CENTRO INTERNACIONAL DE ESTUDOS
DE DOUTORAMENTO E AVANZADOS
DA USC (CIEDUS)

TESIS DE DOCTORADO

DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA GESTIÓN A NIVEL DE CUENCA POR MODELACIÓN. ESTUDIO DE APLICACIÓN A LAS CUENCAS DE RÍO CABE (LUGO) Y RÍO COLORADO (B.C., MÉXICO)

Raymundo Rangel Parra

ESCUELA DE DOCTORADO INTERNACIONAL

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS Y MEDIOAMBIENTALES

LUGO

2019

DECLARACIÓN DEL AUTOR DE LA TESIS

Determinación de la cantidad de recursos hídricos para la gestión a nivel de cuenca por modelación. Estudio de aplicación a las cuencas de río Cabe (Lugo) y río Colorado (B.C., México)

D. Raymundo Rangel Parra

Presento mi tesis, siguiendo el procedimiento adecuado al Reglamento, y declaro que:

1) *La tesis abarca los resultados de la elaboración de mi trabajo.*
2) *En su caso, en la tesis se hace referencia a las colaboraciones que tuvo este trabajo.*
3) *La tesis es la versión definitiva presentada para su defensa y coincide con la versión enviada en formato electrónico.*
4) *Confirmo que la tesis no incurre en ningún tipo de plagio de otros autores ni de trabajos presentados por mí para la obtención de otros títulos.*

En Lugo, 29 de mayo de 2019

Fdo. Raymundo Rangel Parra

AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR / TUTOR DE LA TESIS

Determinación de la cantidad de recursos hídricos para la gestión a nivel de cuenca por modelación. Estudio de aplicación a las cuencas de río Cabe (Lugo) y río Colorado (B.C., México)

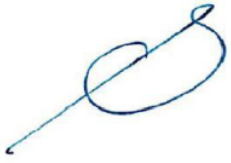
D. Jorge Dafonte Dafonte;
D. Xan Xosé Neira Seijo

INFORMA/N:

Que la presente tesis, corresponde con el trabajo realizado por D. ***Raymundo Rangel Parra****, bajo mi dirección, y autorizo su presentación, considerando que reúne los requisitos exigidos en el Reglamento de Estudios de Doctorado de la USC, y que como director de ésta no incurre en las causas de abstención establecidas en Ley 40/2015.*

En Lugo, 29 de mayo de 2019





Fdo. Jorge Dafonte Dafonte

Fdo. Xan Xosé Neira Seijo

DEDICATORIA

A mi luz y sombra.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por apoyar mis decisiones y entender mis caminos aun que signifique mi ausencia en persona.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México por la beca otorgada y sus servicios a lo largo de los cuatro años de la beca.

A mis directores de tesis Jorge y Xan por los consejos, charlas, experiencias, viajes, congresos, opiniones y orientación durante todo el programa de doctorado, que sin su ayuda no habría sido posible concluir este proyecto de vida y carrera.

A Agustín coordinador del programa de doctorado que siempre estuvo pendiente del progreso y su apoyo en la gestión de documentos que ha sido fundamental en este proceso.

A todas aquellas personas en Lugo con las que compartí experiencias y vida que también son parte de esta etapa de mi vida.

A todo aquello que se cruza en el camino y me enseña que cada día hay un nuevo reto que superar.

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS _____ VII

ÍNDICE DE TABLAS _____ XI

TABLA DE ABREVIACIONES _____ XV

RESUMEN _____ XIX

ABSTRACT _____ XXI

RESUMO _____ XXIII

1 INTRODUCCIÓN _____ 1

1.1 El Agua y recursos hídricos _____ 1
1.1.1 Importancia del agua según la ONU _____ 3
1.1.2 Distribución del agua en el planeta Tierra _____ 4
1.1.3 Impactos de las actividades humanas en los recursos hídricos _____ 6

1.2 El cambio climático _____ 9
1.2.1 Escenarios climáticos _____ 11
1.2.2 Proyecciones del cambio climático en el ciclo del agua _____ 12

1.3 La gestión de recursos hídricos _____ 13
1.3.1 Los organismos de cuenca _____ 14
1.3.2 Diferencia entre gestión y planificación _____ 15
1.3.3 De la gestión tradicional a la integrada de recursos hídricos _____ 16
1.3.4 Desafíos de la gestión de los recursos hídricos _____ 18
1.3.5 Gestión de recursos hídricos para la adaptación y riesgos del cambio climático _____ 19
1.3.6 Acuerdos internacionales para la gestión de recursos hídricos _____ 20
1.3.6.1 Directiva Marco del Agua de la Unión Europea _____ 20
1.3.6.2 Tratado de Aguas Internacionales 1944 _____ 21
1.3.6.3 Acuerdo de París _____ 22

1.4 Enfoques para la gestión de recursos hídricos _____ 23
1.4.1 Gobernanza del agua y la participación pública _____ 23
1.4.2 Water Accounting & Auditing _____ 24

1.4.3 Enfoque de las Soluciones Basadas en la Naturaleza para la gestión del agua 27

1.5 Justificación y objetivos de la tesis 27
1.5.1 Justificación 27
1.5.2 Objetivos de la tesis 29

2 ESTADO DEL ARTE 31

2.1 Escenarios de emisión y modelos de simulación climática 31
2.1.1 Escenarios de emisión del Quinto Informe de Evaluación del IPCC 32
2.1.2 Modelos de circulación global y regionalización dinámica 34
2.1.2.1 Regionalización dinámica vs estadística 38
2.1.3 Modelos de simulación climática Euro-Cordex 40
2.1.4 Sesgo en modelos de simulación climática 42

2.2 Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos 45
2.2.1 Cambios en escorrentía y caudal fluvial 47

2.3 Lagunas de conocimiento sobre cambio climático y su impacto en los recursos hídricos 49

2.4 Modelos para la simulación hidrológica 50
2.4.1 Tipos de modelos 52

2.5 Modelos de simulación gestión de recursos hídricos 53
2.5.1 Enfoque de la maximización del beneficio económico 55
2.5.2 Enfoque de minimización de costo de flujo 55
2.5.3 Enfoque de modelado de sistema dinámico 56
2.5.4 Técnicas de optimización 56

2.6 Situación de los recursos hídricos en España y México 57
2.6.1 Los recursos hídricos en España 58
2.6.2 La gestión de los recursos hídricos en España 60
2.6.3 Galicia: recursos hídricos y Cambio climático 62
2.6.3.1 Cambios en la temperatura por cambio climático 64
2.6.3.2 Cambios en la precipitación por cambio climático 64
2.6.3.1 Cambios en las aguas subterráneas por cambio climático 66
2.6.4 Los recursos hídricos en México 66
2.6.5 La gestión de los recursos hídricos en México 69
2.6.6 Río Colorado: recursos hídricos y cambio climático 72

3 ÁREA DE ESTUDIO 77

3.1 Subcuenca del río Cabe, en Galicia, España 77
3.1.1 Embalse de Vilasouto 79

3.1.2 Distrito de riego del Valle de Lemos 81
3.1.3 Demandas y usos del agua en el río Cabe 82
3.1.3.1 Unidad de demanda urbana 84
3.1.3.2 Unidad de demanda recreacional 84
3.1.3.3 Unidades de demanda agraria y ganadera 84
3.1.4 Proyección futura de las demandas en el río Cabe 85
3.1.4.1 Régimen de caudales ecológicos calculados por métodos hidrobiológicos 85
3.1.4.2 Garantías y fallos en las simulaciones del Plan Hidrológico vigente 86
3.1.5 Cuenca del río Cabe. Tramo hasta Monforte de Lemos 87

3.2 Subcuenca del río Colorado en Mexicali, Baja California, México 90
3.2.1 Entregas de agua a Mexicali, B.C., México 92
3.2.2 Demandas y usos de agua en Mexicali 94
3.2.3 El Acueducto río Colorado-Tijuana 97
3.2.4 Situación del agua subterránea la cuenca del río Colorado 98
3.2.5 Impactos del cambio climático en la cuenca del río Colorado 100
3.2.6 Proyectos internacionales para la gestión del agua entre México y EUA 103
3.2.7 Necesidades de agua para el medioambiente 106
3.2.8 Conflictos por el agua: Demanda de la Cervecería Constellations Brand en Mexicali, B.C. 107

4 MATERIALES Y MÉTODOS 113

4.1 Delimitación de las subcuencas del río Cabe 114
4.1.1 Información cartográfica 115
4.1.2 Software QGIS 116

4.2 Datos meteorológicos 117
4.2.1 Datos observados de MeteoGalicia 117
4.2.2 Métodos de interpolación espacial 119
4.2.2.1 Concepto de krigeado 119
4.2.2.1 Krigeado ordinario 121
4.2.2.2 Krigeado de regresión 122
4.2.2.3 Interpolación espacial por el Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDW) 123
4.2.3 Validación cruzada 125
4.2.4 R-Studio 127

4.3 Modelación hidrológica en la subcuenca del río Cabe 129
4.3.1 Restitución al régimen natural en el embalse de Vilasouto 129
4.3.2 Modelación hidrológica con el software Visual-Balan 132

4.4 Simulación hidrológica de los escenarios de cambio climático en la subcuenca del río Cabe 136
4.4.1 Datos de Euro-Cordex 137

4.4.2 Corrección del sesgo en datos de proyección climática _____139

4.5 Simulación de gestión de recursos hídricos con AQUATOOL _____141
4.5.1 Modelo para la gestión de recursos hídricos AQUATOOL _____142
4.5.1.1 SIMGES _____143
4.5.1.2 Funcionamiento interno de SIMGES _____144
4.5.1.3 OPTIGES _____145
4.5.1.4 Criterios de garantías y fallos del cumplimiento de la demanda ___147
4.5.1.5 Limitaciones por software y hardware _____148
4.5.2 Modelo para la gestión del agua en el escenario de la subcuenca del río Colorado en Mexicali _____148

4.6 Modelo base para la simulación de alternativas de gestión _____150

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN _____ 151

5.1 Delimitación de las subcuencas del río Cabe _____151

5.2 Estimación de los datos climáticos en la cuenca del río Cabe _____153
5.2.1 Validación cruzada de los métodos geoestadísticos y de interpolación espacial _____153
5.2.2 Series completas diarias de datos meteorológicos, para el área de estudio 157

5.3 calibración del modelo hidrológico Visual-Balan _____159
5.3.1 Restitución al régimen natural en el embalse de Vilasouto_____160
5.3.2 Calibración Ponte Pena y Ribas Altas_____162
5.3.3 Comparación con otros estudios realizados en la zona _____165

5.4 Extracción de datos Euro-Cordex en la cuenca del río Cabe _____167
5.4.1 Corrección del sesgo en los datos de Euro-Cordex_____168

5.5 Simulación hidrológica en los escenarios del cambio climático_____171
5.5.1 Proyección de la temperatura media en la subcuenca Cabe_R _____174
5.5.2 Proyección de la precipitación en la subcuenca Cabe_R_____176
5.5.3 Proyección del caudal en la subcuenca Cabe_R _____179

5.6 Simulación de flujos de agua en AQUATOOL_____184
5.6.1 Esquema de flujo de la subcuenca del río Cabe_R _____184
5.6.1.1 Calibración de AQUATOOL en el embalse de Vilasouto_____185
5.6.1.2 Caudal ecológico en el sistema Cabe_R _____189
5.6.2 Garantías en el sistema de la subcuenca Cabe_R _____193
5.6.2.1 Datos observados 2006-2017 _____193
5.6.2.2 Datos escenario RCP8.5 2020-2100 _____195
5.6.3 Evaluación de la alternativa de gestión de agua en el sistema Cabe_R_197
5.6.4 Esquema de flujo de la subcuenca del río Colorado, Mexicali _____199

5.6.5 Garantías en el sistema de la subcuenca río Colorado en Mexicali, B.C. 206
5.6.6 Evaluación del impacto en la demanda de la Cervecería Constellations Brand en el sistema del río Colorado 211
5.6.7 Trabajos futuros para el sistema de Mexicali en la subcuenca del río Colorado 216

6 CONCLUSIONES 219

6.1 Escenario en la cuenca del río Cabe 219

6.2 Escenario de la subcuenca del río Colorado 221

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 223

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Representación del total del agua existente en el planeta Tierra (océanos, capas de hielo, lagos, ríos, agua subterránea, agua atmosférica, e inclusive en la biomasa). Fuente (USGS, 2016). 6
Figura 1-2. Ejemplos de problemáticas generadas debido a la explotación de recursos hídricos alrededor del mundo e indicador de estrés hídrico. Fuente (Bates, et al., 2008). 8
Figura 1-3. Incremento de la temperatura media global en el periodo 1880-2012. Fuente (MAGRAMA, 2013). 10
Figura 1-4 Tendencia 1958-2018 en la concentración atmosférica anual de CO_2 en el observatorio de Mauna Loa, Hawaii (NOAA-ESRL). Fuente (CO2.Earth, 2019). 11
Figura 1-5. Cambio a nivel mundial en la precipitación media anual (en porcentaje), debido al cambio climático entre los periodos de 1986-2005 y 2081-2100. Fuente (IPCC, 2014). 13
Figura 1-6 Etapas en el proceso de implementación de la GIRH. Fuente (GWP, INBO, 2009). 17
Figura 1-7 Diagrama conceptual de la GIRH. Adaptado de (Momblanch, 2016). 18
Figura 1-8 Esquema de relación entre propuesta de tesis y su contribución a la GIRH. Elaboración propia. 29
Figura 2-1 Concentración de CO_2 equivalente para los RCPs y SRES. Fuente (IPCC-GTI, 2013). 33
Figura 2-2 Forzamientos radiativos, tendencia y concentración de CO_2 esperada al 2100 de los RCPs. Fuente (IPCC-GTI, 2013). 33
Figura 2-3 Esquema del funcionamiento de los modelos de simulacion climática. Fuente (Climate4Impact, 2018). 36
Figura 2-4. Representación esquemática del enfoque de GCM y RCM. Fuente (Giorgi, 2008) 37
Figura 2-5 Representación esquemática de los pasos envueltos en la producción de información de cambio climático utilizable para trabajos de evaluación de impacto vía métodos de regionalización. Fuente (AEMET, 2017). 38
Figura 2-6 Ilustración del efecto de la corrección de sesgo en modelaciones a futuro. Fuente (Climate4Impact, 2018). 45
Figura 2-7. Mapa indicativo de los impactos futuros del cambio climático relacionados con el agua dulce que amenazan el desarrollo sostenible de las regiones afectadas. Fuente (Bates, et al., 2008). 48
Figura 2-8 Cifras de la hidrología española. Fuente (MITECO, 2018) 59
Figura 2-9 Precipitación media anual en España de 1981 a 2010. Fuente (IGN, 2016) 60

Figura 2-10 a) Aumento previsto anual de temperatura en ºC y b) diferencia media prevista anual de precipitaciones para Galicia. Fuente (Álvarez, et al., 2011). 65
Figura 2-11 Precipitación media anual en México de 1981 a 2010. Fuente (CONAGUA, 2018) 67
Figura 2-12 Usos consuntivos del agua en México. Fuente (CONAGUA, 2018) 68
Figura 2-13 Cauces y presas principales en la cuenca del río Colorado en EUA y México. Fuente (Hinojosa-Herta & Carrillo-Guerrero, 2010). 73
Figura 2-14 Proyecciones para precipitación total anual y temperatura media de 1950 a 2100 para la cuenca del río Colorado. Fuente (USBR, 2016). 76
Figura 2-15 Proyecciones para el equivalente de agua de nieve y escorrentía anual de 1950 a 2100 para la cuenca del río Colorado. Fuente (USBR, 2016). 76
Figura 3-1 Sistema de explotación del río Cabe, en Galicia, España. Fuente (MAPAMA, 2017). 78
Figura 3-2 Embalse de Vilasouto, fuente (CHMS, 2015). 80
Figura 3-3 Mapa de ubicación del distrito de riego en el Valle de Lemos. Fuente (Neira, et al., 2005). 83
Figura 3-4 Demanda de agua al 2016 por unidades de demanda en el sistema Cabe_R. Adaptado de (CHMS, 2015). 88
Figura 3-5 Proporción por unidades de demanda en el sistema Cabe_R 2016 en Hm^3 y porcentaje. Adaptado de (CHMS, 2015). 89
Figura 3-6 Tramo del río Colorado en México (en Mexicali, Baja California). Fuente (Hinojosa-Herta & Carrillo-Guerrero, 2010). 92
Figura 3-7 Entregas de agua a México del río Colorado2005-2018. Fuente (CILA, 2018). 93
Figura 3-8 Entregas mensuales de agua a México del río Colorado en el LIN y LIS 2005-2018. Fuente (CILA, 2018). 94
Figura 3-9 Distribución de los usos del agua en el sistema del río Colorado en Mexicali. Elaboración propia con datos de (CEABC, 2017). 95
Figura 3-10 Demandas de agua potable en Mexicali y el Valle de Mexicali en 2017. Elaboración propia con datos de (CEABC, 2017). 96
Figura 3-11 Bombeo de agua por el ARCT de 1985 a 2017. Fuente (CEABC, 2017) 97
Figura 3-12 Extracciones de agua subterránea en la Mesa Arenosa de Andrade por parte de México y EUA de 1973 a 2017. Fuente (CILA, 2017) 99
Figura 3-13 Situación de los acuíferos en México como sobreexplotados y por disponibilidad. Fuente (CONAGUA, 2018). 99
Figura 3-14 Niveles de la presa *Hoover* (Lago *Mead*) 2000-2018 y pronóstico 2020. Elaboración propia con datos del (USBR, 2018) y (USBR, 2019). 103
Figura 4-1. Diagrama de proceso general de la metodología para el río Cabe. Elaboración propia. 114
Figura 4-2 Procedimiento para la delimitación de las subcuencas. Elaboración propia. 115

Figura 4-3 Procedimiento para la generación de datos meteorológicos en el área de estudio. Elaboración propia. _____ 117
Figura 4-4 Ejemplo gráfico del concepto de krigeado de regresión. Fuente (Hengl, 2009). _____ 121
Figura 4-5. Proceso de krigeado en los script de R-Studio. Elaboración propia. _____ 128
Figura 4-6 Procedimiento para la modelación hidrológica con Visual-Balan. Elaboración propia. _____ 129
Figura 4-7. Representación esquemática del balance de agua en el modelo Visual-Balan. Fuente (Samper, et al., 1999). _____ 133
Figura 4-8 Procedimiento para la simulación hidrológica en Visual-Balan de escenarios de cambio climático. Elaboración propia. _____ 136
Figura 4-9 Diagrama del proceso de extracción de datos de los mapas Euro-Cordex. Elaboración propia._____ 138
Figura 4-10 Procedimiento para la simulación de gestión de recursos hídricos y del modelo base de simulación para alternativas, elaboración propia. _ 142
Figura 4-11 Procedimiento para la simulación de gestión de recursos hídricos y del modelo base de simulación para alternativas, en el escenario del río Colorado en Mexicali. Elaboración propia._____ 149
Figura 5-1. Subcuencas delimitadas dentro del área de estudio en el sistema del río Cabe_R. Elaboración propia. _____ 152
Figura 5-2 Balance hídrico en la salida del embalse de Vilasouto en m^3/s. Elaboración propia. _____ 160
Figura 5-3. Resultados de la calibración de la subcuenca Vilasouto. Elaboración propia._____ 162
Figura 5-4. Resultados de la calibración de la subcuenca Ponte Pena. Elaboración propia. _____ 162
Figura 5-5. Resultados de la calibración de la subcuenca Ribas Altas. Elaboración propia. _____ 164
Figura 5-6. Distribución de flujos entre las simulaciones del Río Valiñas y Cabe_R. Elaboración propia. _____ 166
Figura 5-7. Ajuste de la transformación de los mapas Euro-Cordex para el área de Galicia. Elaboración propia. _____ 167
Figura 5-8. Muestra de la corrección de la temperatura simulada con coeficientes CAM. Elaboración propia. _____ 170
Figura 5-9 A) y B) resultados para Cabe_R de proyección de temperatura media para los periodos desde el histórico hasta 2100, C) promedios de los modelos en los escenarios RCP4.5 y 8.5. Elaboración propia. _____ 176
Figura 5-10 A) y B) Resultados para Cabe_R de proyección de precipitación mensual para los periodos desde el histórico hasta 2100, C) promedios de los modelos en los escenarios RCP4.5 y 8.5. Elaboración propia. _____ 178
Figura 5-11 Resultados para Cabe_R de proyección de la aportación media para los periodos desde el histórico hasta 2100, promedios de los modelos en los escenarios RCP4.5 y 8.5. Elaboración propia. _____ 180

Figura 5-12 Distribución del promedio mensual de aportaciones en la cuenca Cabe_R para los escenarios histórico, RCP4.5 y RCP8.5, promedio de los modelos. Elaboración propia. _____ 182
Figura 5-13 Proyecciones anuales para la subcuenca Cabe_R 2006-2100 en los escenarios RCP4.5 y 8.5 respecto al periodo histórico de los modelos Euro-Cordex. Elaboración propia._____ 183
Figura 5-14 Esquema de flujo para el sistema Cabe_R. Elaboración propia. 185
Figura 5-15 Reservas en Vilasouto observadas vs simulación y comparación con simuladas por la CHMS. Elaboración propia. _____ 186
Figura 5-16 Caudales de salida del embalse de Vilasouto y en Ribas Altas EA1765 reales observados, simulados con AQUATOOL y caudal ecológico. Elaboración propia. _____ 188
Figura 5-17 Extrapolación de caudal aconsejado aguas arriba y abajo de la masa Mao II dentro del sistema Cabe_R. Elaboración propia. _____ 191
Figura 5-18 Volumen del embalse de Vilasouto, promedio mensual 2020-2100, para el RCP8.5. Elaboración propia. _____ 196
Figura 5-19 Volumen en el embalse de Vilasouto, en periodos 2020-2040, 2040-2070, 2070-2100 y sus desviaciones estándar, para el RCP8.5. Elaboración propia._____ 196
Figura 5-20 Caudales en la salida del Cabe_R, considerado como caudal disponible en el periodo 2020-2040. Elaboración propia._____ 199
Figura 5-21 Esquema de flujo para el sistema del río Colorado en Mexicali. Elaboración propia. _____ 200
Figura 5-22 Promedio, mínima, máxima y desviación estándar mensual de las entregas a México del río Colorado. Elaboración propia con datos del (CILA, 2018). _____ 201
Figura 5-23 Demanda de agua urbana, agrícola y del Acueducto ARCT en 2017. Elaboración propia con datos (CEABC, 2017) y (CONAGUA, 2018). _____ 203
Figura 5-24 Esquema del sistema del río Colorado en Mexicali con la adición de la demanda de la CCB. Elaboración propia. _____ 212
Figura 5-25 Fallos en la garantía de la demanda de la CCB para 5 y 20 Hm^3 por año en el sistema del río Colorado en Mexicali, elaboración propia. __ 215

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Distribución del agua en el planeta Tierra. Fuente (USGS, 2016). 5
Tabla 1-2 Prejuicios y realidades de la participación pública. Fuente (Ballester & La Calle, 2015). 24
Tabla 1-3 Actividades típicas e interrelacionadas del *Water Accounting & Auditing*. Adaptado de (FAO, 2019). 26
Tabla 2-1. Combinación de instituciones y de los modelos regionales y globales utilizados en el dominio EUR-11. Fuente (AEMET, 2017) 41
Tabla 2-2. Características de los tipos de modelos hidrológicos. Adaptado de (Gayathri, et al., 2015) 53
Tabla 2-3 Ventajas y desventajas de las técnicas de optimización de sistemas para la gestión de recursos hídricos. Fuente (Islam, 2011). 57
Tabla 2-4 Extracción de agua y sus porcentajes de uso para España y México. Fuente (CONAGUA, 2018). 59
Tabla 2-5 Organización de la gestión del agua en España. Adaptado de (INBO;GWP, 2009). 62
Tabla 2-6 Organización de la gestión del agua en México. Adaptado de (INBO;GWP, 2009). 71
Tabla 3-1 Estadísticos básicos de las series anuales de precipitación (mm/año) y aportación (hm^3/año) medios para el SEC, serie 1980/81-2011/12. Fuente (CHMS, 2015). 79
Tabla 3-2 Fuentes de abastecimiento en el sistema de explotación Cabe. Fuente (CHMS, 2015). 83
Tabla 3-3 Evolución estimada del uso de la demanda urbana. Fuente (CHMS, 2015). 84
Tabla 3-4 Volumen y fuente de abastecimiento de las unidades de demanda agrícola y ganadera. Fuente (CHMS, 2015). 85
Tabla 3-5 Volúmenes proyectados a los tres periodos futuros para las unidades de demanda del sistema de explotación Cabe, en Hm^3/año, fuente (CHMS, 2015). 85
Tabla 3-6 Caudales aconsejados para las masas de agua de los ríos Cabe I y Mao II. Fuente (CHMS, 2015). 86
Tabla 3-7 Resultados en la simulación de balance para el 2015 en las demandas del Sistema Cabe. Fuente (CHMS, 2015). 87
Tabla 3-8 Disminución de la demanda en los horizontes al 2033 en la UDU_2303_Monforte_Lemos. Fuente (CHMS, 2015). 90
Tabla 3-9 Resumen de las demandas del sistema del río Colorado en Mexicali. Elaboración propia con datos de (CEABC, 2017). 95
Tabla 3-10 Proyecciones de estudios científicos de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos del río Colorado. Extraído de diversas fuentes. 101

Tabla 3-11 Clasificación de las distintas condiciones del lago *Mead* según el nivel en metros y el almacenamiento útil. Adaptado de (USBR, 2019). 103
Tabla 3-12 Ahorros de México al Plan Binacional de Contingencia respecto las elevaciones en el Lago Mead. Fuente (CILA, 2017) _____ 104
Tabla 3-13 Requerimientos de flujos ambientales en el delta del río Colorado. Fuente (Hinojosa-Herta & Carrillo-Guerrero, 2010). _____ 107
Tabla 3-14 Cantidades de agua requeridas por concepto y por fase para el proyecto de la CCB en Mexicali, B.C. Fuentes (Forbes México, 2016), (La Jornada, 2017), (Geografía Septentrional, 2018), (Lindero Norte, 2017). _____ 109
Tabla 3-15 Descripción de las cantidades de agua requeridas por concepto y por fase para el proyecto de la CCB en Mexicali, B.C. Calculadas a partir de los datos de (Constellations Brands, 2018) _____ 110
Tabla 4-1. Factores de conversión para los parámetros extraídos. Elaboración propia. _____ 139
Tabla 4-2 Criterios de fallos y garantías pre-establecidos en AQUATOOL. Fuente (IPH, 2008) _____ 147
Tabla 5-1. Resultados de validación cruzada para todas las estaciones y los tres métodos de cálculo. Elaboración propia. _____ 154
Tabla 5-2. Porcentaje de participación de las variables secundarias explicativas en la prueba de *p-value* para las variables meteorológicas. Elaboración propia. _____ 156
Tabla 5-3. Resultados de validación cruzada para tres estaciones (Abradelo, Bóveda y Monforte) en los tres métodos de cálculo. Elaboración propia. _____ 156
Tabla 5-4. Cantidades y porcentajes de los métodos geoestadísticos que componen las series completas diarias, en cada subcuenca. Elaboración propia. _____ 158
Tabla 5-5. Valores referenciales del coeficiente de Nash-Sutcliffe. Fuente (Nash & Sutcliffe, 1970) _____ 159
Tabla 5-6 Geología en la subcuenca de Ponte Pena. Fuente (IGN, 2016). ___ 163
Tabla 5-7. Comparativa de flujos entre la simulación hidrológica de la subcuenca del Río Valiñas, Galicia-Costa y del Río Cabe_R. Valores de media anual y porcentaje entre entrada y salida. Elaboración propia. 166
Tabla 5-8. Resultados de la corrección mediante CAM para temperatura y precipitación de los valores simulados de los modelos EUR-11. Elaboración propia. _____ 169
Tabla 5-9. Resultados para la subcuenca Cabe_R de las proyecciones de cambio climático para los tres modelos EUR-11, para los escenarios RCP4.5 y 8.5 en promedios mensuales. Elaboración propia. _____ 173
Tabla 5-10 Caudales hidrobiológicos extrapolados para la estación EA1765. Elaboración propia. _____ 190

Tabla 5-11 Caudal ecológico calculado del caudal aconsejado por el estudio hidrobiológico para la salida de la subcuenca Cabe_R. Elaboración propia. _____ 191
Tabla 5-12 Comparación entre caudales ecológicos y mínimos por percentiles 5 y 15% para Ribas Altas y Cabe_R. Elaboración propia. _____ 192
Tabla 5-13 Fallos en la garantía para el sistema Cabe_R en el periodo de observados 2006-2017. Elaboración propia. _____ 194
Tabla 5-14 Estadística mensual de entregas a México 2005-2018. Elaboración propia con datos del (CILA, 2018). _____ 201
Tabla 5-15 Distribución mensual de la demanda agrícola en el DR-014. Elaboración propia con datos (CONAGUA, 2018). _____ 202
Tabla 5-16 Aportación o entrega reducida calculada para México al 2020. Elaboración propia. _____ 204
Tabla 5-17 Resultado de fallos en la simulación de las garantías 2005-2040 en el sistema del río Colorado en Mexicali. Elaboración propia. _____ 208

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

TABLA DE ABREVIACIONES

Abreviación	Significado
AEMA	Agencia Europea de Medio Ambiente
AOP	Programa de Operación Anual
AR4	Cuarto Informe de Evaluación
AR5	Quinto Informe de Evaluación del IPCC
ARCT	Acueducto río Colorado-Tijuana
BLUE	Mejor Estimador Insesgado Lineal
BTN25	Base Topográfica Nacional
CAM	Coeficiente Aditivo-Multiplicativo
CC	coeficiente de correlación
CCB	Cervecería Constellations Brand
CEABC	Comisión Estatal del Agua de Baja California
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CESPM	Comisión Estatal de Servicios Publicos de Mexicali
CHMS	Confederación Hidrográfica Miño-Sil
CILA	Comisión Internacional de Límites y aguas
CMIP3	Coupled Model Intercomparison Project 3
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project 5
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua en México
CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
CV	coeficiente de variación
DHMS	Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil
DMA	Directiva Marco del Agua
DP	programación dinámica
DR-014	Distrito de Riego 014
Eto	Evapotranspiración de referencia
ETR	Evapotranspiración de real
Euro-Cordex	European Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FR	Forzamiento radiativo
FVT	Factor de Variación en el Tiempo
GA	algoritmo genético
GCM	Modelos de Circulación Global
GEG	gases de efecto invernadero
GIRH	Gestión Integrada de Recursos Hídricos
GWP	Asociación Mundial del Agua
Hm3	Hectometro cúbico
IDW	Inverso de la Distancia al Cuadrad

IGN	Instituto Geográfico Nacional
INBO	Red Internacional de Organización de Cuencas
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
IPH	Instrucción de Planificación Hidrológica
KO	Krigeado Ordinario
KR	krigeado de regresión
LAN	Ley de Aguas Nacionales
LIN	Lindero internacional Norte
LIS	Lindero Internacional Sur
LOO	leave-one-out
LP	programación lineal
MDT	Modelos digitales del terreno
MIA	Manifiesto de Impacto Ambiental
Mm3	Millones de metros cúbicos
MTN	Mapa Topográfico Nacional
NFP	programación de red de flujo
NLP	programación no lineal
NS	Coeficiente de Nash-Sutcliffe
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PHC	Plan Hidrológico de Cuenca
PIB	Producto Interno Bruto
Pr	Precipitación
Q	caudal
RCM	Modelos Climáticos Regionales
RCP	Trayectorias de concentración representativas
REPDA	Registro Público de Derechos de Agua
RMNSE	Root-mean-normal-square error
RMSE	Root-mean-square error
RRN	restitución al régimen natural
SbN	Soluciones basadas en la Naturaleza
SCR	Mapa Topográfico Nacional
SD	Sistemas dinámico
SEC	Sistema de Explotación Cabe
SIMPA	Sistema Integrado para la Modelación del proceso Precipitación Aportación
SPABC	Secretaria de Protección al Ambiente de Baja California
SRES	Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones
SWE	Equivalente de Agua de Nieve
T	Temperatura
T media	Temperatura media
TAI	Tratado de Aguas Internacionales
UDA	unidades de demanda agrícola
UDI	Unidad de Demanda Industrial

UDP	demanda recreacional
UDR	Unidad de Demanda Rural
UDU	Unidad de demanda urbana
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
USBR	U.S. Bureau of Reclamation
USGS	U.S. Geological Survey
VIC	Variable Infiltration Capacity
WA&A	Water Accounting and Auditing
WMO	Organización Meteorológica Mundial

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

RESUMEN

En 2019, las sociedades humanas y sus gobiernos son más conscientes de la importancia y la necesidad de gestionar adecuadamente los recursos hídricos para los seres humanos y los ecosistemas que conforman el Planeta Tierra.

No existen soluciones universales a los problemas de gestión de recursos, por lo que el intento de gestión integral de los recursos hídricos se busca a través de acuerdos internacionales, intereses socioeconómicos, desarrollo del conocimiento y la tecnología. Este es uno de los primeros procesos de estimación a partir de los cuales comienza la gestión integral, la "cuantificación de los recursos hídricos". Se han logrado importantes avances en la modelización del clima y las proyecciones futuras, así como en los modelos de simulación hidrológica y la gestión de los recursos hídricos en las redes de optimización de flujos.

En esta tesis se propone una metodología que consiste en un conjunto de modelos y métodos asociados a la disciplina de la hidrología a nivel de cuenca, con el propósito de realizar la cuantificación de los recursos hídricos en el tiempo y el espacio, al presente y en la proyección del cambio climático. Comienza con la delimitación de la cuenca del área de estudio y la estimación mediante métodos de interpolación espacial de las variables climatológicas necesarias para llevar a cabo el balance hídrico actual. Continúa con la extracción de datos para la proyección del cambio climático con los escenarios RCP, la calibración del modelo hidrológico y la simulación hidrológica de los escenarios para cuantificar los recursos hídricos en cada uno. Posteriormente, esta cuantificación se utiliza como entrada de información para el modelo de simulación para la gestión de los recursos hídricos, lo que facilita el análisis de la satisfacción en las garantías de las demandas, las alternativas de gestión propuestas y su impacto en los elementos que conforman el sistema de flujo de agua.

Además, la metodología se aplica a dos casos/escenarios en condiciones de contraste, uno en el río Cabe en Galicia, España (condiciones húmedas) y en el río Colorado en Mexicali, B.C., México (condiciones semiárida), donde se aplica la funcionalidad de la metodología al mostrar las garantías de las demandas, de acuerdo con las alternativas de análisis propuestas. Ha sido necesario ajustar el conjunto de modelos y métodos para cada caso, teniendo en cuenta las variaciones particulares de cada caso así como de la información disponible.

Finalmente, este trabajo proporciona la generación de diagramas de flujo de agua para ambos escenarios con una calibración validada como satisfactoria de acuerdo con los índices utilizados, en los que es posible idear y ejecutar un número infinito de alternativas de gestión, según los objetivos o intereses del usuario.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

ABSTRACT

In 2019, human societies and their governments are more aware of the importance and need to adequately manage water resources for both human beings and the ecosystems that make up Planet Earth.

The universal solutions to the resources management problems do not exist, reason why in the attempt of the integral management of the hydric resources, that is looked for through international agreements, socioeconomic interests, development of the knowledge and the technology. This is one of the first Estimation processes from which the integral management begins; the "quantification of water resources". Important advances have been made in climate modeling and future projections, as well as hydrological simulation models and water resources management in flow optimization networks.

In this thesis a methodology is proposed that consists of an assembly of models and methods associated with the discipline of the hydrology at river basin level, with the purpose of realizing the quantification of the hydric resources in time and space, present and of projection of the change climatic. It begins with the delimitation of the basin of the study area and the estimation by spatial interpolation methods of the climatological variables necessary to carry out the water balance. This continues with the extraction of data for the projection of climate change with the scenarios RCP, calibration of the hydrological model and hydrological simulation of the scenarios to quantify the water resources in each one. Subsequently, this quantification is used as input of information for the simulation model for water resources management, which facilitates the analysis of satisfaction in the guarantees of the demands, management alternatives proposed and their impacts on the elements that make up in the water flow system. Additionally, methodology is applied to two cases/scenarios in contrasting conditions as, one is in the Cabe river in Galicia, Spain (humid conditions) and the Colorado river in Mexicali,

B.C., Mexico (semiarid conditions), where the functionality of the methodology is demonstrated by showing the guarantees of the demands, according to the alternatives of analysis proposed. It has been necessary to adjust the assembly of models and methods for each case, considering that each application has particular variations and available data.

Finally, this work provides the generation of water flow diagrams for both scenarios with a calibration validated as satisfactory according to the indices used, in which it is possible to devise and execute an infinite number of management alternatives, depending on the objectives or interests of the user.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

RESUMO

En 2019, as sociedades humanas e os seus gobernos son máis conscientes da importancia e necesidade de xestionar adecuadamente os recursos hídricos para os seres humanos e os ecosistemas que conforman o planeta Terra.

Non hai solución universal aos problemas de xestión de recursos, polo que se busca a xestión integrada dos recursos hídricos a través de acordos internacionais, intereses socioeconómicos, desenvolvemento do coñecemento e tecnoloxía. Este é un dos primeiros procesos de estimación desde os que comeza a xestión integral; a "cuantificación dos recursos hídricos". Realizáronse avances significativos na modelación do clima e nas proxeccións futuras, así como nos modelos de simulación hidrolóxica e na xestión dos recursos hídricos en redes de optimización de fluxo.

Esta tese propón unha metodoloxía que consiste nun conxunto de modelos e métodos asociados coa disciplina da hidroloxía no nivel de conca, co obxectivo de cuantificar os recursos hídricos no tempo e no espazo, actualmente e na proxección do cambio climático. Comeza coa delimitación da conca da área de estudo e a estimación por métodos de interpolación espacial das variables climatolóxicas necesarias para levar a cabo o balance hídrico actual. Continúa coa extracción de datos para a proxección do cambio climático cos escenarios do RCP, a calibración do modelo hidrolóxico e a simulación hidrolóxica dos escenarios para cuantificar os recursos hídricos en cada un. Posteriormente, esta cuantificación utilízase como entrada de información para o modelo de simulación, para a xestión dos recursos hídricos, o que facilita a análise da satisfacción nas garantías das demandas, as alternativas de xestión propostas e o seu impacto nos elementos que compoñen o sistema de fluxo de auga. Ademais, isto pódese aplicar a dous casos/escenarios en condicións de contraste, un no río Cabe en Galicia, en España (condicións húmidas)

e no río Colorado en Mexicali, BC, México (condicións semiáridas), onde se demostra a funcionalidade da metodoloxía mostrando as garantías das demandas, segundo as alternativas propostas de análise. Foi necesario axustar o conxunto de modelos e métodos para cada caso, tendo en conta a información dispoñible.

Finalmente, este traballo proporciona a xeración de diagramas de fluxo de auga para ambos escenarios cunha calibración validada como satisfactoria de acordo cos índices utilizados, nos que é posible deseñar e executar unha infinidade de alternativas de xestión, de acordo cos obxectivos ou intereses do usuario.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

1 INTRODUCCIÓN

1.1 EL AGUA Y RECURSOS HÍDRICOS

El agua es un elemento natural que posibilita la existencia de vida en la Tierra. Todos los seres vivos del planeta tenemos un origen marino y el agua garantiza nuestra supervivencia. También, el agua es uno de los elementos más importantes del medioambiente, que a su vez, el medioambiente cumple con diferentes funciones en el equilibrio ambiental del planeta. De esta manera, debemos entender que un buen estado del medioambiente es indispensable para todos los tipos de vida en la Tierra.

Desde el inicio, la historia de la humanidad ha estado vinculada al agua como uno de sus principales recursos para sobrevivir y progresar como especie. Si por ejemplo, pensamos en los cinco niveles de jerarquía de la pirámide formulada por Maslow para las necesidades humanas (fisiología, seguridad, afiliación, reconocimiento, autorrealización), el agua interacciona con cada uno de estos niveles, siendo más importante en los primeros dos que tratan sobre las necesidades de alimentación, higiene y salud, entre otros. A lo largo de la evolución de la humanidad se han desarrollo técnicas para intensificar el uso de este recurso, a fin de satisfacer cada vez más y mayores necesidades de su sociedad. Poco a poco, con el avance del conocimiento y tecnología, se ha ido comprendiendo mejor el papel que juega el agua como elemento de un planeta y en el medioambiente.

Entonces, podemos preguntarnos, ¿porque debemos hacer un uso racional del agua y respetar a todos los usuarios incluyendo al medioambiente y todo lo que éste representa?, o ¿cuáles son las

consecuencias de no administrar adecuadamente los recursos naturales a los que tenemos acceso, como el agua que necesitamos para vivir? Pues bien, simplemente hace falta mirar hacia atrás en la historia para encontrar las respuestas a estas preguntas y saber que le sucedió a las civilizaciones humanas pasadas y cuáles fueron los resultados de cómo usaron y administraron sus recursos naturales. Diamond (2005) muestra en su libro diversos factores por las que una sociedad humana puede tener éxito o bien colapsar hasta el grado de desaparecer. En el análisis de las sociedades pasadas, Diamond (2005) identificó cinco conjuntos de factores: deterioro ambiental, cambio climático, respuesta de la sociedad a sus problemas ambientales, vecinos hostiles y socios comerciales amistosos. Los primeros tres de los factores están directamente ligados al tema del agua, mientras que los últimos dos pudieran estar indirectamente relacionados. Por lo tanto, es evidente que el agua, como otros recursos naturales, está envuelta en la supervivencia de las sociedades humanas.

La Ley de Aguas de España de 1985 (BOE, 1985) define al agua de la siguiente manera: "El agua es un recurso natural escaso, indispensable para la vida y para el ejercicio de la inmensa mayoría de actividades económicas: es irreemplazable, no ampliable por la mera voluntad del hombre, irregular en su forma de presentarse en el tiempo y en el espacio, fácilmente vulnerable y susceptible de usos sucesivos. Asimismo el agua constituye un recurso unitario, que se renueva a través del ciclo hidrológico y que conserva, a efectos prácticos, una magnitud casi constante dentro de cada una de las cuencas hidrográficas del país".

Esta última frase de la definición anterior sobre una magnitud constante de agua en las cuencas, en realidad puede variar en el largo plazo debido al cambio climático natural y los cambios en la precipitación que se generan con éste fenómeno. Sin embargo, el actual cambio climático por causas antropogénicas está acelerando estos cambios, por lo que las cantidades naturales de agua en la cueca se pueden ver afectadas en un periodo de tiempo más corto. El tema del cambio climático y sus causas y efectos se trata en la sección 1.2.

Por otra parte, la UNESCO a través de la Organización Meteorológica Mundial, (WMO) en su glosario internacional de hidrología define al agua como: “Fase líquida de un compuesto químico formado aproximadamente por dos partes de hidrógeno y dieciséis partes de oxígeno, en peso (masa atómica de los elementos)”.

En este mismo glosario internacional de hidrología (WMO, 2012) se menciona la definición de recurso hídrico como: “Recursos (refiriéndose al agua) disponibles o potencialmente disponibles, en cantidad y calidad suficientes, en un lugar y en un período de tiempo dados, apropiados para satisfacer una demanda identificable”.

Con las definiciones anteriores podemos entender que existe una diferencia entre agua y recurso hídrico. Mientras que el agua es una sustancia finita que está presente en los componentes del planeta Tierra, el término de recurso hídrico lo establece el ser humano al cuantificar y hacer uso del agua, asignándole funciones para satisfacer sus necesidades de cualquier tipo.

1.1.1 Importancia del agua según la ONU

La Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2018) establece que: “El agua es una condición previa para la existencia humana y para la sostenibilidad del planeta”

La ONU (2018) también reconoce la importancia de cuidar el recurso hídrico debido a que el agua está en el epicentro del desarrollo sostenible y es fundamental para el desarrollo socioeconómico, la energía y la producción de alimentos, los ecosistemas saludables y para la supervivencia misma de los seres humanos.

Los desafíos entorno al agua a nivel global son (ONU, 2018):

- 2.1 billones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura (OMS/UNICEF 2017).
- 4.5 billones de personas carecen de servicios de saneamiento gestionados de forma segura (OMS/UNICEF 2017).

- 340 000 niños menores de cinco años mueren cada año por enfermedades diarreicas (OMS/UNICEF 2017).
- La escasez de agua ya afecta a cuatro de cada 10 personas (OMS).
- El 90% de las afectaciones por fenómenos naturales están relacionados con el agua (UNISDR).
- El 80% de las aguas residuales retornan al ecosistema sin ser tratadas o reutilizadas (UNESCO, 2017).
- Alrededor de dos tercios de los ríos transfronterizos del mundo no tienen un marco de gestión cooperativa (SIWI).
- La agricultura representa el 70% de la extracción mundial de agua (FAO).
- Aproximadamente el 75% de todas las extracciones de agua industrial se utilizan para la producción de energía (UNESCO, 2014).

1.1.2 Distribución del agua en el planeta Tierra

El ciclo del agua describe la presencia del agua en la Tierra y sobre ella. El agua de la Tierra está siempre en movimiento y constantemente cambiando de estado, desde líquido, a vapor, a hielo, y viceversa. El ciclo del agua ha estado ocurriendo por millones de años, y la vida sobre la Tierra depende de él; la Tierra sería un sitio inhóspito si el ciclo del agua no tuviese lugar (USGS, 2018). El *U.S. Geological Survey* (USGS) ha identificado 15 componentes en el ciclo del agua: agua almacenada en los océanos, evaporación, agua en la atmósfera, condensación, precipitación, agua almacenada en hielos y en la nieve, agua de deshielo, escorrentía superficial, corriente de agua, agua dulce almacenada, infiltración, descarga de agua subterránea, manantiales, transpiración, agua subterránea almacenada y distribución global del agua.

El planeta Tierra es un "sistema cerrado," como un invernadero. Esto significa que la Tierra ni gana ni pierde materia, incluyendo el agua. Algo de esta materia, como los meteoros del espacio, son capturados por la Tierra, sin embargo, las substancias de la Tierra no pueden escapar al espacio exterior. Esto significa que la misma agua

que existía hace millones de años en el planeta Tierra, aún es la misma (USGS, 2017).

En la tabla 1-1 se menciona la distribución del estimado total del volumen de agua en el planeta Tierra y su respectiva ubicación. Según la USGS (2016), la mayor parte del agua se encuentra en los océanos con un 97.24% del total y el 2.14% en los glaciares y capas de hielo. Todas las otras ubicaciones de agua en el planeta no llegan al 1%. Las primeras fuentes de abastecimiento de agua para las sociedades humanas han sido las de agua dulce, principalmente ríos y lagos que llegan a representar el 0.6191% del total. El agua subterránea se empezó a utilizar posteriormente. Actualmente, se ha desarrollado la tecnología para desalar el agua de los mares y océanos, a cambio del uso de grandes cantidades de energía para su tratamiento.

Tabla 1-1. Distribución del agua en el planeta Tierra. Fuente (USGS, 2016).

Ubicación del agua	Volumen del agua en kilómetros cúbicos	Porciento de agua total
Océanos	1,321,000,000	97.24%
Capas de hielo, Glaciares	29,200,000	2.14%
Agua subterránea***	8,340,000	0.61%
Lagos de agua dulce***	125,000	0.009%
Mares Tierra adentro	104,000	0.008%
Humedad de la Tierra	66,700	0.005%
Atmósfera	12,900	0.001%
Ríos***	1,250	0.0001%
Volumen total de agua	1,360,000,000	100%
***Volumen de agua dulce potencialmente utilizable	8,466,250	0.6191%

Otra forma de ver la explicación de la tabla anterior, es la de relacionar los porcentajes con alguna cantidades de agua mejor comprensibles para la imaginación. Si pensamos que el 100% del volumen total de agua en el planeta Tierra es el agua de una piscina olímpica que mide en metros 50x25x2 que son 2,500 m^3, el porcentaje que representa el agua dulce en los ríos y lagos (0.0091%), sería el equivalente a 0.227 m3 o 227 litros, que es lo podemos imaginar cómo poco más un bidón de 200 litros que se utiliza comúnmente para el transporte y almacenamiento de líquidos.

En la figura 1-1 se muestra una representación del volumen total de agua presente en la Tierra (océanos, capas de hielo, lagos, ríos, agua subterránea, agua atmosférica, e inclusive en la biomasa) en contraste con la masa de la misma Tierra. La imagen fue generada por el USGS en donde se busca mostrar la dimensión del recurso hídrico finito que existe en el planeta.

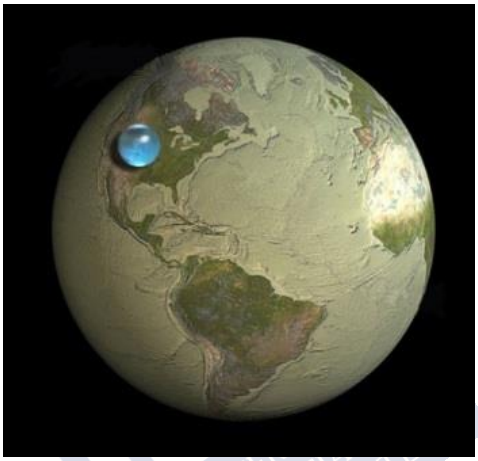


Figura 1-1 Representación del total del agua existente en el planeta Tierra (océanos, capas de hielo, lagos, ríos, agua subterránea, agua atmosférica, e inclusive en la biomasa). Fuente (USGS, 2016).

1.1.3 Impactos de las actividades humanas en los recursos hídricos

Todas las actividades humanas requieren de agua, ya sea directa o indirectamente. La Asociación Mundial del Agua (GWP) y la Red Internacional de Organización de Cuencas (INBO), en su Manual para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos en Cuencas (2009), mencionan la importancia del agua como esencial para la vida humana, animal y vegetal.

El agua sostiene, las actividades productivas, la agricultura, la generación de energía hidroeléctrica, las industrias, la pesca, el turismo y el transporte. Por tal importancia, el agua también puede provocar, o intensificar, conflictos entre comunidades en una cuenca local o nacional, o en cuencas transfronterizas compartidas por más de

un país (GWP, INBO, 2009). También cabe notar las formas en que la sociedad utiliza y contamina el agua, o modifica la morfología de los cursos de agua. Todo esto, altera la cantidad y calidad del agua en los ecosistemas que proporcionan "servicios naturales" esenciales de enorme valor para el bienestar humano y equilibrio del planeta (GWP, INBO, 2009).

El uso de agua está vinculado principalmente a la evolución de la población, al consumo alimentario (incluidos los tipos de dieta), a las políticas económicas (incluidas las de determinación del precio del agua), a la tecnología, al nivel de vida y a la valoración que la sociedad da a los ecosistemas de agua dulce. Los recursos hídricos, tanto en términos de cantidad como de calidad, están gravemente afectados por las actividades humanas, en particular: agricultura y cambios de uso del suelo, construcción y gestión de embalses, emisiones de sustancias contaminantes, y tratamiento de aguas de desecho (Bates, et al., 2008).

En la mayoría de los países, excepto en algunas naciones industrializadas, el consumo de agua ha aumentado en las últimas décadas debido al crecimiento demográfico y económico, a la evolución del nivel de vida y a una mayor extensión de los sistemas de abastecimiento de agua, siendo el riego por mucho, el uso de más consumo. El riego representa en torno a un 70% del agua extraída en todo el mundo, y más de un 90% de su consumo (es decir, del volumen de agua no reutilizable aguas abajo) (Bates, et al., 2008). La superficie de riego mundial ha aumentado de manera aproximadamente lineal desde 1960 a un ritmo aproximado de un 2% al año, pasando de 140 millones de hectáreas entre 1961 y 1963 a 270 millones de hectáreas entre 1997 y 1999, que representan aproximadamente un 18% de la superficie cultivada total actual (Bruinsma, 2003).

En la figura 1-2 se muestran ejemplos de problemas asociados por la explotación de los recursos hídricos por las actividades humanas modernas, en distintos lugares del mundo, así como la medida del indicador de estrés hídrico. Se pueden observar situaciones de

hundimientos de la tierra en la Ciudad de México, ríos totalmente secos en China debido a la sobre explotación de sus recursos, daños a los ecosistemas ribereños en el centro-norte de Europa, daños a ecosistemas acuáticos en Australia a causa de disminución de caudales y aumento en la salinidad, o problemas desabastecimiento agrícola por la sequias en el norte de EUA, sur de Canadá o en la Republica de Benín en África. También se puede observar que el estrés hídrico se extiende principalmente por Asia, el norte de África y en gran parte de en EUA y España, así como en el norte de México (Bates, et al., 2008). Las Naciones Unidas (2018), definen que el estrés hídrico es cuando el suministro anual de agua cae por debajo de 1.700 m^3 por persona. Cuando los suministros anuales de agua caen por debajo de 1.000 m^3 por persona, la población se enfrenta a la escasez de agua, y por debajo de 500 m^3 se denomina escasez absoluta.

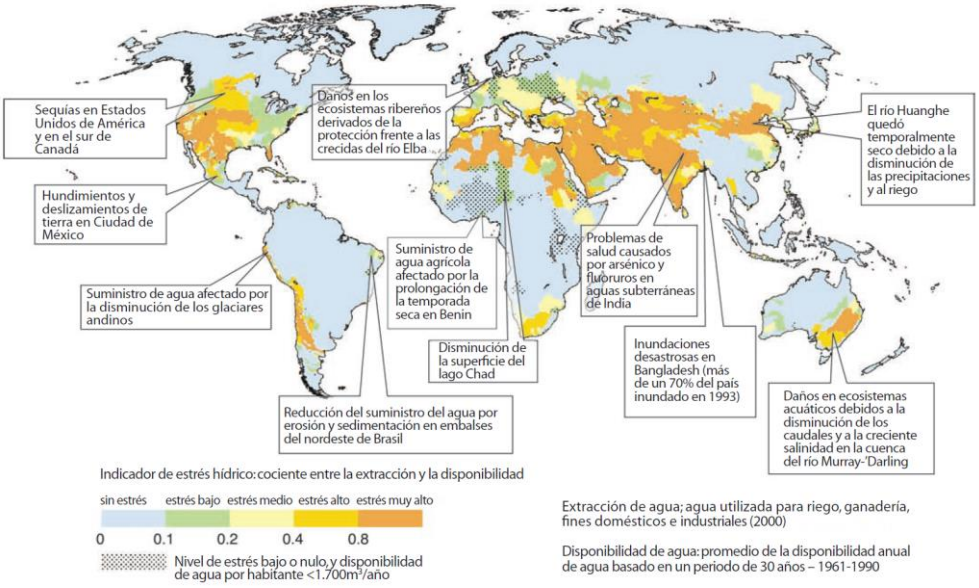


Figura 1-2. Ejemplos de problemáticas generadas debido a la explotación de recursos hídricos alrededor del mundo e indicador de estrés hídrico. Fuente (Bates, et al., 2008).

1.2 EL CAMBIO CLIMÁTICO

El cambio climático se refiere a una variación estadísticamente significativa, ya sea en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (por lo general décadas o más). El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o factores externos, como cambios persistentes en la atmósfera o cambios en el uso de la Tierra. El Artículo uno de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define "cambio climático" como: "un cambio de clima que se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que además altera la variabilidad climática natural observada durante períodos de tiempo comparables. "La CMNUCC hace así una distinción entre "cambio climático" atribuible a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y "variabilidad climática" atribuible a causas naturales (WMO, 2017).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) fue creado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y la ONU Medio Ambiente con el objetivo de proporcionar una fuente objetiva de información científica. En 2013 el IPCC proporcionó más claridad sobre el papel de la actividad humana en el cambio climático cuando publicó su Quinto Informe de Evaluación (AR5). Su conclusión es categórica: el cambio climático es real y las actividades humanas son sus principales causantes (ONU, 2018). El IPCC, asegura que el calentamiento en el sistema climático es inequívoco y, que desde la década de 1950 muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmosfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero (GHG) han aumentado.

En la figura 1-3 se puede observar el aumento de la temperatura anual media global del planeta desde mediados del siglo XIX hasta el año 2010. Se puede notar el acelerado incremento de la temperatura después de 1920, pero de manera abrupta desde 1970.

La principal contribución al forzamiento radiativo total proviene del aumento en la concentración del dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera que se viene produciendo desde 1750. La influencia humana en el sistema climático es clara y evidente ante las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, el forzamiento radiativo positivo y el calentamiento observado, y gracias a la comprensión del sistema climático (IPCC, 2014).

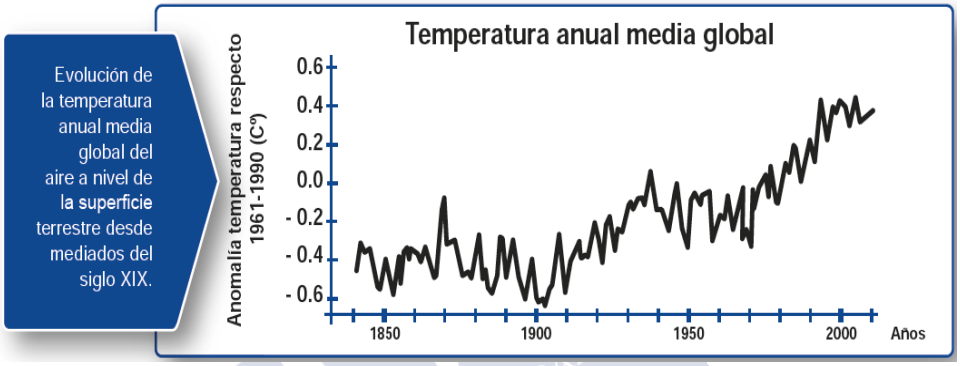


Figura 1-3. Incremento de la temperatura media global en el periodo 1880-2012. Fuente (MAGRAMA, 2013).

Los reportes de concentración atmosférica de CO_2 al mes de Febrero del 2019 es de 411.75 ppm, medidos en el observatorio de Mauna Loa, Hawa (CO2.Earth, 2019)ii, que se utiliza como referencia global y mediante la curva de Keeling para mostrar los cambios en la concentración de CO_2 en la atmósfera desde 1958. Se considera que las mediciones en Mauna Loa reflejan la realidad de la atmósfera global terrestre. La altitud de 3,400 metros sobre el nivel del mar, es excelente para medir masas de aire, que representan extensiones muy grandes. Con frecuencia se comprueba la exactitud, y se comparan con mediciones independientes en el mismo volcán. La diferencia no excede de 0.2 ppm. Se muestra en la figura 1-4 el incremento en la concentración de CO_2 atmosférico de 1958 al 2018, a lo que se le atribuye la relación con el aumento de la temperatura media global.

Los procesos naturales como la fotosíntesis de los bosques, ha pasado millones de años retirando CO_2 de la atmósfera y lo ha

sepultado en el suelo, en los yacimientos petrolíferos y de gas natural. Desde la revolución industrial y la explotación de los combustibles fósiles, la actividad humana devuelve ese CO_2 a la atmósfera (CO2.Earth, 2019).

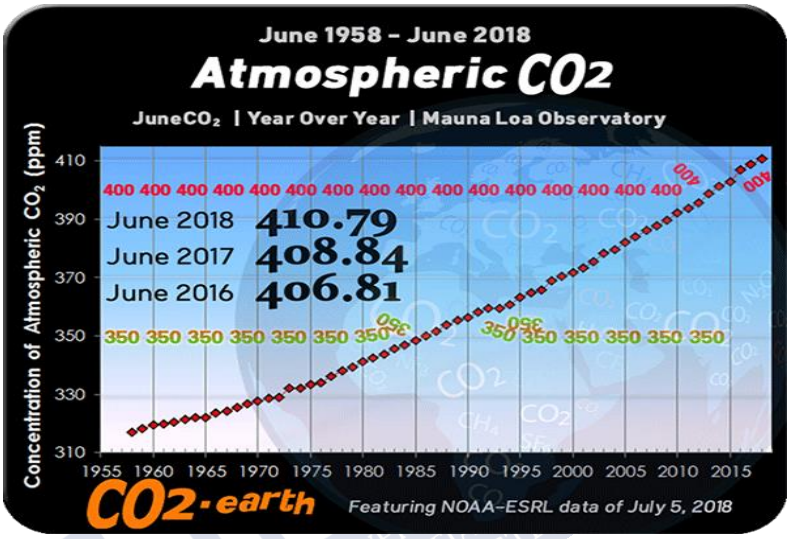


Figura 1-4 Tendencia 1958-2018 en la concentración atmosférica anual de CO_2 en el observatorio de Mauna Loa, Hawaii (NOAA-ESRL). Fuente (CO2.Earth, 2019).

1.2.1 Escenarios climáticos

Para poder estudiar el clima futuro y los efectos que puedan resultar en el medioambiente y consecuentemente en los recursos naturales de los que el ser humano requiere, se han creado los escenarios climáticos. Estos escenarios no son predicciones climáticas, ya que cada escenario es una alternativa de cómo se puede comportar el clima en el futuro.

Los escenarios climáticos son una representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basados en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construyen para ser utilizados explícitamente en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico, y que sirven a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos. Por ejemplo, los escenarios están basados asunciones del futuro

socioeconómico y desarrollo tecnológico que puede o no ser alcanzado y por lo tanto están sujetos a una incertidumbre sustancial (IPCC, 2012). Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación (IPCC, 2000).

Una proyección climática es la respuesta del sistema climático a escenarios emisiones o concentración de gases de efecto invernadero, o escenarios de forzamiento radiativo, a menudo basadas en simulaciones de modelos climáticos. Las proyecciones climáticas se distinguen de las predicciones de manera que las proyecciones depende de del escenario de emisión, concentración o forzamiento radiativo utilizado (IPCC, 2012).

En el siguiente capítulo se explica más a detalle los últimos escenarios de emisión y de simulación climática de los que se dispone de información.

1.2.2 Proyecciones del cambio climático en el ciclo del agua

Los cambios que se producirán en el ciclo global del agua, en respuesta al calentamiento durante el siglo XXI, no serán uniformes. Se acentuará el contraste en las precipitaciones entre las regiones húmedas y secas y entre las estaciones húmedas y secas, si bien podrá haber excepciones regionales. La mayoría de los aspectos del cambio climático perdurarán durante muchos siglos, incluso aunque pararan las emisiones de CO_2, lo que supone que el cambio climático es inevitable durante varios siglos, debido a las emisiones de CO_2 pasadas, presentes y futuras (IPCC, 2013).

El calentamiento climático observado en los últimos decenios está coherentemente asociado a las variaciones de ciertos componentes del ciclo hidrológico y de los sistemas hidrológicos: cambios en las pautas, intensidades y valores extremos de precipitación; fusión generalizada de la nieve y del hielo; aumento del vapor de agua atmosférico; aumento de la evaporación; y variaciones de la humedad del suelo y de la escorrentía. Todos los componentes del ciclo hidrológico presentan una variabilidad natural notable que enmascara

frecuentemente las tendencias a largo plazo. Subsisten todavía incertidumbres importantes respecto a la tendencia de las variables hidrológicas, debido a las grandes diferencias regionales y a limitaciones en la cobertura espacial y temporal de las redes de monitoreo (Huntington, 2006). Si por ejemplo consideramos a la precipitación como la entrada de los recursos hídricos en una región, los cambios causados por el cambio climático en esta variable del componente hidrológico causarían afectaciones a los actuales recursos hídricos a nivel de la cuenca. En la figura 1-5 se pueden observar el cambio a nivel mundial en la precipitación media anual (en porcentaje) entre los periodos de 1986-2005 y 2081-2100, en donde se intensifican en las latitudes cercanas a los polos y al ecuador, mientras que disminuyen alrededor de los trópicos.

Las proyecciones sobre el cambio climático durante el siglo XXI indican que se reducirán los recursos renovables de aguas superficiales y aguas subterráneas en la mayoría de las regiones secas subtropicales, con lo que se intensificará la competencia por el agua entre los sectores (IPCC, 2014).

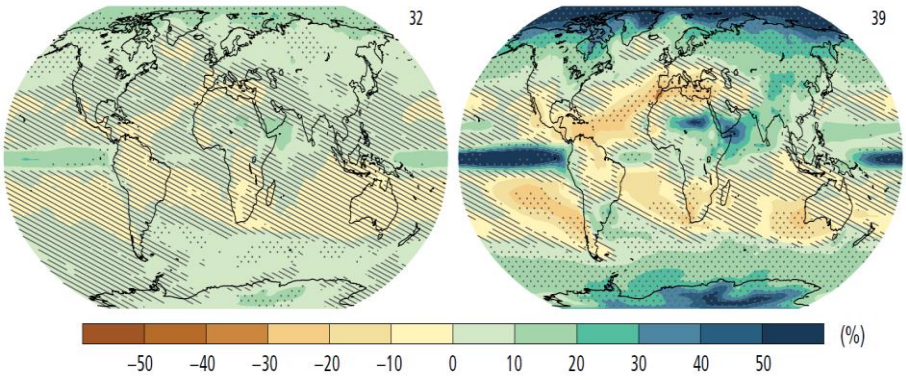


Figura 1-5. Cambio a nivel mundial en la precipitación media anual (en porcentaje), debido al cambio climático entre los periodos de 1986-2005 y 2081-2100. Fuente (IPCC, 2014).

1.3 LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Para responder a la importancia que representa el agua para todas las formas de vida en la Tierra, a los problemas que se presentan

debido al uso del agua y a los posibles efectos del cambio climático en los recursos hídricos, el ser humano ha desarrollado la gestión de los recursos hídricos. La gestión de los recursos hídricos es diferente en tiempo y espacio, como también la distribución de los recursos hídricos de región a región en el planeta Tierra. Por esta razón, como lo confirma la Asociación Mundial del Agua (GWP), no puede existir una solución universal para los problemas de gestión de recursos hídricos. Es posible tomar experiencias y adaptarlas, aprender de las experiencias de otras gestiones, pero no tratar de copiar modelos de gestión.

Para hacer un mejor uso del agua, las sociedades modernas se han visto en la necesidad de crear los conceptos de gestión y planificación de recursos hídricos. A través de los gobiernos de cada país, región y ciudad, se busca organizar a todos los usuarios interesados en los recursos hídricos mediante leyes, normativas, reglamentos, acuerdos, etc., que deberían estar enfocadas a lograr un uso sostenible del recurso.

Estas instituciones de gestión y planeación están constantemente sujetas al aprendizaje de sus mismas experiencias y de otros casos en el mundo. La gestión del agua no es una tarea fácil, ya que se trata de un proceso multifacético y multivariable que requiere de una fuerte organización y coordinación. Inclusive en algunas ocasiones es necesario formular acuerdos internacionales cuando existen fuentes de agua compartidas por dos o más países.

1.3.1 Los organismos de cuenca

En nuestra realidad, quienes administran y planifican los recursos hídricos son los gobiernos nacionales, que establecen las políticas para el uso y protección de los recursos en un país. Se ha llegado a un acuerdo a nivel mundial a través del Red Internacional de Organismos de Cuenca (INBO) para utilizar el término genérico "organismo de cuenca" para referirnos a todos los tipos de instituciones que administran cuencas. Estas pueden ser organismos formales grandes o pequeños, o simplemente grupos informales de personas. Los

organismos de cuenca varían en función y propósito, según los mandatos y acuerdos legales utilizados para su creación.

La misma INBO define el concepto de cuenca hidrográfica, como área delimitada por las divisorias de aguas de un sistema de arroyos y ríos que convergen en la misma desembocadura, en donde hallan los recursos hídricos renovables y utilizables de agua dulce en el mundo. Con ello, se ha reconocido que la cuenca es una unidad hidrológica práctica para la gestión de recursos hídricos.

El enfoque de cuenca, permite la evaluación de recursos hídricos a nivel de sistema. En otras palabras, las políticas nacionales, así como también los acuerdos internacionales y los convenios regionales para aguas transfronterizas, se aplican en cuencas naturales (GWP, INBO, 2009).

En el capítulo dos, se abordan las características de organización y gestión que México y España han seguido a lo largo de los últimos años en tema de gestión de recursos hídricos.

1.3.2 Diferencia entre gestión y planificación

Volviendo al glosario internacional de hidrología de la WMO, encontramos la diferencia entre las definiciones de gestión (o manejo) y planificación.

Por una parte, la gestión de recursos hídricos está definida como: "el proceso de decisión directamente relacionado con la administración, la supervisión y el control de un sistema de recursos hídricos". Por otro lado, la planificación de recursos hídricos está definida como "la formulación y coordinación de las acciones sobre el régimen hidrológico regional, en particular dentro de los marcos institucional y tecnológico, necesarias para alcanzar determinados objetivos socioeconómicos y medioambientales".

A partir de estas dos definiciones, podemos notar que la gestión de recursos hídricos son todas aquellas acciones cotidianas que se aplican sobre los recursos hídricos como la extracción, bombeo y conducción, almacenamiento, tratamiento previo y posterior al uso,

administración de abastecimientos entre los usuarios, reutilización, monitoreo, entre otros de habitual. En diferencia, la planeación de los recursos hídricos trata sobre el desarrollo y formulación de acciones a futuro a mediano y largo plazo que son necesarias para poder lograr objetivos específicos, por ejemplo proyectos de infraestructura, programas de cultura del agua, creación de leyes y normatividad, ampliaciones o modificaciones del sistema de abastecimiento, u otros que definan cómo será el uso de recurso hídrico en un futuro.

1.3.3 De la gestión tradicional a la integrada de recursos hídricos

Hasta finales de 1980, economistas y políticos junto a ingenieros y usuarios, consideraron explotar el recurso del agua tanto para el desarrollo como también para las necesidades de la sociedad. Consecuentemente, la gestión y planificación del agua estuvieron enfocadas de manera de optimización determinista o estocástica, en orden de maximizar los beneficios y minimizar las pérdidas. Recientemente, enfoques y técnicas multi-criterio han sido extensamente utilizadas de manera de tomar en cuenta a una más amplia variedad de objetivos conmensurables e inconmensurables. Con la introducción del concepto de desarrollo sostenible, que cambia radicalmente las perspectivas tradicionales, éste apunta a cumplir las llamadas “3 E’s” (por sus significados en inglés), integridad ambiental, eficiencia económica y equidad para las generaciones presentes y futuras (Todini, 2007).

El enfoque de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) ayuda a administrar y desarrollar los recursos hídricos en forma sostenible y equilibrada, teniendo en cuenta los intereses sociales, económicos y ambientales. Reconoce los diferentes grupos de interés que compiten entre sí, los sectores que usan y abusan del agua, y las necesidades del medio ambiente. El enfoque integrado coordina la gestión de recursos hídricos en todos los sectores y grupos de interés, y a diferentes escalas, desde la local a la internacional (GWP, INBO, 2009). En la figura 1-6 se representan las etapas según la GWP para el ciclo de implementación de objetivos de desarrollo para la GIRH, basado en el aprendizaje mediante la práctica. El primer paso es

definir objetivos generales de políticas (a dónde queremos llegar). Los pasos siguientes son especificar los problemas de la gestión del agua a resolver (identificar problemas), hacer una lista de estrategias potenciales (cómo llegar a donde queremos), evaluar cada una de ellas, seleccionar una estrategia o combinación de estrategias, implementar la estrategia, evaluar los resultados, aprender de dichos resultados.



Figura 1-6 Etapas en el proceso de implementación de la GIRH. Fuente (GWP, INBO, 2009).

La multidimensionalidad del agua requiere de varias áreas científicas para lograr un adecuado estudio y análisis para su gestión. Desde un punto de vista más específico, en la figura 1-7 se muestran las áreas que atienden a la gestión cuantitativa de los recursos hídricos, social, económica, hidrológica y económicamente. Las flechas de dos direcciones representan dependencias entre la gestión cuantitativa y los otros temas. Por ejemplo, la asignación de agua depende de la disponibilidad de los recursos hídricos, pero al mismo tiempo las reglas de operación afectan la relación de aguas superficiales debido a las extracciones de agua. Por otro lado, las flechas circundantes representan las relaciones entre las cuatro áreas secundarias. Por ejemplo, los procesos hidrológicos y la

contaminación difusa determinan los patrones temporales de los flujos ambientales y la calidad del agua en la corriente, respectivamente.

1.3.4 Desafíos de la gestión de los recursos hídricos

Muchos de los desafíos que enfrentan los administradores del agua no son nuevos, dado que la naturaleza y dimensión de los problemas difieren de una región a otra y de una cuenca a otra. Por lo tanto las respuestas y soluciones varían considerablemente. No existe ni puede existir una solución universal para los problemas (GWP, INBO, 2009).



Figura 1-7 Diagrama conceptual de la GIRH. Adaptado de (Momblanch, 2016).

En muchas regiones, la gestión del agua siempre ha sido un gran problema debido a la variabilidad e incertidumbre naturales de los patrones meteorológicos. En algunas cuencas con el cambio climático traerá menos precipitaciones y menores caudales en los ríos, mientras que en otras cuencas, el cambio climático generará mayores inundaciones. Claramente, factores tales como el crecimiento de la población, los cambios demográficos, el desarrollo económico y el cambio climático tienen un serio impacto sobre los recursos hídricos (GWP, INBO, 2009). Dado que las presiones sobre los recursos hídricos son cada vez mayores, es vital que se administren los recursos hídricos adecuadamente. Sin embargo, la gestión del agua se vuelve cada vez más compleja y contenciosa (GWP, INBO, 2009).

Cada vez más, el agua es un recurso en disputa incluso en regiones del mundo que están relativamente bien dotadas de agua. La diferencia clave entre el déficit de agua y la escasez de agua, es que el déficit de agua se debe principalmente a factores biofísicos (lluvia, uso de la tierra, geología, etc.) y el estado de los sistemas de suministro de infraestructura (capacidad, condición y reglas de operación, etc.). Por otro lado, la escasez de agua depende tanto del déficit de agua como de la multitud de factores que impulsan la demanda de agua (el aumento de la población y la demanda per cápita de agua, el crecimiento económico, la necesidad de proteger los ecosistemas acuáticos, etc.) y la gran cantidad de factores políticos y factores socioculturales que determinan el acceso de los usuarios al agua de una calidad aceptable (derechos de agua, exclusión social, pobreza, suministros de energía no confiables, guerras o conflictos localizados) (Batchelor, et al., 2017).

1.3.5 Gestión de recursos hídricos para la adaptación y riesgos del cambio climático

El IPCC (2014), dentro de las medidas de adaptación y mitigación recomendadas ante los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos, menciona que: “Las estrategias comprenden la adopción de una gestión integrada de los recursos hídricos, el aumento del abastecimiento, la reducción del desajuste entre la oferta y la demanda de agua, la disminución de los factores de estrés, el refuerzo de las capacidades institucionales y la adopción de tecnologías eficientes para el agua y estrategias de ahorro de agua”.

Es importante mencionar que el recurso fundamental para la formulación y planeación de todas las acciones de mitigación mencionadas, recae en tener disponible información y datos de las cuencas de interés. Generar la información de los recursos hídricos es una labor extensa y compleja, en la que los organismos de cuenca y centros de investigación deben invertir recursos humanos y tecnológicos. Sin embargo, las declaraciones del IPCC sobre los efectos del cambio climático en los recursos hídricos, dejan en claro que es importante realizar los estudios y análisis requeridos para la gestión de todo tipo de cuencas alrededor del planeta.

1.3.6 Acuerdos internacionales para la gestión de recursos hídricos

A continuación, se mencionan brevemente tres ejemplos de aplicaciones reales de la gestión internacional del recurso hídrico, con las que se puede mostrar por una parte la complejidad y por otra la cooperación coordinada para hacer uso del agua. Una se inició en el año 2000 para la política de aguas en la Unión Europea y la otra data desde 1944 para la gestión de las aguas transfronterizas entre los Estados Unidos mexicanos y los Estados Unidos de América.

1.3.6.1 Directiva Marco del Agua de la Unión Europea

En diciembre del 2000 se publicó la Directiva Marco del Agua (DMA) del Parlamento Europeo, en la que se establece un marco comunitario de actuación en el tema de política de aguas de las Comunidades Europeas.

Esta Directiva, es el resultado de un proceso de más de cinco años de deliberaciones y negociaciones entre multitud de expertos, agentes interesados y representantes de las administraciones competentes. Este proceso ha hecho hincapié en lograr un acuerdo sobre los principios fundamentales de la gestión hidrológica moderna, que actualmente constituye la base de la DMA (Bakeaz, 2003). En términos generales, la Directiva trata de lograr un buen estado de las aguas para todas las aguas continentales antes de 2015.

En la DMA, se enfoca en la protección de todos los cuerpos de agua presentes en el territorio de la Comunidad Europea. Sus objetivos son prevenir el deterioro de los recursos hídricos, protegerlos y mejorar su estado, promover el uso sostenible del recurso, garantizar una reducción de la contaminación y prevenir los efectos de inundaciones y sequias. Con la implementación de la DMA, todos los estados miembros de la Unión Europea estuvieron comprometidos a presentar los Planes Hidrológicos de Cuenca (PHC) correspondientes dentro de sus territorios. En dichos documentos, se caracterizaron las cuencas hidrográficas en cuanto a recursos, presiones, impactos y aspectos económicos de los usos del agua. También se clasificaron los estados ecológicos de los medios

acuáticos, así como se realizó la elaboración de programas de medidas para alcanzar objetivos medioambientales. La DMA está dirigida a cambiar el proceso de gestión, información, consulta y participación pública en temas de los recursos hídricos.

Como resultado, la DMA y los PHC han contribuido significativamente a la mejora de la gestión del agua en el conjunto de la Unión Europea. Sin embargo, a pesar de los avances que se han logrado en el ámbito de mejorar la calidad ambiental las diversas fuentes de agua, los reportes indican que el 60% de las aguas superficiales europeas siguen sin cumplir el objetivo mínimo de "buen estado". La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) ha indicado que gracias a la aplicación de la DMA, la calidad del agua dulce en Europa está mejorando gradualmente, pero es necesario redoblar esfuerzos para lograr el buen estado de todas las masas de agua.

Otro aspecto fundamental de la DMA es el interés que hace en la participación pública en el proceso de decisión. El texto de la Ley de Aguas y el Reglamento de la Planificación Hidrológica recogen en su articulado íntegramente las exigencias del artículo 14 de la DMA y además establecen los comités y órganos de participación pública de las demarcaciones hidrográficas. La participación pública en el proceso de planificación de la DMA deberá asegurarse en tres niveles de implicación creciente del público, a saber: 1) información pública; 2) consulta pública; y 3) participación activa. En un documento de la DMA denominado "Proyecto de Participación Pública", se perfila el alcance y procesos para conseguir una adecuada información, consulta y participación durante todo el proceso.

1.3.6.2 Tratado de Aguas Internacionales 1944

Después de estar en guerra, en 1848 se firmó el tratado de Guadalupe-Hidalgo entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América, para establecer la frontera entre ambos países. Sin embargo, fue hasta 1944 cuando se firmó el Tratado de Aguas Internacionales (TAI), en el que distribuyen las cantidades de agua y

el marco jurídico para la administración de los ríos transfronterizos entre ambos territorios.

A raíz del TAI, se crea la Comisión Internacional de Límites y aguas (CILA) como un organismo binacional, multidisciplinario en el área técnico-diplomático, que funciona como base para la aplicación de acuerdos que se realicen en las reuniones de la comisión. En las llamadas Actas de la comisión quedan plasmados los acuerdos, proyectos, obligaciones de cada país y acciones a tomar en los asuntos relacionados a la gestión de los ríos y del agua. De 1889 hasta 2017, se han firmado 323 Actas.

Durante más de 120 años, México y EUA han encomendado a la CILA la vigilancia y aplicación de las Actas, dando solución a las diferencias que puedan surgir como consecuencia de tales aplicaciones. La CILA ejerce esta responsabilidad a lo largo de su zona jurisdiccional fronteriza, manteniendo una relación de respeto mutuo y entendimiento, cultivando una mejor convivencia internacional, para de esta manera mejorar la gestión del agua para más de 12 millones de habitantes dentro de la zona fronteriza y a lo largo de 3,142 km. Como resultado de la cooperación de la CILA, se han realizado proyectos y atendido situaciones desde desmonte, calidad y saneamiento, salinidad, construcción de infraestructura, control de avenidas, entregas extra de agua y últimamente sobre conservación y estudios sobre restauración ambiental. Actualmente la gestión del río Colorado enfrenta una situación de sequía que afecta ambos países, los que en el 2017 con el Acta 323 han establecido una serie de medidas y proyectos mediante un plan de contingencia e inversión, para hacer frente a la escasez del recurso.

1.3.6.3 Acuerdo de París

El Acuerdo de París es un acuerdo mundial de las Naciones Unidas sobre el cambio climático que ya se alcanzó el 12 de diciembre de 2015 en París. El acuerdo presenta un plan de actuación para limitar el calentamiento del planeta “muy por debajo” de 2 °C, y cubre el periodo posterior a 2020.

El principal objetivo del Acuerdo de París es reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático manteniendo el aumento de la temperatura mundial en este siglo por debajo de los 2 ˚C con respecto a los niveles preindustriales y proseguir con los esfuerzos para limitar aún más el aumento de la temperatura a 1,5 ˚C. En el Día de la Tierra, el 22 de abril de 2016, 175 líderes mundiales firmaron el Acuerdo de París en la Sede de las Naciones Unidas en Nueva York. Este fue, con diferencia, el acuerdo internacional que más países firmaron en un solo día. Otros también lo han firmado desde entonces. Actualmente hay 184 países que se han sumado al Acuerdo de París (ONU, 2018)

1.4 ENFOQUES PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Para abordar los desafíos de gestión de recursos hídricos generalmente se necesitan respuestas en dos áreas clave: respuestas que aborden cuestiones estructurales, incluyendo la generación y adquisición de datos e información, infraestructura y operaciones y mantenimiento, y respuestas institucionales que abarcan cuestiones tales como políticas y fijación de precios, o conocimiento e información (GWP, INBO, 2009).

1.4.1 Gobernanza del agua y la participación pública

Frente a las formas de gobierno del agua basadas únicamente en la voluntad política y los criterios técnicos, la denominada gobernanza supone otra forma de concebir y ejercer la autoridad pública. Esta nueva forma de gobierno propone integrar la complejidad técnica, ambiental y social de la gestión del agua mediante la inclusión de más actores y saberes en el proceso político de toma de decisiones (Ballester & La Calle, 2015). En la gobernanza del agua deben tener participación todos los actores relacionados, desde las autoridades gubernamentales, usuarios de todo tipo, instituciones de conocimiento, hasta colectivos de conservación ambiental.

La participación pública es uno de los pilares fundamentales de la gobernanza y constituye un requisito para mejorar la gestión, la calidad y la conservación de nuestros ríos. La inclusión de un mayor número de actores y saberes en la toma de decisiones sobre el agua

puede realizarse mediante los denominados procesos de participación pública y aporta ventajas de diversa índole para la gestión de este polifacético recurso: a) un diagnóstico del problema más competo y ajustado a la realidad, b) integra las diferentes dimensiones del desarrollo sostenible, c) reduce la aparición de conflictos entre colectivos con diferentes percepciones e intereses, d) aumenta la legitimidad de las decisiones adoptadas, e) aumenta la eficiencia en la implementación de las medidas ahorrando tiempo y recursos (Ballester & La Calle, 2015). En la tabla 1-2 se resumen algunos de los prejuicios y realidades que surgen a la hora de pensar en lo que es y lo que implica la participación pública en los procesos de decisión sobre problemáticas en temas de gestión de recursos hídricos y planificación hidrológica.

Tabla 1-2 Prejuicios y realidades de la participación pública. Fuente (Ballester & La Calle, 2015).

No es:	Sí es:
La garantía de que la administración aceptará el diagnóstico y la solución que le proponen los actores con cargo a los fondos públicos.	La garantía de que la administración recabará y tendrá en cuenta el diagnóstico y las soluciones propuestas por los diversos actores, sin olvidar que tiene la responsabilidad última en la decisión.
Un proceso costoso e interminable que imposibilita la toma de decisiones, por lo que al final "nunca se hace nada".	Una herramienta que permite ahorrar tiempo y recursos al mejorar las decisiones y agilizar su aplicación.
Una reunión entre distintas partes interesadas en que cada una, sin apenas escucharse, intentan imponer su razón, para que al final la administración haga lo que ya pensaba hacer.	Una forma de gobernar en la que de manera temprana se establece un dialogo con las partes interesadas que les permite influir y organizarse en redes.

1.4.2 Water Accounting & Auditing

El *Water Accounting and Auditing* (WA&A) es un componente vital de los procedimientos de planificación para la gestión de los recursos hídricos, especialmente en condiciones de escasez de agua y ante los crecientes riesgos e incertidumbres. Las estrategias que abordan la escasez de agua deben basarse en una comprensión profunda del balance hídrico, incluido el suministro y la demanda de agua y sus dimensiones espaciales y temporales (FAO, 2019).

La FAO en el reporte 43 de 2017, describe el WA&A como la adquisición, el análisis y la comunicación sistemáticos de la información relacionada con la existencia y los flujos de agua en entornos naturales, perturbados o altamente diseñados. Una definición más precisa es que la contabilidad del agua es el estudio sistemático del estado y las tendencias del suministro, la demanda, la accesibilidad y el uso del agua en dominios específicos. La auditoría del agua va un paso más allá que la contabilidad del agua al colocar las tendencias en el suministro, la demanda, la accesibilidad y el uso del agua en el contexto más amplio de la gobernanza, las instituciones, el gasto público y privado, las leyes y la economía política más amplia del agua en dominios específicos.

Una de las perspectivas de la contabilidad del agua está fundamentada en la hidrología. Esta perspectiva hidrológica es firmemente basada en el entendimiento del proceso físico que gobierna los volúmenes y tasas de cambio en el flujo de agua, así como de las existencias en diferentes territorios y/o bajo diferentes condiciones climáticas o régimen de manejo (Batchelor, et al., 2017).

La contabilidad del agua integra los procesos hidrológicos con el uso del suelo, los flujos de agua gestionados y los servicios que resultan del consumo de agua en las cuencas hidrográficas. Su objetivo es esforzarse por lograr una gobernabilidad del agua equitativa y transparente para todos los usuarios y un balance hídrico sostenible (Water Accounting, 2016). Otro aspecto crítico de la contabilidad del agua es que considera y evalúa tanto la oferta como la demanda de los sistemas de suministro de agua. Del lado de la oferta, es importante conocer lo más preciso posible la disponibilidad en espacio y tiempo de lluvia, agua superficial, agua subterránea y fuentes de agua poco convencional. Del lado de la demanda es esencial el conocimiento de la demanda de los usuarios, como son satisfechas, patrones de uso consuntivo y no consuntivo, el nivel de servicio que es experimentado por los usuarios y sus beneficios (Batchelor, et al., 2017).

En la tabla 1-3 se mencionan las actividades típicas e interrelacionadas del WA&A, en donde el *Water Accounting* incluye la identificación sistemática, evaluación y análisis de las componentes de los recursos hídricos en espacio y tiempo, mientras que el *Water Auditing* incluye lo hace a nivel institucional.

Tabla 1-3 Actividades típicas e interrelacionadas del *Water Accounting & Auditing*. Adaptado de (FAO, 2019).

Water Accounting		**Water Auditing**
Estado actual y tendencias futuras en abastecimiento del agua, demandas y usos		Sistemas de gobernanza y particularmente que poder y autoridad son ejecutados y mediados
Causas fundamentales de desbalances y abastecimiento en la demanda		Mandatos, interacciones, funcionabilidad y responsabilidad de instituciones formales e informales relacionadas con el agua
Niveles de sostenibilidad ambiental		Utilidad y efectividad de diferentes modelos de entrega de servicios de agua
Niveles de eficiencia y productividad desde la fuente a los reservorios y a lo largo de la cadena de valor		Efectividad y utilidad de políticas relacionadas a la seguridad del agua y alimenticia y mitigación de la pobreza
Capacidad, funcionalidad y operación-mantenimiento del abastecimiento del agua, almacenamiento, tratamientos y drenaje, relacionados a la infraestructura	**<------> Identificación sistemática, evaluación y análisis <------>**	Niveles de capital público, privado y gastos recurrentes
Niveles de servicios de agua de los diferentes usos y usuarios		Rentabilidad y costo-beneficio de diferentes usos y usuarios del agua
Condición de los flujos ambientales		Leyes y regulaciones (formales o informales y sus aplicaciones)
Niveles de equidad y niveles de competición por el agua		Efectividad y transparencia de sistemas de asignación y regulación del agua
Funcionalidad y efectividad de los sistemas monitoreo y evaluación		Problemas de economía política más amplios que a menudo respaldan discursos sancionados y resistencia al cambio
Identificación y evaluación de potenciales externalidades ligadas a usos del territorio e intensificación agrícola		

1.4.3 Enfoque de las Soluciones Basadas en la Naturaleza para la gestión del agua

Esta idea de las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) básicamente se propone para hacer frente a los desafíos se enfrenta la gestión contemporánea de los recursos hídricos, mediante un mejor entendimiento y análisis de los procesos naturales en los ecosistemas. Algo muy parecido fue planteado en por Benyus (1997) con la introducción del concepto de Biomimética o biomímesis (*Biomimicry*), en el cual explica como la naturaleza puede ser fuente de inspiración de ideas para los problemas convencionales y de una manera más equilibrada con el medio ambiente.

En el Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (WWDR, 2018), se aborda una la nueva perspectiva llamada "Soluciones basadas en la Naturaleza", las cuales están inspiradas en procesos naturales que son tomados como modelos para contribuir a la gestión mejorada del agua. Una solución basada en la naturaleza puede implicar la conservación o rehabilitación de los ecosistemas naturales y/o la mejora o creación de procesos naturales en ecosistemas modificados o artificiales. Se pueden aplicar a microescala (por ejemplo, un inodoro seco) o a macroescala (por ejemplo, el paisaje).

1.5 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DE LA TESIS

1.5.1 Justificación

Los problemas sobre la gestión del agua en todo el mundo son complejos. Sin embargo, la información útil relacionada al agua, necesaria para los tomadores de decisiones en el sector del agua en muchas ocasiones no es suficiente ni especifica. Resolver los problemas relacionados al agua requiere información de muchas disciplinas, considerando que los datos físicos (que describen las fuentes y los usos del agua) son la base más importante. Los conjuntos de datos sobre hidrología, gestión del agua y, en particular, sobre el uso de consuntivo a escala de cuencas hidrográficas son deficientes, incompletos, están ausentes u ocultos (Water Accounting, 2016). Dentro de esta información, la correcta cuantificación de los recursos

hídricos de la cuenca hidrográfica es fundamental para estimar la disponibilidad de los recursos y empezar su gestión y planificación. Para esto se requiere de una serie de técnicas y tecnologías de diversas disciplinas, meteorología, hidrología, geología, estadística, sistemas de información geográfica, con información propia del lugar de estudio.

En la presente tesis, se plantea una investigación para dos escenarios en extremos de disponibilidad de recursos hídricos. Por un lado, el escenario húmedo, la subcuenca en el río Cabe en Galicia, España, con precipitaciones en promedio de 1041 mm al año. Por otra parte, el escenario seco se plantea para la subcuenca del río Colorado en la parte mexicana ubicado en la ciudad de Mexicali, Baja California, México, en donde las precipitaciones son tan bajas como 77 mm al año y una situación particular en la disponibilidad de recursos hídricos regida bajo un tratado internacional. Se pretende aportar un ensamble de métodos para el proceso de cuantificación de recursos hídricos actuales y futuros ante el cambio climático. Además del proceso de cuantificación de recursos hídricos, se incorpora el esquema de gestión de recursos hídricos actual en cada escenario para enlazar el modelo de simulación hidrológico con el modelo de simulación de gestión. Se busca ejecutar un ejemplo sencillo en el modelo de gestión para observar el comportamiento en los elementos de demandas y de los datos de aportaciones generados en el modelo hidrológico, que sirvan como base en la simulación de gestión de recursos hídricos.

En la figura 1-8 se representa como la propuesta de este trabajo tesis busca aportar la cuantificación de los recursos hídricos mediante la metodología explicada en el capítulo 3, aportando un procedimiento e información sobre de la cuantificación de los recursos hídricos para la situación actual y de cambio climático. El aporte de este trabajo de tesis, encaja en el enfoque de *Water Accounting* de la FAO en el punto de acción mencionado como “Estado y tendencias futuras en oferta y accesibilidad de recursos hídricos” en el contexto del balance hidrológico, como una de las partes de generación de información fundamental para la GIRH y que es esencial para las medidas de

mitigación y adaptación ante los posibles impactos del cambio climático en los recursos hídricos. La propuesta corresponde al elemento de "procesos hidrológicos" en el diagrama conceptual de la GIRH, mostrado en la figura 1-7, como una parte de una de las áreas que contribuye a tal concepto.

1.5.2 Objetivos de la tesis

Objetivo general:

- Generar una metodología y su aplicación que contribuya al objetivo general del *Water Accounting*: "Estado actual y tendencia futura de oferta y accesibilidad del agua".

Objetivos específicos:

- Cuantificar los recursos hídricos del río Cabe (Lugo), para el estado actual y de proyección al cambio climático.
- Evaluar las garantías de las demandas en el sistema de gestión de recursos hídricos del río Cabe, para el estado actual y de proyección al cambio climático.
- Evaluación del escenario de la gestión del agua en las garantías de la demanda en el sistema del río Colorado en Mexicali.

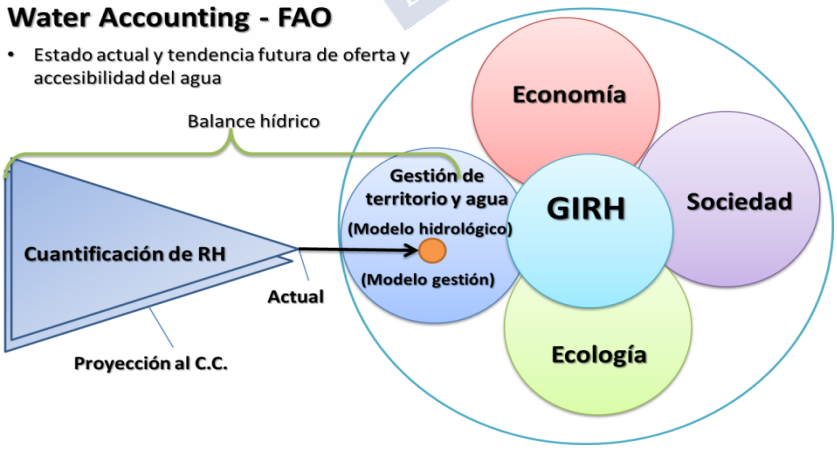


Figura 1-8 Esquema de relación entre propuesta de tesis y su contribución a la GIRH. Elaboración propia.

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

2 ESTADO DEL ARTE

La clara vinculación entre la climatología y los recursos hídricos, realiza el interés de presentar diferentes escenarios de simulación climática para evaluar los posibles efectos derivados.

2.1 ESCENARIOS DE EMISIÓN Y MODELOS DE SIMULACIÓN CLIMÁTICA

En la sección 1.2.1 del capítulo anterior se explicó la definición de lo que es un escenario climático y su diferencia con proyección climática. En esta sección se explican más ampliamente los escenarios de emisiones que son utilizados para la evaluación del clima futuro y realizar proyecciones climáticas.

El IPCC fue creado en 1988 para que facilitara evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta.

Tradicionalmente, los escenarios del Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (SRES en inglés) basados en modelos utilizados en la investigación del cambio climático, se han desarrollado utilizando un "proceso secuencial" centrado en una entrega de información paso a paso y que consume mucho tiempo entre disciplinas científicas separadas (Moss, et al., 2010). El equipo de SRES definió cuatro argumentos narrativos, etiquetados como A1, A2, B1 y B2, que describen las relaciones entre las fuerzas que impulsan las emisiones de gases de efecto invernadero y su evolución durante el siglo XXI a nivel mundial. Cada argumento representa

diferentes desarrollos demográficos, sociales, económicos, tecnológicos y ambientales (Nakicenovic, et al., 2000).

2.1.1 Escenarios de emisión del Quinto Informe de Evaluación del IPCC

En el Quinto Informe de Evaluación (AR5), el IPCC ha definido cuatro nuevos escenarios de emisión conocidos como trayectorias de concentración representativas (RCP). Éstos se identifican por expresar un forzamiento radiativo (FR) total para el año 2100 que varía desde 2,6 a 8,5 W/m^2. Los escenarios de emisión utilizados en el SRES no contemplaban los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales tendentes a mitigar las emisiones, representando posibles evoluciones socio-económicas sin restricciones en las emisiones. Por el contrario, algunos de los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XXI (IPCC-GTI, 2013). Ahora, los investigadores del cambio climático de diferentes disciplinas han establecido un nuevo "proceso paralelo" coordinado para desarrollar escenarios. Esto comienza con cuatro escenarios de futuros forzamientos radiativos (Moss, et al., 2010). Los RCPs se han desarrollado mediante modelos integrados de evaluación con datos para una amplia gama de simulaciones de modelos climáticos con objeto de proyectar sus consecuencias para el sistema climático (IPCC, 2014).

El "forzamiento radiativo", significa el cambio en la diferencia entre la cantidad de calor que entra en la atmósfera y la que sale de ella causada por cambios en los componentes atmosféricos, como el dióxido de carbono, en relación con el año 1750 (que es tomado como momento en que se inicia la revolución industrial). Un forzamiento positivo tiende a calentar el planeta, mientras que uno negativo tiende a enfriarlo (IPCC-GTI, 2013).

En cuanto a sus equivalencias, el RCP8.5 puede compararse en términos generales con el escenario A2/A1FI del SRES, RCP6.0 con B2 y RCP4.5 con B1. Respecto a RCP2.6, no hay un escenario equivalente en el Informe especial (IPCC, 2014). En la figura 2-1 se

muestra la gráfica con las similitud o equivalencia de la representación de concentración de CO_2 entre los RCPs y los SRES.

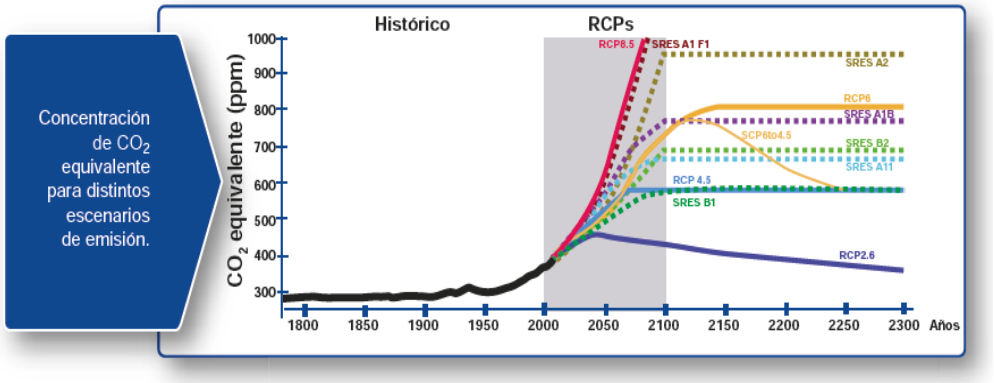


Figura 2-1 Concentración de CO_2 equivalente para los RCPs y SRES. Fuente (IPCC-GTI, 2013).

El RCP8.5 es una trayectoria de forzamiento radiativo, que alcanza más de 8.5 W/m^2 para el 2100. RCP4.5 es una trayectoria intermedia que no supera un nivel de estabilización de aproximadamente 4.5 W/m^2 (estabilización en 2100-2150). El RCP4.5 proporciona una buena relación señal/ruido y separación del RCP8.5. El RCP6 es una segunda trayectoria intermedia que no excede un nivel de estabilización de aproximadamente 6 W/m^2 (Moss, et al., 2008). En la figura 2-2 se encuentra la descripción de cada escenario RCP respecto a su forzamiento radiativo, tendencia a seguir del FR, y la concentración de CO2 del escenario esperada al año 2100.

	FR	Tendencia del FR	[CO_2] en 2100
RCP2.6	2.6 W/m 2	decreciente en 2100	421 ppm
RCP4.5	4.5 W/m 2	estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6.0 W/m 2	creciente	670 ppm
RCP8.5	8.5 W/m 2	creciente	936 ppm

Figura 2-2 Forzamientos radiativos, tendencia y concentración de CO_2 esperada al 2100 de los RCPs. Fuente (IPCC-GTI, 2013).

La comunidad del modelado del clima ha asignado un orden preferente a las ejecuciones de RCP (Moss, et al., 2008). El orden de prioridad para las simulaciones CM RCP es: primero: los RCP altos y bajos como mínimo (RCP8.5 y RCP2.6); y segundo el RCP de rango intermedio con resolución a corto plazo (RCP4.5); por último el RCP6.

Esta nueva generación de escenarios RCP mejora la comprensión de la sociedad sobre el clima plausible y el futuro socio-económico. La importancia de los nuevos escenarios se corresponde con la importancia del mayor nivel de comunicación y colaboración entre los diferentes grupos de investigadores. Aunque los escenarios no ofrecen una bola de cristal para el futuro, el nuevo enfoque coordinado para desarrollarlos y aplicarlos en el clima la investigación sobre el cambio arrojará información valiosa sobre la interacción de los procesos climáticos naturales y antropogénicos, y los posibles costos y beneficios de diferentes combinaciones de políticas de adaptación y mitigación (Moss, et al., 2010).

Sin embargo, existen fuentes de incertidumbre en las proyecciones de cambio climático que pueden agruparse en tres categorías principales: a) incertidumbre asociada al escenario, debida a las inciertas emisiones y concentraciones futuras de los gases de efecto invernadero y aerosoles; b) incertidumbre asociada a la modelización, debida a las limitaciones en nuestra comprensión del sistema climático y de su representación en los modelos climáticos, y c) incertidumbre asociada a la variabilidad natural, incertidumbre que surge de la variabilidad interna del sistema (IPCC, 2013).

2.1.2 Modelos de circulación global y regionalización dinámica

El IPCC define los modelos climáticos como una representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones de procesos de realimentación y que recoge todas o algunas de sus propiedades conocidas.

El sistema climático se puede representar mediante modelos de diverso grado de complejidad; para cada componente o conjunto de componentes es posible identificar un espectro o jerarquía de modelos que difieren en aspectos tales como el número de dimensiones espaciales, el grado en que aparecen representados explícitamente los procesos físicos, químicos o biológicos, o el grado de utilización de parametrizaciones empíricas (AEMET, 2017).

Los modelos climáticos han mejorado desde el Cuarto Informe de Evaluación (AR4). Los modelos reproducen patrones y tendencias de la temperatura en superficie a escala continental observados a lo largo de muchos decenios, en particular el calentamiento más rápido producido desde mediados del siglo XX y el enfriamiento que se produce inmediatamente tras las grandes erupciones volcánicas (IPCC, 2014).

Para tener en cuenta los diferentes balances de energía de estos entornos, el esquema de superficie de algunos modelos se representa en mosaicos y celdas. Cada celda se divide en varios mosaicos de acuerdo con el porcentaje de unas pocas clases amplias de vegetación o cobertura del suelo. A menudo, la vegetación y el uso del suelo o tierra muestran una considerable variación local dentro de una celda. Por ejemplo, puede haber mosaicos separados para bosques, lagos, áreas urbanas, terrenos abiertos, etc. El número de mosaicos diferentes, así como el nivel de detalle en la clasificación de la cobertura del suelo, difiere entre los diferentes modelos. Los balances de energía individuales de cada mosaico se agregan a un promedio de la malla de celdas. El principio de un esquema de superficie de suelo de mosaicos es la última generación (Climate4Impact, 2018). En la fig. 2-3, se muestra un esquema de cómo funcionan los modelos de simulación climática explicado anteriormente.

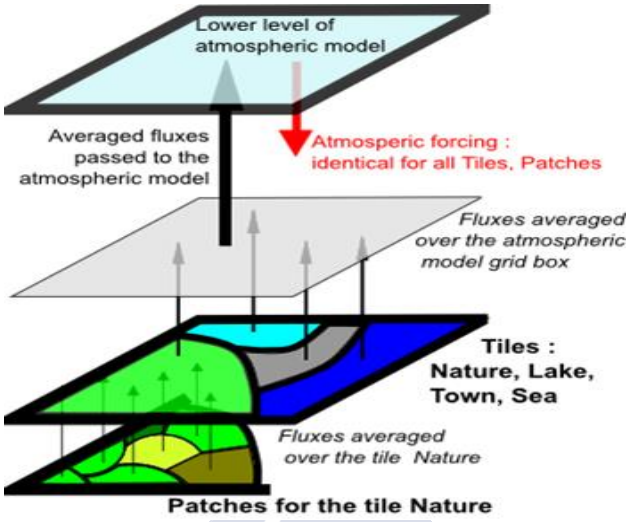


Figura 2-3 Esquema del funcionamiento de los modelos de simulacion climática. Fuente (Climate4Impact, 2018).

Los modelos de circulación general o global (GCM) (figura 2-4) son la herramienta más importante para las estimaciones en escenarios de cambio climático pero no representan bien escalas espaciales pequeñas. La producción de escenarios de alta resolución (reducción de escala) se realiza a partir de modelos climáticos regionales (RCM), anidados en GCM en un área limitada, es computacionalmente costosa y solo se justifica si los RCM mejoran la representación del clima regional simulado por los GCM (Eden, et al., 2014). Los RCM son una reducción de escala de los GCM a una extensión de menor tamaño pero de mayor resolución, que se realiza a través de la regionalización dinámica explicada en la sección 2.1.2.1.

Los GCM se basan en los principios físicos generales de la dinámica de fluidos y la termodinámica. Describen las interacciones entre los componentes del sistema climático global: la atmósfera, los océanos y una clasificación básica de la superficie terrestre (es decir, aspectos de la biosfera y la litosfera que son relevantes para la superficie balance de energía). A veces se les conoce como GCMs Atmósfera-Océano Acoplados (AOGCM) (climate4impact, 2011). El RCM es probablemente el método de reducción de escala dinámica

más ampliamente utilizado. El supuesto básico de este enfoque subyacente en que el AOGCM simula la respuesta de la circulación global a forzamientos radiativos a gran escala y el RCM simula el efecto de forzamientos regionales en la escala sub-GCM (Giorgi, 2008).

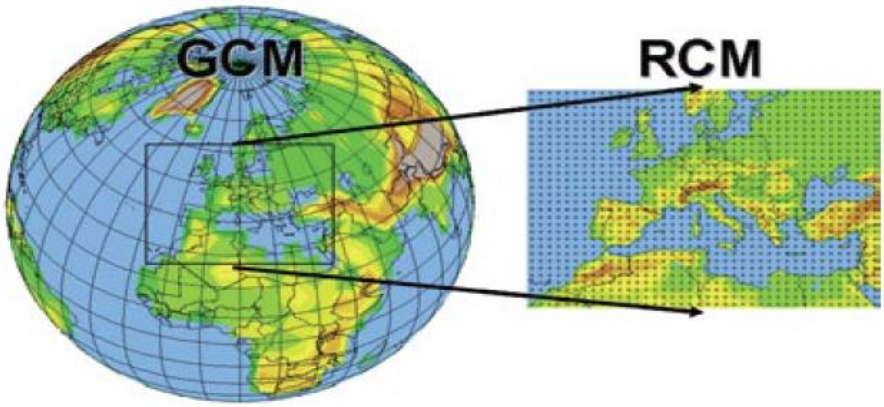


Figura 2-4. Representación esquemática del enfoque de GCM y RCM. Fuente (Giorgi, 2008)

La figura 2-5 muestra la secuencia de pasos necesarios para producir un escenario de cambio climático regionalizado para su uso en estudios de impacto en sus diversos temas. Primero, los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (GHG) son establecidos con la asunción del desarrollo socio-económico o escenarios de estabilización. Estos son entonces alimentados en los AOGCMs para producir simulaciones transitorias de cambio climático para el siglo XXI. Los resultados de estas simulaciones se incorporan a las herramientas de regionalización, que luego producen la información que ingresa a los modelos de impacto y eventualmente a los de planificación y adaptación. Cada paso en este proceso se caracteriza por cierto nivel de incertidumbre que se agrega en un proceso de cascada de un paso al siguiente. La mayor cantidad de incertidumbre se deriva del uso de los escenarios de gases de efecto invernadero,

diferentes configuraciones de modelos globales y diferentes modelos y métodos de regionalización (Giorgi, 2008).

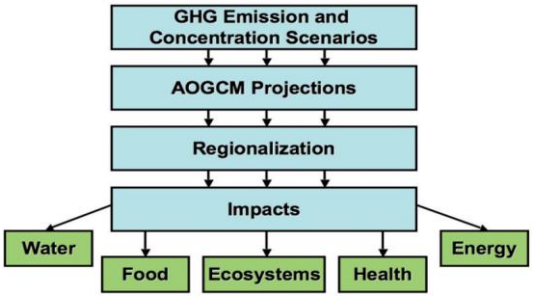


Figura 2-5 Representación esquemática de los pasos envueltos en la producción de información de cambio climático utilizable para trabajos de evaluación de impacto vía métodos de regionalización. Fuente (AEMET, 2017).

El GCM completo determina los efectos a gran escala del cambio de concentraciones de gases de efecto invernadero, erupciones volcánicas, etc. en el clima global. El clima (temperatura, viento, etc.) calculado por un GCM se usa como entrada en los límites del dominio simulado por RCM. Los RCM pueden resolver la información local en pequeña escala sobre la orografía (altura de la tierra), el uso de la tierra, etc., proporcionando información climática y climática a resoluciones menores de 50 o incluso 10 km (climate4impact, 2011).

2.1.2.1 Regionalización dinámica vs estadística

Se puede simular razonablemente bien el clima global aunque no se acierte a captar en la simulación los detalles del clima a escala regional. A pesar de que la resolución espacial de los modelos climáticos globales ha mejorado en el transcurso del tiempo, las escalas de su malla de resolución limitan la representación de algunas características importantes tanto regionales como locales y los procesos asociados a esas escalas. Esto puede repercutir de manera importante en determinadas variables como, por ejemplo, en la distribución local de la lluvia (AEMET, 2017). La regionalización o reducción de escala surge para tratar de paliar esas limitaciones de los modelos globales. La regionalización tiene sentido porque existe una conexión entre la gran escala y la pequeña escala, las escalas grandes

condicionan a las pequeñas. Las técnicas de regionalización pueden aplicarse espacial y temporalmente.

Los métodos de regionalización dinámicos tienen la ventaja de ser físicamente consistentes y la gran desventaja de ser muy costosos en tiempo de cálculo. Los métodos de regionalización estadísticos están basados en el desarrollo de relaciones estadísticas que vinculan las variables atmosféricas de gran escala (predictores) con las variables climáticas de escala local/regional (predictandos), relaciones que se suponen invariables frente al cambio de clima. Esta invariabilidad es una clara desventaja frente al grupo de métodos de regionalización dinámica, aunque, generalmente, sean poco costosos en tiempo de cálculo y relativamente simples. En todos los casos, la calidad del modelo climático global utilizado sigue siendo una importante limitación en la calidad de la información obtenida a escalas reducidas (AEMET, 2017).

El concepto de regionalización estadística de las proyecciones climáticas, básicamente se trata de establecer una serie de relaciones empíricas y/o estadísticas entre el predictando (variables locales de interés en la zona de estudio) y aquellas variables mejor simuladas (geopotencial, temperatura o parámetros derivados) por los modelos climáticos en baja resolución o predictores, con base en la idea que subyace en este tipo de técnica de regionalización de que el clima regional está condicionado por el estado climático a gran escala y las características fisiográficas regionales/locales. La regionalización estadística tiene la doble ventaja de ser computacionalmente más barata y de ajustarse mejor a escalas locales, facilitando la generación de conjuntos o ensambles con un número suficiente de miembros para poder explorar las incertidumbres. Entre los métodos de regionalización estadística, dos son los más utilizados, el método de regresión lineal múltiple y el método de análogos (AEMET, 2017).

La regionalización dinámica permite explotar la existencia de vínculos físicos y dinámicos entre el clima a gran escala y los procesos que ocurren a escalas más pequeñas. Esto puede hacerse, bien aumentando directamente la resolución de los modelos en el área

de interés, anidando un modelo de área limitada de alta resolución configurado para dicha área en el modelo climático de baja resolución. La principal ventaja de los RCM estriba en su mayor capacidad para representar los procesos atmosféricos de macro escala, y en un tratamiento mejor de los factores regionales responsables, en parte, de las características de las variables climáticas de interés. Además se pueden obtener regionalizaciones de todas las variables que generan los RCM y las variables mantendrán una coherencia física y espacial. Dado que la regionalización dinámica está ligada a los modelos climáticos globales, los errores de estos modelos se propagarán a través de la regionalización la incertidumbre y los errores de los GCM se seguirán manteniendo a las proyecciones regionalizadas de clima futuro (AEMET, 2017).

2.1.3 Modelos de simulación climática Euro-Cordex

Euro-Cordex es la rama del dominio europeo de la iniciativa internacional CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*), que es un programa del Programa Mundial de Investigación del Clima (WRCP) para organizar un marco coordinado internacionalmente para producir proyecciones regionales mejoradas de cambio climático para todas las regiones terrestres de todo el mundo. Los resultados de CORDEX servirán como insumo para el impacto del cambio climático y los estudios de adaptación dentro del calendario del AR5 del IPCC y más allá (Euro-Cordex, 2017). Las simulaciones de escenarios de Euro-Cordex utilizan las nuevas rutas de concentración representativas (RCP) definidas para el quinto informe de evaluación del IPCC (Moss, et al., 2010).

Jacob, et al., (2014) realizaron una comparación entre las proyecciones climáticas de Euro-Cordex con los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5, y los compararon con el conjunto de datos regionales de cambio climático de ENSEMBLES. Los patrones espaciales generales para los cambios de temperatura y precipitación y los índices relacionados son similares. Existe un alto grado de coherencia entre los conjuntos de los escenarios de emisión. En dicho estudio, concluyen que los resultados refuerzan claramente los

hallazgos previos obtenidos de los experimentos de datos ENSEMBLES.

La alta resolución en las simulaciones de Euro-Cordex es claramente visible en el patrón de cambio para eventos de fuertes precipitaciones. Esta información espacial es potencialmente muy útil para los estudios de impacto climático. Los patrones espaciales más detallados en las simulaciones de alta resolución pueden relacionarse con procesos físicos mejor resueltos, como la convección y la precipitación intensa, y debido a una mejor representación de las características de la superficie y su variabilidad espacial (Jacob, et al., 2014).

En el anexo digital AD-20 se presenta una relación detallada de los GCMs y RCMs utilizados en el proyecto Euro-Cordex, así como de los parámetros que manejan. En la tabla 2-1 se muestra la combinación de los modelos regionales y globales de CORDEX correspondientes al dominio Euro-Cordex (EUR-11) utilizado en las proyecciones regionalizadas por métodos dinámicos. Las columnas corresponden a: institución, modelo climático regional y modelo de circulación global.

Tabla 2-1. Combinación de instituciones y de los modelos regionales y globales utilizados en el dominio EUR-11. Fuente (AEMET, 2017)

Institución	Modelo Regional RCM	Modelo Global GCM
Climate Limited-area Modelling Community, (CLM-Community)	CCLM4-8-17	CNRM-CM5
Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rossby Centre, Suecia	RCA4	CNRM-CM5
Royal Netherlands Meteorological Institute, Holanda	RACMO22E	EC-EARTH
Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rossby Centre, Suecia	RCA4	IPSL-CM5A-MR
Climate Limited-area Modelling Community, (CLM-Community)	CCLM4-8-17	MPI-ESM-LR
Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rossby Centre, Suecia	RCA4	MPI-ESM-LR
Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Climate Service Center, Max Planck Institute for Meteorology, Alemania	REMO2009	MPI-ESM-LR

Climate Limited-area Modelling Community (CLM-Community)	CCLM4-8-17	MOHC-HadGEM2-ES
Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Rossby Centre, Suecia	RCA4	MOHC-HadGEM2-ES
Royal Netherlands Meteorological Institute, Holanda	RACMO22E	MOHC-HadGEM2-ES

2.1.4 Sesgo en modelos de simulación climática

El sesgo, en el contexto de la simulación de datos climáticos y/o estadísticos, se refiere al error sistemático del resultado de la generación de los datos. Los modelos climáticos se alimentan con datos de variables medidos en la realidad y arrojan resultados simulados de las mismas variables, generalmente con una diferencia de error metódico. Éste error es debido, entre otras causas, a la simplificación de los procesos físicos y termodinámicos, esquemas numéricos y al incompleto conocimiento de los procesos del sistema climático (Climate4Impact, 2018).

A pesar de un progreso considerable en los últimos años, los datos producidos por los modelos GCM como los RCM todavía están afectados por sesgos en un grado que imposibilita su uso directo, especialmente en los estudios de impacto del cambio climático. Esto es bien conocido y para superar este problema, la corrección de sesgo, es decir, la corrección de la salida del modelo hacia las observaciones en un paso posterior al procesamiento, que se ha convertido en un procedimiento estándar en los estudios de impacto del cambio climático (Ehret, et al., 2012).

El post-proceso puede reducir el sesgo GCM/RCM y puede ser considerado como una parte valida de la cadena del modelo cuando esta cumple los requerimientos que imponemos en la incorporación de cualquier componente del modelo: debería incrementar la consistencia (correspondencia entre las salida dinámica/producto del modelo y nuestro juicio), calidad (correspondencia entre la salida del modelo y las observaciones) y el valor (beneficio de la salida del modelo para los usuarios) del modelo (Ehret, et al., 2012).

Hoy en día, los investigadores de clima son conscientes de la incertidumbre involucrada en el modelado y de la necesidad de cuantificar la confiabilidad de la salida del modelo. Sin embargo, en muchos de estos estudios de impacto climático, el modelo hidrológico se ve forzado (alimentado) con datos de RCM, sin un intento de evaluar la calidad de los datos de RCM. Obviamente, la fiabilidad de la salida del modelo depende en gran medida de la calidad de los datos del clima (Terink, et al., 2010). Christensen y otros (2008) afirman que una fuente inherente de incertidumbre proviene de la incapacidad del RCM para simular con precisión las condiciones climáticas actuales. Por lo tanto, es de gran importancia que la producción del RCM se valide con observaciones históricas, antes de ejecutar el modelo hidrológico con los datos del RCM (Terink, et al., 2010). La aplicación de una corrección de sesgo a los datos de RCM, a menudo parece necesaria para unir los datos de RCM con las observaciones (Shabalova, et al., 2003) (Kleinn, et al., 2005) (Leander & Buishand, 2007).

Las razones más obvias del origen del sesgo en las salidas de los modelos, son las representaciones imperfectas de la física atmosférica del modelo (Maraun, 2012) y la incorrecta inicialización del modelo o errores en la cadena de parametrización. La cadena de procesos que conduce al clima modelo depende de la parametrización de varios procesos de todos los componentes del sistema del planeta Tierra, incluida la criosfera, la hidrosfera y la biosfera, así como la atmósfera con su fina escala, compleja turbulencia y microfísica de aerosol-nubes-precipitación (Ehret, et al., 2012).

Se tiene en cuenta que el concepto de “corrección de sesgo” no es indiscutible. Además de las cuestiones contenciosas que rodean a la corrección de sesgo, algunos investigadores argumentarían que la corrección de sesgo es distinta del uso de métodos de factor de cambio (por ejemplo, *delta change*). A pesar de que pueden producir resultados idénticos en ciertas situaciones idealizadas, normalmente no se esperaría que la corrección de sesgo reproduzca perfectamente el clima de referencia, por lo que no puede ofrecer un sustituto fiel (para

todas las variables y resoluciones de tiempo) para que las observaciones reales representen el clima actual.

Se consideran tres enfoques para afrontar el problema del sesgo. Primero, es reducir el sesgo mediante la mejora de los modelos de parametrización. Este es el más difícil pero, a largo plazo es el enfoque más prometedor y potencialmente confiable al ser el que está atado a las bases del modelo físico. El segundo, como la remoción completa del sesgo no es posible mediante un modelo determinístico único, se necesita una combinación de ensamble multi-modelo tanto para GCMs, RCMs, como para modelos hidrológicos. Este amplio ensamble es esencial para cuantificar la incertidumbre asociada con los resultados del estudio de impacto de cambio climático. Un tercer enfoque es llamado la corrección de la salida del modelo en etapa "post-proceso". El post-proceso puede reducir el sesgo GCM/RCM y puede ser considerado como una parte valida de la cadena del modelo cuando esta cumple los requerimientos que imponemos en la incorporación de cualquier componente del modelo: debería incrementar la consistencia (correspondencia entre las salida dinámica/producto del modelo y nuestro juicio), calidad (correspondencia entre la salida del modelo y las observaciones) y el valor (beneficio de la salida del modelo para los usuarios) del modelo (Ehret, et al., 2012).

Existe una numerosa cantidad de artículos y métodos de corrección de sesgos, una completa revisión puede ser consultada en (Themessl, et al., 2011). Para corregir el sesgo, por mencionar algunos de los métodos, se enlistan los siguientes: *monthly mean correction* (Fowler & Kilsby, 2007), *delta change method* (Hay, et al., 2000) *multiple linear regression* (Hay & Clark, 2003), *analog methods* (Moron, et al., 2008), *local intensity scaling* (Schmidli, et al., 2006), *quantile mapping* (Wood, et al., 2004) (Sun, et al., 2011), *fitted histogram equalization* (Piani, et al., 2010), *gamma-gamma transformation* (Sharma, et al., 2007).

En la figura 2-6 se ilustra el efecto que tiene el cambio en el resultado al proyectar datos de modelos a futuro con la corrección de

sesgo con datos observados y sin la corrección. Se puede observar que la diferencia del valor del eje *Y* es más amplia en los modelos sin corrección (línea punteada), que en los modelos corregidos (línea sólida). Esto se debe a que la corrección del sesgo se realiza con base a datos de un periodo de control en el modelo del presente y tiene una mejor representación a la realidad con un menor error sistemático. Al proyectar el modelo a un escenario futuro, se espera que el error del modelo corregido sea menor que el del modelo sin corregir.

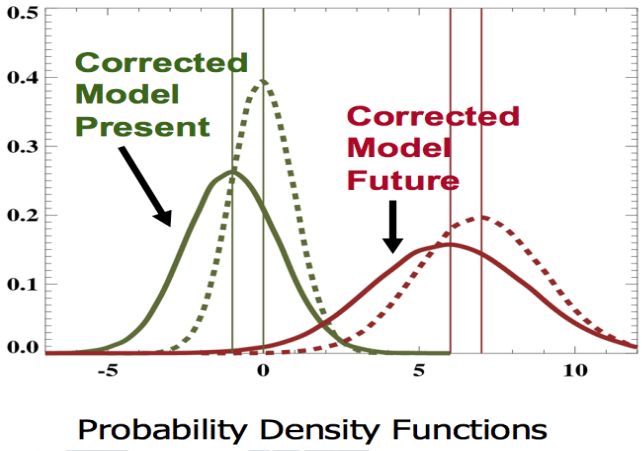


Figura 2-6 Ilustración del efecto de la corrección de sesgo en modelaciones a futuro. Fuente (Climate4Impact, 2018).

2.2 Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos

El ciclo hidrológico está estrechamente vinculado a los cambios de la temperatura atmosférica y al balance de flujo energía que circula a través de éste. Por tal motivo, el cambio climático ya sea natural o antropogénico, tiene ciertos efectos los recursos hídricos que se verán reflejados de distinta manera en cada región.

Las proyecciones multi-modelo del clima para el siglo XXI contemplan, en numerosas regiones, un aumento tanto de la intensidad de precipitación como del número de días secos consecutivos. La intensidad de precipitación aumenta casi por doquier, pero

particularmente en latitudes medias y altas en que aumenta también la precipitación media (Bates, et al., 2008).

En las zonas urbanas, las proyecciones indican que el cambio climático hará que aumenten los riesgos para las personas, los activos, las economías y los ecosistemas, incluidos los riesgos derivados del estrés térmico, las tormentas y precipitaciones extremas, las inundaciones continentales y costeras, los deslizamientos de tierra, la contaminación del aire, las sequías, la escasez de agua, la elevación del nivel del mar y las mareas meteorológicas (nivel de confianza muy alto). Los riesgos se agravarán para las personas que carezcan de infraestructuras y servicios esenciales o vivan en zonas expuestas (IPCC, 2014).

Se prevé que las zonas rurales se enfrenten a grandes impactos en cuanto a la disponibilidad y abastecimiento de agua, la seguridad alimentaria, la infraestructura y los ingresos agrícolas, incluidos cambios en las zonas de cultivos alimentarios y no alimentarios en todo el mundo (IPCC, 2014).

Existen muy pocas mediciones directas de la evapotranspiración real en las áreas terrestres de nuestro planeta, mientras que los productos de análisis de alcance mundial son sensibles al tipo de análisis y pueden incorporar grandes errores, por lo que no son adecuados para el análisis de tendencias. Por esa razón, son pocos los trabajos publicados sobre las tendencias observadas de la evapotranspiración, tanto real como potencial (Bates, et al., 2008).

También, son pocas las regiones que disponen de registros históricos de mediciones in situ del contenido de humedad del suelo, y en muchos casos su duración es muy corta (Bates, et al., 2008). Sobre un conjunto de más de 600 estaciones situadas en una amplia diversidad de climas, Robock et al. (2000) advirtieron que el contenido de humedad del suelo en superficie (0 a 1 m) exhibía una tendencia creciente a largo plazo durante los veranos en estaciones con registros más dilatados, ubicadas principalmente en la antigua Unión Soviética, China, y centro de Estados Unidos de América. Por otra parte, los registros más largos disponibles, referentes a Ucrania,

evidencian aumento generales de la humedad del suelo en superficie, aunque menos pronunciados en los últimos decenios.

2.2.1 Cambios en escorrentía y caudal fluvial

Son numerosos los estudios que han examinado las posibles tendencias del caudal fluvial observado durante el siglo XX, en escalas que van desde el nivel de cuenca hasta el nivel mundial. Algunos han detectado tendencias apreciables en ciertos indicadores de flujo, y otros han evidenciado vínculos, estadísticamente significantes, con las tendencias de la temperatura o de la precipitación. Otros muchos estudios, sin embargo, no han advertido tendencia alguna, o no han conseguido disociar los efectos de las variaciones de temperatura y precipitación de los efectos de la intervención humana en las cuencas (Bates, et al., 2008).

Las tendencias de la escorrentía no siempre concuerdan con los cambios de la precipitación. Ello puede deberse a limitaciones de los acervos de datos (en particular, la cobertura de los datos de precipitación), a los efectos de la intervención humana, por ejemplo mediante embalses (así sucede en los principales ríos de Eurasia), o a los efectos paralelos de los cambios de precipitación y temperatura (Bates, et al., 2008). Hay, sin embargo, evidencia mucho más robusta y extensa de que se ha alterado considerablemente la cronología de los flujos fluviales en muchas regiones en que las precipitaciones invernales son de nieve. Un aumento de la temperatura significa que una mayor proporción de las precipitaciones invernales cae en forma de lluvia en lugar de nieve, y que la temporada de deshielo se inicia antes. En áreas de Nueva Inglaterra, el deshielo se adelantó entre una y dos semanas en referencia al período 1936-2000 (Hodgkins, et al., 2003), aunque su efecto sobre los flujos de verano haya sido apenas discernible (Hodgkins, et al., 2005).

En la figura 2-7, Bates, et al., (2008) refleja los impactos futuros del cambio climático relacionados a las fuentes de agua dulce, mencionando las amenazas que algunas regiones en el mundo podrían enfrentar. En la región de la cuenca del río Colorado que comparten México y EUA, podría tener una disminución en los caudales que

impediría abastecer a la demanda de agua actual, en la región de España se vería amenazada la capacidad de producción de las centrales hidroeléctricas disminuyendo más de 25% y también una caída en las producciones agrícolas. En otras regiones enfrentarían otros problemas que varían desde menores recargas de acuíferos a problemas de incremento de inundaciones, mostrando así los cambios a nivel global que son esperados.

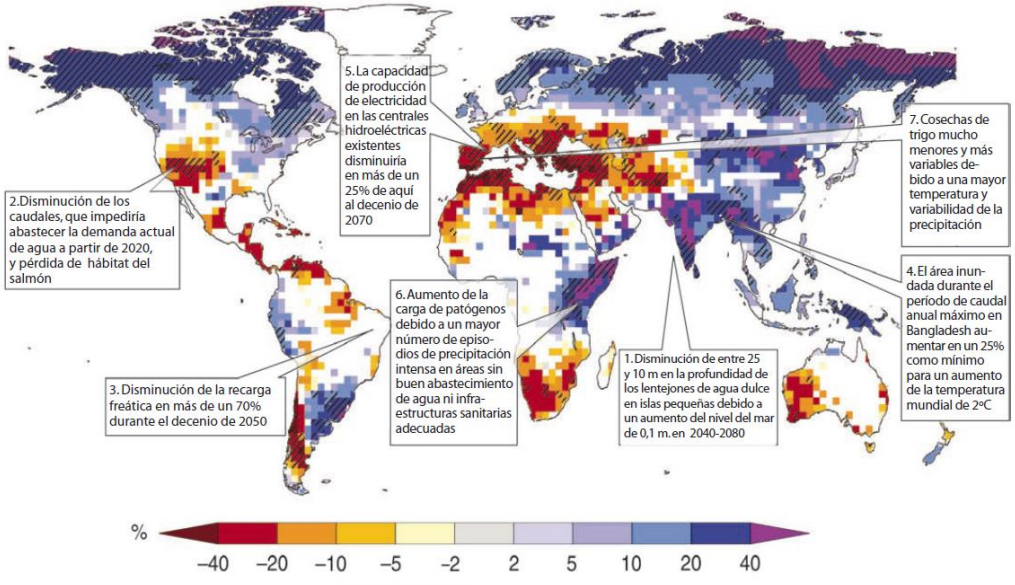


Figura 2-7. Mapa indicativo de los impactos futuros del cambio climático relacionados con el agua dulce que amenazan el desarrollo sostenible de las regiones afectadas. Fuente (Bates, et al., 2008).

Los valores de incertidumbre de los cambios proyectados para el sistema hidrológico reflejan la variabilidad interna del sistema climático, la incertidumbre de las futuras emisiones de gases invernadero y aerosoles, la traslación de estas emisiones al cambio climático mediante modelos climáticos, y la incertidumbre de los modelos hidrológicos. Respecto a otros aspectos del ciclo hidrológico, como los cambios de evaporación, humedad del suelo o escorrentía, la dispersión relativa de las proyecciones es similar o superior a los cambios de precipitación (Bates, et al., 2008).

La incertidumbre respecto a los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, las sequías y las crecidas, se debe a varias razones, en particular a las diferencias entre los escenarios de desarrollo económico, de emisiones de gases invernadero y de modelos climáticos e hidrológicos. Sin embargo, no existe todavía ningún estudio que evalúe en qué manera reaccionan diferentes modelos hidrológicos ante una misma señal de cambio climático (Bates, et al., 2008). Otro aspecto sobre a los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos se derivan principalmente de la incertidumbre existente respecto a los aportes de precipitación y, en menor medida, de las incertidumbres respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero (Döll, et al., 2003; Arnell, 2004), o respecto a las sensibilidades climáticas (Prudhomme, et al., 2003), o de la sensibilidad inherente a los propios modelos hidrológicos (Kaspar, 2003).

2.3 LAGUNAS DE CONOCIMIENTO SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS

La capacidad para cuantificar los cambios futuros de las variables hidrológicas, así como sus impactos sobre los sistemas y sectores, está limitada por la incertidumbre en todas las etapas del proceso de evaluación. La incertidumbre refleja la horquilla de escenarios de desarrollo socioeconómico, la horquilla de proyecciones de modelos climáticos para un escenario dado, la reducción de escala de los efectos del clima a escala local/regional, las evaluaciones de impacto y los retroefectos de las actividades de adaptación y mitigación. Las limitaciones de que adolecen las observaciones y nuestros conocimientos limitan nuestra capacidad actual para reducir esas incertidumbres. La toma de decisiones ha de desenvolverse en el contexto de esa incertidumbre. El desarrollo de métodos robustos para la evaluación de riesgos en base a esas incertidumbres apenas ha comenzado (Bates, et al., 2008).

Es necesario mejorar los datos observacionales y su accesibilidad para conocer más a fondo los cambios que están sucediendo, y para acotar mejor las proyecciones de los modelos; tales datos son imprescindibles para una gestión adaptativa frente a la eventualidad de

un cambio climático. Para avanzar en esa dirección es necesario disponer de más datos (Bates, et al., 2008).

Numerosas variables hidrometeorológicas (por ejemplo, el flujo fluvial, la humedad del suelo o la evapotranspiración real) no son adecuadamente medidas. La evapotranspiración potencial suele calcularse en base a parámetros tales como la radiación solar, la humedad relativa o la velocidad del viento. Los registros suelen abarcar períodos muy cortos y un escaso número de regiones, lo cual impide un análisis completo de los cambios experimentados por las sequías (Bates, et al., 2008).

Sigue habiendo un desajuste entre los resultados de los modelos climáticos de gran escala y los resultados a escala de cuenca de captación, que es la más importante para la gestión hídrica. Se necesitan, por consiguiente, modelos climáticos de resolución superior que incorporen una mayor riqueza de propiedades y de interacciones en la superficie de la tierra, a fin de obtener información de mayor utilidad para la gestión hídrica. La reducción de escala en términos estadísticos y físicos puede contribuir a ello (Bates, et al., 2008).

Son relativamente escasos los resultados disponibles con respecto a los aspectos socioeconómicos de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos, y en particular con respecto a los impactos del cambio climático sobre la demanda de agua (Bates, et al., 2008).

Deberían analizarse más a fondo los retroefectos entre el uso de la tierra y el cambio climático (incluidos el cambio de la vegetación y las actividades antropógenas, como el riego o la construcción de reservorios); por ejemplo, mediante la modelización acoplada del clima y del uso de la tierra (Bates, et al., 2008).

2.4 MODELOS PARA LA SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

De acuerdo con Sorooshian et al. (2008), un modelo es una representación simplificada del sistema del mundo real. El mejor modelo es el que da resultados cercanos a la realidad con el uso de los parámetros mínimos y la complejidad del modelo. Los modelos se usan principalmente para predecir el comportamiento del sistema y

comprender diversos procesos hidrológicos. Un modelo consta de varios parámetros que definen las características del modelo. Un modelo de escorrentía se puede definir como un conjunto de ecuaciones que ayuda a estimar la escorrentía en función de varios parámetros utilizados para describir las características de la cuenca. Las dos entradas importantes requeridas para todos los modelos son los datos de lluvia y el área de drenaje. Junto con esto, también se consideran las características de las cuencas hidrográficas, como las propiedades del suelo, la cubierta vegetal, la topografía de la cuenca, el contenido de humedad del suelo y las características del acuífero subterráneo. Los modelos hidrológicos son hoy en día considerados como una herramienta importante y necesaria para el manejo de recursos hídricos y ambientales.

En general, los modelos de precipitación-escorrentía son las herramientas estándar utilizadas para investigar los procesos hidrológicos. Se ha desarrollado una gran cantidad de modelos con diferentes aplicaciones que van desde pequeñas captaciones hasta modelos globales. Cada modelo tiene sus propias características únicas y sus respectivas aplicaciones. Algunos de ellos son completos y utilizan la física de los procesos hidrológicos subyacentes y se distribuyen en el espacio y el tiempo. Cada modelo tiene varios inconvenientes como la falta de facilidad de uso, los grandes requisitos de datos, la ausencia de declaraciones claras de sus limitaciones, etc. Para superar estos defectos, es necesario que los modelos incluyan avances en tecnologías de teledetección, análisis de riesgos, etc. Mediante la aplicación de nuevas tecnologías, nuevos modelos distribuidos pueden ser desarrollados para el modelado de cuencas calibradas y no calibradas (Gayathri, et al., 2015).

La evaluación de los recursos hídricos requiere la realización de balances en las diferentes componentes del ciclo hidrológico. Para ello, las ecuaciones del balance deben normalmente resolverse utilizando programas de cálculo numérico. La estimación de la recarga de los acuíferos requiere utilizar métodos de balance (Custodio, et al., 1997). Los resultados de los balances deben ser contrastados y calibrados con datos de oscilaciones piezométricas y de aforos en los

puntos de salida de la cuenca. También es recomendable comprobar su coherencia con los resultados obtenidos con métodos hidroquímicos e isotópicos y con modelos numéricos de flujo en el acuífero. Los métodos de balance, sin embargo, tienen algunas limitaciones causadas fundamentalmente por las dificultades e incertidumbres existentes en la estimación de ciertos parámetros y componentes del balance, especialmente la reserva útil y la evapotranspiración real (Samper, et al., 2005).

2.4.1 Tipos de modelos

Los modelos de precipitación-escorrentía se clasifican en función de la entrada de parámetros del modelo y la extensión de los principios físicos aplicados. El modelo determinístico dará la misma salida para un solo conjunto de valores de entrada, mientras que en los modelos estocásticos, diferentes valores de salida se pueden producir para un solo conjunto de entradas. Según Moradkhani (2008) en modelos concentrados, toda la cuenca hidrográfica se toma como una sola unidad donde se descarta la variabilidad espacial y, por lo tanto, los resultados se generan sin considerar los procesos espaciales donde un modelo distribuido puede hacer predicciones distribuidas en espacio dividiendo toda la cuenca en unidades pequeñas, generalmente celdas cuadradas o red triangular irregular, de modo que los parámetros, entradas y salidas pueden variar espacialmente. Otra clasificación son los modelos estáticos y dinámicos basados en el factor tiempo. El modelo estático excluye el tiempo mientras que el modelo dinámico incluye el tiempo. Sorooshian et al. (2008) clasificaron los modelos como modelos basados en eventos y continuos. El primero produce información solo para períodos de tiempo específicos, mientras que el último produce una información continua. Una de las clasificaciones más importantes es el modelo empírico, los modelos conceptuales y los modelos de base física, como se muestra en la tabla 2-2.

Tabla 2-2. Características de los tipos de modelos hidrológicos. Adaptado de (Gayathri, et al., 2015)

Modelos empíricos (Modelos métricos)	Modelos conceptuales (Modelos paramétricos)	Modelos de base física
Modelo basado en datos métricos o caja negra.	Modelo paramétrico o caja gris.	Modelo mecánico o caja blanca.
Implica ecuaciones matemáticas, valores derivados de series temporales disponibles.	Basado en la modelación de reservorios e incluye ecuaciones semi-empíricas con base física.	Basado en distribución espacial, evaluación de parámetros describiendo características físicas.
Pequeñas consideraciones de características y procesos del sistema.	Parámetros son derivados de datos de campo y calibración.	Requiere datos de estado inicial del modelo y morfología de la cuenca.
Poder predictivo alto, profundidad explicativa baja.	Simple y puede ser implementado en código computacional.	Modelo complejo, requiere experiencia humana y capacidad computacional.
No puede ser generado para otras cuencas.	Requiere gran cantidad de datos hidrológicos y meteorológicos.	Sufre de problemas relacionados a la escala.
Ejemplos: RNA[1], unidad hidrográfica.	Ejemplos: Modelo HBV, TOPMODEL.	Ejemplos: SHE o MIKESHE, SWAT[2].
Valido dentro de los límites de un dominio dado.	La calibración implica una curva de ajuste, que dificulta la interpretación física.	Valido para un amplio rango de situaciones.

2.5 MODELOS DE SIMULACIÓN GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Los modelos para la simulación de gestión de recursos hídricos son la herramienta actual más importante para evaluar las alternativas y propuestas cuando se busca una solución ante una problemática de gestión en la cuenca. Esto es de gran ayuda, ya que este tipo de acciones resultaría casi imposible replicar en la realidad de forma iterativa. Con estas herramientas de simulación, una vez que se ha montado el escenario real como un esquema, es posible visualizar los efectos de las acciones en sus diferentes elementos.

[1] Red Neuronal Artificial

Un sistema de cuenca fluvial se compone de tres componentes básicos: 1) componentes de fuentes de agua, 2) componentes de demanda consuntivos y no consuntivos, y 3) componentes intermedios. Los componentes de fuentes de agua son ríos, canales, embalses y acuíferos; los componentes de la demanda consuntivos son campos de riego, plantas industriales y ciudades; los componentes de la demanda no consuntivos son la energía hidroeléctrica, la recreación, el medio ambiente; los componentes intermedios son las plantas de tratamiento, la reutilización del agua y las instalaciones de reciclaje. La gestión del agua implica el desarrollo, el control, la protección, la regulación y el uso beneficioso de las fuentes de agua al satisfacer las demandas de agua de manera eficiente. Las relaciones esenciales dentro de cada componente y las interrelaciones entre estos componentes en la cuenca se pueden considerar en un marco de modelado integrado que puede proporcionar información esencial para los encargados de políticas en sus decisiones de asignación de recursos (Islam, 2011).

La simulación y la optimización son los dos enfoques principales para el modelado de cuencas hidrográficas. En la simulación, el comportamiento de los recursos hídricos se simula en función de un conjunto de reglas que rigen las asignaciones de agua y la operación de la infraestructura, mientras que en la optimización, las asignaciones se optimizan en función de una función objetiva y restricciones asociadas (McKinney, et al., 1999). La gestión de los recursos hídricos implica la identificación y el desarrollo de inversiones en proyectos de recursos hídricos que maximizan los beneficios netos o al menos minimizan los costos, al tiempo que consideran los impactos no valorizados, como la posible degradación de los ecosistemas o los impactos sociales negativos (Mayer & Muñoz-Hernandez, 2009).

Una serie de autores han revisado previamente los modelos de gestión de recursos hídricos. McKinney et al. (1999) revisaron la modelización de la gestión de los recursos hídricos a nivel de la cuenca, Mayer y Muñoz-Hernández (2009) revisaron los modelos integrados de optimización de los recursos hídricos, Hajkowicz & Collins (2007) revisaron el análisis de múltiples criterios para la

planificación y gestión de los recursos hídricos, Rani & Moreira (2010) revisaron varias técnicas de optimización utilizadas en el modelado de la gestión de los recursos hídricos para la operación del sistema de reservorios. Según Islam (2011), los modelos de gestión se pueden clasificar como:

- Modelos de optimización basados en maximización de beneficios económicos.
- Modelos de optimización basados en minimización de costos de flujo.
- Modelos de gestión de recursos hídricos basados en sistemas dinámicos.

2.5.1 Enfoque de la maximización del beneficio económico

En este enfoque, el modelo de cuenca fluvial se desarrolla como una red de enlace de nodos que representan las relaciones espaciales entre varias componentes físicas de la cuenca, donde los nodos representan ríos, reservorios y sitios de demanda, y los enlaces representan las conexiones entre estas entidades. El objetivo general de este tipo de modelo de gestión es asignar agua en función de maximizar las ganancias netas anuales del uso, ya sea el agrícola, el uso residencial, el uso industrial, el uso para energía hidroeléctrica, el agua asignada para el funcionamiento del ecosistema y uso recreativo, etc. (Islam, 2011).

2.5.2 Enfoque de minimización de costo de flujo

En este enfoque, la región modelada se traduce en una red compuesta por nodos interconectados por enlaces de flujo para representar canales físicos. Cada nodo (distinto de la unión) o el enlace de flujo en la red, representa uno de los componentes del modelo. Los nodos se utilizan para representar puntos de entrada, desviación, almacenamiento o consumo. Los enlaces de flujo definen la dirección del movimiento del agua superficial de una ubicación a otra (por ejemplo, alcances de ríos, canales de desviación y canales de flujo de retorno) (Islam, 2011).

La asignación de agua o la prioridad de suministro, se establece en varios grupos de usuarios de agua y la asignación de recursos hídricos se realiza para maximizar el suministro a todos los usuarios de acuerdo con sus prioridades respectivas. Todos los flujos en la red están ponderados por un costo unitario que puede variar entre arcos y la optimización se realiza minimizando el costo general del flujo. Los costos incluyen pérdidas económicas convexas para las regiones agrícolas y urbanas, costos de calidad del agua urbana para salinidad y tratamiento, y costos de bombeo y otros costos operativos (Islam, 2011).

2.5.3 Enfoque de modelado de sistema dinámico

En el enfoque de modelado de sistemas dinámico (SD), los modelos cualitativos y cuantitativos se crean para captar las interrelaciones de los procesos físicos (por ejemplo, las entradas y salidas de agua) y el comportamiento (por ejemplo, las reglas de decisión, las percepciones) en el sistema. Es una metodología rigurosa para pensar, visualizar y comunicar sobre la evolución futura de sistemas complejos que proporciona un marco de modelos orientado a la retroalimentación para aprender y comunicar sobre la complejidad inherente de la gestión del agua y se ha aplicado ampliamente en muchos problemas ambientales, incluida la gestión del agua. El modelado de SD consta de diferentes fases, como definición de problemas, conceptualización de sistemas, formulación de modelos, evaluación/prueba de modelos, análisis e implementación de políticas (Islam, 2011).

2.5.4 Técnicas de optimización

Las diferentes técnicas de optimización comúnmente utilizadas en estudios de gestión de recursos hídricos según Islam (2011), se muestran en la tabla 2-3, que se resumen las ventajas y desventajas, así como la descripción de cada una de las técnicas, como son programación lineal (LP), programación de red de flujo (NFP), programación no lineal (NLP), programación dinámica (DP) y algoritmo genético (GA).

Tabla 2-3 Ventajas y desventajas de las técnicas de optimización de sistemas para la gestión de recursos hídricos. Fuente (Islam, 2011).

Técnica	Ventaja	Desventaja
LP	- Flexible para la aplicación para problemas a gran escala. - Converge para una solución óptima global. - Tiene paquetes de software eficientes disponibles.	- Restringido para usar funciones objetivas y restricciones lineales y convexas.
NFP	- Muy adecuado para sistemas de embalse. - Más rápido que los solucionadores Simplex estándar. - Pueden simplemente manejar flujo de restricciones. - Considerado como un buen vehículo para manejar restricciones que no son de red.	- Cualquier restricción de ruta de flujo que es actualizada a través de llamadas iterativas del solucionador del NFP puede fallar para entregar soluciones razonables. - NFP basado en esquemas iterativos podría fallar debido a un simple embalse con múltiples flujos de salida.
NLP	- Problemas con suavizar problemas no lineales y restricciones pueden ser resueltos.	- En métodos largos y altamente no lineales, NLP puede fallar para encontrar soluciones factibles o convergir al punto local más cercano al punto de inicio.
DP	- Son eficientes en realizar una secuencia de decisiones interrelacionadas. - Muy bien adecuado para estudiar problemas operacionales de embalses. - No restringido a ninguna estructura de problema en particular y puede manejar funciones objetivo no lineales y restricciones no lineales.	- Requiere más esfuerzo computacional. - Quizás termina en un óptimo local.
GA	- Son más como para lograr un óptimo global cercano o soluciones óptimas globales. - Capaz de tratar con diferentes problemas usando la misma computadora. - Naturaleza paralela de GA permite procesos paralelos.	- Para soluciones inviables de problemas altamente restrictivos podría tomar una relativamente a gran porción en población.

2.6 SITUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN ESPAÑA Y MÉXICO

Hidrológicamente hablando, España y México comparten similitudes en cuanto a la variabilidad de los recursos hídricos a lo largo de su extensión territorial. Por un lado, el norte de España es húmedo con abundante agua mientras que el sur es seco y con

limitaciones en el recurso hídrico. Para México es a la inversa, con el norte árido y el centro-sur húmedo. Como contraste, la extensión territorial de España es de 505, 370 km^2, mientras que México cuenta con 1, 964, 375 km^2 (3.9 veces más extenso que España).

2.6.1 Los recursos hídricos en España

En España, tres aspectos definen la irregularidad hidrográfica que presenta su hidrología, la irregularidad en la distribución espacial, temporal, y la ocurrencia de avenidas con caudales enormes con respecto a la media, presentando así el sistema hidrográfico español numerosas peculiaridades y fuertes contrastes (Martínez De Teresa, 2015).

Un rasgo peculiar de esta es la frecuente presencia de corrientes efímeras, existiendo tramos continuos con caudales permanentes y otros intermitentes con caudales efímeros en un mismo río. Se observa que no todas las escorrentías discurren hacia la red fluvial, existiendo numerosas áreas cerradas de carácter endorreico o semiendorréico, donde las aguas se retienen hasta perderse por evaporación o infiltración. En muchos casos, el 70% de la aportación anual a los ríos se concentra durante unos pocos meses, e incluso en uno solo, dando lugar a episodios de avenidas (Martínez De Teresa, 2015).

Por un lado, en sector septentrional y noroccidental de España, abundan de forma natural los recursos, son regulares y no son limitantes. Para el sector central las precipitaciones son modestas y hay situaciones de aridez en las cuencas más continentales. Hay aportaciones desde los sistemas montañosos. Por otro lado, en las grandes cuencas interiores, los recursos abundan de forma global pero de forma local y pueden tener problemas de escasez. Los recursos pueden ser limitantes en las cuencas más meridionales (Guadalquivir). Por último, en el sector mediterráneo, se tienen precipitaciones modestas e irregulares (sequías). Los recursos subterráneos son importantes y hay una escasez natural de recursos siendo más acusado en el ámbito sudoriental (Martínez De Teresa, 2015).

En la figura 2-8 se muestran los datos contrastantes de los recursos hídricos dentro de España, con la amplia diferencia en la

precipitación media anual entre Vigo (noroeste) y Almería (sureste) de 1909 y 196 mm. También se nota la diferencia en la escorrentía del norte en Cantabria de 700 mm de escorrentía media anual y en la demarcación del río Segura al sureste con menos de 50 mm.



La hidrología española, en cifras	
Superficie	509.000 km²
Precipitación media anual	649 mm
Precipitación media anual Vigo (NO de España)	1.909 mm
Precipitación media anual Almería (SE de España)	196 mm
Escorrentía media anual	220 mm
Escorrentía media anual cornisa cantábrica (N de España)	700 mm/año
Escorrentía media demarcación del Segura (SE de España)	<50 mm

Figura 2-8 Cifras de la hidrología española. Fuente (MITECO, 2018)

En la figura 2-9 se puede observar la variabilidad de la distribución de la precipitación a lo largo del territorio español, con el norte principalmente muy lluvioso con media en las precipitaciones de hasta 2600 mm y el sur y este con media de entre 500 y 100 mm.

La mayor parte de los recursos hídricos en España se destinan al uso agrícola con el 68% de media, seguido del uso industrial con 17.6% y el abastecimiento público con 14.2%. España ocupa el lugar 21 mundial (tabla 2-4) en extracción de agua del medio ambiente con 37.35 mil millones de metros cúbicos al año (37,350 Hm^3/año). Cabe señalar la similitud entre México y España en el porcentaje que destinan al abastecimiento público es de alrededor del 14%, así como la diferencia radica entre el uso agrícola y el uso industrial, donde España destina cerca del 18% a la industria.

Tabla 2-4 Extracción de agua y sus porcentajes de uso para España y México. Fuente (CONAGUA, 2018).

No	País	Extracción total de agua (miles de millones de m^3/año)	% Uso agrícola	% Uso industrial	% Uso abastecimiento público
7	México	87.84	76.0	9.6	14.4
21	España	37.35	68.2	17.6	14.6

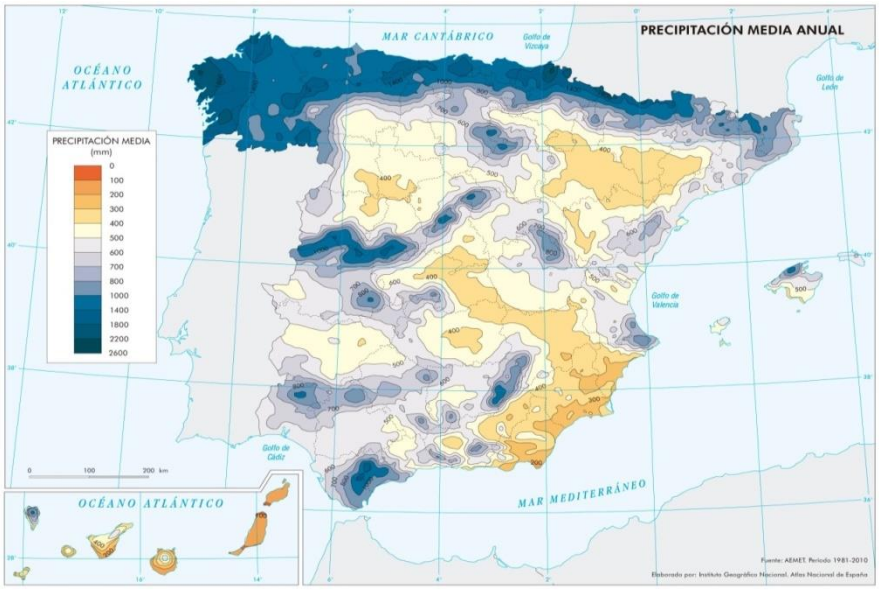


Figura 2-9 Precipitación media anual en España de 1981 a 2010. Fuente (IGN, 2016)

2.6.2 La gestión de los recursos hídricos en España

La gestión del agua a nivel de cuenca en España no es nueva. Algunos países, como por ejemplo España y Francia, han practicado la gestión del agua en cuencas durante décadas. España ha tenido nueve Confederaciones Hidrográficas durante más de 75 años (INBO;GWP, 2009). En 1926 se aprobó el Decreto-Ley de la creación de Confederaciones Hidrográficas, siendo la del Ebro la primera de ellas. Estos son los organismos públicos que administran y gestionan el agua en las cuencas que abarcan el territorio de las comunidades autónomas (Fanlo, 2016).

La disponibilidad de agua en España alcanza un 8% de los recursos existentes de forma natural en la red hidrográfica, esto sin alterarse el régimen natural. En los demás países europeos, el aprovechamiento en régimen natural alcanza un 40% de sus recursos hídricos. Esto explica la característica principal de la política del agua en España en el siglo XX: “la política de obras hidráulicas”. Los

proyectos nacionales de obras fueron el Plan Nacional de Canales de Riego y Pantanos de 1902 y el Plan Nacional de Obras Hidráulicas de 1933, como destino principal el regadío y la producción de energía hidroeléctrica (Fanlo, 2016).

En España se debieron construir casi 1,200 embalses de regulación, así como grandes canales de riego para aumentar la disponibilidad de agua del 8% a una oscilación entre 37 y 47% de recursos hídricos. Esto es lo que se conoce como la política de oferta, como respuesta a las condiciones hídricas naturales poco favorables (Fanlo, 2016).

Sin embargo, los desequilibrios hídricos territoriales de España generaron "la política de transferencia de recursos" entre diferentes cuencas hidrográficas, la más importante de ellas es la del acueducto Tajo-Segura. Estas medidas rompen el principio de unidad de gestión de cuenca, que suscita un intenso debate social y político (Fanlo, 2016). En la tabla 2-5 se resume las funciones principales asociadas la al gestión del agua en el territorio de España y la dependencia gubernamental que atiende tal función, tabla que ha sido extraída de una tabla comparativa entre varios países en INBO; GWP (2009).

España y Portugal cuentan con una extensa tradición de cooperación bilateral en las cinco cuencas transfronterizas que comparten (Miño, Limia, Duero, Tajo y Guadiana). Un tratado firmado en 1864 estableció las fronteras internacionales de los ríos, e hizo hincapié en la importancia de emplear recursos hídricos transfronterizos para beneficio de ambos países. El acuerdo inicial fue seguido por otros tratados y acuerdos bilaterales, como los firmados en 1866, 1906 y 1912. El Convenio de Albufeira, firmado en 1998 en concordancia con los principios de la Directiva Marco del Agua, busca equilibrar la protección ambiental con el desarrollo sostenible de los recursos hídricos en ambos países. España y Portugal habrán de coordinar sus respectivos esfuerzos de gestionar el agua en las cuencas compartidas (INBO;GWP, 2009).

Tabla 2-5 Organización de la gestión del agua en España. Adaptado de (INBO;GWP, 2009).

Función	Dependencia gubernamental
Políticas hídricas - autorización (descargas, extracciones)	Organismo de cuenca – Confederación
Registro de usuarios	Organismo de cuenca – Confederación
Planificación estratégica a largo plazo (plan maestro)	Organismo de cuenca – Confederación
Gestión de concesiones a grandes empresas (ventas de agua sin procesar)	Organismo de cuenca – Confederación
Aplicación de cargos del agua (contaminación , extracción), plan de acción de cuenca	Organismo de cuenca – Confederación
Suministro de agua potable y saneamiento (comunidad)	Municipalidades y Autoridades Autónomas
Riego (comunidad)	Asociaciones – Comunidad de regantes
Monitoreo, datos	Organismo de cuenca – Confederación y Autoridades autónomas

El marco jurídico de la gestión del agua en España está disperso en un extenso conjunto de normas europeas, donde destaca la Directiva Marco del Agua del año 2000, normas estatales y regionales, en las que destaca la Ley de Aguas de 2003 y sus dos reglamentos de desarrollo (el del Dominio Público Hidráulico de 1986 y el de la Administración Pública del Agua de 1988) (Fanlo, 2016).

El proceso de planificación hidrológica en todo el ámbito de la Unión Europea se enmarca y realiza de acuerdo con los criterios establecidos por la Directiva Marco del Agua (DMA). Esta Directiva fue traspuesta al ordenamiento jurídico español mediante la Ley 62/2003 del 30 de diciembre, de medidas fiscales, administrativas y del orden social, que modificaba tanto el texto refundido de la Ley de Aguas como la Ley del Plan Hidrológico Nacional. De acuerdo con la DMA, el proceso de planificación se establece mediante ciclos de seis años (MITECO, 2019).

2.6.3 Galicia: recursos hídricos y Cambio climático

Galicia, es una comunidad autónoma española situada en el extremo noroeste de la península Ibérica. Limita al norte con el mar

Cantábrico y al oeste con el océano Atlántico. Las comunidades autónomas del Principado de Asturias y Castilla y León constituyen su confín oriental. Al sur, el río Miño traza parte de su frontera con Portugal. Galicia pertenece a la llamada Iberia húmeda de clima oceánico, que se caracteriza por la regularidad de las precipitaciones a lo largo del año (entre 1,000 y 1,500 mm anuales repartidos por toda la comunidad), temperaturas suaves y una oscilación térmica anual reducida (8.8 °C en Finisterra, y 15.5 °C en Ourense) (Álvarez, et al., 2011).

La Comunidad autónoma de Galicia se compone de la hidrografía de tres demarcaciones hidrográficas intercomunitarias, siendo la del Cantábrico Occidental, la del Duero y la del Miño-Sil, así como de una intracomunitaria denominada Galicia-Costa. Dos ríos constituyen fronteras administrativas que se reparten la propiedad de sus vertientes: en el margen del Este, el río Eo hace frontera con Asturias y al Oeste el bajo Miño con Portugal. En conjunto todos los ríos son de régimen pluvial oceánico: abundante caudal, regularidad, crecidas invernales y sólo pequeños estiajes. Algunos de los que nacen en las montañas orientales participan de un régimen pluvionival oceánico.

En el estudio realizado Álvarez, et al. (2011) se evaluaron los impactos del cambio climatico en la comunidad de Galicia. Se han utilizado como GCM el ECHAM5, desarrollado por el Instituto Max Planck de Meteorología de Hamburgo, cuyos resultados en las latitudes medias del Atlántico norte son muy destacables. En cuanto a la ejecución del RCM escogido fue el RCA, desarrollado en el *Rossby Center* del centro meteorológico de Suecia. Los otros dos GCM's utilizados fueron el modelo del *Hadley Center* inglés de alta resolución HADCM3 y el desarrollado por el instituto *Bjerknes* de Noruega BCM.

En cuanto al acierto relativo que el HADCM3 y el BCM tienen en la simulación del clima actual en el área de Galicia, cabe decir que el modelo desarrollado por el *Hadley Center* presenta un buen comportamiento, mientras que el BCM daría un comportamiento no

tan bueno, pero en todo caso aceptable dentro de los parámetros propuestos por van Ulden & van Oldenborgh (Álvarez, et al., 2011).

En los resultados de Álvarez, et al. (2011), se refleja la alta dependencia que la precipitación tiene de las condiciones locales del área de estudio (orografía, parametrizaciones de convección…), dependencia que no se observó en la temperatura más influenciada por las condiciones de escala sinóptica.

2.6.3.1 Cambios en la temperatura por cambio climático

Estos mapas (figura 2-10 a)) se han obtenido restando al campo de temperaturas medias anuales del futuro (2065-2095), las temperaturas medias anuales del periodo 1965-1995 (Álvarez, et al., 2011).

Los resultados para temperatura muestran que, en general, los modelos predicen aumentos en el promedio anual algo más intensos en el interior que en la costa, pero que, en promedio, estarían en torno a los 3 ºC en el interior y los 2 ºC en la costa. Sin embargo, estos incrementos no se repartirán por igual a lo largo del año, sino que se producirán con mayor intensidad en verano, estación en la que los incrementos de temperatura podrían llegar a superar los 5 ºC en el interior (Álvarez, et al., 2011).

2.6.3.2 Cambios en la precipitación por cambio climático

En cuanto a las lluvias, en general podemos decir que los modelos tienden a pronosticar menos lluvias a lo largo del año, si bien, en general, la incertidumbre en este caso es mucho mayor que en el caso de las temperaturas, como se aprecia en la figura 2-10 b). Esto queda de manifiesto en el hecho de que los comportamientos difieren mucho entre las diferentes combinaciones GCM-RCM. En general, podemos esperar que todas las estaciones tiendan a ser más secas aunque en invierno y otoño algunos modelos pronostican un aumento de las lluvias (Álvarez, et al., 2011).

Los resultados de Álvarez, et al. (2011) muestran en primer lugar que la reducción de escala (*downscaling*) dinámica que se realiza en el proyecto ENSEMBLES tiene una importancia significativa en el caso

de la precipitación, pero no es tan importante en el caso de las temperaturas. En este último caso, diferentes modelos regionales acoplados con el mismo modelo de circulación general aportan algunos detalles, pero no dan demasiadas diferencias con respecto a lo que predice el modelo global. En el caso de la lluvia sin embargo, los diferentes modelos regionales sí son capaces de dar información diferente a la que se obtendría solamente con el modelo global (Álvarez, et al., 2011).

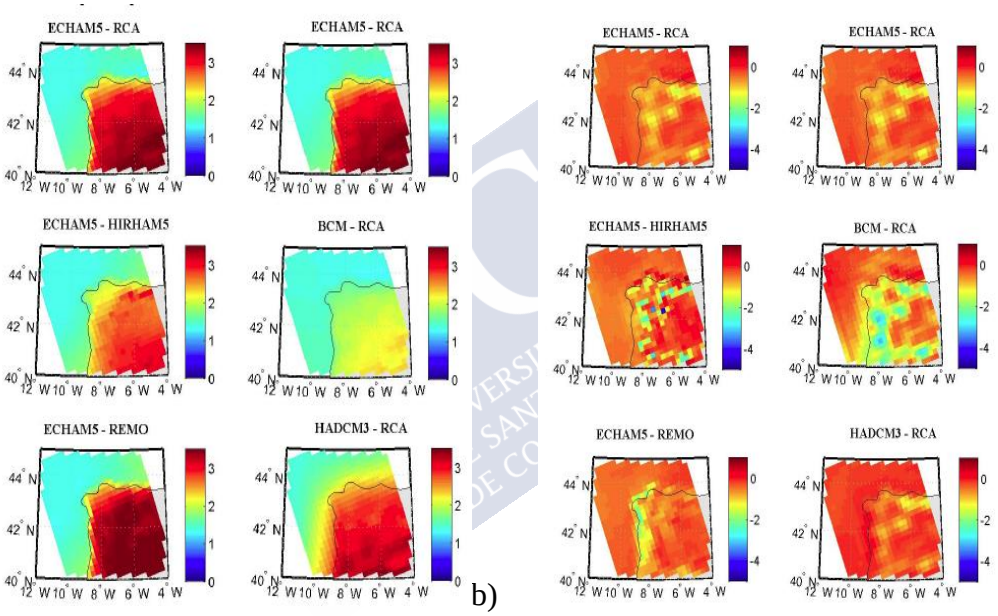


Figura 2-10 a) Aumento previsto anual de temperatura en ºC y b) diferencia media prevista anual de precipitaciones para Galicia. Fuente (Álvarez, et al., 2011).

En general, estas variaciones en la distribución anual de las lluvias anuncian un clima más extremo en Galicia, puesto que el aumento esperado de las temperaturas en primavera y verano, combinado con el déficit de lluvia que se podría producir en esas estaciones daría lugar a olas de calor y sequías más intensas y prolongadas que en la actualidad.

2.6.3.1 Cambios en las aguas subterráneas por cambio climático

El principal impacto del cambio climático en los recursos de agua subterránea de Galicia serán la modificación del patrón temporal de recarga, la cual principalmente se concentraría en temporada de invierno, pero disminuiría dramáticamente en temporada de primavera-verano (Raposo, et al., 2013).

La ligera disminución de la recarga se traducirá en un ligero descenso de los niveles freáticos y de los caudales de las surgencias, manantiales y de la descarga subterránea a los cauces (Samper, et al., 2016).

La disminución de la recarga subterránea no será uniforme a lo largo del año. Los resultados del modelo, de hecho, indican que la recarga se concentrará en periodos más cortos, aumentará en el invierno y disminuirá en el resto de año. Se espera que aumenten los periodos de tiempo sin recarga. Los periodos de estiaje serán más largos y disminuirá la recarga en dichos periodos (Samper, et al., 2016).

Los descensos de los niveles freáticos y la reducción de los recursos hídricos debidos al consumo de agua de los eucaliptos podrían verse agravados debido a los efectos del cambio climático, que según las simulaciones realizadas podrían provocar una reducción adicional de entre 6% y 12% en los valores medios anuales del flujo hipodérmico, la recarga al acuífero y las aportaciones totales (Samper, et al., 2016).

2.6.4 Los recursos hídricos en México

Anualmente México recibe aproximadamente 1,449,471 Mm^3 de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.1% es evapotranspiración y regresa a la atmósfera, el 21.4% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con los países vecinos, el país anualmente cuenta con 451,585 Mm^3 (o Hm^3) de agua dulce renovable (CONAGUA, 2018).

La precipitación normal anual en México en el periodo de 1981-2010 fue de 739.8 milímetros según lo reportado por CONAGUA (2018). La figura 2-11 muestra la distribución para la precipitación media anual en el territorio mexicano. Los valores normales, de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), corresponden a los promedios calculados para un periodo uniforme y relativamente largo, el cual debe tener como mínimo 30 años de recabar información, lo cual se considera como un periodo climatológico mínimo representativo. Es importante señalar que la distribución mensual de la precipitación acentúa los problemas relacionados con la disponibilidad del recurso, debido a que el 68% de la precipitación normal mensual ocurre entre los meses de junio y septiembre.

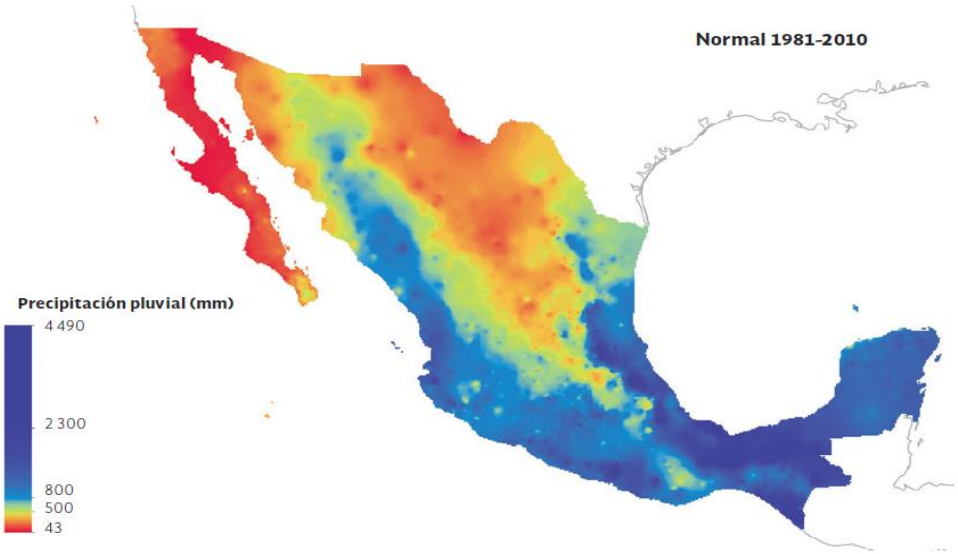


Figura 2-11 Precipitación media anual en México de 1981 a 2010. Fuente (CONAGUA, 2018)

En el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), se registran los volúmenes concesionados o asignados1 a los usuarios de aguas nacionales. El REPDA tiene clasificados los usos del agua en diversos rubros. En 2014 se adicionó un nuevo rubro no consuntivo: el de conservación ecológica, con un volumen concesionado de 9.46

hm³/año. El 60.9% del agua utilizada para uso consuntivo proviene de fuentes superficiales (ríos, arroyos y lagos), mientras que el 39.1% restante corresponde a fuentes subterráneas (acuíferos). Existen tanto incrementos como decrementos en los volúmenes concesionados a lo largo del tiempo (CONAGUA, 2018).

El mayor volumen concesionado para usos consuntivos lo representa el uso agrupado agrícola, principalmente para riego y la superficie en unidades agrícolas de producción fue de 30.2 millones de hectáreas, de las cuales 18% eran de riego y el resto tenían régimen de temporal. Los usos agrupados agrícola y abastecimiento público representaban en 2017 el 90.4% del volumen concesionado a nivel nacional. A precios corrientes, la aportación del sector agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza al Producto Interno Bruto Nacional (PIB) fue de 3.63% al 2017 (CONAGUA, 2018). En la figura 2-12 se muestran los porcentajes de usos consuntivos en México a nivel nacional. En el último informe de Estadísticas del Agua en México, el volumen total concesionado para usos consuntivos fue de 87,840 Mm^3.

Se estima que en 1955, cada mexicano consumía alrededor de 40 litros al día; por otro lado, en 2012 el consumo aumentó a 280 l/hab.día. En 2012, con una población de 117 millones de habitantes, la disponibilidad natural media por habitante se calculaba en 4028 m^3/año. Se estima que para 2030, con el aumento de la población y el deterioro de los cuerpos de agua descenderá hasta 3430 m^3/hab.año (agua.org.mx, 2019).

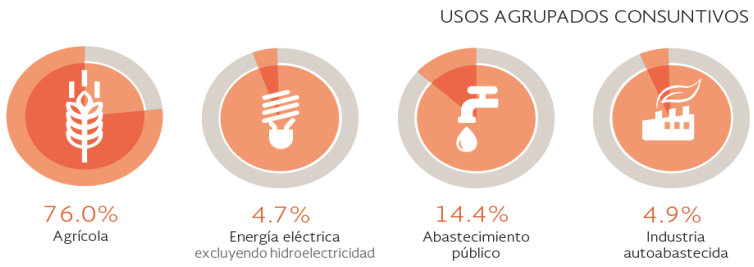


Figura 2-12 Usos consuntivos del agua en México. Fuente (CONAGUA, 2018)

Se espera que la región de aguas del Valle de México mantenga su situación de escasez de agua y el grado de presión supere el 100%, ya que es bien sabido que las necesidades de agua de esta región se complementan con importaciones de agua provenientes del Valle de Toluca y Sistema Cutzamala. Las regiones de la Península de Baja California y del Río Bravo tenderán a incrementar su situación de estrés pasando a escasez; pero manteniendo el grado de presión alto. Las zonas de Lerma-Santiago-Pacífico mantendrá el nivel de estrés con relativamente alto grado de presión. Las Cuencas Centrales de Norte y Balsas cambiarán de una situación sin estrés a otra con estrés; pero mantendrán el grado de presión relativamente alto. Inclusive en la zona de la Península de Yucatán donde el grado de presión se espera aumente de bajo a medio (CONAGUA, 2018).

En el esquema del Sistema Nacional de Planeación Democrática, el Programa Nacional Hídrico (PNH) 2014-2018 se deriva y está alineado con el Plan Nacional de Desarrollo. El PNH articula las políticas públicas del gobierno de la república en torno al sector hídrico y forma parte de la planificación y programación hídrica consignada en la Ley de Aguas Nacionales. La planificación hídrica es de carácter obligatorio para la gestión integrada de los recursos hídricos, la conservación de los recursos naturales, ecosistemas vitales y el medio ambiente (CONAGUA, 2018).

2.6.5 La gestión de los recursos hídricos en México

El manejo de los recursos hídricos es una de las preocupaciones más importantes de México y le está produciendo costos elevados a la economía. Las áridas regiones del noroeste y centro del país agrupan la mayor parte de la población de México y generan el casi el total del producto interior bruto (PIB). Sin embargo son las regiones del sur las que tienen abundantes recursos hídricos.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), creada en 1989, es el órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo encargado de la gestión del agua en México, desempeña sus funciones a través de estos 13 organismos de cuenca, cuyo ámbito de competencia son las regiones hidrológico-administrativas. México se

ha dividido en 13 regiones hidrológico-administrativas, las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos, sus límites respetan los municipales, para facilitar la administración e integración de la información socioeconómica (CONAGUA, 2018).

En 1992 se promulga la Ley de Aguas Nacionales (LAN), reformada en 2004. La LAN, considera a la cuenca hidrográfica como la unidad básica para la administración del agua. Se establece también la creación de oficinas regionales y estatales en XIII Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA) denominadas en un principio como Gerencias Regionales y en varios estados de la República. Con el Reglamento Interior de Conagua publicado en 2006, las gerencias regionales y estatales se denominan como Organismos de Cuenca y Direcciones Locales respectivamente (Perevochtchikova & Arellano-Monterrosas, 2008).

Por otra parte, en la Ley de Aguas Nacionales se crean también los Consejos y Comités de Cuenca como órganos de concertación para la gestión del agua (Arellano, 2005). Para un mejor funcionamiento, los Consejos de Cuenca cuentan con órganos auxiliares a niveles de sub-cuenca, micro-cuenca (según el ámbito territorial) y acuífero, denominadas respectivamente Comisiones de Cuenca, Comités de Cuenca y Comités Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS) (Perevochtchikova & Arellano-Monterrosas, 2008).

Existen alrededor de 4,000 presas en México, de las cuales 667 están clasificadas como grandes presas, de acuerdo con la definición de la *International Commission on Large Dams* (ICOLD). La capacidad de almacenamiento de las presas del país es de 150 km^3 de agua; destacan 51 que representan casi 70% de la capacidad de almacenamiento (Valencia, 2007).

Al mes de abril del 2019, se tiene abierta la consulta pública del Programa Nacional Hídrico 2019-2024 en la página web oficial de la

CONAGUA[3], con seis objetivos propuestos, 1) Promover el uso eficiente del agua en la generación de energía, bienes y servicios para apoyar el crecimiento económico del país; 2) Fortalecer las acciones para mejorar la eficiencia en el uso del agua y la productividad agrícola para apoyar la autosuficiencia alimentaria; 3) Promover el acceso apropiado a toda la población, especialmente a la vulnerable; 4) Dar seguridad a la población y zonas productivas ante la presencia de eventos hidrometeorológicos; 5) Mejorar los instrumentos de gobernanza y gobernabilidad del agua en cuencas y acuíferos; 6) Mejorar la calidad del agua en cauces, vasos, acuíferos y playas para la preservación y conservación de los ecosistemas en las cuencas.

En la tabla 2-6 se resume las funciones principales asociadas a la gestión del agua en el territorio de México y la dependencia gubernamental que atiende tal función, tabla que ha sido extraída de una tabla comparativa entre varios países en INBO;GWP (2009).

Tabla 2-6 Organización de la gestión del agua en México. Adaptado de (INBO;GWP, 2009).

Función	Dependencia gubernamental
Políticas hídricas - autorización (descargas, extracciones)	Comisión Nacional del Agua
Registro de usuarios	Comisión Nacional del Agua
Planificación estratégica a largo plazo (plan maestro)	Organismo de Cuenca
Gestión de concesiones a grandes empresas (ventas de agua sin procesar)	Comisión Nacional del Agua
Aplicación de cargos del agua (contaminación , extracción), plan de acción de cuenca	Organismo de Cuenca
Suministro de agua potable y saneamiento (comunidad)	Municipalidades o Estado
Riego (comunidad)	Asociaciones
Monitoreo, datos	Comisión Nacional del Agua y Estados

[3] https://www.gob.mx/conagua/articulos/consulta-para-el-del-programa-nacional-hidrico-2019-2024-190499?idiom=es

En México, la gestión del agua por cuencas enfrenta principalmente los siguientes desafíos: a) la estructura de la CONAGUA separa la gestión del agua superficial de la subterránea, tanto administrativamente como de calidad y cantidad; b) las dificultades de la coordinación interinstitucional, las cuales están asociadas al complejo entramado de las estructuras gubernamentales relacionadas con la gestión del agua (Perevochtchikova & Arellano-Monterrosas, 2008).

2.6.6 Río Colorado: recursos hídricos y cambio climático

El río Colorado es la fuente de vida para el suroeste de Estados Unidos y el noroeste de México. La cuenca transfronteriza del Colorado abarca un área de más de 630,000 km^2 en la que habitan más de 30 millones de personas en ambos países (Adler, 2007). Desde su nacimiento en las montañas Rocallosas en Estados Unidos, el río recorre más de 2,300 km en dirección suroeste por los estados de Wyoming y Colorado hacia Utah, Nevada, Arizona y California (Morrison, et al., 1996). Los últimos 140 km del cauce del río Colorado se encuentran al sur de la frontera internacional México-Estados Unidos, entre los estados de Baja California y Sonora. Representando casi el 2% del total de la cuenca, el delta es el área en donde el río Colorado se dispersaba en meandros y lagunas antes de su desembocadura en el Golfo de California (Glenn, et al., 2001). En la figura 2-13 se muestran los cauces de la cuenca del río Colorado en ambos países y las principales presas en EUA.

Más del 85% del volumen de agua disponible en la cuenca es captada en las montañas del estado de Colorado, en un área que cubre tan sólo el 15% de la misma (Adler, 2007). El volumen de agua acarreado anualmente en el río Colorado varía alrededor de los 17,000 millones de metros cúbicos (Mm^3), sin embargo, el 70% del volumen anual fluye en la temporada de deshielo (mayo a julio) (Cohen & Henges-Jeck, 2001). El total de derechos de agua asignados en la cuenca del río Colorado (ambos países) es de 21,586 Mm^3/año (Luecke, et al., 1999). Sin embargo, el volumen anual registrado en promedio en los últimos 100 años es de 18,500 Mm^3/año, por lo que se tiene una sobre-asignación de derechos de aproximadamente 17%

(Cohen & Henges-Jeck, 2001). En estas cantidades no se incluye ningún caudal ecológico.

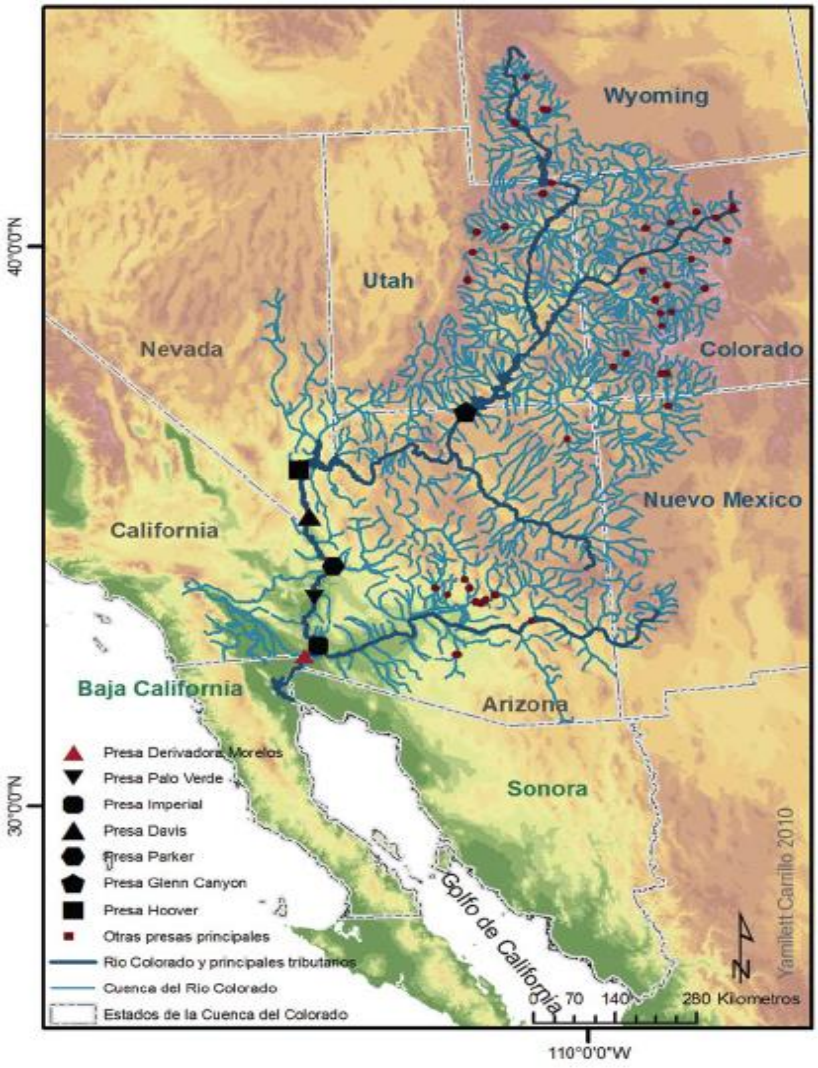


Figura 2-13 Cauces y presas principales en la cuenca del río Colorado en EUA y México. Fuente (Hinojosa-Herta & Carrillo-Guerrero, 2010).

Antes de la construcción del sistema de presas (en EUA) en la cuenca, el río desembocaba más de 15,000 Mm^3 por año al Alto Golfo de California, creando una zona estuarina de cerca de 500,000 ha donde se mezclaban el agua dulce del río con las aguas salinas del Golfo (Lavín & Sánchez, 1999) (Rodríguez, et al., 2001).

El Tratado Internacional del Agua acordado por México y Estados Unidos en 1944 define el volumen anual que México recibe del río Colorado, el cual es de 1,850.2 Hm^3 al año. La sección estadounidense de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA en México y el *IBWC* en EUA) se encarga de hacer la entrega oficial de los volúmenes asignados a México, mientras que la sección mexicana de la CILA está encargada de recibir dichos volúmenes. Como parte del proceso de manejo adaptativo del río, ambos países acuerdan actas que se anexan al Tratado Internacional de Aguas. Estas actas contienen generalmente especificaciones o temas no incluidos en el cuerpo del tratado per se, como la calidad del agua, implementación de proyectos de mantenimiento de la infraestructura hidráulica y más recientemente, aspectos ambientales (Hinojosa-Herta & Carrillo-Guerrero, 2010).

La temperatura promedio en la cuenca se espera que incremente; El "*RECLAMATION - Secure Water Report*" del *Bureau of Reclamation* (USBR) ha detectado un incremento de 1.2 °C en la cuenca a lo largo del siglo XX. En la cuenca baja se observó un incremento de 1.7 °C, debido al clima más seco y caliente de esos estados. Además se encontraron predicciones de incremento de 3.3 a 3.9 °C en las temperaturas promedio de la cuenca alta a lo largo del siglo XXI (hasta 2060), acoplado con incrementos de 2.8 a 3.3 °C en la temperatura de la cuenca baja sobre el mismo periodo (USBR, 2011).

En Marzo del 2016 el USBR publicó un reporte técnico de "*RECLAMATION – Managing in the West*" titulado "*West-Wide Climate Risk Assessments: Hydroclimate Projections*" en donde presenta los resultados del último estudio realizado los modelos del CMIP5 en donde se utilizan los nuevos RCPs, actualizando de esta

manera lo que se había hecho en el 2011 utilizando los modelos del CMIP3 donde se usaron los escenarios SRES.

La precipitación anual total en toda la cuenca tiene una trayectoria ligeramente ascendente durante el período transitorio que se extiende hasta 2099. La incertidumbre parece ser en gran medida constante a lo largo del tiempo, lo que implica que no hay aumento o disminución en la incertidumbre del presente para las magnitudes de precipitación anual total a través del tiempo. La temperatura media anual en toda la cuenca muestra una tendencia creciente con una incertidumbre cada vez mayor, lo que implica que la incertidumbre aumenta a lo largo del tiempo. La escorrentía anual no muestra una tendencia aparente. (USBR, 2016).

El la figura 2-14 se muestran las tendencias de precipitación total anual y media de temperatura estimada hasta el 2100, mientras que en la figura 2-15 se muestra las estimaciones para el Equivalente de Agua de Nieve (SWE) y la escorrentía total anual proyectadas al 2100. La línea negra se refiere a la media mientras que el sombreado representa el rango del percentil 10 al 90.

El informe del USBR (2016) identifica el cambio climático como un riesgo creciente para la gestión del agua en el oeste y menciona temperaturas más cálidas, cambios en la precipitación, la capa de nieve y el tiempo y la calidad de la escorrentía en las principales cuencas fluviales como amenazas para la sostenibilidad del agua. El abastecimiento de agua, calidad y operaciones; hidroelectricidad; recursos de agua subterránea; control de inundaciones; recreación; y los peces, la vida silvestre y otros recursos ecológicos en los estados occidentales siguen en riesgo. Las reducciones en la escorrentía de primavera y principios de verano podrían traducirse en una caída en el suministro de agua para satisfacer las demandas de riego e impactar adversamente las operaciones de energía hidroeléctrica en los embalses.

Según el estudio realizado por Christensen et al. (2004), para la cuenca del río Colorado, los resultados muestran que el cambio climático durante el próximo siglo, se llegaría a una situación en la

que la demanda total del sistema superaría las entradas de agua, provocando una degradación sustancial en rendimiento de sistema del río Colorado.

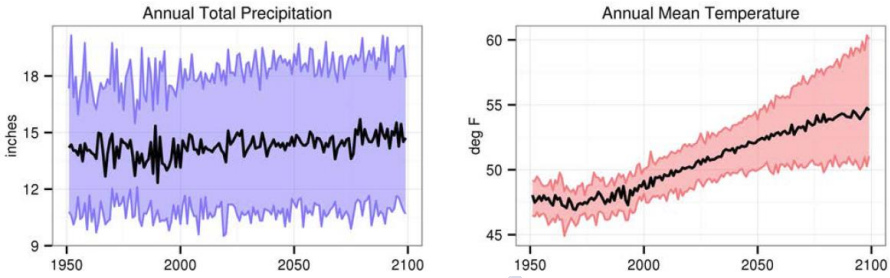


Figura 2-14 Proyecciones para precipitación total anual y temperatura media de 1950 a 2100 para la cuenca del río Colorado. Fuente (USBR, 2016).

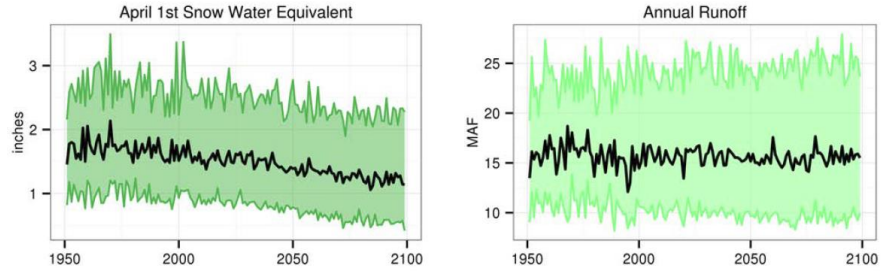


Figura 2-15 Proyecciones para el equivalente de agua de nieve y escorrentía anual de 1950 a 2100 para la cuenca del río Colorado. Fuente (USBR, 2016).

El sistema de embalses del río Colorado, es altamente insensible al patrón estacional de las entradas de los reservorios y, por implicación, los cambios en la distribución estacional de la escorrentía asociada con un clima más cálido: el desempeño del sistema de reservorios depende mucho más críticamente de las entradas anuales totales. En general, debido al tamaño (relativo) del sistema de reservorio, es poco probable que los cambios en las políticas operativas del reservorio puedan mitigar adecuadamente los efectos del cambio climático y los cambios hidrológicos asociados en la cuenca (Christensen, et al., 2004).

3 ÁREA DE ESTUDIO

Como se ha mencionado en la sección 1.5 Justificación, se plantean dos áreas de estudio considerando sus situaciones hídricas naturales, uno con condiciones húmedas o de abundancia en recursos hídricos, tratándose del río Cabe en Galicia, España. El otro con condiciones secas o de poca abundancia, se trata del río Colorado en su sección en Mexicali, Baja California (B.C.), México.

3.1 SUBCUENCA DEL RÍO CABE, EN GALICIA, ESPAÑA

El sistema de Explotación Cabe (SEC), mostrado en la figura 3-1, se refiere al aprovechamiento resultante de la subcuenca del río Cabe, que se forma parte de la cuenca del río Sil, dentro de la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil. El sistema está formado por la cuenca completa del río Cabe desde su nacimiento hasta su desembocadura en el río Sil, incluyéndose en su totalidad en la Comunidad Autónoma de Galicia, provincia de Lugo. La superficie de la cuenca del sistema de explotación Cabe es de 735.18 km^2. Durante su recorrido de 54.94 km recibe varios afluentes, siendo los más importantes por la derecha el Mao con 49.47 km de longitud, Cinsa y Carabelos con 15.69 y 11.35 km de longitud respectivamente. En todo el sistema hay 200.65 km de longitud de masas de agua y 925.05 km de longitud de cauces. (MAGRAMA, 2015).

Las series hidrológicas utilizadas en la elaboración del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil han sido dos, la serie larga correspondiente al período 1940/41-2011/12 y la serie corta correspondiente al período 1980/81-2011/12. El modelo de simulación utilizado ha sido el modelo conceptual y cuasi distribuido SIMPA (Sistema Integrado para la Modelación del proceso

Precipitación Aportación), actualizado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Se han utilizado como variables de la fase atmosférica: la temperatura, la precipitación, la evapotranspiración de referencia, y como variables de la fase terrestre: la infiltración o recarga, la evapotranspiración real, y las escorrentías: superficial, subterránea y total (CHMS, 2015).

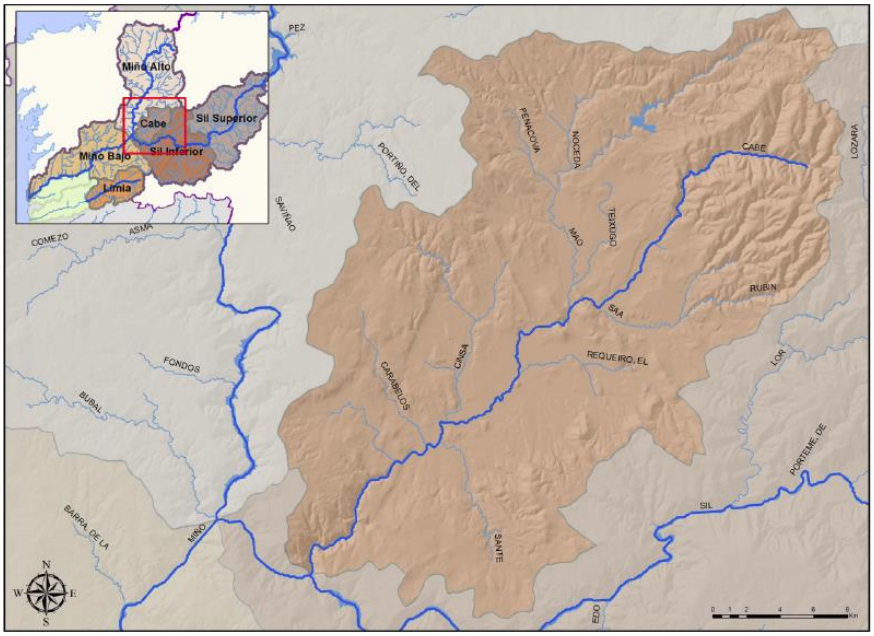


Figura 3-1 Sistema de explotación del río Cabe, en Galicia, España. Fuente (MAPAMA, 2017).

En la tabla 3-1 se muestran los datos estadísticos básicos de precipitación y aportaciones según lo reportado en el plan hidrológico para la serie de 1980/81-2011/12, donde se tiene una precipitación media anual de 1041.59 mm y una aportación anual media de 386.42 hm^3/año.

Los valores anuales (años hidrológicos octubre-septiembre) estimados de otras variables hidrológicas en el SEC son, evapotranspiración potencial de 604.1 mm/año, evapotranspiración real 518.33 mm/año, recarga de acuíferos 158.66 hm^3/año, caudal

superficial 226.60 hm^3/año y caudal subterráneo 159.82 hm^3/año, caudal total 386.42 hm^3/año (CHMS, 2015). Estos valores son promedios de la serie 1980/81-2011/12.

Tabla 3-1 Estadísticos básicos de las series anuales de precipitación (mm/año) y aportación (hm^3/año) medios para el SEC, serie 1980/81-2011/12. Fuente (CHMS, 2015).

Datos anuales	Precipitación (mm)	Año ocurrencia	Aportación anual (Hm^3)	Año ocurrencia
Valor mínimo	638.9	2011/2012	140.22	2011/2012
Valor medio	1041.59		386.42	
Valor máximo	1751.33	2000/2001	841.86	2000/2001
Coef. Var.	0.23		0.40	
Coef. Sesgo	0.81		0.86	
Autocorrelación	-0.19		-0.22	

En cuanto a la demografía de la región del SEC, se estima que la población total (permanente y con turismo) disminuya de 33,253 en 2013 a 26,419 en 2021 y hasta 25,991 en 2027.

3.1.1 Embalse de Vilasouto

El embalse de Vilasouto, que se observa en la figura 3-2, se encuentra en la provincia de Lugo, el cual pertenece al Sistema de Explotación Cabe de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil, que dicha confederación forma parte de los organismos de cuenca concebidos en el estado español por la Ley de Aguas, en su artículo 19 y siguientes, como los Organismos responsables, fundamentalmente, de la Administración Hidráulica de las cuencas intercomunitarias (CHMS, 2015). El embalse de Vilasouto se identifica con el código de masa de agua ES464MAR001690 y se encuentra en la categoría de "embalse muy modificado", cuenta con un área de 1.06 Km^2 y se encuentra en las coordenadas (ETRS89-UTMH29) 629214 en X, 4724386 en Y, y a 442 metros sobre nivel del mar.

El embalse de Vilasouto es generado por una presa de gravedad de 59 metros de altura construida en el año 1969. El embalse, de titularidad pública, es la principal reserva hidráulica en la comarca de "Terras de Lemos". Se encuentra dentro del municipio de "O Incio"

en Lugo, en la cabecera del río Mao que desemboca aguas abajo en el río Cabe, a unos 14 km. El embalse, con una cuenca hidrográfica de 49.37 km^2 y alcanza una capacidad máxima de 20.43 hm^3, destinándose principalmente para regadío en el valle de Lemos y abastecimiento urbano de Monforte y Bóveda. El sistema de regadíos del Valle de Lemos abastece de agua a una superficie de 1,700 ha. Vilasouto alimenta este sistema de regadíos a través del canal alto del valle de Lemos y también, junto con el río Cabe, a través del azud de Ribas Altas, que se muestra en la figura 3-3 (MAPAMA, 2017).



Figura 3-2 Embalse de Vilasouto, fuente (CHMS, 2015).

El embalse de Vilasouto se emplea además en el abastecimiento de las localidades de Monforte de Lemos y Bóveda (20,500 habitantes). En consecuencia, el embalse de Vilasouto representa el elemento más característico y de mayor capacidad empleado en la gestión de los recursos hídricos superficiales de la comarca, lo que justifica la importancia de esta infraestructura y el interés de disponer de predicciones de caudal de aportación futura de cara al desarrollo de una gestión integrada, sostenible y eficaz de su funcionamiento y de los recursos hídricos que almacena. Los recursos hídricos subterráneos disponibles en la comarca se ubican dentro de la masa de agua subterránea "Cuenca del Sil", con unos recursos renovables de 1,682 hm^3/año, de los cuales 158 se sitúan dentro de la cuenca hidrográfica del río Cabe. La recarga principal al acuífero es a partir de infiltración

de la lluvia, retornos de riego y aportaciones laterales de otras masas (MAPAMA, 2017).

Según la descripción en el plan hidrológico, CHMS (2015), al tratarse de un gran embalse no existen medidas correctoras que permitan mejorar las condiciones hidromorfológicas hasta alcanzar condiciones similares a las naturales de los ríos. Los cambios hidromorfológicos necesarios para alcanzar el buen estado son, 1) eliminación de infraestructuras, 2) restauración hidrológico-forestal, 3) restauración de riberas. Deben tenerse en cuenta los efectos adversos y las afecciones medioambientales que se generarían durante el desmontaje de la infraestructura. Además, se afectaría al uso para riego del Valle de Lemos y para el abastecimiento de Monforte y Bóveda. Una posible alternativa sería que el suministro para abastecimiento y riego podría tomarse de otras fuentes como aguas subterráneas o trasvasadas. Los objetivos y plazo adoptados son el buen potencial ecológico y buen estado químico en 2021 (CHMS, 2015).

El potencial ecológico en diciembre de 2010 se ha valorado como deficiente por criterio de experto. Según los índices de alteración hidrológica (indicador P10%-P90%), calculados para esta masa a partir de las aportaciones mensuales y anuales, es una masa de agua muy alterada hidrológicamente al presentar una desviación significativa en la magnitud de los parámetros que caracterizan las condiciones mensuales y anuales del régimen hidrológico natural. Para los indicadores físico-químicos se obtuvieron condiciones moderadas (indicios de cierta tensión), aguas trasparentes, sin anomalías en la temperatura y mineralización, alto contenido en amonio y cianobacterias, y estado trófico de eutrofia (CHMS, 2015).

Los demás parámetros y datos físicos del embalse de Vilasouto, coeficientes de retornos, conducciones, tomas de agua, coeficientes de consumo y bombeos, se pueden consultar en el anexo digital AD-08.

3.1.2 Distrito de riego del Valle de Lemos

El distrito de riego del Valle de Lemos se muestra en la figura 3-3, al noroeste de España, se encuentra al sur de la provincia de Lugo,

en la Comunidad Autónoma de Galicia. El establecimiento de este distrito en 1966 preveía el desarrollo de riego de unas 5,300 ha, utilizando los caudales naturales del río Cabe y los flujos de agua regulados del río Mao. Los criterios de diseño utilizados en 1966 se basaron en la capacidad limitada de la red de distribución y en la falta de almacenamiento interna de agua (Cuesta, 2001). El patrón de cultivo tradicional de la zona consiste en una rotación anual de pastos y ensilados de maíz, típica para una agricultura orientada a la ganadería. Los cultivos predominantes en la zona son cultivos forrajeros anuales, maíz, centeno, nabos y coles (Cuesta, et al., 2005).

En la actualidad, el riego se aplica solo a un pequeño porcentaje de la superficie irrigable debido a las insuficiencias de la red de distribución que obliga a los agricultores a transportar agua a sus campos. Sin embargo, la entrega total, estimada en 12,500 m^3 ha^{-1}, es excesiva (Cuesta, 2001).

El distrito de riego se caracteriza por una baja eficiencia en el uso del agua, importantes pérdidas operacionales en la red de distribución, patrones fragmentados de propiedad de la tierra y un uso deficiente de la infraestructura disponible. En consecuencia, después de la aprobación del Plan Nacional Agrícola, la administración pública proporcionó una inversión de hasta 12 millones de euros para mejorar el riego en el Valle de Lemos hasta 2008. El área que se definió potencialmente modernizable cubre una superficie de 4,690 hectáreas (Cuesta, et al., 2005).

3.1.3 Demandas y usos del agua en el río Cabe

En la información reportada en el plan hidrológico de la CHMS (2015), los usos del agua se dividen por “Unidades de Demanda” de tipo urbana (incluye doméstico, industrial, municipal, comercial y turismo), agrícola, ganadera y recreacional. En dicho plan hidrológico se puede consultar toda la información mucho más detallada de todas las unidades de demanda y sus diversas características, que también incluyen por municipios y no solo el sistema de explotación, así como también datos de rendimiento económico del agua.

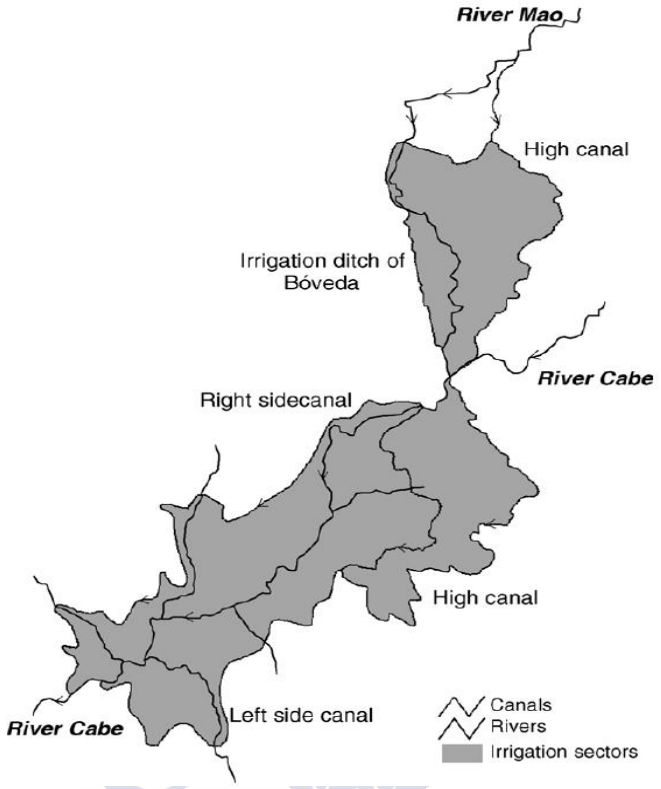


Figura 3-3 Mapa de ubicación del distrito de riego en el Valle de Lemos. Fuente (Neira, et al., 2005).

En la tabla 3-2 se pueden observar las cantidades de agua que se extraen de las diversas fuentes para satisfacer los 17.78 Hm^3 anuales de todas las demandas en el SEC estimadas al 2012. La gran mayoría del agua se obtiene de fuentes superficiales, debido a la disponibilidad natural de agua en la región.

Tabla 3-2 Fuentes de abastecimiento en el sistema de explotación Cabe. Fuente (CHMS, 2015).

Sistema de explotación	Origen de agua en el Sistema de Explotación			
	Superficial (Hm^3/año)	Subterránea (Hm^3/año)	Manantial (Hm^3/año)	Vol. Total (Hm^3/año)
Cabe	14.13	2.43	1.22	17.78

3.1.3.1 Unidad de demanda urbana

Para la unidad de demanda urbana (UDU) se estima un decremento en la demanda de agua en los horizontes futuros, fenómeno que viene acompañado de un decremento de la población y las mejoras físicas en la red de distribución. Al año 2012, en el SEC se calculó una población permanente de 32,112 y una población equivalente (con turismo) de 37,109 habitantes, acompañado de un volumen captado de agua de 4.54 Hm^3/año para satisfacer una demanda de 3.63 Hm^3/año, lo que significa una eficiencia de 80%. En la disminución de la población para el año 2027, se espera que la permanente pase a ser de 23,069 y la población equivalente de 33,812 habitantes. En plan hidrológico CHMS (2015), se hace la aclaración de que a falta de información han supuesto la eficiencia de 80% por el valor conocido es el de la captación, con esto han asumido el cálculo de la demanda. En la tabla 3-3 se muestra la evolución de la UDU proyectada del 2012 al 2027.

Tabla 3-3 Evolución estimada del uso de la demanda urbana. Fuente (CHMS, 2015).

Sistema de explotación	Demanda en baja – Total UDU (Hm^3/año)		
	2012	2015	2027
Cabe	3.63	3.55	3.55

3.1.3.2 Unidad de demanda recreacional

En cuanto a la demanda recreacional se estima para el SEC en 0.118 hm^3/año, la cual es completamente abastecida por fuentes superficiales.

3.1.3.3 Unidades de demanda agraria y ganadera

La estimación que se tiene para el 2012 para el riego agrícola es de 12.04 Hm^3/año, que se abastece principalmente de fuentes superficiales, mientras que para la ganadería es de 0.62 Hm^3/año que extrae mayormente agua subterránea y de manantial para cumplir la garantía, como se muestra en la tabla 3-4 según la CHMS.

Tabla 3-4 Volumen y fuente de abastecimiento de las unidades de demanda agrícola y ganadera. Fuente (CHMS, 2015).

Sist. Explot.	Riego (Hm^3/año)				Ganadería (Hm^3/año)			
	Sup.	Sub.	Manant.	Total	Sup.	Sub.	Manant.	Total
Cabe	12.04	0.06	0.14	12.24	0.06	0.32	0.24	0.62

3.1.4 Proyección futura de las demandas en el río Cabe

Las estimaciones de proyección futura en el sistema de explotación del río Cabe se han calculado en tres horizontes futuros, 2021, 2027 y 2033, que coinciden con la vigencia de los planes hidrológicos. Actualmente al momento de realización de este trabajo de tesis, el plan vigente corresponde del 2016 al 2021. En la tabla 3-5 se contienen los volúmenes de agua en Hm^3/año que se esperan para los tres horizontes futuros en comparación al inicial del 2012. Las cantidades en porcentaje representan la parte que esos volúmenes en el SEC tienen respecto a los otros sistemas de explotación en la demarcación hidrográfica.

Tabla 3-5 Volúmenes proyectados a los tres periodos futuros para las unidades de demanda del sistema de explotación Cabe, en Hm^3/año, fuente (CHMS, 2015).

Sist. Explot.	2012									
	Urbana		Industrial		Agraria		Recreativa		Total	
	Hm^3	%	Hm^3	%	Hm^3	%	Hm^3	%	Hm^3	%
Cabe	4.83	4.93	0.04	0.21	12.86	4.02	0.06	5.37	17.78	4.08
	2021									
	3.89	3.97	0.04	0.25	12.34	3.86	0.06	5.37	16.33	3.75
	2027									
	3.83	4.19	0.05	0.21	11.85	4.02	0.06	5.37	15.78	3.85
	2033									
	3.83	4.19	0.05	0.21	11.37	3.56	0.06	5.37	15.31	3.84

3.1.4.1 Régimen de caudales ecológicos calculados por métodos hidrobiológicos

Dentro del SEC, hay dos masas de agua que cuentan con estudios hidrobiológicos en su cauce principal, de los cuales resulta un caudal aconsejado para mantener un buen estado ecológico en dicha masa de agua. En la tabla 3-6 se pueden observar los valores mensuales

aconsejados por el estudio hidrobiológico realizado por la Dirección General del Agua, para las masas de agua correspondientes a los denominados Río Cabe I y Río Mao II. La tabla completa de los caudales aconsejados se encuentra en la página 20 del capítulo 4 del Plan Hidrológico. Los caudales aconsejados fueron establecidos por temporada estacional, es por esa razón es que tres meses tienen el mismo valor, siendo los más altos en otoño y los más bajos en verano.

Tabla 3-6 Caudales aconsejados para las masas de agua de los ríos Cabe I y Mao II. Fuente (CHMS, 2015).

	Río Cabe I	Río Mao II
Mes	Q aconsejado (m^3/seg.)	Q aconsejado (m^3/seg.)
Oct	0.56	0.7
Nov	0.56	0.7
Dec	0.56	0.7
Jan	0.5	0.65
Feb	0.5	0.65
Mar	0.5	0.65
Apr	0.41	0.53
May	0.41	0.53
Jun	0.41	0.53
Jul	0.28	0.32
Aug	0.28	0.32
Sep	0.28	0.32

3.1.4.2 Garantías y fallos en las simulaciones del Plan Hidrológico vigente

En el vigente plan hidrológico, la CHMS ha realizado simulaciones de balances entre recursos y demandas con el software AQUATOOL para todos los sistemas de explotación que forman la demarcación hidrográfica del Miño-Sil. Los cálculos de las aportaciones fueron realizados con el modelo hidrológico SIMPA. Para el caso del SEC, en las condiciones que la CHMS calculó las aportaciones y calibró (con la serie corta 1980-2005) el modelo de gestión, los resultados en el cumplimiento de la garantía de las demandas se muestra en la tabla 3-7, en donde únicamente no se presentan fallos en las garantías. Esto quiere decir que según estos

resultados y de acuerdo con los criterios de la instrucción de planificación hidrológica, todas las demandas están satisfechas.

Tabla 3-7 Resultados en la simulación de balance para el 2015 en las demandas del Sistema Cabe. Fuente (CHMS, 2015)**.**

Unidades de demanda	Dem. anual	Gar. mens.	Gar. 10 años	Gar. Vol.	Déf. máx. mens.	Déf. máx. 10 años	No. Fallos mens.	Satisf. Dem. IPH
	Hm^3	%	%	%	Hm^3	Hm^3	-	-
Proba de Brollón	0.37	100	100	100	0.00	0.00	0	Si
UDU Bóveda/Incio	0.80	100	100	100	0.00	0.00	0	Si
UDA Valle de Lemos	12.25	100	100	100	0.00	0.00	0	Si
Monforte de Lemos	2.51	100	100	100	0.00	0.00	0	Si
UDU Sober_Panton	0.76	100	100	100	0.00	0.00	0	Si

La CHMS concluye que el sistema Cabe es suficiente para satisfacer las demandas existentes y mantener los caudales ecológicos definidos en los distintos tramos. Los resultados de simulación a los horizontes al 2033 en el Plan Hidrológico del Miño-Sil no presentan fallo alguno en el sistema de explotación del río Cabe.

En cuanto a las reservas ambientales la CHMS establece en base a los caudales ecológicos, mientras que la reserva para abastecimiento es calculada en base a la población. Los volúmenes obtenidos para el SEC es de 104.24 Hm^3 anuales para reserva ambiental y de 3.86 Hm^3 anuales para reserva de abastecimiento.

3.1.5 Cuenca del río Cabe. Tramo hasta Monforte de Lemos

El área de estudio real para este trabajo de tesis, es en realidad una simplificación o reducción del SEC (de 735.18 km^2), el cual se ha denominado Cabe_R (Cabe Reducido, de 426.34 km^2) que corresponde a aproximadamente la mitad del sistema de explotación del río Cabe, dentro de la Confederación Hidrográfica Miño-Sil. El punto de la delimitación de la subcuenca Cabe_R se encuentra dentro de la ciudad de Monforte de Lemos, sobre el Río Cabe. El área de estudio se ha acotado a este punto debido a que, la última estación de aforo (EA1765) se encuentra aguas arriba la ciudad de Monforte de

Lemos y no es posible calibrar el modelo hidrológico más allá de la estación de aforos. Si se realiza la simulación hidrológica en áreas no calibradas, se generarían resultados que no son posibles contrastar con alguna realidad que los haga confiables.

La información de resumen total por tipo de unidades de demandas de agua en el sistema Cabe_R se muestra en la figura 3-4, que ha sido extraída de lo reportado en el CHMS vigente. Se puede observar que la UDU no llega a 0.5 Hm^3 en ningún mes y no presenta grandes diferencias a lo largo del año, que representa el 24%. Lo mismo se observa para las demandas ganaderas (UDG) demanda recreacional (UDP) que representan el mínimo de la demanda al ser del 6% en conjunto. Las unidades de demanda agrícola (UDA) que representa el 70%, tiene el mayor consumo en los meses de mayo a septiembre y un consumo nulo de noviembre a febrero. En la figura 3-5 se puede observar la distribución de las unidades de demanda por porcentaje y total en Hm^3.

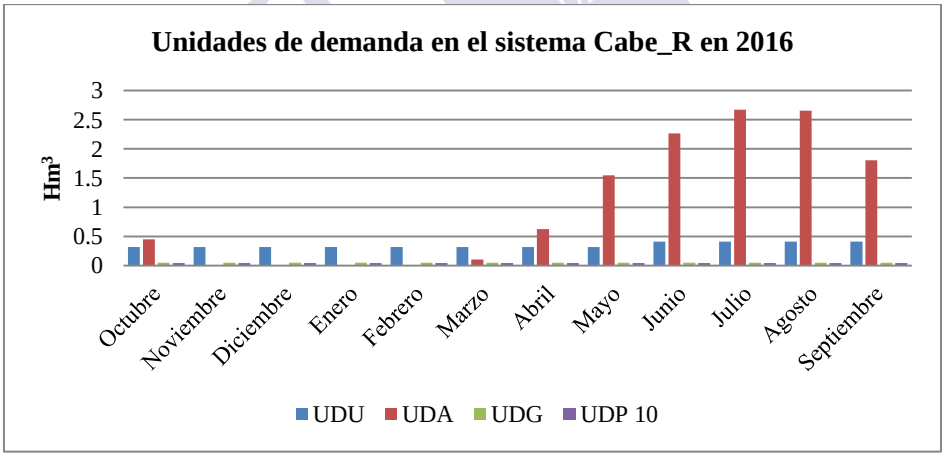


Figura 3-4 Demanda de agua al 2016 por unidades de demanda en el sistema Cabe_R. Adaptado de (CHMS, 2015).

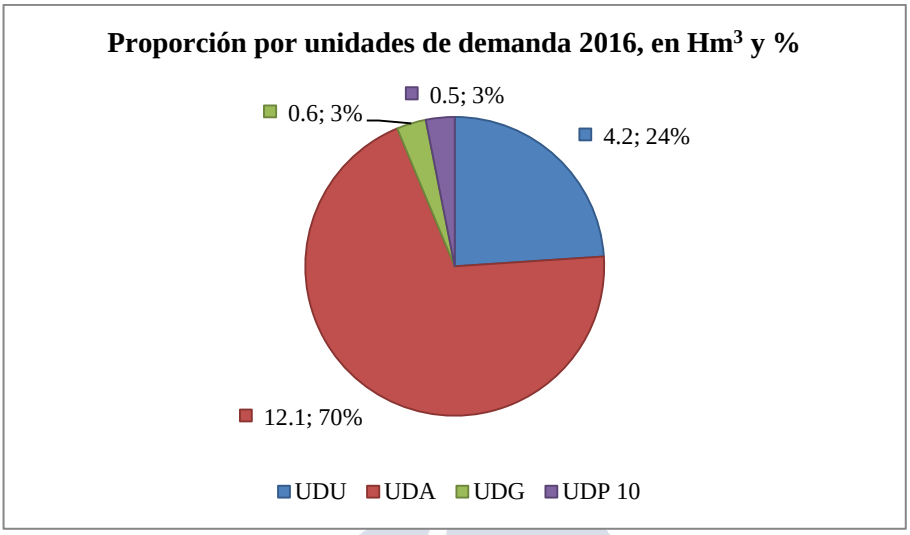


Figura 3-5 Proporción por unidades de demanda en el sistema Cabe_R 2016 en Hm^3 y porcentaje. Adaptado de (CHMS, 2015).

En dichos horizontes que van de 2015-2021, 2021-2027 y 2027-2033 existe un decremento mínimo en las demandas, ya que está asociado a una caída en la tasa de población de la región. En la tabla 3-8 se muestran dos ejemplos, primero la demanda UDU_2303_Monforte_Lemos y su variación de la demanda en los 3 horizontes, la cual muestra la disminución desde -6.39% en 2021 y hasta -8.21% en 2033. Segundo, para el caso de la UDA 3301 Valle Lemos, la disminución va de -4.00% en 2021 hasta -11.63% en 2033. Aunque estas disminuciones parecen importantes en porcentaje, en magnitud representan muy poco en hectómetros cúbicos mensuales.

Tabla 3-8 Disminución de la demanda en los horizontes al 2033 en la UDU_2303_Monforte_Lemos. Fuente (CHMS, 2015).

	UDU_2303_Monforte_Lemos				UDA 3301 Valle Lemos			
Mes	2016	2021	2027	2033	2016	2021	2027	2033
	Hm^3	Hm^3	Hm^3	Hm^3	0.43	0.412	0.396	0.38
Oct.	0.266	0.249	0.245	0.245	0	0	0	0
Nov.	0.266	0.249	0.245	0.245	0	0	0	0
Dic.	0.266	0.249	0.245	0.245	0	0	0	0
Ene.	0.266	0.249	0.245	0.245	0	0	0	0
Feb.	0.266	0.249	0.245	0.245	0.096	0.092	0.088	0.085
Mar.	0.266	0.249	0.245	0.245	0.598	0.574	0.552	0.529
Abr.	0.266	0.249	0.245	0.245	1.476	1.417	1.36	1.306
May.	0.266	0.249	0.245	0.245	2.167	2.08	1.997	1.917
Jun.	0.341	0.318	0.313	0.313	2.552	2.45	2.352	2.258
Jul.	0.341	0.318	0.313	0.313	2.539	2.437	2.34	2.246
Ago.	0.341	0.318	0.313	0.313	1.724	1.655	1.589	1.525
Sep.	0.341	0.318	0.313	0.313	0.43	0.412	0.396	0.38
Var. min. y máx.	---	- 6.39% - 6.74%	- 7.89% - 8.21%	- 7.89% - 8.21%	---	- 4.00% - 4.19%	- 7.69% - 8.33%	- 11.46% - 11.63%

3.2 SUBCUENCA DEL RÍO COLORADO EN MEXICALI, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Mexicali es una ciudad con casi un millón de habitantes que se encuentra en el estado de Baja California (B.C.), en la frontera noroeste de México con los Estados Unidos de América. Los recursos hídricos superficiales que llegan a Mexicali son únicamente por el último tramo del recorrido del río Colorado. La región de Mexicali es una de las más cálidas del planeta con temperaturas en verano que llegan a alcanzar entre 45 y 50 °C (CEABC, 2016). La fuente de agua subterránea se encuentra declarada en déficit por la autoridad administradora del agua en México, de la cual depende un extenso valle agrícola al sur de la ciudad llamado "El valle de Mexicali", el cual forma parte del "Distrito de Riego 014" (DR-014). Además, del agua del río Colorado que le corresponde a Mexicali, también se tienen asignadas cantidades para otras ciudades de Baja California como Tijuana y Ensenada que no cuentan con grandes fuentes de

abastecimiento. Las tecnologías de riego en la región son de baja eficiencia, en lo que el uso de agua agrícola representa alrededor del 80% del uso consuntivo (CEABC, 2016).

El clima de Mexicali, por su escasa precipitación anual presenta un clima desértico (*Bwh*), de acuerdo con los criterios de la clasificación climática de *Köppen*. Mexicali se encuentra totalmente dentro del 39.17% que cubre el clima muy seco semicálido en el estado de B.C. El clima de la ciudad de Mexicali es cálido seco, muy árido con régimen de lluvias de invierno y con una oscilación anual de temperaturas medias mensuales muy extremosa. En el período climatológico base de 1961-1990, su temperatura media anual fue de 22.3°C, con una precipitación promedio anual estimada de 76.9 mm. En Mexicali se han registrado grandes contrastes térmicos, con temperaturas tan altas como 54.3°C, y tan bajas como -7°C (SPABC, 2012).

Las proyecciones del SRES reportadas por la SPABC (2012) para Mexicali, indican que las temperaturas máximas medias anuales para los escenarios A2 y B2 se incrementaran del año 2010 al 2100 en 5 y 4 °C respectivamente, en comparación al periodo 1961-1990. Las ondas cálidas (temperaturas superiores 44°C) aparecerían con más frecuencia, y tendrían un inicio más temprano y retirada más tardía, es decir el período caluroso en Mexicali sería más severo y más prolongado.

Los usos consuntivos del agua en el estado de Baja California son en porcentaje, agrícola 80.81%, público urbano 6.6%, industrial 2.45%, termoeléctricas 6.08% (CEABC, 2016).

Cabe mencionar que para este escenario de tesis del río Colorado, se han hecho cálculos a partir de datos indirectos y algunas asunciones, debido la limitación en los datos e información disponibles al momento de realizar este trabajo. Las fuentes de información utilizada fue lo que se encontró mediante informes y publicaciones en línea de la CEABC y la CILA, así como de los estudios hechos en EUA que involucran a la parte del río Colorado en Mexicali.

3.2.1 Entregas de agua a Mexicali, B.C., México

Del volumen del río Colorado, se reciben 1,677.5 Hm^3 anuales por el punto denominado Lindero Norte, localizado aguas arriba de la presa derivadora Morelos, y 172.7 Hm^3 por el punto denominado Lindero Sur o Canal Sánchez Mejorada, como se muestra en la figura 3-6. El volumen de agua subterránea proviene de las concesiones de los sistemas de pozos federales (500hm^3) y particulares (200 Hm^3), proviene de los Acuíferos: 0210 - Valle de Mexicali, estado de Baja California y 2601 - San Luis Río Colorado, estado de Sonora (CEABC, 2016).

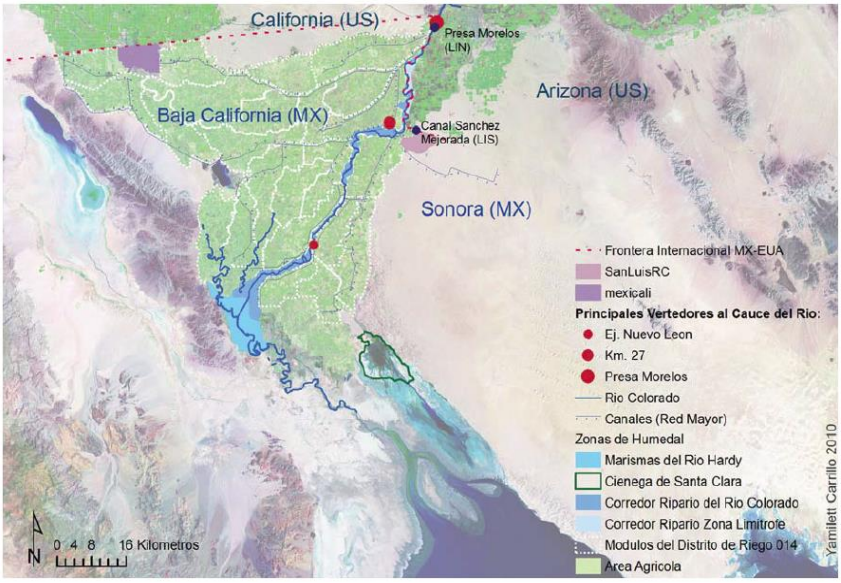


Figura 3-6 Tramo del río Colorado en México (en Mexicali, Baja California). Fuente (Hinojosa-Herta & Carrillo-Guerrero, 2010).

Es importante notar que la "Presa Morelos" en el Lindero internacional Norte (LIN) funciona únicamente como una derivadora en la cual se controla la entrega que EUA realiza a México mes a mes. Por lo tanto, éste comportamiento puede ser más tomado como una "aportación" y no como embalse, a la hora de realizar la gestión. Aunque es posible conocer los parametros físicos de la Presa Morelos, en la realidad las entregas de agua a México no se ven afectadas por la

evaporación o la cota. En el caso del Lindero Internacional Sur (LIS), físicamente es una derivación, de la cual el agua procede de una planta de tratamiento en territorio de EUA y las aguas que son tratadas son provenientes del drenaje agrícola aguas arriba de la planta de tratamiento.

En la figura 3-7 se muestran las entregas de agua anuales del 2005-2018 que México ha recibido de acuerdo al TAI de 1944, donde en 2012, 2013, 2014 y 2018 ha sido menor a la cantidad total establecida. Cabe la posibilidad de que en estos 4 años México haya recibido agua directamente a Tijuana en lugar de en el LIN y LIS. Esas entregas de San Diego (EUA) a Tijuana (México) se conocen como "entregas de emergencia" y están establecidas en Actas de la CILA para responder rápidamente a escasez de agua en ésta ciudad fronteriza. Según datos de la CILA, hasta la fecha siempre se ha cumplido con las cantidades de agua establecidas. En la figura 3-8 se muestra la entrega mensual desglosada en el LIN y LIS. En el anexo digital AD-11 se encuentra el archivo con las entregas en LIN y LIS.

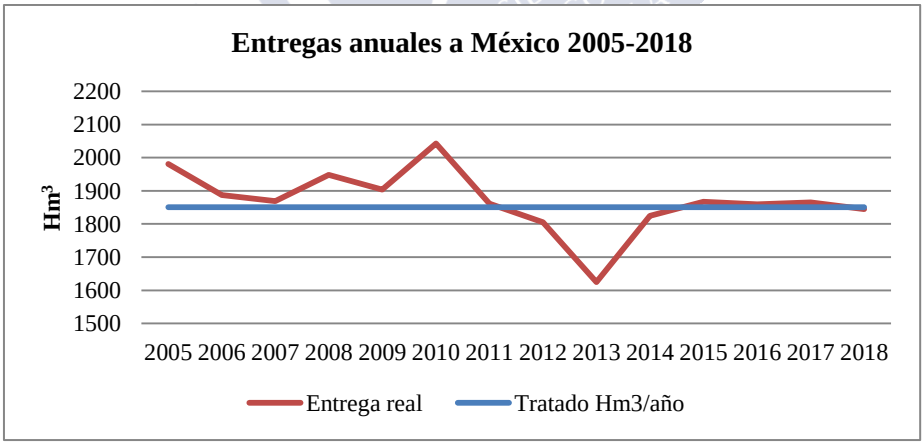


Figura 3-7 Entregas de agua a México del río Colorado2005-2018. Fuente (CILA, 2018).

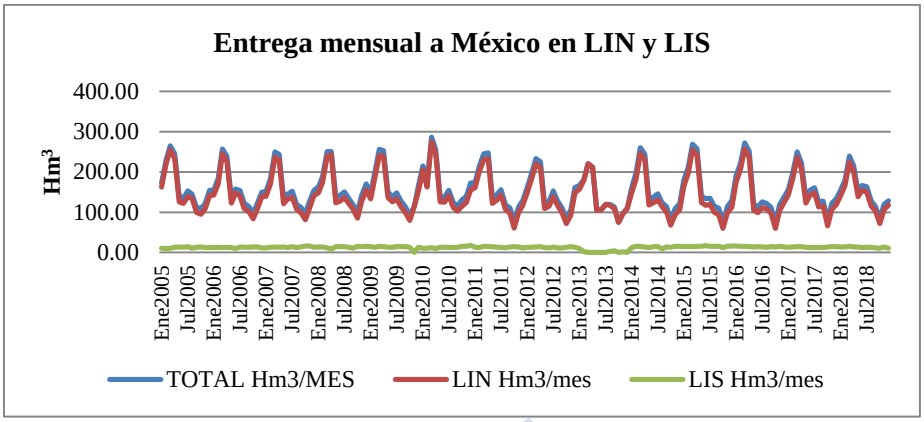


Figura 3-8 Entregas mensuales de agua a México del río Colorado en el LIN y LIS 2005-2018. Fuente (CILA, 2018).

3.2.2 Demandas y usos de agua en Mexicali

Las demandas definidas como urbanas, industriales y rurales fueron estimadas con base a lo publicado en el dicho informe de indicadores de la CEABC (2017), así otros parámetros de coeficientes de consumo y retorno en relación con la información de las plantas de tratamiento reportadas. Así mismo, el mencionado informe contiene los datos de la operación del Acueducto río Colorado-Tijuana (ARCT) desde 1982 hasta el 2017. Estos datos se pueden consultar en el anexo digital AD-12. El ARCT ha sido representado en el esquema como una demanda, ya que el agua que se bombea por el acueducto está en función de una demanda y de esta manera se pueden evaluar la garantía y fallos. En la tabla 3-9 se muestra un resumen de las demandas en el sistema del río Colorado, Mexicali, según los datos publicados en el informe de la CEABC (2017). En la figura 3-9 se puede observar la distribución circular de los usos del agua. Cabe resaltar el alto porcentaje destinado al uso agrícola de hasta 90% que está compuesto por una parte de abastecimiento de agua superficial y otra parte por abastecimiento de agua subterránea. En los siguientes párrafos se explica cómo se estimó la demanda agrícola mensualmente, ya que solamente fue posible obtener datos anuales en la información disponible de la CEABC y la CONAGUA. En los

informes de la CONAGUA (2018) se manejan cifras de 80% de consumo de agua agrícola en Baja California.

Tabla 3-9 Resumen de las demandas del sistema del río Colorado en Mexicali. Elaboración propia con datos de (CEABC, 2017).

Demanda de agua (2017)	Superficial (Hm^3)	Subterránea (Hm^3)	%
UDU_Mexicali	68.41	-	2.52%
UDI_Mexicali	4.71	-	0.17%
Perdidas UDU y UDI	16.52	-	0.61%
UDI_Agua Residual (reciclada)	11.65	-	0.43%
Suma 3 UDR (Valle de Mexicali)	10.98	-	0.40%
Demanda agrícola DR-014	1753.19	700	90.38%
Acueducto ARCT (mesa arenosa)	-	148.96	5.49%
Subtotal	1865.46	848.9	
Gran total	2714.36		100%

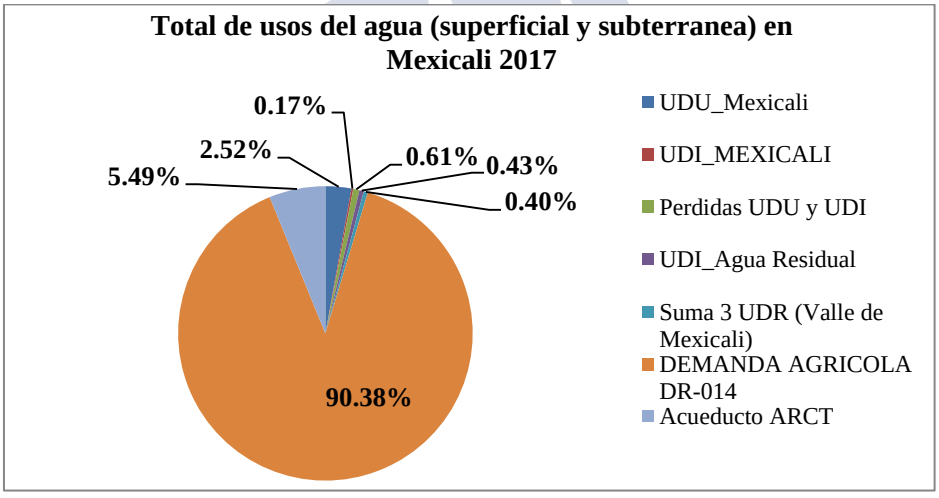


Figura 3-9 Distribución de los usos del agua en el sistema del río Colorado en Mexicali. Elaboración propia con datos de (CEABC, 2017).

En la figura 3-10 se muestran las demandas mensuales en la ciudad de Mexicali y su Valle. La demanda urbana de Mexicali (UDU) considera el agua para la población y servicios, la demanda industrial (UDI) el agua destinada a la industria y las demandas rurales (UDR) el agua para la población rural que habita en el Valle de

Mexicali (no se refiere al agua para la agricultura). En el caso de las UDR se sumaron en un solo concepto ya que los valores eran demasiado pequeños para representarlos en las gráficas, aunque en el esquema de AQUATOOL están individualmente. Existe otra demanda llamada demanda industrial de agua residual (UDI_Agua Residual) que se trata de la industria que recicla (da tratamiento) aguas residuales de la ciudad para sus procesos. Esa UDI_Agua Residual no debe ser sumada a la demanda consuntiva de la ciudad al tratarse de un reciclamiento. En la figura se puede observar que la UDU_Mexicali está muy por encima de las demandas industriales y rurales, sobre todo en los meses de verano.

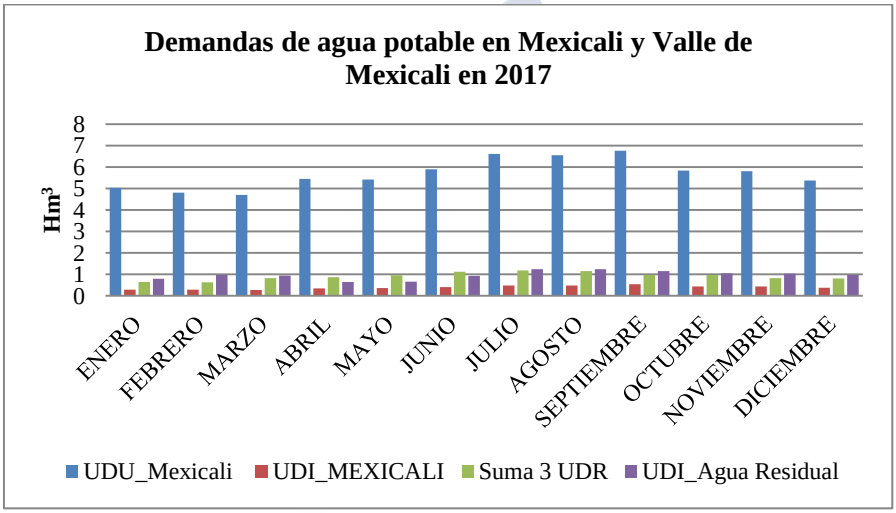


Figura 3-10 Demandas de agua potable en Mexicali y el Valle de Mexicali en 2017. Elaboración propia con datos de (CEABC, 2017).

Las UDRs individualmente se nombran Zona_VI, Zona_VIII y Zona_IX en el esquema del sistema del río Colorado en Mexicali. Estas demandas rurales están abastecidas por una parte con agua superficial y otra parte con agua subterránea. La Zona VI está completamente abastecida con agua superficial que corresponde a 0.218 Hm^3 anuales. Para la Zona_VIII se abastecen 0.211 Hm^3 anuales de agua superficial y 3.84 Hm^3 anuales de agua subterránea.

La zona _IX se abastece de 5.26 Hm^3 de agua superficial y 1.44 Hm^3 de agua subterránea anualmente.

3.2.3 El Acueducto río Colorado-Tijuana

En 1975 se inició la construcción del Acueducto río Colorado-Tijuana (ARCT) y entró en operación en el año de 1982, cumpliendo con la finalidad de abastecer de agua la demanda urbana de las otras ciudades del estado de Baja California, Tecate, Tijuana, Playas de Rosarito y recientemente también Ensenada.

El acueducto es operado por la Comisión Estatal del Agua de Baja California (CEABC), que recorre una distancia de 125 kilómetros y vence una altura de 1,061 metros, con una capacidad de diseño de 5333 l/s por medio de 6 plantas de bombeo.

El agua del ARCT proviene de fuente subterránea de una zona llamada Mesa arenosa de Andrade y no del valle de Mexicali, aunque se considera parte del mismo acuífero. En total se puede decir que anualmente se llegan a extraer hasta 849 Hm^3 de agua subterránea entre el valle de Mexicali y la Mesa arenosa. En la figura 3-11 se grafican los caudales anuales bombeados por el ARCT desde su inicio de operaciones en 1985 hasta el 2017 según los datos de la CEABC (2017). Se puede observar la tendencia de incremento que presenta debido al aumento en las demandas que este abastece en las demás ciudades del estado del B.C.

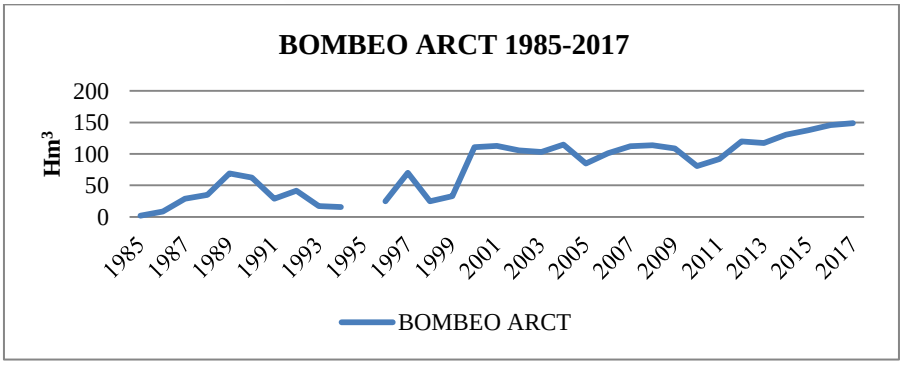


Figura 3-11 Bombeo de agua por el ARCT de 1985 a 2017. Fuente (CEABC, 2017)

3.2.4 Situación del agua subterránea la cuenca del río Colorado

El bombeo agua subterránea es de 180 Hm^3 aproximadamente en 2017 para las demandas de las ciudades de Tijuana, Rosarito, Ensenada y Tecate (CILA, 2017), como se observa en la figura 3-11. Esto difiere de los 148.96 que declara la CEABC)

Además el dato de la CILA (2017) no considera toda la extracción de agua subterránea anual, que en 2017 que se puede estimar en 848.96 Hm^3 (500 + 200 + 148.96) según los datos oficiales reportados en la página web del DR-014 que son 700 de pozos federales (500) y particulares (200)[4] más lo reportado por la CILA. Mientras que la recarga del acuífero esta reportada en 520.36 Hm^3 anuales, se puede afirmar que existe una sobreexplotación de aguas subterráneas.

La CILA, con su función de supervisión de aguas transfronterizas, respecto al agua subterránea declara que (CILA, 2017):

- No existe un tratado de aguas subterráneas entre México y Estados Unidos.
- Los asuntos transfronterizos relacionados al tema son atendidos caso por caso por la CILA.
- Existen diferencias entre ambos países respecto a la legislación y jurisdicción (federal en México, no federal en EUA) de las aguas subterráneas.
- Existe interés de ambos lados de la frontera en mejorar el conocimiento científico sobre los acuíferos transfronterizos.

En la figura 3-12 se observan las extracciones de agua subterránea en la franja fronteriza por parte de México y EUA desde 1973 al 2017. Es evidente que México hace un uso mucho más intenso del agua subterránea de lo que EUA extrae. Ambos países establecieron en el Acta 242 un límite de 197.35 Hm^3 de extracciones al acuífero, lo cual en muchos años no se cumple desde el 2004. En el AD-13 se pueden consultar los bombeos de agua subterránea de la Mesa Arenosa de

[4] http://distritoderiego.com.mx/informacion-distrito/

Andrade en 2017. Como se puede observar en la figura 3-13, en el último informe de estadística del agua en Mexica del 2018, la CONAGUA tiene clasificado al acuífero del río Colorado en zona de veda, por tener una condición sin disponibilidad y sobreexplotado.

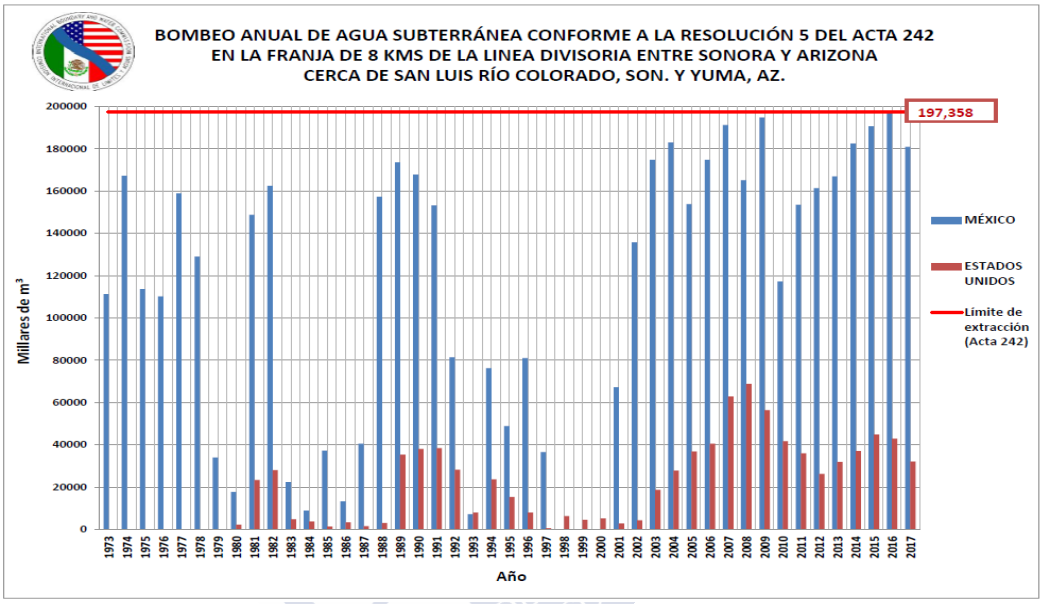


Figura 3-12 Extracciones de agua subterránea en la Mesa Arenosa de Andrade por parte de México y EUA de 1973 a 2017. Fuente (CILA, 2017)

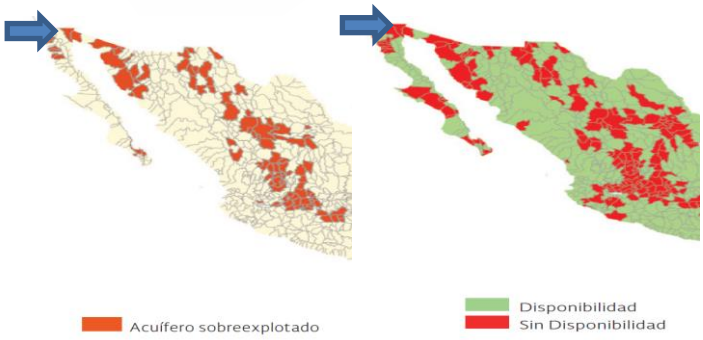


Figura 3-13 Situación de los acuíferos en México como sobreexplotados y por disponibilidad. Fuente (CONAGUA, 2018).

3.2.5 Impactos del cambio climático en la cuenca del río Colorado

Se han realizado estudios científicos de investigación y publicaciones sobre los posibles efectos del cambio climático en la cuenca del río Colorado. En la siguiente tabla 3-10 se resumen algunos estudios publicados sobre los impactos que los recursos hídricos del río Colorado podrían experimentar según los modelos de proyección del cambio climático. Todos los estudios coinciden con aumentos en la temperatura media anual. Para el caso de la precipitación y escorrentía, en los primeros estudios que se realizaron con los modelos del AR4 (CMIP3), coinciden con disminuciones en general en la cuenca del río Colorado. Sin embargo con los nuevos modelos del AR5 (CMIP5) que cuentan con mayor resolución espacial, muestran que la precipitación y la escorrentía varían respecto a la región y a la elevación, según la zona interna de la misma cuenca. En algunas zonas aumenta y en otras disminuyen tanto precipitación como escorrentía. Es posible notar que en la mayor parte de los estudios se utiliza el modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC).

La proyección oficial futura de disponibilidad real de agua la estima el USBR. Las estregas se hacen en coordinación de la CILA de ambos países y en el informe de estudio de 24 meses que realiza EUA a través del USBR con base en los niveles de las presas (propiedad de EUA) a lo largo de todo el río Colorado.

El USBR lleva a cabo proyecciones de las elevaciones del lago *Mead*, mismas que se resumen en los Informes del Estudio de 24 Meses de la cuenca del río Colorado. El modelo del Estudio de 24 Meses simula las operaciones en 12 de los principales embalses en la Cuenca del río Colorado. Las proyecciones se utilizan para avalar decisiones anuales y mensuales en materia de cómo operar el sistema durante los siguientes 1 a 2 años. Las condiciones anuales de operación para el lago *Mead* y el lago *Powell* durante el año siguiente se basan en la elevación del embalse proyectada para el 1º de enero que arroja el Estudio de 24 Meses correspondiente al mes de agosto. El estudio de 24 Meses utiliza el escurrimiento pronosticado para la

Cuenca Alta (proporcionado por el Centro de Pronósticos de la Cuenca del río Colorado), las proyecciones para las operaciones de las presas y para los programas de derivaciones y uso consuntivo, entre otros factores, para generar un escenario único de las posibles condiciones de los embalses (USBR, 2019).

Tabla 3-10 Proyecciones de estudios científicos de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos del río Colorado. Extraído de diversas fuentes.

Autor del estudio	Fuente de la variabilidad climática	Método de estimación de recursos hídricos	Periodo de tiempo	Result. Q, T, Pr.	Notas/Observaciones
Christensen, et al., 2004	NCAR GCMs, scenario Business as usual	VIC Hydrology Model	2010-2100	+ 2 ºC - 3% Pr - 17% Q	Los niveles promedio de embalses caen significativamente con incluso pequeñas reducciones de escorrentía.
Christensen and Lettenmaier, 2006	11 AR4[5] GCMs y A2,B1 escenarios de emisión	VIC Hydrology Model	2010-2099	+ 4.5 ºC - 2% Pr - 11% Q	Aumento de la precipitación invernal amortigua la reducción de la escorrentía.
Ficklin, et al., 2013	16 AR4 GCMs, A2 escenario de emisión	SWAT model	2050-2080	+ 4.7 ºC - 5% Pr - 23% Q	Resultados para la cuenca alta (superior) del río Colorado.
Brekke, et al., 2014	112 CMIP3 (AR4) y 31 CMIP5 (AR5) con 4 RCP	VIC Hydrology Model	1950-2099	+ 4 ºC - 6 a 12% Pr ± 15% Q	Lanzamiento de las proyecciones de hidrología, comparación con información previa y resumen de las necesidades del usuario
Udall & Overpeck, 2017	Datos observados	Datos observados	2000-2014	+ 0.9 ºC - 4.6% Pr - 11.4% Q	Estudio de las condiciones de sequía en la cuenca alta del río Colorado
Gautam & Mascaro, 2018	19 AR5 GCMs y 4 RCMs	No aplica.	1850-2005	- 4.9 ºC -44 a +19% Pr	La mayoría de los modelos sobreestiman la precipitación media anual y subestiman la temperatura media anual en todos los lugares

[5] IPCC AR4 Model results and comparison with observations, 2007

Los Lineamientos Interinos del USBR de 2007, los cuales se aprobaron en diciembre de 2007 y estarán en vigor hasta 2026, incluyen criterios para la implementación de condiciones de excedentes y escasez en la cuenca baja del río Colorado. Las proyecciones para el 1º de enero y las operaciones anuales resultantes para el lago *Mead* y el lago *Powell* se informan en el Plan Anual de Operación (AOP en inglés) para Vasos de Almacenamiento del río Colorado para el año siguiente. Los AOP actuales y de años anteriores se encuentran disponibles en el sitio web del *Bureau of Reclamation*. (USBR, 2019)

En la figura 3-14 se muestra la evolución de los niveles de la presa *Hoover* en el lago *Mead* desde el 2000 hasta el 2018 con la proyección al 2020, realizado a partir de los AOP reportados por el USBR. Se puede notar claramente la tendencia de caída en el nivel de la presa desde el año 2000, como reporta el USBR al establecer la situación de sequía en la cuenca del Colorado. En la tabla 3-11 se menciona la clasificación de condición considerada para el lago *Mead* según sus niveles de metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) y su almacenamiento útil. A la fecha de agosto de 2018, el lago *Mead* se encuentra en un nivel de 328.4 metros, lo que lo ubica en una condición "Normal" en su límite inferior. Sin embargo la proyección del estudio de 24 meses define que muy probablemente a partir de Mayo del 2019 se entre a la "condición de escasez nivel 1" y continúe el decremento del nivel hasta llegar muy cerca del límite con el Nivel 2 de escasez. En el AD-14 se pueden consultar los niveles de la presa *Hoover* 1935-2018.

A pesar de lo establecido en el Acta 323, el 15 de agosto de 2018, la CILA emitió un boletín informativo en donde se estipula que "México recibirá su asignación completa de agua del río Colorado en 2019". Sin embargo para efectos de este trabajo de tesis, se utilizaran las aportaciones reducidas estimadas de 2018-2020. Este documento se puede consultar en el anexo digital AD-16.

Tabla 3-11 Clasificación de las distintas condiciones del lago *Mead* según el nivel en metros y el almacenamiento útil. Adaptado de (USBR, 2019).

Condición	Nivel en metros (m.s.n.m.)	Almacenamiento útil en millones de metros cúbicos
Excedentes con control de avenidas	> 365.8	> 28493
Excedentes cuantificados y excedentes domésticos	349 – 365.8	19982 a 28493
Condición normal	327.7 - 349	11841 a 19982
Condición de escasez Nivel 1	320 – 327.7	9498 a 11841
Condición de escasez Nivel 2	312.4 - 320	7401 a 9498
Condición de escasez Nivel 3	< 312.4	< 7401

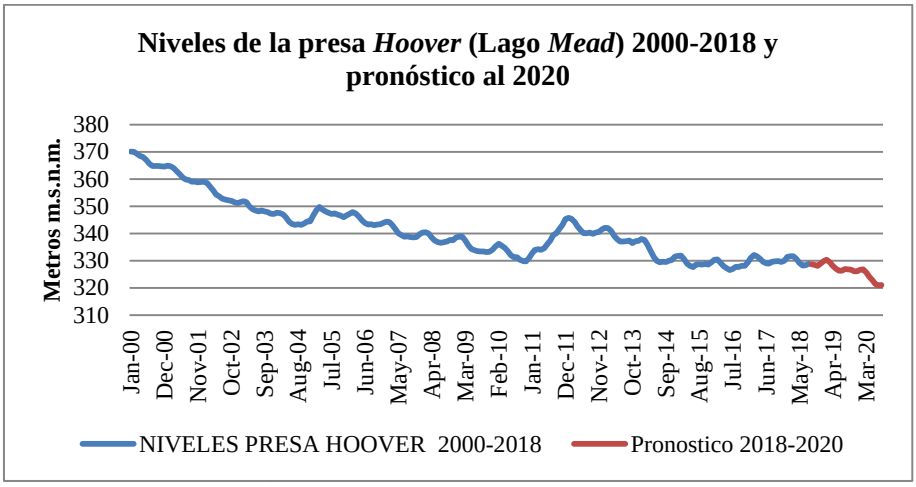


Figura 3-14 Niveles de la presa *Hoover* (Lago *Mead*) 2000-2018 y pronóstico 2020. Elaboración propia con datos del (USBR, 2018) y (USBR, 2019).

3.2.6 Proyectos internacionales para la gestión del agua entre México y EUA

Desde su creación a partir del Tratado de Aguas Internacionales (TAI) en 1944, los gobiernos de México y EUA a través de la CILA han buscado la cooperación en las situaciones de gestión del agua que se han presentado en sus cuencas transfronterizas. Esta cooperación internacional se ve reflejada en las ACTAS que firman ambos representantes de cada país en las reuniones que se llevan a cabo para tratar temas de gestión de aguas binacionales. Al 2017 se han firmado

323 Actas en las cuales las más relevantes para el tema de esta tesis son dos, la 319 y la 323.

En el Acta 319 se establecen, dentro de otras cosas, los fundamentos para la cooperación internacional de la cuenca del río Colorado. En el Acta 323 se especifica en Plan Binacional de Contingencia, en el cual se marcan dos cosas relevantes, 1) las acciones a realizar respecto a los nieles altos (incrementos en la entrega) y bajos (ahorros en la entrega) tomando de referencia el Lago Mead en EUA y 2) los proyectos para conservación y nuevas fuentes de agua tanto en México como en EUA.

Aunque en el TAI del 1944 se establece que EUA debe entregar anualmente a México 1,850 hm^3 de agua del río Colorado, en el 319 y en la 323 de la CILA se establecen los acuerdos de las disminuciones en las entregas de agua proporcionales a la disminución de la disponibilidad en la cuenca del río Colorado a lo largo del siglo XXI, en caso de ser necesario. Por esta razón los efectos que el cambio climático tenga sobre la cuenca alta, se verán también reflejados en la cuenca baja, a donde pertenece Mexicali y de la cual depende gran parte de B.C.

Las disminuciones de entrega a México consideradas en el Acta 323 como "Ahorros de México al Plan Binacional de Contingencia" se muestran en la siguiente tabla 3-12:

Tabla 3-12 Ahorros de México al Plan Binacional de Contingencia respecto las elevaciones en el Lago Mead. Fuente (CILA, 2017)

Elevaciones en el Lago Mead en pies sobre el nivel del mar (psnm) proyectadas al 01 de Enero	Ahorros de México al Plan Binacional de Contingencia (Hm^3)
En o por debajo de 1090 y por encima de 1075	51
En o por debajo de 1075 y por encima de 1050	37
En o por debajo de 1050 y por encima de 1045	42
En o por debajo de 1045 y por encima de 1040	94
En o por debajo de 1040 y por encima de 1035	104
En o por debajo de 1035 y por encima de 1030	113
En o por debajo de 1030 y por encima de 1025	125
En o por debajo de 1025	185

Como parte del plan de acciones de contingencia para la escasez de agua en el Acta 323, la CILA ha propuesto los siguientes proyectos en México para asegurar la disponibilidad de agua en la cuenca. Estos proyectos en México contarían con una gran parte de apoyo económico de EUA, ya que el beneficio sería para ambas naciones. Adicionalmente EUA realizaría proyectos en su territorio. Los proyectos contemplan lo siguiente:

- Proyectos de Conservación de Agua en B.C.: Revestimiento de canales, Conservación a nivel parcelario, Vasos reguladores, Descanso de tierras, Modernización y tecnificación en los distritos de riego, Mejoras en la operación del sistema, Creación de humedales y reúso de aguas tratadas.
- Proyectos de Nuevas Fuentes de Agua en B.C.: Planta Desalinizadora Binacional en la costa del océano pacífico, Planta Desalinizadora Binacional en el Río Nuevo, Planta Desalinizadora Binacional en el Mar de Cortés, Reuso del efluente de las plantas de, tratamiento en el Valle de Mexicali para humedales o para la restauración riparia del río Colorado, Reuso en los Estados Unidos del efluente de la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Tijuana (PITAR).
- Proyectos de Conservación de Agua en EUA: *U.S. Department of the interior, Bureau of Reclamation*, ha propuesto una serie de proyectos basados en los estudios de cambio climático que ha realizado para la cuenca del río Colorado en su reporte "*Secure Water Act, Reclamation Climate Change and Water 2016*". La propuesta, incluye diferentes tipos de proyectos en temas de: Desalinización (en México y EUA), Reuso, Mejoras en el abastecimiento local, Mejoras en el manejo de la cuenca, Importación de agua (desde México), Conservación de agua, Conservación de agua en agricultura, Eficiencia en el uso de agua

para energía, y Mejoras en el sistema de operación (control de evaporaciones y operación de reservorios).

3.2.7 Necesidades de agua para el medioambiente

El estudio de Hinojosa-Herta & Carrillo-Guerrero (2010), en la publicación titulada "Las cuencas hidrográficas de México", hacen mención sobre las caracteristicas ambientales de la cuenca del río Colorado. Se hace referencia sobre los daños ecológicos a lo largo del recorrido del río, causadas por las grandes obras de ingenieria hidraulica y a que no se consideraron las necesidades ambientales cuando se realizó la asignación de flujos. Esto ha significado la pérdida de valores ambientales y de calidad del hábitat en toda la cuenca, de tal forma que el lecho del río queda seco cerca de la frontera entre EUA y México. El río Colorado ya no desemboca en el Alto Golfo de California, lo que ha causado la disminución de poblaciones de peces y vida silvestre, al grado que dies especies endémicas y 45 especies nativas de la cuenca se encuentran en peligro de extinción.

La variación de flujos de carácter estacional del río Colorado tenía máximos de 2800 m^3/s durante el deshielo (mayo a julio) y mínimos de 140 m^3/s durante el otoño e invierno, antes de la construccion de las obras hidraulicas en territorio de EUA. En el delta del río Colorado, los flujos de agua dulce mantenian una zona de las de 400,000 hectareas de bosques riparios y humedales de agua dulce. Antes de la construcción de las presas, el río desembocaba mas de 15,000 millones de m^3 (Hm^3) al año, cuya influencia se extendía 65 km mar adentro, formando una zona de gran importancia para la reproducón, desove y crianza de una gran variedad de organismos marinos (Hinojosa-Herta & Carrillo-Guerrero, 2010).

En la actualidad, los humedales se han reducido a 100,000 ha y están constituidos por una serie de ecozonas contrastantes, que van de las zonas más áridas en el desierto hasta las marismas más reproductivas. Estos humedales han logrado mantenerse gracias a desfogues esporádicos de las presas en EUA, flujos de drenes agrícolas y a escurrimientos de los canales de riego que no están

revestidos. También la planta de tratamiento de aguas residuales "Las Arenitas" de Mexicali, tiene un flujo designado para fines ambientales de aproximadamente 300 l/s. En otras palabras, han logrado sobrevivir con flujos de segunda mano o con "ineficiencias" en el sistema de conducción. No obstante, sigue siendo un oasis de vida en medio del desierto, manteniendo una gran diversidad de especies gracias a su adaptabilidad y resiliencia y a las fuentes de agua no convencionales (Hinojosa-Herta & Carrillo-Guerrero, 2010).

En total se estima que se requieren entre 390 y 600 millones de m^3 (Hm^3) al año para restaurar y mantener las funciones ambientales en el delta del río Colorado, lo que significa un 3.33% del flujo total anual de la cuenca completa (Zamora-Arroyo, et al., 2005). En la tabla 3-13 se mencionan las zonas de en el delta del Colorado, el respectivo volumen de agua estimada para la restauración ambiental, la concetración salina recomendada, asi como el área que representa cada zona.

Tabla 3-13 Requerimientos de flujos ambientales en el delta del río Colorado. Fuente (Hinojosa-Herta & Carrillo-Guerrero, 2010).

Zona	Millones m^3/año	Salinidad ppm	Hectáreas
Corredor Ripario	102-204	<2000	45000
Río Hardy	38-63	3500	8000
Ciénega de Santa Clara	132	3000	20000
Laguna del indio	25-38	3800	1500
Estuario	95-158	3500	15000

3.2.8 Conflictos por el agua: Demanda de la Cervecería Constellations Brand en Mexicali, B.C.

Desde inicios del 2016 se ha hecho presente un conflicto entre grupos sociales y el gobierno estatal, en el cuál se cuestionan las irregularidades con las que la Cervecería Constellations Brand (CCB) de EUA ha iniciado obras de instalación para una planta de producción de cerveza. Las manifestaciones locales ha puesto una resistencia que se notado en noticias internacionales, reclamando una mejor gestión del agua en la región, que en la actualidad se encuentran

en estado de estrés hídrico. La fuente de agua subterránea se encuentra declarada en déficit por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

La demanda de agua de la CCB está dividida en dos etapas de dos fases cada una (4 fases en total) como está estipulado en los planes publicados por el proyecto de la Cervecería, a través de los comunicados en los medios de comunicación y en el Manifiesto de Impacto Ambiental (MIA) declarado por la CCB[6]. En la tabla 3-14 se muestran las cantidades de agua requeridas expresadas para los diferentes conceptos en cada una de las fases del proyecto. Cabe destacar la cantidad de producción total buscado de 20 millones de Hectolitros (2 Hm^3) anuales al termino de las 4 fases. La relación de agua como materia prima es de 3.5 litros de agua por litro de cerveza, según declara la CCB. Esta agua como materia prima es excluyente de todos los otros posibles procesos existentes por lo que se refiere únicamente al líquido para cerveza. La CCB ha declarado que requiere de 1.75 Hm^3 anuales para producir los 0.5 Hm^3 (5 millones de Hectolitros) de cada fase anualmente. El agua para todos los otros procesos se estima en 3.25 Hm^3 anuales de acuerdo a la relación de 35% agua en materia prima y 65% agua residual de procesos y auxiliares. El total de agua requerida es de 5 Hm^3/año por fase, con un total final de 20 Hm^3 para el proyecto final. Esta cantidad equivale a lo declarado en los medios de comunicación de que la CCB busca obtener 20 Millones de metros cúbicos (20 Hm^3) de agua para su planta de producción.

Como contraste a los requerimientos publicados por la CCB sobre la necesidad de agua por litro de cerveza mencionada en el párrafo anterior, Water Footprinting (2009) ha publicado que el promedio en la industria de cerveza es de 5 litros de agua por litro de cerveza, y que la empresa británico-sudafricana SABMiller declaró que trabaja en la iniciativa de reducir el consumo al mencionado por la CCB.

En la revisión de los datos del MIA, se encontró que las fuentes de abastecimiento buscadas por la CCB son de 15 Hm^3 anuales de

[6] http://www.cbrands.mx/nuestra-historia/unidades-de-negocio/

agua subterránea, a través de pozos de perforación en una zona cercana a la Mesa arenosa de Andrade y un acueducto con capacidad de 475 l/s (14.98 Hm^3). Además, 5 Hm^3 anuales se pretenden de fuentes superficiales de los canales de riego o de la red de agua potable de la ciudad de Mexicali, llamadas fuentes de respaldo en el MIA. El organismo operador de Mexicali, CESPM, declaró a CCB tener disponibles hasta 10 Hm^3 al año.

A diferencia de la tabla anterior 3-7, en la tabla 3-8 se muestran los valores calculados a partir del dato que declara el MIA del tanque de agua para materia prima de la cerveza, con un consumo mensual de 212,666 m^3/mes (equivalente a 2.551 Hm^3/año) al finalizar las 2 etapas (4 fases). Tomado esta referencia de producción mensual se calcula la diferente producción anual en cada de cerveza de 0.638 Hm^3/año o bien 6.38 Millones de Hectolitros, a diferencia de los 5 millones que se declaran en los medios de comunicación. Utilizando la relación declarada por CCB de 3.15 (no de 3.5) se calcula el agua como materia prima de cerveza en 2.0089 Hm^3/año por cada fase. El agua residual de procesos auxiliares se estima en 3.73 Hm^3/año por fase, que la suma de esta cantidad en las 4 fases coincide con los 15 Hm^3/año del agua subterránea. Por último el total de la demanda de agua en cada fase se estima en 5.789 Hm^3 con un total de 23 Hm^3 anuales para el proyecto final.

Tabla 3-14 Cantidades de agua requeridas por concepto y por fase para el proyecto de la CCB en Mexicali, B.C. Fuentes (Forbes México, 2016), (La Jornada, 2017), (Geografía Septentrional, 2018), (Lindero Norte, 2017).

		ETAPA 1		ETAPA 2		
Concepto:	Unidades	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	TOTAL
Producto Cerveza	HL/año	5,000,000	5,000,000	5,000,000	5,000,000	20,000,000
Relación Agua Materia Prima (AMP):Cerveza	3.5 : 1					
Agua MP para cerveza	Hm^3/año	1.75	1.75	1.75	1.75	7
Relación AMP / Agua procesos y auxiliares	0.35 / 0.65					
Agua residual de procesos auxiliares	Hm^3/año	3.25	3.25	3.25	3.25	13
Total demanda agua	Hm^3/año	5	5	5	5	20

Estas cantidades de la tabla 3-14 podrían tratarse de las capacidades máximas de producción y las de la tabla 3-15 las cantidades promedio pretendidas por CCB. Sin embargo coinciden los volúmenes de agua pretendidos de agua subterránea de 15 Hm^3 que son de menor calidad y ser utilizados en los procesos auxiliares, mientras que los 5 Hm^3 de agua potable que podrían entregarse a través de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM), serían utilizados como materia prima para la cerveza.

Tabla 3-15 Descripción de las cantidades de agua requeridas por concepto y por fase para el proyecto de la CCB en Mexicali, B.C. Calculadas a partir de los datos de (Constellations Brands, 2018)

		ETAPA 1		ETAPA 2		
Concepto:	Unidades	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	TOTAL
Producto Cerveza (estimación publica)	HL/año	5,000,000	5,000,000	5,000,000	5,000,000	20,000,000
Producto Cerveza (calculado datos MIA)	HL/año	6,379,980	6,379,980	6,379,980	6,379,980	25,519,920
Equivalencia Producto Cerveza en Hm3	Hm^3/año	0.638	0.638	0.638	0.638	2.551
Relación Agua Materia Prima (AMP):Cerveza	3.15 : 1					
Agua MP para cerveza	Hm^3	2.01	2.01	2.01	2.01	8
Relación AMP / Agua procesos y auxiliares	0.35 / 0.65					
Agua residual de procesos auxiliares	Hm^3/año	3.73	3.73	3.73	3.73	15
Total demanda agua	Hm^3/año	5.74	5.74	5.74	5.74	23

Desde finales del 2016 a la fecha se han presentado un par de sucesos relacionados a la gestión del agua en el estado de Baja California, que causó protestas en la ciudad de Mexicali en donde según los medios locales, hasta 40 mil personas salieron a las calles para manifestar su inconformidad. Uno fue la aprobación y posterior abrogación de una nueva ley estatal de agua y el otro, que ha causado mayor polémica ha sido el inicio de instalación de una planta cervecera en el valle de Mexicali, el cual presenta una serie de

irregularidades en su proceso de aprobación y concesión de agua. A inicios del 2017, el gobernador del estado ha estado rodeado de una serie de polémicas y presiones sociales en donde es seguido muy de cerca por los medios de comunicación y sociales en cada acción que hace. Para el año 2018, continuaron algunos sucesos de enfrentamientos entre los grupos sociales de protesta y las autoridades del gobierno estatal, lo cual ha quedado publicado por varios periódicos locales e internacionales como proceso.com.mx (2018), animalpolitico (2017), animalpolitico (2018).

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

4 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describen la metodología para la cuantificación de los recursos hídricos, la simulación en la gestión, obtención de modelo base, así como el origen de datos e información que se requirieron para lograr los objetivos establecidos en esta tesis. Se han utilizado distintas herramientas como QGIS y R-Studio para tratar los datos y la información los mapas y variables climatológicas necesarias durante las distintas etapas de la metodología. Dentro de los métodos de procesamiento de los datos se han utilizado la estadística descriptiva, técnicas geoestadísticas y de interpolación espacial. El modelo hidrológico utilizado para los cálculos del balance hídrico ha sido Visual-Balan desarrollado por la Universidad de A Coruña. Los datos meteorológicos fueron obtenidos de la red meteorológica de comunidad autónoma de Galicia llamada Meteogalicia. Los datos de proyección de cambio climático fueron obtenidos de la iniciativa Euro-Cordex y de los escenarios generados por este proyecto. También el software AQUATOOL es descrito en su función para la simulación de redes de flujo para la gestión del agua. En la figura 4-1 se representa el proceso general de la metodología seguida en esta tesis, que consta de seis etapas (recuadros de color negro), en donde para cada una de éstas es necesario un sub-proceso. Los recuadros en color rojo son datos e información de adquirida de alguna fuente, los de color azul son softwares o métodos de procesamiento de datos y los recuadros en verde son los resultados obtenidos del sub-proceso para poder cumplir con el propósito de cada una de las etapas.

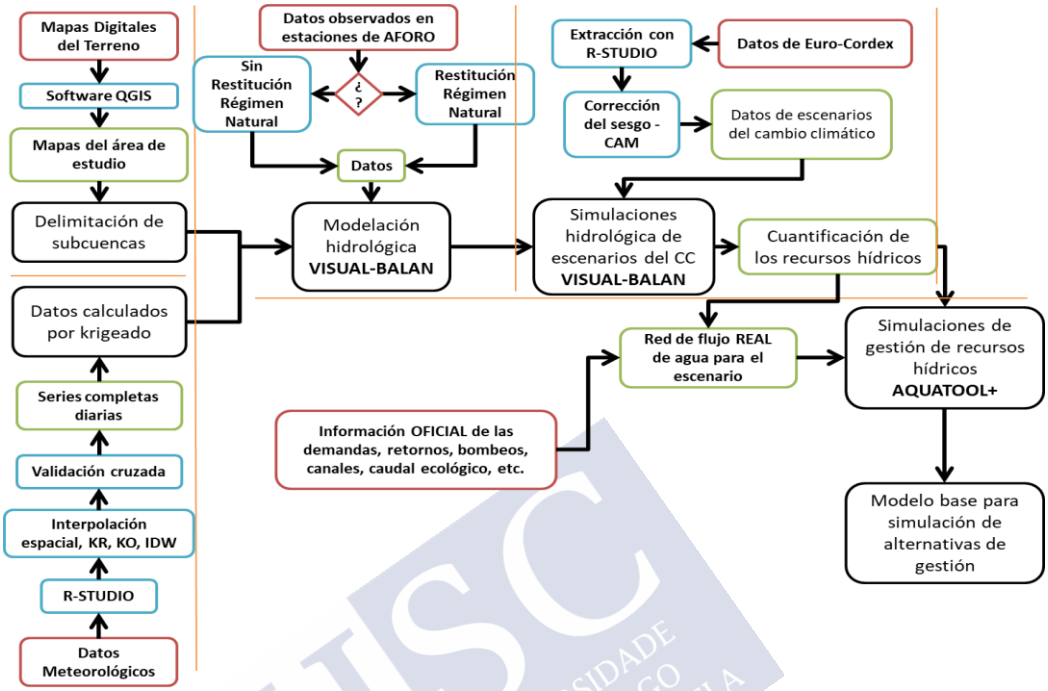


Figura 4-1. Diagrama de proceso general de la metodología para el río Cabe. Elaboración propia.

4.1 DELIMITACIÓN DE LAS SUBCUENCAS DEL RÍO CABE

La cuenca es la unidad territorial designada para la gestión de recursos naturales y de los recursos hídricos en particular, lo que la hace imprescindible para los análisis territoriales. Con la finalidad de establecer las bases para una gestión adecuada de los recursos naturales en el nivel nacional y transfronterizo se hace necesaria la elaboración de un mapa de unidades hidrográficas. Una cuenca hidrográfica está constituida por el territorio que delimita el curso de un río y el espacio donde colecta el agua que converge hacia un mismo cauce, por decirlo de otra manera, es el territorio cuyas aguas afluyen a un mismo río, lago o mar.

Para poder delimitar las cuencas, a fin de analizar la hidrología en el área de estudio, es necesario obtener o en su caso, generar los mapas del área de estudio. En este trabajo se requirió información

geo-espacial del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España y del software libre QGIS para procesar y obtener los mapas de delimitación del área de estudio.

En la figura 4-2 representa el proceso para la delimitación de las subcuencas, el cual inicia con la información de los modelos digitales del terreno (MDT), los cuales son trabajados con el software de información geográfica QGIS para poder generar los mapas del área específica de interés. Por ultimo con las herramientas de GRASS incluida en QGIS es posible delimitar las subcuencas.



Figura 4-2 Procedimiento para la delimitación de las subcuencas. Elaboración propia.

A continuación se describen las características importantes de los elementos de la figura anterior.

4.1.1 Información cartográfica

Un modelo digital de terreno (MDT) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continúa. En definitiva un MDT es una representación de la topografía de una zona terrestre en una forma adaptada digitalmente. Esta información, junto al software QGIS, es necesaria generar los mapas de red de drenaje y para proceso de delimitación de la cuenca.

El IGN es una institución del Centro Nacional de Información Geográfica del Gobierno de España que cumple con las funciones relacionadas a la comercialización y difusión de la información geográfica que ésta genera y maneja, garantizar la calidad de la información, apoyar el desarrollo de la cartografía nacional, participar en la investigación, tecnología e innovación, mantener el sistema de información pública, brindar asistencia técnica especializada y en general gestionar la información geográfica de España.

A través del IGN se obtuvo del centro de descargas la información de mapas ráster MTN (Mapa Topográfico Nacional) 25 y 50 respectivos a las secciones 123, 124, 155, 156, 189 de la cuadricula cartográfica 1:50000 que abarcan la extensión del área de estudio. Los mapas descargados, con Sistema de Coordenadas de Referencia (SCR) ETRS89, fueron:

- MDT200 (Modelo Digital del Terreno)
- MDT05 LIDAR (LIDAR, Laser Imaging Detection and Ranging)
- BTN25 (Base Topográfica Nacional)

4.1.2 Software QGIS

QGIS, es un Sistema de Información Geográfico (SIG o GIS en inglés) de código abierto. Actualmente funciona para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows y Android. QGIS pretende ser un SIG amigable, proporcionando funciones y características comunes. Admite diversos formatos de datos ráster y vectoriales, con el nuevo formato de ayuda fácilmente agregado usando la arquitectura del complemento. QGIS se distribuye bajo la Licencia Pública General GNU (GPL).

QGIS ofrece muchas funcionalidades SIG comunes proporcionado por las características principales y complementos:

- Ver datos
- Explorar datos y componer mapas
- Crear, editar, gestionar, analizar y exportar datos
- Publicar mapas en internet
- Extender funcionalidades QGIS a través de complementos
- Consola de Python
    - Complementos de calculo

Dentro de los complementos de QGIS que fueron utilizados en este trabajo, se encuentran las utilidades y las herramientas de:

- GDAL (Geospatial data abstraction library)
- GRASS-PROJECT (Geographic resource analysis support system)

4.2 DATOS METEOROLÓGICOS

Los datos de los parámetros meteorológicos observados dentro del área de estudio es información fundamental para iniciar el proceso de cuantificación de los recursos hídricos. El procedimiento propuesto en este trabajo de tesis está ilustrado en la figura 4-3, el cual consta primeramente de obtener los datos de la red de Meteogalicia para una extensión superior a la del área de estudio. Después, mediante el software R-Studio es posible aplicar la técnica geoestadística, así como de interpolación espacial y su respectiva validación cruzada para estimar las series completas diarias de valores para los parámetros meteorológicos requeridos, en caso de no disponer de la totalidad de los datos.

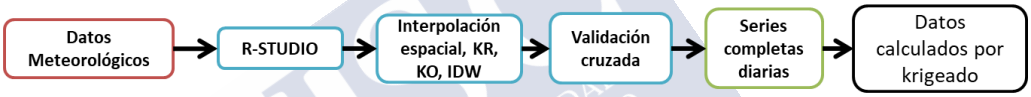


Figura 4-3 Procedimiento para la generación de datos meteorológicos en el área de estudio. Elaboración propia.

Con este procedimiento mostrado en la figura anterior, es posible obtener los datos meteorológicos considerados como observados, aunque en realidad son estimaciones de interpolación espacial de datos observados reales en una extensión mayor.

4.2.1 Datos observados de MeteoGalicia

MeteoGalicia es la red de predicciones y observación meteorológica de la comunidad autónoma de Galicia. Forma parte de la Consellería de Medio Ambiente e Ordenamiento do Territorio de la Xunta de Galicia. Desde su página web se han descargado los datos de las series históricas diarias de 146 estaciones para el periodo de 11 años hidrológicos iniciando el 01/Octubre/2006 al 30/Septiembre/2017 para los siguientes parámetros meteorológicos en archivos JSON:

- Temperatura máxima a 1.5 metros (T máx.)
- Temperatura mínima a 1.5 metros (T min)
- Temperatura media a 1.5 metros (T media)
- Precipitación (Pr)
- Evapotranspiración de referencia (ET_0)

La información divulgada a través del servidor de MeteoGalicia se ofrece gratuitamente para que pueda ser utilizada libremente, con el único compromiso de mencionar expresamente a MeteoGalicia y a la Consellería de Medio Ambiente e Ordenación do Territorio de la Xunta de Galicia como fuente de la misma cada vez que las utilice para los usos distintos del particular y privado (MeteoGalicia, 2018).

Las únicas estaciones meteorológicas que se encuentran dentro del área de estudios son la de Bóveda y Monforte. Otras estaciones cercanas son la de Abradelo, Samos, Morelle, Alto do Poio y Courel, sin embargo ninguna contaba con series de datos completas para los 11 años hidrológicos (4018 días). Por tal motivo, se descargó la información de las 146 estaciones de MeteoGalicia para aplicar métodos de interpolación espacial que permiten obtener series de datos completas para los puntos de interés dentro del área de estudio.

En el anexo AD-01 se encuentra un listado con los nombres de las estaciones 146 estaciones con las coordenadas X, Y en UTM-ETRS89 y la respectiva altura de cota.

El método de cálculo que MeteoGalicia utiliza para la ET_0 es el recomendado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) Penman-Monteith.

Para el caso de todos los parámetros meteorológicos, únicamente se han utilizado los datos que han sido reportados como validados por parte de la institución emisora.

4.2.2 Métodos de interpolación espacial

A partir de las series históricas diarias de 2006 a 2017 se recurrió a métodos de interpolación para generar series de datos diarias completas para las subcuencas de área de estudio. Uno de los métodos de interpolación espacial más utilizados es la geoestadística.

El objetivo de la geoestadística es predecir la posible distribución espacial de una propiedad en estudio. Tal predicción a menudo toma la forma de un mapa o una serie de mapas. Existen dos formas básicas de predicción: estimación y simulación. En la estimación, se produce una única estimación (mapa) estadísticamente "óptima" de la ocurrencia espacial. La estimación se basa tanto en los datos de muestra como en un modelo (variograma) determinado como la representación más precisa de la correlación espacial de los datos de muestra. Esta estimación o mapa único generalmente se produce mediante la técnica de krigeado. Por otro lado, en la simulación, se producen muchos mapas de igual probabilidad de distribución de la propiedad, utilizando el mismo modelo de correlación espacial que se requiere para el krigeado. Las diferencias entre los mapas alternativos proporcionan una medida de la cuantificación de la incertidumbre, una opción no disponible con la estimación (Zhang, 2009).

4.2.2.1 Concepto de krigeado

El krigeado es un interpolador exacto, es decir, la estimación en un sitio con dato vuelve a dar el valor de este dato, mientras que la varianza del krigeado en ese sitio es nula. Para demostrarlo, basta con verificar que, si el sitio a estimar x_0 es el mismo donde se midió un dato, el estimador definido por $Z^*(x_0) = Z(x_0)$ cumple las tres restricciones del krigeado. En especial, el error de estimación asociado es nulo, luego obviamente insesgado y de varianza mínima (nula) (Emery, 2013).

Existen diferentes variaciones del krigeado con variables secundarias, como krigeado universal (KU), krigeado de regresión (KR) o krigeado con deriva externa (KDE). En teoría, todos los nombres describen la misma técnica. En la práctica, hay algunas diferencias computacionales: en el caso del krigeado de regresión, los

predictores determinístico (regresión) y el estocástico (krigeado) se calculan de manera separada; en el caso de krigeado con deriva externa, ambos componentes son predecidos simultáneamente; el termino krigeado universal es a menudo reservado para el caso cuando la parte determinística es modelada como una función de las coordenadas (Hengl, 2009).

Goovaerts (1997), utiliza el termino krigeado con modelo de tendencia (KMT) para referir a una familia de predictores, y se refiere al krigeado de regresión como un krigeado simple con variación en las medias locales. Aunque equivalentes, KDE y RK difieren en los pasos computacionales utilizados.

En la figura 4-4 se muestra un ejemplo grafico del concepto de krigeado de regresión en una sección transversal. En el eje Y indica los valores de la variable objetivo, mientras que en el eje X se indica el espacio geográfico o la distancia (s) y los puntos z(s) (en rojo) representan los valores de las observaciones o muestras de campo. La línea negra irregular ilustra los valores de la variable si esta hubiese sido muestreada muy densamente, la línea punteada muestra la función (tendencia) de regresión ḿ(s) de los valores observados o muestreados y los residuales son la distancia entre los valores observados y la función de regresión. Finalmente la línea azul representa la estimación final por krigeado de regresión, la cual se puede observar que es mucho más suavizada que la línea negra de los valores supuestos reales y que se adapta muy bien a la tendencia de los valores reales. Al momento de utilizar los valores estimados mediante krigeado para cálculos posteriores, debe considerarse como una realidad más "suavizada" que la que tendría la verdadera.

En teoría, entre regresión-kriging, kriging universal y kriging con deriva externa, describen la misma técnica. En la práctica, hay algunas diferencias computacionales: en el caso de la regresión kriging, las predicciones determinísticas (regresión) y estocásticas (kriging) se hacen por separado; en el caso de kriging con deriva externa, ambos componentes se predicen simultáneamente; El término kriging universal se reserva a menudo para el caso cuando la parte

determinista se modela como una función de coordenadas. (Hengl, 2009).

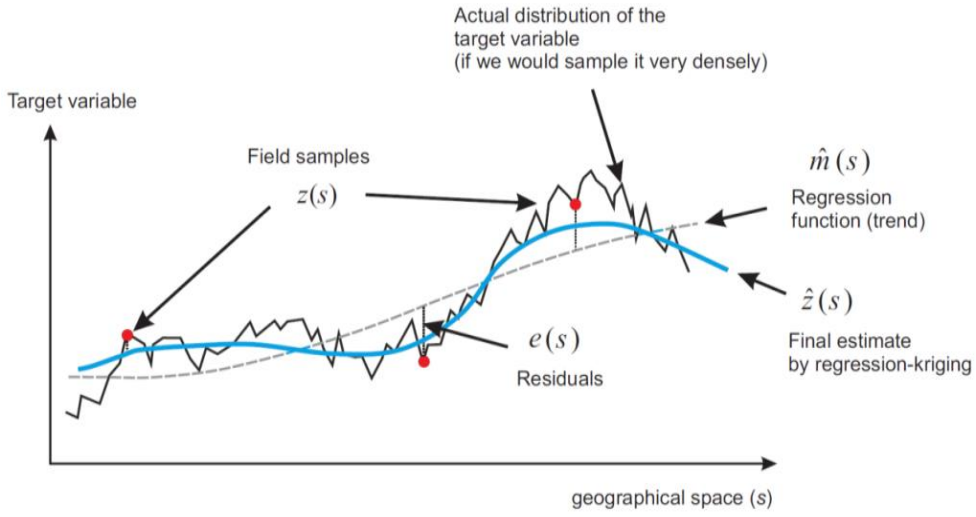


Figura 4-4 Ejemplo gráfico del concepto de krigeado de regresión. Fuente (Hengl, 2009).

4.2.2.1 Krigeado ordinario

El término ordinario significa primero que la variable solo se modela a partir de sí misma y su posición espacial, sin otra información, como una tendencia geográfica u otra variable, segundo que la media espacial no se conoce a priori y debe estimarse a partir de los datos (Rossiter, 2017).

Las predicciones están basadas en el modelo según Hengl (2009), en las siguientes ecuaciones:

$$Z(s) = \mu + \varepsilon'(s)$$

Donde μ es la función estacionaria constante (media global) y $\varepsilon'(s)$ es la parte estocástica correlacionada de la variación. Las predicciones están hechas con la ecuación:

$$\hat{z}_{OK}(s_0) = \sum_{i=1}^{n} w_i(s_0) * z(s_i) = \lambda_0^T * z$$

Donde λ_0 es el vector de los pesos de kriging w_i, z es el vector de n observaciones en las locaciones primarias. De cierta manera, el kriging puede ser visto como una sofisticación de la interpolación de distancia inversa. Matheron (1962) y sus colegas introdujeron para el análisis de datos puntuales la derivación y trazado de lo entonces llamado *semivarianzas*, actualmente llamadas simplemente *varianzas* (Hengl, 2009):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[\big(z(s_i) - z(s_i + h)\big)^2]$$

Donde $z(s_i)$ es el valor de la variable objetivo en alguna locación muestra y $z(s_i+h)$ es el valor del vecino a la distancia (s_i+h).

El proceso completo del método de krigeado ordinario (KO) se puede consultar en el libro de Hengl (2009) en la sección 1.31, página 15.

4.2.2.2 Krigeado de regresión

Matheron (1969) propuso que el valor de la variable objetivo en la misma locación puede ser modelada como la suma de los componentes determinísticos y estocásticos:

$$Z(s) = m(s) + \varepsilon'(s) + \varepsilon''$$

El cual él definió como modelo universal de variación espacial. Los componentes determinístico y estocástico de la variación espacial pueden modelarse separadamente:

$$\hat{z}(s_0) = \hat{m}(s_0) + \hat{e}(s_0) = \sum_{k=0}^{p} \hat{\beta}_k * q_k(s_0) + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i * e(s_i)$$

Donde $\hat{m}(s_0)$ es la parte determinística ajustada, $\hat{e}(s_0)$ es el residual interpolado, $\hat{\beta}_k$ son los coeficientes del modelo determinístico

estimados ($\hat{\beta}_0$ es la intercepción estimada), λ_i son los pesos del krigeado determinados por la estructura de la dependencia espacial de los residuos y donde $e(s_i)$ es el residuo en la locación s_i. Los coeficientes de regresión $\hat{\beta}_k$ pueden ser estimados de la muestra por algún método de ajuste, como por ejemplo mínimos cuadrados ordinarios (OLS en inglés) u óptimamente utilizando mínimos cuadrados generalizados (GLS en inglés):

$$\hat{\beta}_{GLS} = (q^T * C^{-1} * q)^{-1} * q^T * C^{-1} * z$$

Donde $\hat{\beta}_{GLS}$ es el vector de los coeficientes de regresión estimados, *C* es la matriz de covarianza de los residuales, *q* es la matriz de predictores en las locaciones de muestra y *z* es el vector de valores medidos de la variable objetivo.

En notación de matiz, el krigeado de regresión es comúnmente escrito como:

$$\hat{z}_{RK}(s_0) = q_0^T * \hat{\beta}_{GLS} + \lambda_0^T * (z - q * \hat{\beta}_{GLS})$$

Donde $\hat{z}_{RK}(s_0)$ es el valor predicho en la locación s_0, q_0 es el vector de *p + 1* predictores y λ_0 es el vector de *n* pesos de krigeado usados para interpolar los residuales. Este modelo es considerado como el Mejor Estimador Insesgado Lineal (BLUE) de datos espaciales.

El proceso completo del método de krigeado de regresión (KR) se puede consultar en el libro de Hengl (2009) en la sección 2.1, página 27.

4.2.2.3 Interpolación espacial por el Inverso de la Distancia al Cuadrado (IDW)

Es probablemente una de las más viejas técnicas de predicción espacial. En este caso, un valor de la variable objetivo en alguna nueva locación puede ser derivado como un promedio ponderado (Hengl, 2009):

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i(s_0) * z(s_i)$$

Donde λ_i es el peso de vecino i. La suma de los pesos debe de ser igual a uno para asegurar un interpolador insesgado. El enfoque más simple para determinar los pesos es el uso de la inversa de las distancias desde todos los puntos al nuevo punto (Hengl, 2009).

$$\lambda_i(S_0) = \frac{\frac{1}{d^{\beta}(s_0, s_i)}}{\sum_{i=0}^{n} \frac{1}{d^{\beta}(s_0, s_i)}}; \quad \beta > 1$$

Donde $d^{\beta}(S_0, S_i)$ es la distancia desde el nuevo punto a un punto muestra conocido y β es un coeficiente que es usado para ajustar los pesos. Por lo tanto, puntos los cuales están cerca de un pixel obtendrán mayores pesos y aquellos puntos los cuales están más lejos de un pixel obtendrán pesos menores. El parámetro β es usado para enfatizar la similaridad espacial. Si se incrementa β menor importancia será puesta en los puntos distantes. Otro problema es como estimar β objetivamente de forma que refleje la verdadera fuerza de auto-correlación (Hengl, 2009).

Este método asigna a cada dato una ponderación inversamente proporcional a (una potencia de) su distancia al sitio a estimar. Si la potencia es baja (cercana a cero), la distancia elevada a esta potencia es cercana a 1, por lo que el estimador asigna la misma ponderación a todos los datos (media aritmética de los datos). Al contrario, si la potencia es muy alta, el inverso de la distancia más pequeña se vuelve preponderante sobre todos los otros términos, y el estimador se convierte en el del más cercano vecino. Los inconvenientes que presenta este método de es que 1) no hay forma objetiva para elegir las opciones de inversa o inversa al cuadrado, 2) no hay forma objetiva para elegir el radio límite (Rossiter, 2017).

4.2.3 Validación cruzada

Se utiliza esta técnica para para evaluar los resultados de un análisis estadístico y garantizar que son independientes de la partición entre datos de entrenamiento y prueba. Consiste en repetir y calcular la media aritmética obtenida de las medidas de evaluación sobre diferentes particiones. Se utiliza en entornos donde el objetivo principal es la predicción y se quiere estimar la precisión de un modelo que se llevará a cabo a la práctica.

La estimación estadística de un modelo es incierta. El verdadero poder del predictor puede únicamente ser evaluado utilizando una serie de datos independiente. El error del predictor es entonces muchas veces referido como la precisión de la predicción. La verdadera calidad de una estimación puede ser evaluada por la comparación de valores estimados $\hat{z}(s_j)$ con observaciones actuales en los puntos de validación $z^*(s_j)$. Comúnmente dos mediciones son las más relevantes, 1) la media del error de predicción (*ME*) y 2) la raíz de la media de errores de predicción al cuadrado (*RMSE*) (Hengl, 2009):

$$ME = \frac{1}{l} * \sum_{j=1}^{l} \left[\hat{z}(s_j) - z^*(s_j)\right]; \; E\{ME\} = 0$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{l} * \sum_{j=1}^{l} \left[\hat{z}(s_j) - z^*(s_j)\right]^2}; \quad E\{RMSE\} = \sigma(h = 0)$$

Donde l es el número de puntos validados. También es posible estandarizar el error (*RMNSE*) basado en la variación de predicción estimada por el modelo de predicción espacial (Hengl, 2009):

$$RMNSE = \sqrt{\frac{1}{l} * \sum_{j=1}^{l} \left[\frac{\hat{z}(s_j) - z^*(s_j)}{\hat{\sigma}_j}\right]^2}; \quad E\{RMNSE\} = 1$$

En orden para comparar la exactitud de la predicción entre variables de diferentes tipos, el *RMSE* puede ser también normalizado por el total de la variación:

$$RMSE_r = \frac{RMSE}{s_z}$$

Lo cual muestra que tanto la pre-supuesta variación global ha sido explicada por el modelo. Como regla oro, un valor de $RMSE_r$ que está cerca del 40% significa una exactitud bastante satisfactoria de predicción (R^2 = 85%). De lo contrario, si *RMSEr* > 71%, esto significa que el modelo representaba menos del 50% de la variabilidad en los puntos de validación. Tenga en cuenta también que *ME*, *RMSE* y *RMNSE* estimados en los puntos de validación también son solo una muestra de una población de valores; si los puntos de validación están muestreados de manera deficiente, nuestra estimación de la calidad del mapa puede ser igualmente deficiente (Hengl, 2009).

Colectar muestras adicionales (independientes) es a menudo impráctico y caro, la validación de los modelos de predicción es comúnmente hecha utilizando *validación cruzada*. Hay varios tipos de métodos de validación cruzada (Hengl, 2009):

- Validación cruzada *K-fold* – La muestra original es seccionada en *k* partes iguales y entonces cada una es utilizada para la validación cruzada;
- Validación cruzada leave-one-out (LOO) – Cada punto de muestra es usado para la validación cruzada;
- Jackknifing – Similar a LOO, pero con el propósito en estimar el sesgo del análisis estadístico y no de las predicciones.

El algoritmo de LOO funciona de la siguiente forma: inspecciona un dato puntual, predice el valor en ese punto por kriging sin utilizar el valor observado, y procede al siguiente dato puntual. De esta manera cada punto individual es evaluado contra la serie de datos completa. El resultado de la validación cruzada puede ser visualizado

para determinar con precisión los puntos más problemáticos. Varios autores recomiendan *10-fold cross-validation* como el enfoque más robusto (Hengl, 2009).

4.2.4 R-Studio

R es, al momento, el más barato, el más amplio, y más profesional ambiente computacional estadístico. Además, éste permite automatización de procesamiento de datos, importación/exportación a varias plataformas, extensión de funcionamiento e intercambio abierto de *scripts/paquetes*. También permite el manejo y generación de mapas. El lema oficial de un gurú de R es: ¡todo es posible! (Hengl, 2009).

Aunque la mayoría del código de R esta siembre bajo desarrollo, una gran parte de código es utilizable, portable y extensible. Esto hace a R uno de los más adecuados ambientes de código para sociedades académicas. Para ejecutar análisis geoestadístico en R, son necesarios los siguientes paquetes (Hengl, 2009): *gstat* (geoestadística), *raster* (herramientas para trabajar mapas ráster en R), *rgdal* (importación de capas SIG), *sp* (soporte de objetos espaciales), *spatstat* (estadística espacial), *maptools* (herramientas para mapas), *ncdf4* (funciones para trabajar archivos NetCDF), *GSIF* (Instalaciones de información global del suelo), *plotKML* (Visualización científica de datos espacio-temporales.), *gdalutils* (contenedor para las utilidades de la biblioteca de abstracción de datos geoespaciales (GDAL))

R es ampliamente reconocido como una de las herramientas de computación estadística de mayor crecimiento y más comprensiva. R ofrece prácticamente análisis estadístico y visualización de sofisticación ilimitada. El usuario no está restringido a un pequeño set de procedimientos u opciones, y gracias a la contribución de paquetes, los usuarios no están limitados a un método para lograr una presentación de computación o gráfica (Hengl, 2009).

Por medio del software R-Studio se escribieron los scripts de comandos y funciones de los paquetes anteriormente mencionados. El proceso consiste en generar un mapa de Galicia (celdas de 100x200m) con valores calculados (*predicted*) para cada día de los 11

años hidrológicos (en total 4018 días) con las variables meteorológicas usadas en el modelo hidrológico, extraer los valores correspondientes para cada *shape* (polígono) de las subcuencas y crear un archivo de salida que acumule la información de cada día para las subcuencas. Por último es necesario validar los datos generados por el krigeado de regresión mediante validación cruzada. Los scripts del proceso de krigeado se pueden consultar en el anexo digital AD-03. En la figura 4-5 están representados los pasos a *grosso modo* que sigue el script de los códigos en R para generar los archivos de salida que contienen las estimaciones por el método de krigeado de regresión.

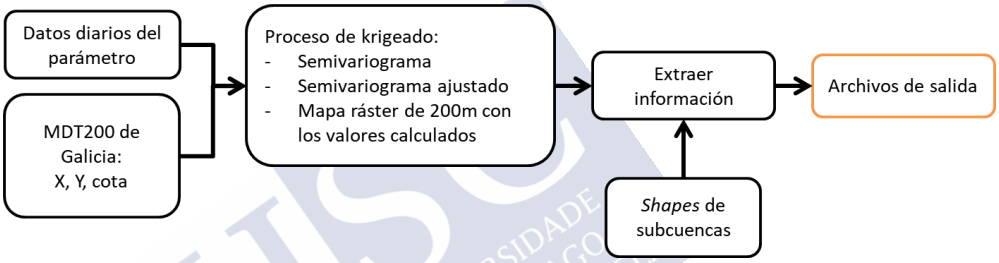


Figura 4-5. Proceso de krigeado en los script de R-Studio. Elaboración propia.

El mismo proceso de KR incluye una validación cruzada al momento de estimar los valores, por lo que en el caso de no cumplir la validación, se optaría por algún método alterno como KO o en el último de los casos el IDW. De esta manera se generan archivos de series diarias completas para cada parámetro (T media, máx., min., Pr. y ET_0) y para cada una de las subcuencas. En el método de krigeado la primera opción es el de regresión, pero en algunos casos no es posible aplicar éste método debido a que no se logra ajustar correctamente el semivariograma o cuando no hay datos en más de 50 estaciones meteorologías. Como segunda opción se utiliza el KO. Sin embargo, cuando el método de KO tampoco es posible de aplicar debido al efecto pepita en el semivariograma, se utiliza la tercera opción de IDW.

4.3 MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CABE

La modelación hidrológica consiste en reproducir el proceso hidrológico de un territorio y calcular el balance de los flujos de agua en sus diferentes fases, mediante una variedad de modelos matemáticos. Para la modelación hidrológica en una cuenca, es necesaria tanto la información generada en las dos etapas anteriores como adicionalmente los datos de los aforos de caudales, y en caso de ser necesario, la restitución al régimen natural de los datos de caudales disponibles. En la figura 4-6 se muestra los pasos y la información previa que se requiere para ser introducida al software de modelación hidrológica Visual-Balan.

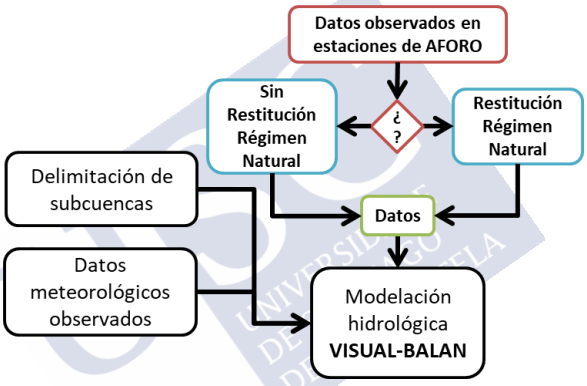


Figura 4-6 Procedimiento para la modelación hidrológica con Visual-Balan. Elaboración propia.

4.3.1 Restitución al régimen natural en el embalse de Vilasouto

En algunos casos, en los que en las cuencas están presentes obras hidráulicas de diversos tipos, se altera el cauce y distribución natural de los flujos de agua en una cuenca. Por esa razón, para poder conocer el comportamiento de la cuenca en su régimen natura (datos restituidos), es necesario hacer una serie de cálculos para pasar de la situación alterada a la normal.

Cuando se construyen obras hidráulicas, debido a estas modificaciones en el régimen del drenaje natural, los caudales que registran las estaciones de aforo no representan la producción

hidrológica real de la cuenca. A las series de caudales completos, homogéneos, no alterados por la intervención del ser humano se les denomina "caudales en régimen natural", se obtienen partiendo de las series registradas en las estaciones de aforo y de las series modificadas antrópicas del régimen hidráulico (Lopez Garcia, 1993).

En particular, se necesitan series de caudales en régimen natural en los casos siguientes (Lopez Garcia, 1993), de entre otros:

- Estimación de aportaciones en cuencas sin datos de modelos estadísticos o modelos conceptuales.
- Cálculos de parámetros estadísticos para generación de series sintéticas.
- Creación de series de aportaciones en cabeceras e intermedias a emplear en modelos de gestión de embalses.

Para calcular el caudal con restitución al régimen natural (RRN), bastaría con añadir a los caudales aforados en el punto del río a restituir, los caudales derivados a través de las tomas efectuadas en el tramo superior y los detraídos por extracción de acuíferos, restar los caudales incorporados por vertidos, trasvases de otras cuencas o alimentación subterránea debida a recarga no natural en el acuífero. Al valor obtenido en las operaciones anteriores, se sumaría el caudal evaporado en la superficie adicional creada por los embalses de regulación, y se le sumaría (cuando el nivel del embalse fuese mayor al final del periodo que al principio), o restaría (en caso contrario) el caudal medio almacenado o liberado por estos en el período de cálculo (Lopez Garcia, 1993).

La ecuación general a aplicar para la RRN tendría el siguiente planteamiento (Lopez Garcia, 1993):

$$N = S + T + B - V - Q - R + E \pm A$$

En donde N es el caudal en régimen natural para el periodo, S es el caudal forado, T es el caudal derivado o trasvasado por tomas aguas arriba (hacia fuera de la cuenca), B es el caudal detraído por bombeo

en acuíferos conectados, V es el caudal vertido por usos aguas arriba, Q es el caudal trasvasado de otras cuencas (hacia dentro de la cuenca), R es el caudal aportado por recarga adicional en acuíferos, E es el caudal evaporado en embalses y masas de agua nuevas, y A es el caudal almacenado o liberado por embalses.

Para este trabajo en particular del embalse de Vilasouto, se ha modificado la ecuación para adaptarla al caso en particular, quedando de la siguiente forma. La escorrentía total con RRN en el punto de salida del embalse se calcula con la siguiente ecuación de balance hídrico para el almacenamiento:

$$A_i = A_{i-1} + P + N - Evap. - Q_{Salida}$$

O para la caudal total:

$$N = (A_i - A_{i-1}) + Evap. + Q_{Salida} - P$$

En donde para el día i, N es el caudal total superficial en volumen/tiempo, A_i es el almacenamiento en el embalse para cierto día y A_{i-1} es el almacenamiento del día anterior en unidades de volumen/tiempo que corresponde al día i, Evap., es la evaporación en la superficie del embalse en volumen/tiempo, Q_{salida} es el caudal de salida del embalse en volumen/tiempo y P es la precipitación que cae en el área del embalse (se multiplica la precipitación observada por el área del embalse) en volumen/tiempo. La evaporación (Evap.) del embalse de Vilasouto se estimó como una fracción de la evapotranspiración de referencia (ET_0) calculada por krigeado para el centro del embalse. La ecuación según Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, 1996) es:

$$ET_c = K_c ET_0$$

Adicionalmente hay que agregar el área del embalse para tener el volumen de toda la evaporación en el embalse para el día correspondiente.

$$K_c(ET_0 * A) = Evap.$$

En donde el valor de Kc es de 0.75 según reportado por ASCE para el para agua en superficie abierta, se considera que ET_c correspondería a la evaporación de la superficie de agua (ET_c = Evap.), A es el área del embalse y ET_0) es la evapotranspiración de referencia en mm/día (calculada por krigeado para el centro del embalse).

En el libro de Lopez Garcia (1993), se describen con mayor detalle las variables de la ecuación general de RRN.

4.3.2 Modelación hidrológica con el software Visual-Balan

El programa Visual-Balan realiza balances de agua en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero utilizando un entorno interactivo de entrada de datos y post-proceso de resultados. Los términos fundamentales del balance son las entradas por precipitación y riegos, las salidas por escorrentía superficial, evapotranspiración, intercepción, flujo hipodérmico y flujo subterráneo, la variación del contenido de humedad del suelo, de la zona no saturada y del nivel de agua en el acuífero. El programa evalúa cada uno de esos términos de forma secuencial, comenzando por la precipitación y las dotaciones de riego, que son datos conocidos, continuando con la intercepción, la escorrentía superficial y la evapotranspiración real, y finalmente termina con la recarga en tránsito que constituye la entrada de agua a la zona no saturada. En esta zona se evalúan primero las salidas sub-horizontales por flujo hipodérmico y posteriormente la recarga al acuífero. El balance se realiza en periodos de tiempo de duración igual a un día. Otra característica de Visual-Balan es su capacidad para realizar además del balance en la zona edáfica, el balance en la zona no saturada y en el acuífero subyacente. El programa calcula los valores diarios de los niveles piezométricos y de los caudales descargados en el punto de salida de la cuenca. Estos resultados se pueden comparar con datos disponibles de niveles y aforos (Samper, 1999). En la figura 4-7 se puede observar la relación y la dirección en la que Visual-Balan realiza los cálculos del balance de agua en el suelo edáfico, zona no saturada y el acuífero.

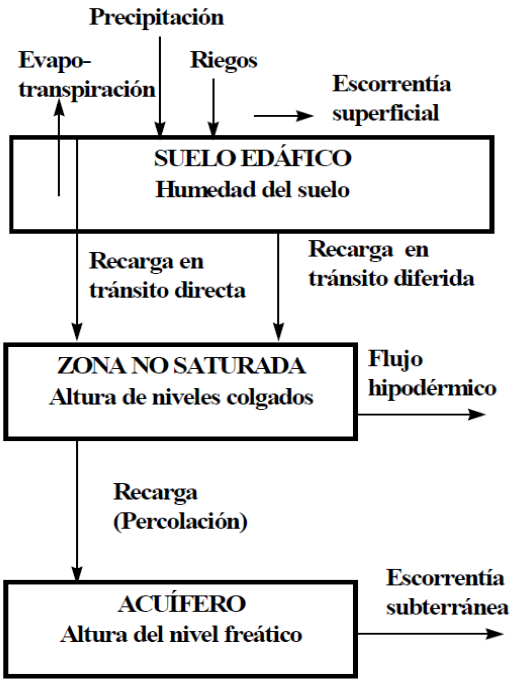


Figura 4-7. Representación esquemática del balance de agua en el modelo Visual-Balan. Fuente (Samper, et al., 1999).

La versión 2.0 de Visual-Balan incorpora las siguientes características:

- Definición de varias subcuencas dentro de la cuenca de estudio. Cada subcuenca puede tener propiedades y parámetros diferentes. El programa realiza los cálculos del balance en cada subcuenca por separado.
- Puede utilizar datos de varias estaciones hidrometeorológicas.
- Puede utilizar datos de varias estaciones de aforos. En este caso se contempla la posibilidad de realizar la restitución de los caudales al régimen natural.

- Puede introducir datos hidrometeorológicos y de aforo directamente en el formato usado por las Confederaciones Hidrográficas españolas.
- Utilización del método de Turc para el cálculo de la ET_0. La consideración de la intercepción utilizando las ecuaciones de Horton y Singh.
- Consideración de la precipitación, retención y escorrentía nival.

El programa incorpora dos opciones de carácter avanzado: 1) el ajuste automático de parámetros del modelo a partir de datos de niveles piezométricos y/o caudales, y 2) el análisis de sensibilidad, que permite evaluar la sensibilidad de los resultados del balance respecto a variaciones en ciertos parámetros del modelo (Samper, 1999).

El ajuste automático es la primera opción avanzada que consiste en la calibración automática de los parámetros del modelo mediante la comparación entre los resultados reales de niveles piezométricos y/o caudales totales, en relación a los valores calculados por el programa. Partiendo de los valores iniciales de los parámetros, Visual-Balan los actualiza buscando el mejor ajuste posible a los datos reales de niveles piezométricos y/o caudales. El proceso se realiza mediante el método de Powell de minimización multidimensional. Mediante un proceso iterativo se busca la minimización de la función vectorial que en cada iteración recibe los errores cuadráticos asociados a los caudales y/o niveles, así como el valor de cada parámetro a calibrar en la iteración (Samper, 1999).

La segunda opción avanzada es el análisis de sensibilidad, que permite evaluar la sensibilidad de los resultados del balance (en términos de valores medios anuales) con respecto a determinados parámetros. El funcionamiento de esta opción simplemente consiste en un bucle que va asignando al parámetro pedido los valores especificados por el usuario, almacenando en un vector los valores medios anuales pedidos. El análisis se realiza de forma separada para

cada parámetro; para cada uno de ellos se define un rango de variación. El balance se realiza para una serie de valores del parámetro dentro del citado rango (Samper, 1999). En el manual del programa Visual-Balan se pueden encontrar los fundamentos a detalle de ambas opciones avanzadas.

La calibración del modelo hidrológico Visual-Balan consiste de 5 pasos, 1) introducir en el modelo los datos meteorológicos, aforos y físicos correspondientes a cada subcuenca, 2) ejecución de la modelación hidrológica y analizar la aproximación de caudales observados y simulados, 3) calibración con ajuste automático de los parámetros físicos de la subcuenca, 4) re-ejecución del modelo calibrado y 5) validación del resultado de simulación. Como se mencionó anteriormente, para los datos considerados como observados para T med., Pr y ET_0 se utilizan los datos generados con el krigeado para cada subcuenca. Los archivos de entrada para Visual-Balan de datos observados se encuentran en el anexo digital AD-05. Los valores de aforos observados corresponden a los reportados en el anuario de aforos de la Confederación Hidrográfica Miño-Sil (CHMS) para el periodo de control de 2006 al 2017, datos que son obtenidos por estaciones de aforo automáticas.

Los aforos fueron obtenidos del anuario de aforos del CEDEX[7] para las tres subcuencas. Para la subcuenca de Ponte Pena corresponden al periodo competo de 2007-2017, para Ribas Altas, solo se utilizaron los caudales de invierno del 2006-2017, ya que durante el verano se realizan extracciones en el cauce que no están cuantificadas, por lo que utilizar los caudales de verano resultaría en un error no medible. Por último para el caso del embalse de Vilasouto fue necesario aplicar una Restitución al Régimen Natural que se explicó en la sección anterior.

Para la subcuenca llamada Cabe_R no se tienen datos de aforo de caudal, por lo que no es posible realizar la calibración específicamente para esta subcuenca. Sin embargo, con las otras tres subcuencas se realizó la calibración de los parámetros físicos del modelo

[7] http://ceh-flumen64.cedex.es/anuarioaforos/default.asp

hidrológico, hasta obtener unos parámetros de calibración común para las tres subcuencas. Una vez validados los parámetros de calibración común, se aplicaron los mismos a la subcuenca Cabe_R, los cuales se asumen que son válidos para realizar simulaciones hidrológicas.

Los parámetros físicos del suelo del área de estudio fueron obtenidos en los mapas interactivos de propiedades del suelo de Galicia del Departamento de Edafología y Química agrícola de la USC[8]. Los parámetros físicos que no han sido posibles obtener de la bibliografía, fueron ajustados mediante la herramienta de calibración automática que ofrece el Visual-Balan. En el anexo digital AD-06 se encuentran los parámetros de calibración para el modelo de Visual-Balan.

4.4 SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CABE

Para la simulación hidrológica en una cuenca en posibles escenarios futuros de cambio climático, es necesario obtener la información de las variables meteorológicas proyectadas a un periodo futuro. Esta información de proyección, es generada por los modeladores climáticos que calculan la posible evolución y cambios en el clima. En la figura 4-8, se ilustran los pasos que van desde la obtención de los datos de los modelos climáticos de Euro-Cordex, la extracción de la información con el software R-Studio, la corrección del sesgo de la información, a fin de tener datos de escenarios de cambio climático para el área de estudio y posteriormente realizar la simulación hidrológica. De esta manera se logra la cuantificación proyectada a futuro de los recursos hídricos en la cuenca de interés.



Figura 4-8 Procedimiento para la simulación hidrológica en Visual-Balan de escenarios de cambio climático. Elaboración propia.

[8] http://rgis.cesga.es/index.html

4.4.1 Datos de Euro-Cordex

Los datos de Euro-Cordex se tratan de mapas de la región de Europa a una cierta resolución de pixeles, en donde cada uno de estos pixeles cuenta con valores para diversas variables meteorológicas. Estos mapas son multicapa, en el que cada una de las capas es un periodo de tiempo.

Como parte del marco global de CORDEX, la iniciativa EUROCORDEX proporciona proyecciones climáticas regionales para Europa a 50 km (EUR-44) y 12.5 km (EUR-11) de resolución horizontal, por lo que complementando conjuntos de datos de resolución más gruesa de actividades anteriores como, por ejemplo, PRUDENCE y ENSEMBLES (Jacob, et al., 2014).

Los archivos de Euro-Cordex en formato NetCDF (*Network Common Data Form*) se encuentran en coordenadas polares rotadas, lo que requiere de un proceso de aproximación de transformación de coordenadas para hacer coincidir el mapa real de la cuenca con los de los modelos Euro-Cordex. Las coordenadas originales de los mapas de las simulaciones del proyecto Euro-Cordex están en coordenadas rotadas polares (*rotated pole*). Un total de 66 variables esta disponibles en los mapas Euro-Cordex, sin embargo, no todas las combinaciones de los mapas tienen todas las variables, por lo que se debe revisar cuales son los que tiene la información de interés. La herramienta de análisis R-Studio puede leer archivos NetCDF (convenciones de CF) y permite un gran universo de análisis estadísticos, pruebas y visualización (por ejemplo, regresión y análisis de valores extremos).

En la figura 4-9 se muestra el diagrama del proceso que sigue el código del script en R-Studio para la extracción de los datos de los mapas Euro-Cordex. Dicho proceso consiste en importar los archivos NetCDF, convertir a ráster tipo *brick*, reproyectar las latitudes y longitudes con un CRS adecuado, recortar el ráster-*brick* al área de estudio, extraer los datos correspondientes a la cuenca de interés y generar el archivo de salida con la información.

Los tres modelos seleccionados que contienen la información que es útil para este trabajo son los siguientes, en donde el RCM es el RCA4 y los otros acrónimos son el GCM:

- CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_RCA4
- ICHEC-EC-EARTH_RCA4
- IPSL-IPSL-CM5A-MR_RCA4

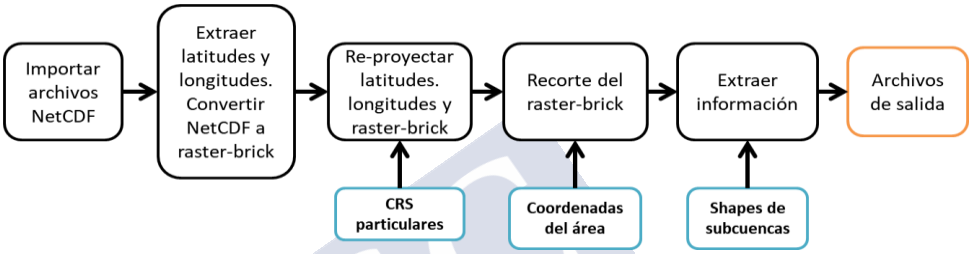


Figura 4-9 Diagrama del proceso de extracción de datos de los mapas Euro-Cordex. Elaboración propia.

De los modelos mencionados, se han extraído las variables de interés: temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y evapotranspiración de referencia. La frecuencia de los datos es diaria para un calendario de 365 días. Los tres periodos se componen de "histórico que va de 1970-2005 y los "RCP4.5 y 8.5" para el periodo de 2006-2100.

En la tabla 4-1 se especifican las unidades que tienen los valores de los mapas de Euro-Cordex, el valor del factor y el tipo de operación matemática necesaria para convertir las unidades. Para la temperatura es una sustracción sencilla, mientras que para el caso de la precipitación y la ET_0 en donde los datos se encuentran en unidades de $kg*m^{-1}*s^{-1}$, se supuso una densidad del agua de 1kg/lt y se transformó a unidades de $mm*día^{-1}$.

Tabla 4-1. Factores de conversión para los parámetros extraídos. Elaboración propia.

Parámetro	Unidades de origen	Factor	Operación matemática	Unidades convertidas
T med.	K	273.15	Sustracción	° C
Pr.	kg m^{-2} s^{-1}	86400	Multiplicativo	mm/d
ET_0	kg m^{-2} s^{-1}	86400	Multiplicativo	mm/d

4.4.2 Corrección del sesgo en datos de proyección climática

Una vez extraída la información, es necesario validarla y en su caso realizar la corrección de sesgo apropiada. Existen diversos métodos y discusiones que están mencionadas en el capítulo 2. Solamente después de realizar la validación y la corrección del sesgo (si es que lo necesita), podemos asumir que los datos son válidos para ser utilizados en cálculos posteriores.

El método propuesto para este trabajo se trata de un Coeficiente Aditivo-Multiplicativo (CAM) determinado con las medias mensuales de los valores observados y simulados, para posteriormente ajustar los valores diarios simulados con dicho coeficiente. El método propuesto CAM fue desarrollado después de revisar los métodos aplicados por (Hay, et al., 2000) y por (Fowler & Kilsby, 2007).

Para determinar el coeficiente de la temperatura, se calcula del valor absoluto de la diferencia de la temperatura del mes observado menos la temperatura del mes simulado para el mismo año: $\mathrm{T.dif.abs_{ij}} = \left|\mathrm{T.obs_{ij}} - \mathrm{T.sim_{ij}}\right|$ siendo i cada mes del año j. Posteriormente se determina el coeficiente promedio de cada mes, respecto al periodo de tiempo. Por ejemplo se obtiene el promedio de todos los "eneros" en los "n" años, y así para el resto de los meses:

$\mathrm{Coef.T.mensual_i} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \mathrm{T.dif.abs_i}$. Por último, la temperatura diaria corregida (T*) se calcula sumando o restando a cada dato diario el valor del coeficiente del mes que le corresponde. $T^*_{di} = T.sim_d \pm \mathrm{Coef.T.mensual_i}$ Siendo d el día del mes i. Para determinar si el coeficiente mensual es aditivo o sustractivo, se debe conocer la suma total de todas las temperaturas mensuales observadas y la suma total

de todas las temperaturas mensuales simuladas. Si las temperaturas mensuales observadas son mayores a las simuladas, entonces el coeficiente será aditivo, de lo contrario será sustractivo.

$$Si, \sum T_{obs} > \sum T_{sim}\,;\; T^* = T_{sim} + Coef.T.mensual_i\,;\; Si, \sum T_{obs} < \sum T_{sim}\,;\; T^* = T_{sim} - Coef.T.mensual_i$$

Para el coeficiente de la evapotranspiración se realiza el mismo procesa que para la temperatura, pero una vez calculado el promedio para cada mes, si se quiere hacer la corrección a nivel diario, entonces el coeficiente mensual se debe dividir por el número de días de cada mes. A diferencia del coeficiente de temperatura (que es un promedio de los días del mes), el coeficiente de evapotranspiración mensual es un acumulado de todo el mes. Para el mes de febrero se divide entre 28.25 días para tener en cuenta el año bisiesto.

De esta manera las ecuaciones quedan:

$$ETP.dif.abs_{ij} = \left|ETP.obs_{ij} - ETP.sim_{ij}\right|$$

$$Coef.ETP.mensual_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} ETP.dif.abs_i$$

$$Coef.ETP.diario_i = \frac{Coef.mensual_i}{\#\ días\ del\ mes}$$

Donde *i* sigue siendo el mes correspondiente al día del año. Por último, como en el mismo caso de la temperatura, dependiendo de la relación entre ET_0 observada y simulada, se determina si el coeficiente es aditivo o sustractivo.

$$Si, \sum ETP_{obs} > \sum ETP_{sim}\,;\; ETP^* = ETP_{sim} + Coef.ETP.diario_i\,; Si, \sum ETP_{obs} < \sum ETP_{sim}\,;\; ETP^* = ETP_{sim} - Coef.ETP.diario_i$$

Entonces se puede sumar o restar el coeficiente para corregir los datos de ET_0 diaria simulada, como: ${ET_0}^*_{di} = ET_0.sim_d \pm Coef.ET_0.diario_i$, siendo *d* el día del mes *i*.

Por ultimo de la precipitación, a diferencia de los dos coeficientes anteriores que se obtienen por una diferencia absoluta, el coeficiente para la precipitación se obtiene por una relación entre la división de la precipitación mensual observada y la simulada. Este coeficiente también se estima como uno para cada mes del año mediante el promedio del mismo mes en todo el periodo de años. Este coeficiente no se divide por el número de días del mes, debido a que la corrección se aplicará como factor multiplicativo (y según el mes correspondiente) al dato diario simulado. El coeficiente para cada mes se calcula como:

$Coef.Pr_{ij} = \frac{Pr.obs_{ij}}{Pr.sim_{ij}}$, siendo i cada mes del año j. Entonces se determina el factor multiplicativo promedio de cada mes, respecto al periodo de tiempo, en donde "n" es en número de años del periodo o bien el número de veces que se repite el mismo mes.

$Factor.mensual_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Coef.Pr_i$, Con estos factores para cada mes "i" del año, se puede corregir la precipitación diaria simulada, como: $Pr^*_{di} = (Pr.sim_d)(Factor.mensual_i)$, Siendo d el día del mes i.

4.5 SIMULACIÓN DE GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS CON AQUATOOL

Una vez que se tiene la cuantificación de las aportaciones de los recursos hídricos en la cuenca de estudio, para el periodo observado y para la proyección futura de escenarios de cambio climático, es posible iniciar con la simulación de gestión de recursos hídricos en el sistema actual de uso de agua en la cuenca.

El procedimiento representado en la figura 4-10, muestra que además de la cuantificación de los recursos hídricos o también llamadas aportaciones de la cuenca, es necesario conocer los usos del agua en el sistema que se quiere analizar, lo que incluye toda la información sobre demandas, retornos, bombeos, conducciones y canales, caudales ecológicos, etc., a fin de poder desarrollar el diagrama de flujo real de agua en el escenario estudiado. Una vez que

el diagrama queda establecido y calibrado, se procede a realizar las simulaciones de flujo de agua en el software AQUATOOL para verificar que el comportamiento de los flujos de agua en el sistema sea representativo a la realidad. Una vez que se logra la verificación, diagrama de flujo de agua queda como un modelo base para simular alternativas de gestión de recursos hídricos.

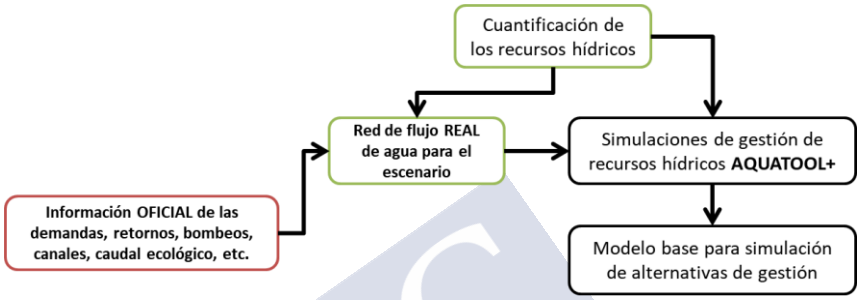


Figura 4-10 Procedimiento para la simulación de gestión de recursos hídricos y del modelo base de simulación para alternativas, elaboración propia.

4.5.1 Modelo para la gestión de recursos hídricos AQUATOOL

AQUATOOL es un interface o entorno de trabajo para el desarrollo y análisis de sistemas de ayuda a la decisión en planificación y gestión de cuencas. El contenido del programa es una serie de fichas interactivas que permiten la edición de los datos necesarios para el análisis de alternativas de gestión de los recursos hídricos de cuencas hidrográficas. Como entorno de trabajo proporciona acceso directo a otros programas que realizan funciones específicas relacionadas con el análisis de la gestión de una cuenca. Todos estos programas son integrados y coordinados con este interface haciendo que el usuario pueda manejarlos todos sin notar que está cambiando de programa (Solera Solera, et al., 2015).

Los principales programas gestionados desde AQUATOOL son los siguientes:

- Módulo SIMGES (Andreu, et al., 2007) para la simulación de la gestión de cuencas incluyendo utilización conjunta.
- Módulo OPTIGES para la optimización de la gestión de cuencas.
- Módulo GESCAL para la simulación de la calidad de aguas a escala de cuencas (Paredes, et al., 2007).
- Módulo SIMRISK para la simulación múltiple de la gestión de sistemas y cálculo de riesgos en la gestión.

Los dos módulos relevantes para la gestión de recursos hídricos son SIMGES y OPTIGES, que se describen a continuación.

4.5.1.1 SIMGES

El modelo SIMGES es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial. La simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce a la escala de detalle espacial que el usuario desee el flujo del agua a través del sistema. Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance, mientras que para los subsistemas subterráneos o acuíferos el flujo es simulado mediante modelos de celda, uní o pluricelulares, según convenga, o incluso mediante modelos distribuidos de flujo lineal. Se tiene asimismo en cuenta en la simulación las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas (Andreu, et al., 2007).

La simulación y gestión del sistema superficial se efectúan a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo. Dicho algoritmo se encarga de determinar el flujo en el sistema tratando de satisfacer al máximo los objetivos múltiples de minimización de déficits, y de máxima adaptación a las curvas de volúmenes objetivos de embalse y objetivos de producción hidroeléctrica (Andreu, et al., 2007).

Los resultados del modelo incluyen la evolución de todas las variables de interés a nivel mensual, a nivel anual, valores medios del período de simulación, así como garantías. Todo ello permite que el modelo pueda ser utilizado, entre otras finalidades para:

- Determinar las garantías que se obtienen para distintas hipótesis de infraestructura y de evolución de demandas, así como para distintas reglas de explotación de la cuenca.
- Determinación de reglas de explotación más adecuadas para unos niveles exigidos de garantías.
- Determinación de beneficios o perjuicios derivados de la alteración de prioridades de usos del agua.
- Determinación de capacidades de embalse, de conducciones, y de instalaciones de bombeo para unos niveles de demanda y de garantía dados

Los elementos que se consideran en el esquema del usuario son: embalses, nudos tomas o conexiones, aportaciones intermedias, conducciones de 5 tipos diferentes, demandas consuntivas, elementos de retorno, demandas no consuntivas, recarga artificial, bombeos adicionales, acuíferos de distintos tipos

4.5.1.2 Funcionamiento interno de SIMGES

El "esquema del usuario" constituye una red de flujo, pero dicha red no cumple el requisito de ser conservativa, pues no es cerrada y hay nudos en los que hay almacenamiento (los correspondientes a los embalses). Por tanto, la primera tarea del modelo después de la lectura de datos es la adaptación del esquema del usuario como una red de flujo conservativo. Para ello es necesario, por una parte, el establecimientos de unos nudos de "cierre" de la red, y por otra, el desdobla miento de cada elemento tipo en un sub-esquema de arcos y nudos tal que aseguren que la simulación del comportamiento hidráulico y de gestión del elemento es adecuada. El resultado es una "red de flujo interna", mucho más compleja que la del usuario, que ya es conservativa, y que es la que manejará el modelo sin trascendencia exterior al usuario. Una vez confeccionada dicha red interna, se entra

en la dinámica de la simulación, en la que para cada mes del período de simulación se resuelve la red de flujo con los valores de aportaciones, demandas, y parámetros de gestión correspondientes a ese mes, se simulan los acuíferos, se itera entre estos dos últimos pasos (debido a las no linealidades y a las relaciones río-acuífero), y se almacenan valores para su escritura anual y estadísticas. Finalmente, una vez terminado el periodo de simulación, se procede a la confección de estadísticas, y cálculos de garantías (Andreu, et al., 2007).

4.5.1.3 OPTIGES

El modelo OPTIGES es un programa de uso general que realiza la optimización de la gestión de un sistema de recursos hidráulicos de acuerdo con unas hipótesis, objetivos y restricciones que se explican más adelante, y con decisiones y variables hidrológicas a escala mensual (Andreu, et al., 1998).

Para la utilización del modelo el usuario ha de confeccionar previamente un esquema simplificado del sistema de forma que este esté constituido por los elementos que en el modelo se contemplan. El usuario suministra al programa los datos de la configuración de este esquema, o red, juntamente con los datos físicos de los elementos (por ejemplo: capacidades máximas de embalses, o de conducciones), los datos relativos a recursos y demandas, así como los que sirven para fijar prioridades dentro del esquema (Andreu, et al., 1998).

El programa trabaja con valores mensuales, y permite optimizaciones de períodos de un año (12 meses) en adelante, con un número de períodos de optimización definido por el usuario (por ejemplo, para unos datos de 40 años (horizonte de estudio de 40 años) de aportaciones se pueden hacer: 8 períodos de optimización quinquenal, o 20 períodos de optimización bienal,...). El modelo proporciona las soluciones óptimas según la función objetivo que se define más adelante, dando los valores de volúmenes embalsados, caudales circulantes y déficits, en cada mes para cada año, así como un resumen final de todo el horizonte de estudio que incluye valores medios, mensuales y anuales de todas las variables, número de fallos y

garantías según distintos criterios definibles por el usuario, y déficits máximos (Andreu, et al., 1998).

El uso de algoritmos de redes de flujo para optimización y simulación de recursos hidráulicos es una metodología bastante recurrida en la práctica de la gestión de recursos hidráulicos. La versión 3.0, producida en 2014, permite al usuario considerar la gestión conjunta de los recursos superficiales y subterráneos del sistema. A las capacidades existentes en versiones anteriores, se ha incluido la modelación de acuíferos, pérdidas de embalses por filtración, tramos de río con pérdidas y tramos con conexión hidráulica al acuífero, bombeos adicionales y recargas artificiales. Esto, de nuevo, incrementa el tiempo de cálculo por las iteraciones necesarias para resolver el problema. Además, en esta versión también se incluye la posibilidad de emplear el algoritmo de optimización RELAX que permiten una resolución considerablemente más rápida de la optimización (Andreu, et al., 1998).

Dado que las restricciones del problema (balance cero en los nudos, caudales máximos y flujos positivos) son también lineales, y el esquema de cuenca se convierte en una red de flujo conservativa, se puede utilizar para la optimización el algoritmo de resolución de redes de flujo conservativas *Out-of-Kilter* (Bazaraa & Jarvis, 1977), Relax-IV (Bersetkas, 1994) o NETFLO (Kennington & Helgason 1980). La utilización de un algoritmo u otro puede ser seleccionada por el usuario, estando seleccionado por defecto el primero de los nombrados (Andreu, et al., 1998).

Existen diversas referencias comparando el funcionamiento de los tres algoritmos. La mayoría de autores coinciden en la eficacia superior de los algoritmos basados en el método de relajación como Relax-IV e implementaciones anteriores (Bersetkas 1985; Bersetkas & Tseng 1988 & 1994; Kuczera 1993). Estos algoritmos suelen tener tiempos de cálculo alrededor de un orden de magnitud inferiores que otros algoritmos de resolución de redes de flujo a coste mínimo (Andreu, et al., 1998).

4.5.1.4 Criterios de garantías y fallos del cumplimiento de la demanda

De acuerdo al IPH (008), a efectos de la asignación y reserva de recursos hídricos, se considerará satisfecha la demanda urbana cuando: a) el déficit en un mes no sea superior al 10% de la correspondiente demanda mensual, y b) en diez años consecutivos, la suma de déficit no sea superior al 8% de la demanda anual. Cuando algún de estas dos condiciones no se cumplan, se considerara que existe un fallo en el cumplimiento de la garantía de la demanda.

Los criterios pre-establecidos considerados para definir el cumplimiento de las garantías y los fallos en el software AQUATOOL, son los que la Instrucción de Planificación Hidrológica (2008) (IPH) ha definido como criterio de cumplimiento para la demanda urbana y para la demanda agrícola. En la tabla 4-2 se resumen las situaciones en las que se considera que se tiene un fallo, mientras que las ecuaciones para calcular las garantías mensuales y volumétricas son las siguientes:

Tabla 4-2 Criterios de fallos y garantías pre-establecidos en AQUATOOL. Fuente (IPH, 2008)

	Fallo	Criterio
Criterio IPH Agrícola	Fallo máximo en un año (% sobre la demanda anual.	Se considera fallo cuando el déficit en un año es superior al 50% de la demanda anual.
	Fallo máximo en dos años (% sobre la demanda anual).	Se considera fallo cuando en dos años consecutivos la suma del déficit es superior al 75% de la demanda anual.
	Fallo máximo en diez años (% sobre la demanda anual).	Se considera fallo cuando en diez años consecutivos la suma de déficit es superior al 100% de la demanda anual.
Criterio IPH Urbano	Fallo mensual.	Se considera fallo cuando en el déficit en un mes es superior al 10% de la demanda mensual.
	Fallo en diez años consecutivos.	Se considera fallo cuando en diez años consecutivos la suma de déficit es superior al 8% de la demanda anual.
Caudales mínimos	Fallo mensual.	Se considera cuando un mes no alcanza el caudal mínimo establecido.
	Garantía mensual.	Equivalente a la fórmula de garantía mensual.

$$Garantia\ Mensual = \left(1 - \frac{Nº\ de\ fallos}{Nº\ cd\ meses\ totales}\right) * 100$$

$$Garantia\ Volumétrica = \left(1 - \frac{Volumen\ suministrado}{Volumen\ total\ demandado}\right) * 100$$

Estos criterios del IPH se pueden cambiar por cualquier valor deseado por el usuario, para así ser flexible a las legislaciones o evaluaciones que el usuario quiera establecer.

4.5.1.5 Limitaciones por software y hardware

En principio las únicas limitaciones del programa ejecutable son la dimensión de las variables según se modifique o no el número de elementos de cada tipo. En la compilación del programa debe establecerse el número máximo de elementos y años del horizonte de optimización. Este número determina también el tamaño del archivo ejecutable y las necesidades de memoria requeridas al ordenador. La versión oficial admite un número máximo de elementos suficiente para la optimización de sistemas normales, siendo el número de años máximo en la optimización es de 5 (Andreu, et al., 1998).

4.5.2 Modelo para la gestión del agua en el escenario de la subcuenca del río Colorado en Mexicali

Para el caso del escenario de la subcuenca del río Colorado en Mexicali, se tiene una situación particular para la determinación de la cuantificación del recurso hídrico de la que dispone la ciudad de Mexicali, a diferencia del caso del escenario de la subcuenca del río Cabe. La disponibilidad del recurso hídrico está determinado por el Tratado Internacional de Aguas de 1944, en el cual se establece la cantidad de 1850 Hm^3 anuales, entregados parcialmente mes a mes. Por tal motivo, no es posible realizar la simulación hidrológica en la cuenca del río Colorado aguas arriba del punto de entrega a México, debido a la alteración en gran medida que tiene toda la cuenca del Colorado en territorio de EUA.

Ante esta situación en particular, se ha reunido la información oficial de los usos y distribuciones de agua en el sistema actual de

flujos de agua en Mexicali, y posteriormente armar el diagrama en el escenario actual. Como se muestra en la figura 4-11, la información de las entregas de agua a Mexicali han son obtenidas de la CILA en sus fuentes de información desde el año 2005 al 2018. Con esta información es posible estimar un promedio mensual de entregas para considerarse como si fueran aportaciones de agua al sistema. De esta manera se puede hacer funcionar la red de flujo de agua en el escenario y calibrar el modelo de las simulaciones en AQUATOOL. Para la proyección de entregas de agua a México a futuro con la situación del cambio climático, se utiliza la tabla del Acta 323 con las reducciones según los niveles de la presa Hoover y su misma tendencia en decremento de los niveles, respaldado por los estudios de impacto de cambio climático de diversas fuentes en la cuenca del Colorado. Dichos estudios coinciden en el aumento de temperaturas y cambios es las precipitaciones, lo que se traduce en posibles reducciones en la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca.

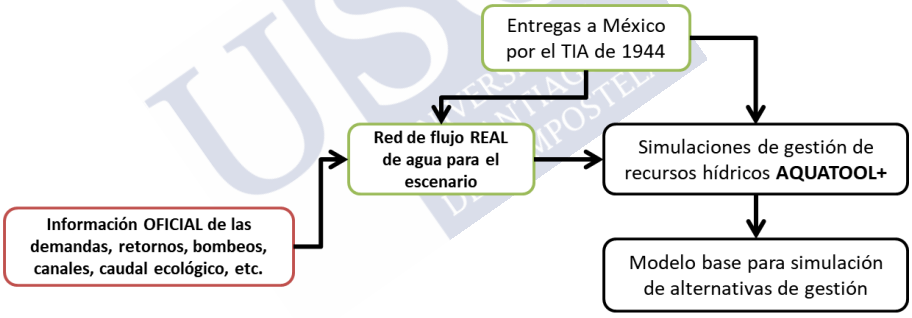


Figura 4-11 Procedimiento para la simulación de gestión de recursos hídricos y del modelo base de simulación para alternativas, en el escenario del río Colorado en Mexicali. Elaboración propia.

La comparación entre el caso de los escenarios del río Cabe y del río Colorado, sirve para ilustrar los diferentes contrastes que se pueden presentar a la hora de cuantificar los recursos hídricos en las cuencas o subcuencas hidrográficas. Sin embargo, es posible aplicar la parte final (simulación en AQUATOOL y generación del modelo base) de la metodología propuesta en el presente trabajo de tesis para ambas subcuencas.

4.6 MODELO BASE PARA LA SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS DE GESTIÓN

Con todos los pasos anteriores es posible llegar a obtener el modelo base, que servirá para evaluar el comportamiento de los flujos de agua en el sistema, para cualquier alternativa planteada sobre cambios en la gestión en un periodo de tiempo definido. Sobre este modelo base se pueden realizar cualquier tipo de cambios, ya sea en las aportaciones, en las demandas, o en cualquier otro de los elementos del sistema, y obtener la información estadística para poder comparar resultados entre las alternativas. La cantidad, complejidad y tipo de alternativas propuestas a evaluar en el modelo base, dependerán de los intereses del usuario.

Es importante mencionar que la calidad y robustez del modelo base está influida por la calidad de los datos en todas etapas previas del proceso. Mientras más datos, periodos más largos e información validada, el modelo base podrá representar mejor la realidad.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 DELIMITACIÓN DE LAS SUBCUENCAS DEL RÍO CABE

Mediante el software QGIS y la información de los mapas MDT05-LIDAR se generaron los archivos *shape* con proyección ETRS89/UTM zona 29 (EPSG:25829) para el área de estudio de este proyecto de tesis. Los complementos de QGIS utilizados fueron *GRASS-PROJECT y GDAL*. El *shape* de subcuenca de estudio denominada Cabe_R (cabe reducido) corresponde a aproximadamente la mitad del sistema de explotación del Río Cabe, dentro de la Confederación Hidrográfica Miño-Sil. El punto de la delimitación de la subcuenca Cabe_R se encuentra dentro de la ciudad de Monforte de Lemos, sobre el río Cabe. Adicionalmente, la subcuenca Cabe_R se subdividió en tres subcuencas más llamadas 1) Embalse Vilasouto, 2) Ribas Altas y 3) Ponte Pena, debido a que en esos tres puntos se encontraban estaciones de aforo, las cuales son utilizadas más adelante para la calibración y verificación del modelo hidrológico Visual Balan.

El proceso para obtener las subcuencas a partir de los MDT05-LIDAR y de la herramienta *GRASS* r.watershed, genero los siguientes mapas como sub-resultados: mapa de dirección de drenaje, mapa de superficie de flujo acumulada con número de celdas que drenan a través de cada celda, mapa de sombras, mapa de pendientes, mapa de delimitación de la cuenca. En la figura 5-1 se muestran las subcuencas dentro del sistema de explotación Cabe. La delimitación de color rojo corresponde al área de estudio subcuenca Cabe_R, que contiene a las subcuencas de Ribas Altas en color amarillo, Embalse de Vilasouto

color verde y Ponte Pena en color rojo. Ambas subcuencas, Embalse de Vilasouto y Ponte Pena corresponden a una fracción de Ribas Altas. El Sistema de Explotación Cabe (SEC) restante se muestra con el sombreado en diagonal, por lo que el total del SEC es el sombreado más la subcuenca Cabe_R. Las áreas de cada subcuenca del SEC, son: Sistema de explotación Cabe, 735.18 km^2, Cabe_R 426.34 km^2, Ribas Altas 350.79 km^2, Embalse Vilasouto 49.24 km^2, Ponte Pena 35.24 km^2. Las coordenadas geográficas WGS84 de sus centroides son Cabe_R 42º36'13''N y 7º25'2.9"W, Ribas Altas 42º37'40''N y 7º23'40"W, Embalse Vilasouto 42º41'10"N y 7º21'12"W, por último Ponte Pena 42º39'10''N y 7º18'37"W.

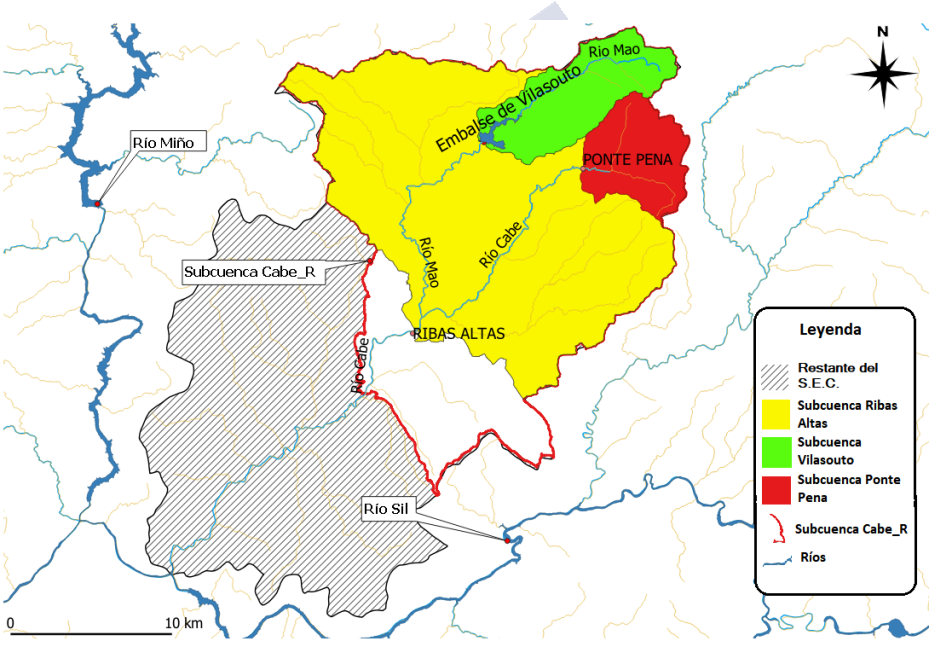


Figura 5-1. Subcuencas delimitadas dentro del área de estudio en el sistema del río Cabe_R. Elaboración propia.

Se eligió la subcuenca del río Cabe porque es un área en la que se tienen los elementos con información necesarios para el balance hídrico como varios puntos de aforos, niveles del embalse, demandas, y caudales ecológicos. También la presencia del embalse y un sistema de flujo de demandas relativamente sencillo, hacen de éste un buen

escenario para desarrollar la metodología y calibrar los modelos de simulación hídrica y de gestión. Delimitar la subcuenca hasta este punto permite reducir la incertidumbre de las estaciones hidrológicas, debido a que aguas debajo de este punto ya no se cuenta con estaciones de aforo para el río Cabe. Es posible extrapolar o ampliar el área de cálculo para todo el SEC pero no sería posible calibrar el modelo hidrológico. En realidad, el punto de salida en Cabe_R ya implica una incertidumbre por que el último punto donde se tienen datos de aforo es en la salida de Ribas Altas y no en la salida del Cabe_R. Otro motivo, es la existencia de la tesis de Cuesta (1999) que describe datos sobre el uso del agua agrícola en el valle de Lemos.

5.2 ESTIMACIÓN DE LOS DATOS CLIMÁTICOS EN LA CUENCA DEL RÍO CABE

Una vez descargados los datos y organizados de la forma apropiada en tablas y en formato de archivo (que se pueden consultar en el anexo digital AD-02), se realizó el proceso de interpolación espacial en el software R-Studio mediante la escritura de los Scripts. La necesidad de contar con series diarias completas de información para los 11 años hidrológicos (4018 días) es esencial para que el modelo hidrológico tenga una mejor representación del proceso hidrológico en la subcuenca. Estos datos generados por krigeado de regresión o interpolación espacial para cada parámetro meteorológico (T media, precipitación y ET_0), son los que se consideran como datos observados dentro del presente estudio, ya que éstos han sido generados con base en las observaciones de la red meteorológica de MeteoGalicia. Los archivos generados se pueden consultar en el anexo digital AD-04.

5.2.1 Validación cruzada de los métodos geoestadísticos y de interpolación espacial

La validación cruzada (VC) para los tres métodos KR, KO e IDW, presentan buenos resultados siendo en orden de la validación 1) T media, 2) ET_0 y 3) precipitación. La VC considera las 146 estaciones meteorológicas que contienen datos diarios. Por ejemplo, para T media, el número máximo de estaciones con datos en un día (de los 4018 días) es de 139, el mínimo 61 y el medio de 115. Para la

precipitación hubo un máximo de 139 estaciones con datos, una mínima de 55 y una media de 114. Para la ET_0, una máxima de 92, mínima de 50 y una media de 74 estaciones con datos.

En la tabla 5-1 se muestran los resultados para el RMSE y RMNSE para los tres métodos de cálculo por krigeado y para los tres parámetros. El RMSE corresponde a las unidades de cada parámetro, mm para Pr y ET_0, y ºC para T media. Todos los parámetros presentan una buena calidad de la predicción al tener los RMNSE cercanos a 1.

Tabla 5-1. Resultados de validación cruzada para todas las estaciones y los tres métodos de cálculo. Elaboración propia.

	KR		KO		IDW
Parámetro	RMSE	RMNSE	RMSE	RMNSE	RMSE
T media (ºC)	0.92	1.10	1.64	1.02	1.71
Pr (mm)	3.76	1.64	-	-	3.86
ET_0 (mm)	0.48	1.31	0.56	1.01	0.59

La temperatura presenta la mejor validación de los tres parámetros, lo que significa que este es el parámetro que mejor se puede predecir según los datos observados. La temperatura tiene un comportamiento más estable a lo largo del ciclo de las estaciones del año (primavera, verano, otoño, invierno) y también respecto a la orografía del terreno, lo que hace genera menor error en los cálculos. El total de los datos calculados se compone de una parte calculado por KR, otra por KO y otra por IDW. El mejor de los métodos para la T media es para el conjunto de datos calculados por KR, seguido del KO y por último el IDW según los resultados de RMSE para la validación de la cantidad de error entre los conjuntos de datos observados y calculados. Sin embargo, los datos calculados por KO tienen unos valores ligeramente superiores de RMNSE que los datos calculados por KR.

El parámetro de la precipitación no sigue un patrón tan estable como la temperatura, que aunque si tiene una ocurrencia estacional marcada en el año, los días de lluvia no están condicionados a una continuidad tan uniforme como la temperatura. Mientras que las

cantidades de errores (RMSE) para la T media están cercanas a uno, para la precipitación son de 3.7 para los datos calculados por KR y 3.8 para los de IDW. Para este parámetro no se utilizó el método de KO, debido a que si no cumplía con las condiciones para el semivariograma en el KR, tampoco lo cumplía para el KO y se procesaba directamente con IDW. Esto refleja la menor correlación espacial y temporal de la precipitación en relación a la temperatura.

Para el caso de la ET_0, que está influenciada por la temperatura, no se calculó la misma cantidad de datos que para la T media por ninguno de los tres métodos, ya que el proceso de esta variable estaba condicionado a tener información en al menos 50 estaciones meteorológicas en cada día para intentar el cálculo. En caso contrario, se utilizó el método de Hargreaves. Aparentemente la validación RMSE es mejor para los conjuntos de datos calculados para la ET_0, pero también ha sido una menor cantidad de datos (ver sección 5.2.2).

Para los cálculos realizados con el método del KR, se realizó además una evaluación *p-value* del nivel de significancia de la ecuación de las tres variables secundarias, coordenadas X e Y y la cota, para cada uno de los cálculos en cada día. De esta manera se pudo contabilizar si una, dos o las tres variables fueron significativas en la estimación, en donde al menos una variable tiene que tener participación en el cálculo. En la tabla 5-2 se muestra los porcentajes de participación de las variables secundas para cada parámetro, en el total de cálculos por KR realizados para cada variable (ver sección 5.2.2 para cantidades), en los que el valor *p-value* ha sido menor a 0.01. Se puede observar que para la T media, la cota es la variable explicativa en mayor grado en el cálculo de KR, mientras que para la Pr y ET_0 es la coordenada Y la de mayor influencia, según los resultados de *p-value* para cada día.

Tabla 5-2. Porcentaje de participación de las variables secundarias explicativas en la prueba de *p-value* para las variables meteorológicas. Elaboración propia.

	Krigeado de Regresión		
Parámetro	Coordenada Y	Coordenada X	Cota
T med.	75.13 %	71.24 %	92.74 %
Pr	44.79 %	40.10 %	22.42 %
ET_0	66.37 %	51.28 %	65.77 %

Adicionalmente se realizó una VC únicamente para tres estaciones cercanas al área de estudio con el fin de valorar el proceso de krigeado lo más cerca posible del área de interés. Dos de las estaciones se encuentran dentro del área de estudio, Bóveda y Monforte, y la tercera, Abradelo, se encuentra al norte fuera del área de estudio a 6 km (dirección Noreste) del límite norte. En la tabla 5-3 se muestras los valores RMSE y RMNSE para los tres métodos de interpolación espacial y para los tres parámetros, obtenidos para los tres puntos de evaluación cercanos al área de estudio. Respecto al *p-value*, la T media es el parámetro en la que más veces coincide en uso de más de una variable secundaria en el proceso de cálculo. Esto indica la estabilidad en la continuidad del tiempo y espacio de la temperatura. Para la precipitación parece influir más la posición en X (cercanía costa oeste) o Y (cercanía a la costa norte), que la altura sobre el nivel del mar (cota).

Tabla 5-3. Resultados de validación cruzada para tres estaciones (Abradelo, Bóveda y Monforte) en los tres métodos de cálculo. Elaboración propia.

	KR		**KO**		**IDW**
Parámetro	RMSE	RMNSE	RMSE	RMNSE	RMSE
T med.	0.97	1.09	1.15	0.71	1.32
Pr	2.48	1.13	2.80	1.09	2.52
ET_0	0.81	2.18	0.83	1.54	0.86

Comparando el RMNSE de la VC del KR de todo el mapa de Galicia y de la VC de las tres estaciones cercanas al área de estudio, se

observa que T media y la precipitación tienen ligeramente unas décimas de mayor cercanía al valor ideal de 1.

Con estos resultados se pueden entender que la continuidad de la temperatura tiene una mejor correlación espacial que la precipitación. En el caso de la precipitación, es un parámetro dependiente de otros parámetros y su modelación se vuelve más compleja, por ejemplo un día puede llover y al siguiente no. La temperatura sigue una tendencia diaria y gradual a lo largo de año, mientras que la precipitación se cumple solamente para la ocurrencia estacional del año. También los resultados indican que los cálculos generados por la interpolación espacial son válidos para ser utilizados como sustitutos de datos observados en los puntos de interés en el área de estudio. Lo anterior no reemplaza a que siempre sería preferible tener series de datos completas y validadas directamente en los puntos del área de estudio. Algo importante a señalar es que en el proceso de estimación de los valores y la validación, los datos son calculados por un método o por el otro, motivo por el cual no se puede comprar si en una estimación un método tiene menos error que el otro.

5.2.2 Series completas diarias de datos meteorológicos, para el área de estudio

Después de la VC de los métodos geoestadísticos y de interpolación espacial y de comprobar la buena calidad de los datos generados, se construyeron las series completas diarias de datos (4018 días) meteorológicos de T media, Pr., y ET_0, y para cada una de las tres subcuencas y también la subcuenca del Cabe_R. En la tabla 5-4 se muestran las cantidades y porcentajes que componen las series temporales por cada método geoestadístico y para cada parámetro. La razón de utilizar el método IDW fue para los casos en las que el KR o KO no fue posible ser ejecutado, es debido a que los datos no se ajustaron en el modelo del semivariograma, resultando en el efecto pepita (validado por el mismo proceso de R-studio). El KR compone la mayor parte de las series calculadas para la T media con más del 98% de los datos, para la precipitación el 76% y para la ET_0 un 69%. Con esto se afirma que el KR fue utilizado en la mayor parte de los cálculos, seguido del método de IDW y en una mucha menor

proporción en uso del KO (en solo dos ocasiones para la T media y en 14 para la ET_0). La baja cantidad de datos calculados por KO se debe a que si las condiciones del semivariograma calculado no se ajustaban al semivariograma modelo para el caso del KR, tampoco se cumplen para el KO y se procedió directamente al IDW. En el caso de la precipitación se puede observar que no hay ni un dato calculado por KO. Para el caso de la ET_0, se presentaron 914 días en los que se no había datos en al menos 50 estaciones (menos del 30% de las 146 estaciones), por lo que se decidió para esos 914 casos (22.75% de los datos) calcular la ET_0 por el método de Hargreaves (2003) para los cuales si se tenían los datos de T media, T máx., y T min. Las series completas diarias para el área de estudio y las subcuencas se pueden consultar en el anexo digital AD-04.

Tabla 5-4. Cantidades y porcentajes de los métodos geoestadísticos que componen las series completas diarias, en cada subcuenca. Elaboración propia.

	KR		KO		IDW		Hargreaves		Cant. total
Parámetro	Cant.	%	Cant.	%	Cant.	%	Cant.	%	
T media	3967	98.73	2	0.05	49	1.22	-	-	4018
Pr.	3071	76.43	0	0	947	23.57	-	-	4018
ET_0	2774	69.04	14	0.35	316	7.86	914	22.75	4018

La interpolación espacial se calculó de esta manera, porque así fue posible automatizar el proceso de cálculo en R-Studio. Si bien es cierto que se mezclan tres métodos en la cantidad total de estimaciones, el cálculo de cada día es independiente del día anterior o posterior. Es posible analizar, por ejemplo los días en la que la temperatura no fue posible aplicar el KR y ajustar los parámetros del comando de cálculo, sin embargo no está dentro de los objetivos de la tesis realizar un análisis profundo del proceso de krigeado y era necesario automatizar el proceso para la cantidad total de calculados por parámetro (4018 * 3 = 12,054). Aun con la automatización, cada parámetro requirió de aproximadamente 5 días completos para los 4018 estimaciones. Apoyándonos en la validación del RMSE y RMNSE se puede concluir que las estimaciones cumplen con grado de validez aceptable.

5.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO VISUAL-BALAN

Para realizar la calibración de los parámetros del modelo hidrológico en Visual-Balan se utilizó la subcuenca de Vilasouto, ya que es la única en donde es posible realizar la restitución al régimen natural y se considera que no existe una actividad intensa de extracciones o incorporaciones externas agua arriba del embalse. En las otras subcuencas no es posible conocer detalladamente el balance de agua y dos de ellas (Ribas Altas y Cabe_R) cuentan con un área mayor y con actividades agrícolas que extraen cantidades importantes de agua. Los parámetros de calibración de la subcuenca de Vilasouto fueron utilizados en las otras subcuencas para la simulación hidrológica.

Los resultados de la validación de la calibración para las tres subcuencas de las que se disponían de datos de aforo presentan un ajuste dentro de la categoría de bueno a muy bueno según el coeficiente de Nash-Sutcliffe. La validación de la calibración de los resultados de Visual-Balan se encuentra en el anexo digital AD-07. En la tabla 5-5 se mencionan los valores para el criterio del coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS).

Tabla 5-5. Valores referenciales del coeficiente de Nash-Sutcliffe. Fuente (Nash & Sutcliffe, 1970)

Valor	Criterio coeficiente
< 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
> 0.8	Excelente

En general se puede considerar que la calibración en las tres cuencas es satisfactoria y funcional para los propósitos de este trabajo de tesis. Hacia el final del periodo de calibración se tiene tres picos en los caudales simulados que no corresponden a la precipitación ni a la realidad física, pero el resto del periodo simulado responde correctamente según las observaciones. Aun así, si fuera posible contar con información detallada a nivel de la subcuenca, se podrían

realizar calibraciones individuales para cada una de ellas y reducir el error en la simulación.

5.3.1 Restitución al régimen natural en el embalse de Vilasouto

La Restitución al Régimen Natural (RRN) se realizó para conocer cuáles deberían ser los caudales reales que escurrirían por la salida del embalse de Vilasouto si éste no existiera. Esto es necesario para poder comparar si las simulaciones de Visual-Balan se aproximan a la realidad, ya que el modelo hidrológico solo simula en régimen natural.

Al graficar el caudal con RRN, se observó que a partir del día 20/06/2013 de los 11 años hidrológicos, había un comportamiento irregular negativo en los caudales, como se observa en la figura 5-2. Posiblemente se debió a error en la estimación de los caudales de salida. Por tal motivo, únicamente se utilizaron los datos anteriores a esta fecha de la irregularidad, que es del 01/10/2006 al 19/06/2013, como referencia para calibrar el modelo hidrológico en la subcuenca del embalse de Vilasouto. En el anexo digital AD-21 se encuentra la información sobre la RRN para el embalse de Vilasouto.

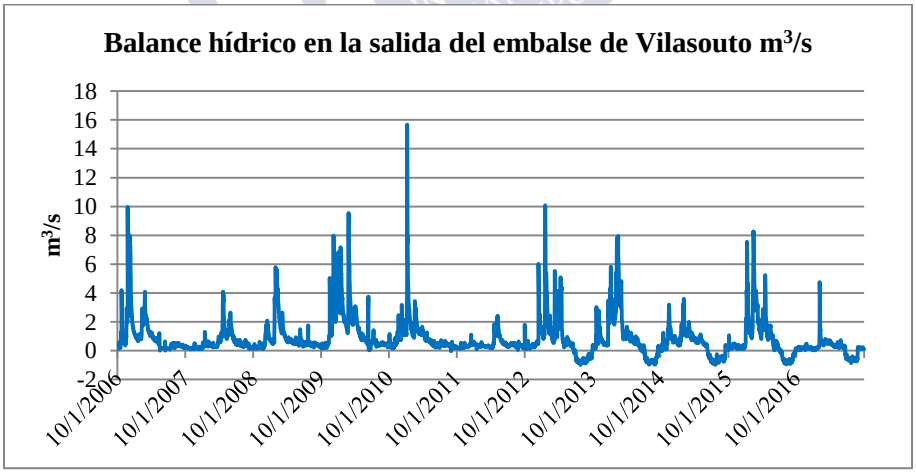


Figura 5-2 Balance hídrico en la salida del embalse de Vilasouto en m^3/s. Elaboración propia.

Es importante validar los datos observados aunque estén publicados como validados por parte de las autoridades de la información. Es conveniente contrastar los datos con otra información similar y de ser posible con las mismas entidades que los emiten, ya que de la calidad de los datos observados depende en gran medida la calidad de las estimaciones posteriores.

En la figura 5-3 se muestran los caudales simulados con el modelo calibrado y los caudales observados para la subcuenca de Vilasouto. El coeficiente de Nash-Sutcliffe, obtenido entre los valores observados de los aforos (con restitución al régimen natural) y los valores calculados (simulados) por el modelo Visual-Balan, da un valor de 0.69, el cual se encuentra en la categoría de muy bueno de los valores de referencia del coeficiente Nash-Sutcliffe. Los caudales simulados se ajustan adecuadamente a la magnitud y tendencias de los datos observados con excepción de una fecha en enero del 2011.

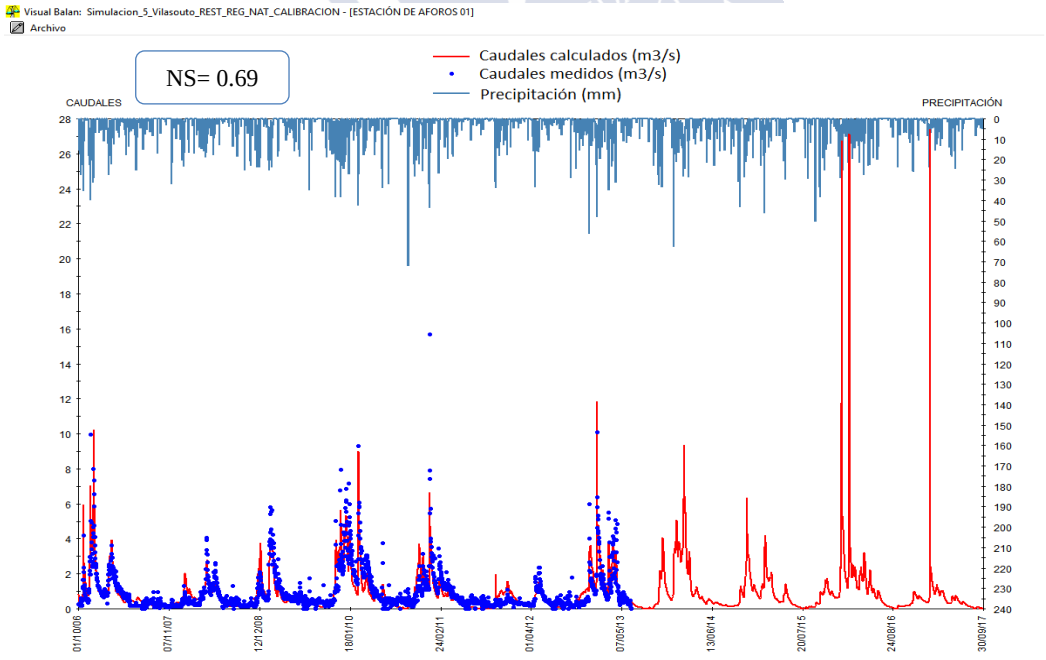


Figura 5-3. Resultados de la calibración de la subcuenca Vilasouto.
Elaboración propia.

5.3.2 Calibración Ponte Pena y Ribas Altas

Para subcuenca de Ponte Pena se obtuvo un valor de NS de 0.38 (satisfactorio). En la figura 5-4 se muestra el resultado de los caudales del modelo hidrológico Visual-Balan calibrado y los caudales observados para la subcuenca Ponte Pena, donde se observa que las tendencias son similares aunque hay diferencias en los caudales bajos. Esta diferencia se debe posiblemente a que existe una distinta composición geológica entre las subcuencas de Vilasouto y Ponte Pena.

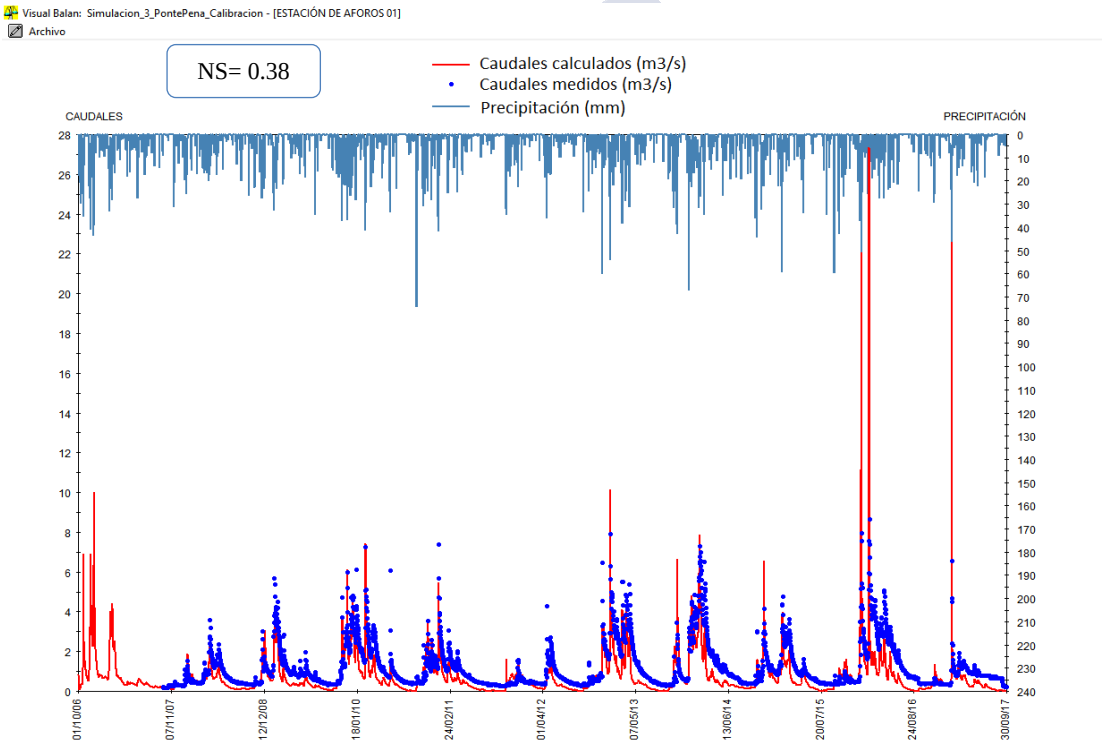


Figura 5-4. Resultados de la calibración de la subcuenca Ponte Pena.
Elaboración propia.

En la tabla 5-6 se pueden observar los porcentajes de grupos geológicos en la subcuenca de Ponte Pena, en donde casi la mitad (47%) pertenece a grupo de “cuarcitas, pizarras, areniscas y limotitas”, a diferencia de la subcuenca de Vilasouto, donde este mismo grupo tiene solamente un 13.79%, que resalta la aparición de calizas, ya que esto modifica los parámetros hidrogeológicos del acuífero.

Tabla 5-6 Geología en la subcuenca de Ponte Pena. Fuente (IGN, 2016).

Grupo geológico	Porcentaje
Cuarcitas, pizarras, areniscas y limotitas	47%
Pizarras, areniscas y niveles carbonatados	22%
Esquistos, filitas o pizarras grafitosas o ampelitas	17%
Calizas y pizarras	8%
Niveles de ampelitas	3%
Otros varios, cuarcitas blancas, ampelitas y magnesitas	3%

En el anexo digital AD-22, se pueden observar los archivos de QGIS y en ellos los mapas de composición geológica en donde la composición entre las subcuencas en Vilasouto y Ribas Altas es más parecida, mientras que en Ponte Pena se puede apreciar ese 47% de diferencia entre las otras dos subcuencas. Como se mencionó anteriormente, se utilizaron los parámetros de Vilasouto para simular la subcuenca de Ponte Pena porque no fue posible realizar la RRN en Ponte Pena, al no conocer las extracciones y aportaciones al caudal del río. En esta ausencia de información podría se podrían haber vertidos o aportaciones al río por parte de los usuarios. En el estudio realizado Raposo et al. (2012) menciona que aunque la cuarcita es una roca metamórfica, desde un punto de vista hidrogeológico, se considera que es más similar a los granitos debido a sus productos de intemperismo y alto grado de fracturamiento de la roca madre que favorece una mayor capacidad de almacenamiento de agua. Por el contrario, el esquisto y las pizarras gallegas suelen tener fracturas cerradas a gran profundidad (Samper, 2003) y, por lo tanto, su capacidad de almacenamiento en el acuífero se llena rápidamente durante la precipitación alta. Esto también refleja la importancia de contar con la mayor cantidad de datos posibles del área de estudio, muy especialmente del subsuelo.

La subcuenca Ponte Pena es la más pequeña de todas por lo que el rango inferior en la categoría de calibración en comparación a Vilasouto, no afecta en gran medida en la estimación del caudal a la salida del total de la subcuenca Cabe_R, aunque se encuentra dentro de la categoría de criterio satisfactorio.

En la figura 5-5 se muestra el resultado entre los caudales simulados en el modelo calibrado y caudales observados para la subcuenca de Ribas Altas, con un valor de 0.82 (excelente), pero en donde se utilizaron únicamente los caudales de otoño-invierno (octubre-marzo). De la misma manera que en Ponte Pena, se utilizaron los parámetros físicos de la subcuenca de Vilasouto para calibrar Ribas Altas.

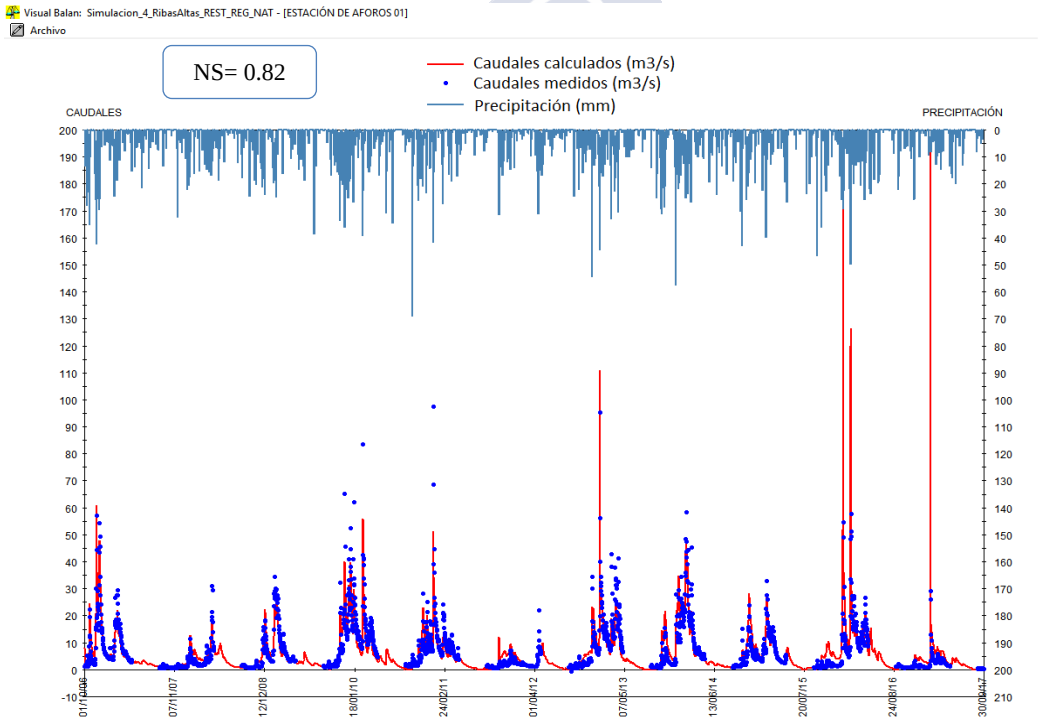


Figura 5-5. Resultados de la calibración de la subcuenca Ribas Altas. Elaboración propia.

La subcuenca de Ribas Altas es la de mayor área de todas, por consiguiente la que más contribuye a la aportación de los caudales. La razón para utilizar solamente los caudales observados de otoño-invierno es porque durante el verano se realizan importantes extracciones de agua para la agricultura, de lo cual no se tienen datos precisos para la RRN. Aunque se obtiene un valor de NS de 0.82 que cae en la categoría de "excelente" pero no debería considerarse mejor que Vilasouto ya que las comparaciones entre simulados y observados no tienen continuidad a lo largo del año hidrológico.

No se cuenta con información sobre los datos de niveles piezométricos en el área, lo que ayudaría a realizar un mejor ajuste de calibración del comportamiento del modelo hidrológico, sobre todo en la parte del flujo subterráneo. Si bien la información de los caudales observados permite la calibración del modelo, tener un segundo punto de comparación eliminaría más incertidumbre del resultado del modelo. Esta información tampoco está publicada en el Plan Hidrológico correspondiente. Generar los datos de niveles piezométricos en el área de Galicia puede ser un importante proyecto a futuro para el gobierno de la comunidad autónoma y los centros de investigación presentes en la región. Sin duda contar con dicha información permitirá desarrollar mejores modelos hidrológicos para comprender tanto la hidrología superficial como los flujos de agua subterránea.

5.3.3 Comparación con otros estudios realizados en la zona

Los resultados de los flujos obtenidos por la simulación hidrológica con el modelo calibrado para la subcuenca Cabe_R, se compraron con un estudio realizado también en la Comunidad de Galicia por Samper & Pisani (2013) en la subcuenca del Río Valiñas con un área de 34 km^2. En la tabla 5-7 se muestra la comparación de los flujos en medias anuales (mm) entre los dos estudios mencionados con los resultados de este trabajo, en donde la similitud con el estudio del río Valiñas es mayor que con el de toda Galicia-Costa. La figura 5-6 muestra la distribución porcentual en barras entre el estudio del río Valiñas y este trabajo.

Tabla 5-7. Comparativa de flujos entre la simulación hidrológica de la subcuenca del Río Valiñas, Galicia-Costa y del Río Cabe_R. Valores de media anual y porcentaje entre entrada y salida. Elaboración propia.

	Río Valiñas Samper & Pisani (2013)		Galicia Costa Raposo et al. (2012) (promedio)		Cabe_R	
Precipitación (mm)	1081	100%	1545.44	100%	994.32	100%
Interceptación (mm)	163	15.08%	118.8	7.69%	93.21	9.68%
Escorrentía superficial (mm)	5	0.46%	92.7	6%	16.82	1.69%
ET_0 (mm)	928	-	-	-	997.00	-
ETR (mm)	376	34.78%	357.8	23.2%	391.02	39.3%
Recarga en tránsito (mm)	536	-	-	-	490.28	-
Flujo hipodérmico (mm)	437	40.43%	592.3	38.3%	396.17	39.8%
Recarga al acuífero (mm)	99	-	385	24.9%	94.38	-
Flujo subterráneo (mm)	98	9.07%	-	-	94.38	9.49%
Caudal total (mm)	541	50.05%	-	-	507.37	51.0%

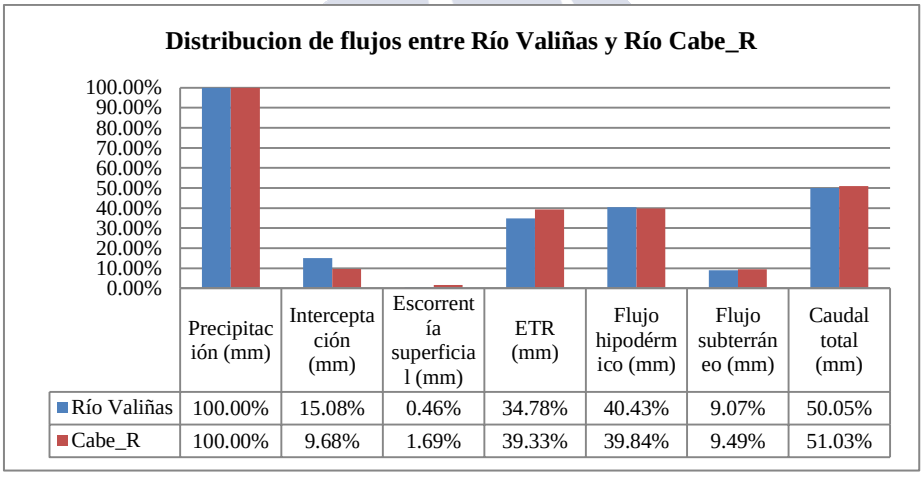


Figura 5-6. Distribución de flujos entre las simulaciones del Río Valiñas y Cabe_R. Elaboración propia.

Esta comparación es pertinente ya que las dos subcuencas se encuentran ubicadas en la misma región, por lo que las características físicas e hidromorfológicas se pueden considerar similares. Si bien los resultados de los flujos no tienen que ser iguales, pueden ser usados como referencia en su porcentaje de distribución. Otra comparación sobre los parámetros del modelo Visual-Balan, posible

hacerla con el trabajo publicado Raposo et al. (2012) con un área de 13,072 km^2, el cual tambien utilizo Visual-Balan para calcular en balance hídrico en la región de la cuenca de Galicia-Costa.

5.4 Extracción de datos Euro-Cordex en la cuenca del río Cabe

Mediante código de *R* se realizó el ajuste y transformación de los mapas de EUR-11 y la extracción de datos del área de interés. Los scripts de los cogidos de *R* se pueden consultar en el anexo AD-03. En la figura 5-7 se muestra una imagen del ajuste transformación de los mapas al área de Galicia y la ubicación de las subcuencas del área de estudio. Para comprobar el ajuste de los límites en la costa, se utilizó un mapa de ET_0, ya que en los mapas de T media, y Pr, la línea divisoria entre mar y costa no está definida. El proceso de transformación de coordenadas en *R* fue diseñado para re-proyectar al sistema geodésicoWGS84, el cual fue logrado por iteración. Existe una versión de mapas de Euro-Cordex que fueron proyectados a WGS84 por los mismos institutos que realizaron las simulaciones, llamados EUR-11i y EUR44i, sin embargo estas versiones solamente cuentan con series de datos mensuales y no diarios.

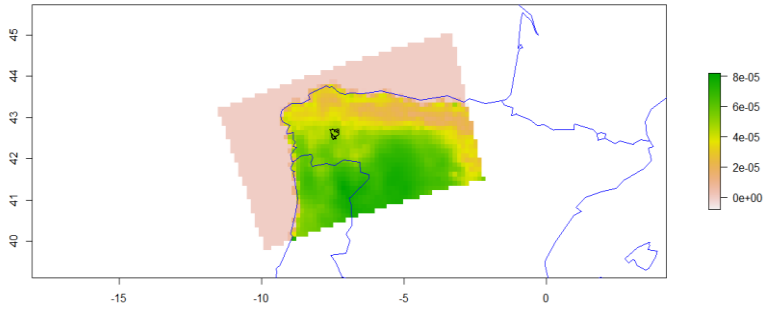


Figura 5-7. Ajuste de la transformación de los mapas Euro-Cordex para el área de Galicia. Elaboración propia.

Por las dimensiones del área de la subcuenca Cabe_R que es de 426.34 Km^2 y el tamaño (~ 12.5 x 12.5 km = 156.25 km^2) de los pixeles de los mapas Euro-Cordex, se estima que la información extraída sea la correspondiente a dos o tres pixeles. Para la subcuenca

del embalse de Vilasouto que es la más pequeña de todas, con un área de 49.24 Km^2, la información extraída correspondería a un solo pixel.

El código utilizado para realizar la transformación en *R* de los mapas, para el área de Galicia, es la siguiente:

CRS("+proj=lcc +lat_1=57.59 +lat_2=39.17 +lat_0=39.41 +lon_0=17.92 +lon_1=10.0 +k=77.81 +units=m +datum=WGS84 +no_defs")

Los parámetros de transformación anteriores, no son aplicables para otras regiones en el mundo. Para cada región específica se debe encontrar una parametrización particular. Por ejemplo, en los foros de R hay varios casos aplicados a regiones de EUA y otras zonas de Europa.

El total de datos de los tres modelos de Euro-Cordex del domino EUR11 utilizados y el total de las cantidades de datos extraídas para los tres parámetros meteorológicos. Un total de 244,350 datos para cada modelo sumando los tres parámetros son los que se extrajeron con el proceso en R-studio.

5.4.1 Corrección del sesgo en los datos de Euro-Cordex

Después de realizar el ajuste de unidades para cada parámetro, se compraron las series de tiempo de cada serie extraída con las series observadas. Se encontró sesgo entre los datos observados y los valores simulados por los modelos Euro-Cordex en todas las variables, siendo la ET_0 la de menor cantidad y la precipitación la que más se alejó de los valores reales. Por ejemplo, las cantidades de los sesgos en diferencia de la precipitación para los tres modelos utilizados son de 5,021.13 mm, 9,391.58 mm y 60,864.20 mm por encima de las cantidades observadas para el mismo periodo de control de 1972-2005.

La aplicación de los coeficientes CAM mostró un buen resultado para corregir los valores simulados respecto a los observados para el periodo de 1972-2005 en Vilasouto. En la figura 5-8 se puede ver una comparación de los valores antes y después de la corrección con los

coeficientes CAM para la temperatura. La figura muestra como la temperatura simulada lleva una tendencia correspondiente a la observada pero por debajo de los valores. Se utilizó como periodo de control los valores mensuales para temperatura, precipitación y ET_0 de las observaciones de la estación del embalse de Vilasouto para los años hidrológicos de 1972-2005. El resultado de la corrección para la temperatura y la precipitación en cada modelo EUR-11 se muestra en la tabla 5-8, tomando la media, el coeficiente de variación (CV), el coeficiente de correlación (CC) como evaluadores. La temperatura presenta el mejor ajuste según los cuatro evaluadores teniendo más cercanía en la media y mejorando el CC, mientras que disminuye ligeramente el CV. Para el caso de la precipitación el ajuste en la media es exacto, pero las mejoras en CC son mínimas.

Tabla 5-8. Resultados de la corrección mediante CAM para temperatura y precipitación de los valores simulados de los modelos EUR-11. Elaboración propia.

Fuente de los datos de 1972-2005 :	Temperatura media					
	Coeficiente aditivo					
	Antes de la corrección			Después de la corrección		
	Med. (ºC)	CV	CC	Med. (ºC)	CV	CC
OBS. Vilasouto (Ref.)	11.15	0.48	-	11.15	0.48	-
CNRM-CERFACS-CM5_RCA4	9.48	0.43	0.88	11.95	0.39	0.91
IPSL-IPSL-CM5A-MR_RCA4	10.14	0.49	0.89	12.17	0.42	0.91
ICHEC-EC-EARTH_RCA4	9.45	0.45	0.91	11.72	0.41	0.92
Fuente de los datos de 1972-2005 :	Precipitación					
	Coeficiente multiplicativo					
	Antes de la corrección			Después de la corrección		
	Med. (mm/mes)	CV	CC	Med. (mm/mes)	CV	CC
OBS. Vilasouto (Ref.)	100.7	0.8	-	100.7	0.8	-
CNRM-CERFACS-CM5_RCA4	157.3	0.6	0.24	100.7	0.7	0.32
IPSL-IPSL-CM5A-MR_RCA4	124.9	0.9	0.27	100.7	0.8	0.23
ICHEC-EC-EARTH_RCA4	114.2	0.8	0.29	100.7	0.8	0.27

Sin embargo, con el ajuste, se logró minimizar la diferencia en la suma absoluta de la temperatura, ET_0 y precipitación entre las observaciones y los modelos para el periodo de control. Esta

diferencia mínima entre las sumas totales de la precipitación es importante para no sobreestimar en este caso los caudales generados por las cantidades de lluvia, aunque se debe considerar que la respuesta de la cuenca no es lineal a las cantidades de precipitación. Los coeficientes CAM fueron aplicados a los escenarios de Histórico (1970-2005), RCP4.5 y RCP8.5 (2006-2100) de los tres modelos del dominio EUR-11, para proceder a la simulación de escenarios en el modelo hidrológico.

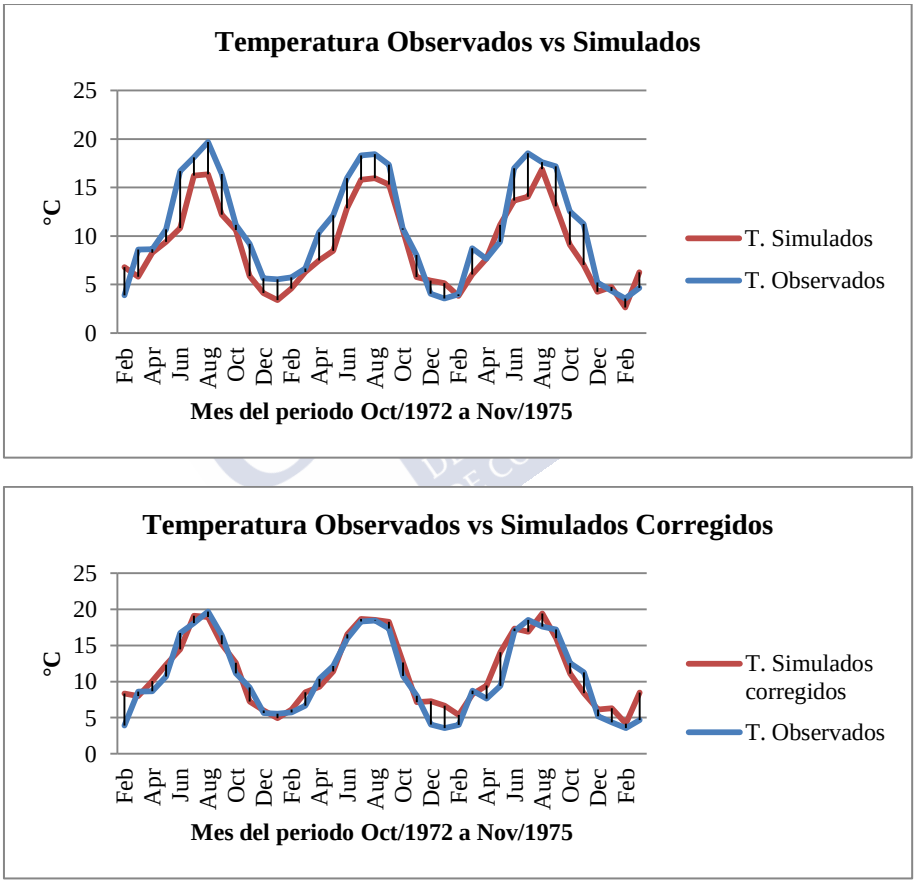


Figura 5-8. Muestra de la corrección de la temperatura simulada con coeficientes CAM. Elaboración propia.

Hay investigaciones que dicen que no es necesario corregir el sesgo para comparación entre los escenarios histórico y los RCPs, ya que todos ellos están afectados por el mismo sesgo. Si no se corrige el sesgo, los que se puede valorar es la tendencia que indican los modelos de proyección climática. Sin embargo, para trabajar la cuantificación de los recursos hídricos con la finalidad de estimar cantidades volumétricas para posteriormente simular la gestión de recursos hídricos para periodos futuros, en este trabajo se considera que se debe realizar la corrección, ya que la respuesta hidrológica de una cuenca no es lineal con las variables climatológicas.

5.5 SIMULACIÓN HIDROLÓGICA EN LOS ESCENARIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Después de que los coeficientes CAM fueron aplicados a las tres variables meteorológicas en los escenarios histórico (1970-2005), RCP4.5 y RCP8.5 (2006-2100) a los tres modelos para corregir el sesgo, procedió a la simulación hidrológica con Visual-Balan de escenarios futuros en cuatro periodos de evaluación que son: 1) 1970-2005, 2) 2020-2040, 3) 2040-2070 y 4) 2070-2100. Estas simulaciones fueron realizadas en las cuatro subcuencas por separado, aunque en este capítulo solo se presentan para la subcuenca Cabe_R, que resume los resultados de todas las otras subcuencas. Los resultados y los archivos de simulación de Visual-Balan se pueden encontrar en el anexo digital AD-18.

Los resultados de las simulaciones en los escenarios del cambio climático en la subcuenca del Cabe_R, coinciden con los resultados encontrados por Álvarez et al. (2011) con los escenarios SRES en cuanto a temperatura y precipitación para el área de Galicia. El aumento de la temperatura principalmente en los veranos y la concentración de las lluvias en invierno se encontraron también para la proyección de cambio climático para este trabajo en la subcuenca Cabe_R con los escenarios RCPs. El caudal o aportaciones, no funciona de forma lineal con la precipitación, pero al presentarse una variación en la precipitación, cambia consecuentemente también la distribución temporal del caudal.

La tabla 5-9 contiene los resultados de las proyecciones de cambio climático en la subcuenca Cabe_R para los tres modelos utilizados divididos en cuatro periodos, 1970-2005, 2020-2040, 2040-2070, 2070-2100. Para el escenario RCP4.5 los tres modelos siguen una tendencia a aumentar de 1.5 a 2 ºC para el año 2100 respecto al escenario de control. Para el escenario RCP8.5 también los modelos tienden a la alza de temperatura, esperando un aumento de hasta 3 ºC para finales del 2100, aproximadamente 1 ºC por cada periodo. Respecto a la precipitación, para el escenario RCP4.5 cada modelo presenta comportamientos diferentes, mientras que los modelos CNRM-CERFACS-CM5_RCA4 y IPSL-IPSL-CM5A-MR_RCA4 proyectan una disminución para el 2100 respecto al escenario histórico, el modelo ICHEC-EC-EARTH_RCA4 estima un ligero aumento en la precipitación. La proyección de la precipitación para el escenario RCP8.5 se comporta de manera distinta para cada modelo pero coincidiendo en una menor disponibilidad para finales del 2100.

Para el caudal promedio mensual la disminución varía entre 0.89 y 1.97 Hm^3 (media de 1.43) para el RCP4.5 y entre 1.86 y 2.76 Hm^3 (media de 2.31) para el RCP8.5 respecto al periodo histórico. Estas disminuciones parecen cantidades no muy grandes, pero se pueden comparar con la equivalencia a la UDG que es de 0.6 Hm^3 o con la UDP de 0.5 Hm^3 anuales, por lo que una variación mensual de esta magnitud representa más que el total de estas demandas anuales. También, estas disminuciones del caudal para el RCP4.5 equivalen al 96.6% del total de la demanda consuntiva de 1.48 Hm^3/mes (17.78 Hm^3/año) del Cabe_R al 2012 y respectivamente el RCP8.5 al del 156%. Esto no quiere decir que el sistema del Cabe_R se quedará sin agua, pues el caudal mensual promedio sigue siendo de 23.29 Hm^3 para el RCP4.5 y de 21.04 Hm^3 para el RCP8.5. Además, el abastecimiento se controla con el embalse, por lo que esos porcentajes tan altos de equivalencia no significan que la demanda será imposible de cumplir. El caudal se ve afectado directamente por la variación en la precipitación, aunque no linealmente pero magnitud, como se puede observar en las figuras de la sección 5.5.1.3.

Tabla 5-9. Resultados para la subcuenca Cabe_R de las proyecciones de cambio climático para los tres modelos EUR-11, para los escenarios RCP4.5 y 8.5 en promedios mensuales. Elaboración propia.

Cabe_R. RCP 4.5	1970-2005 histórico				2020-2040			
	T	ET_0	Pr	Q	T	ET_0	Pr	Q
Promedios mensuales	**˚C**	**mm**	**mm**	**hm^3**	**˚C**	**mm**	**mm**	**hm^3**
CNRM-CERFACS-CM5_RCA4	11.83	76.91	104.93	23.9	12.63	79.21	100.85	22.9
IPSL-IPSL-CM5A-MR_RCA4	12.26	83.86	100.88	22.7	13.50	90.80	87.10	18.8
ICHEC-EC-EARTH_RCA4	11.77	80.02	102.79	23.3	12.77	82.84	109.14	25.1
	2040-2070				2070-2100			
	T	ET_0	Pr	Q	T	ET_0	Pr	Q
Promedios mensuales	**˚C**	**mm**	**mm**	**hm^3**	**˚C**	**mm**	**mm**	**hm^3**
CNRM-CERFACS-CM5_RCA4	12.98	80.73	101.09	23.52	13.40	81.12	100.36	23.01
IPSL-IPSL-CM5A-MR_RCA4	13.92	92.93	91.34	21.01	14.38	94.87	93.01	21.58
ICHEC-EC-EARTH_RCA4	13.40	86.98	102.03	23.04	13.77	87.71	108.58	25.27
Cabe_R. RCP 8.5	**1970-2005 histórico**				**2020-2040**			
	T	ET_0	Pr	Q	T	ET_0	Pr	Q
Promedios mensuales	**˚C**	**mm**	**mm**	**hm^3**	**˚C**	**mm**	**mm**	**hm^3**
CNRM-CERFACS-CM5_RCA4	11.83	76.91	104.93	23.9	12.39	78.36	104.77	24.1
IPSL-IPSL-CM5A-MR_RCA4	12.26	83.86	100.88	22.7	13.43	90.28	87.50	19.4
ICHEC-EC-EARTH_RCA4	11.77	80.02	102.79	23.3	12.72	83.40	102.57	23.5
	2040-2070				2070-2100			
	T	ET_0	Pr	Q	T	ET_0	Pr	Q
Promedios mensuales	**˚C**	**mm**	**mm**	**hm^3**	**˚C**	**mm**	**mm**	**hm^3**
CNRM-CERFACS-CM5_RCA4	13.60	84.14	96.98	21.55	15.16	89.50	98.15	22.04
IPSL-IPSL-CM5A-MR_RCA4	14.64	95.54	91.67	21.06	16.14	102.04	87.69	20.54
ICHEC-EC-EARTH_RCA4	14.04	89.85	104.49	24.26	15.63	98.09	91.46	20.54

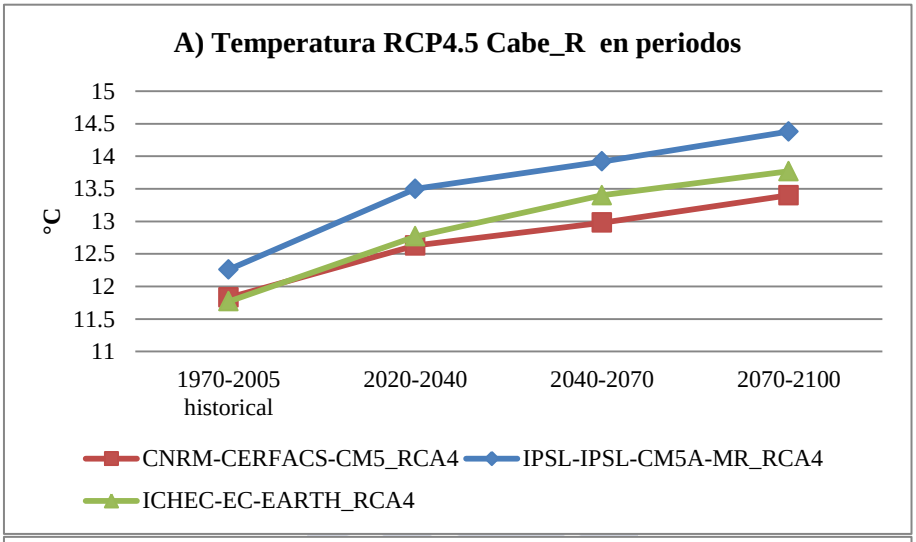
Hay otros aspectos hidrológicos del cambio climático que no se han evaluado en esta tesis por no estar dentro de los objetivos de la misma, como son caudales máximos y mínimos.

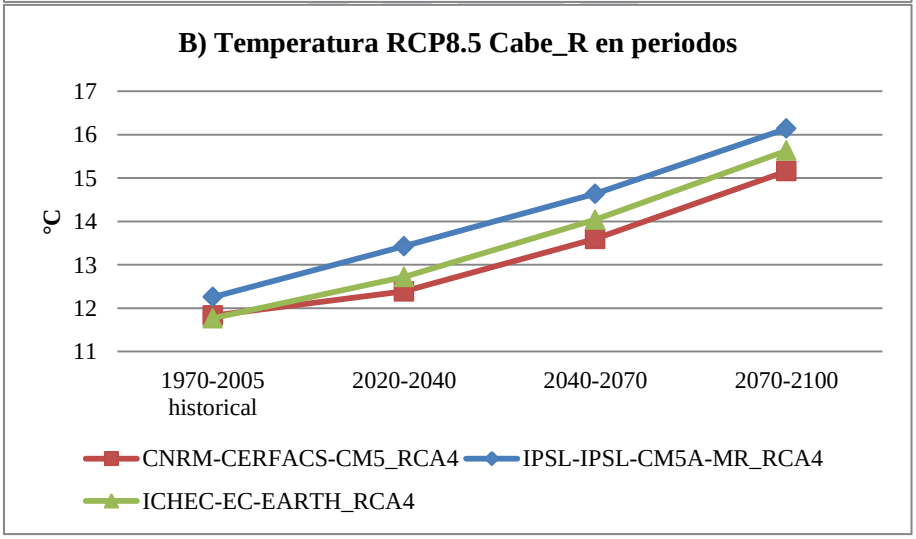
El CEDEX tiene una aplicación llamada CAMREC (Cambio Climático en los Recursos hídricos) en la que ha depositado la información de las extracciones de algunos modelos climáticos de Euro-Cordex para el área de España. Sin embargo, no es posible comprar los resultados de la tabla 5-9, ya que la información de la tabla tiene la corrección del sesgo y la información de la aplicación CAMREC no tiene la corrección del sesgo. Lo que es posible comprar, es el porcentaje de cambio entre los escenarios RCP4.5 y 8.5 y los periodos en los que se han dividido, en relación al periodo

histórico, aunque la respuesta del caudal de aportación no es lineal a la tendencia de las variables climáticas.

5.5.1 Proyección de la temperatura media en la subcuenca Cabe_R

Las gráficas individuales de promedio mensual de cada modelo EUR-11 se encuentran en el anexo digital AD-19. Los tres modelos coinciden en la subcuenca Cabe_R con un aumento para ambos escenarios RCP4.5 y RCP 8.4 respecto al escenario histórico. Los aumentos de temperatura promedio mensual en verano podrían ser de entre 2 y 3 ºC, mientras que en invierno el aumento está entre 1 y 2 ºC para finales del 2100. Los modelos IPSL-IPSL-CM5A-MR_RCA4 y ICHEC-EC-EARTH_RCA4 son los que proyectan el mayor aumento durante el verano para el RCP8.5. Es apreciable en incremento tendencial uniforme para ambos escenarios en los tres modelos, en el que el RCP8.5 tiende a incrementarse más a finales del 2100. Hasta el año 2040 ambos escenarios muestran una tendencia similar. Los gráficos respaldan la proyección de que el cambio climático tendrá efectos en el aumento de la temperatura media mensual e invariable mente anual, así como consecuentemente también un aumento en la ET_0. La similitud entre los modelos entre dos modelos y variación de uno es normal en los modelos de simulación climática, ya que cada uno es diferente y por tal razón, los expertos en simulación climática recomiendan utilizar la mayor cantidad de modelos disponibles para que la media sea más representativa. En la sección 5-9 C), el promedio de los modelos parece ser similar hasta el periodo 2020-2040, pero a partir de ese punto el RCP8.5 se intensifica el incremento en aproximadamente 2 grados más hacia final del 2100, mostrando claramente las diferencias que cada RCP representa y explica la diferencia de las características con las que cada escenario RCP está configurado. Nuevamente estas proyecciones coinciden con los resultados el estudio de Álvarez et al. (2011) en los que se estiman aumentos de entre 2 y 3 ºC pero con los escenarios SRES en vez de los RCP.


A) Temperatura RCP4.5 Cabe_R en periodos
15
14.5
14
13.5
13
12.5
12
11.5
11
°C
1970-2005
historical
2020-2040
2040-2070
2070-2100
CNRM-CERFACS-CM5_RCA4
IPSL-IPSL-CM5A-MR_RCA4
ICHEC-EC-EARTH_RCA4


B) Temperatura RCP8.5 Cabe_R en periodos
17
16
15
14
13
12
11
°C
1970-2005
historical
2020-2040
2040-2070
2070-2100
CNRM-CERFACS-CM5_RCA4
IPSL-IPSL-CM5A-MR_RCA4
ICHEC-EC-EARTH_RCA4

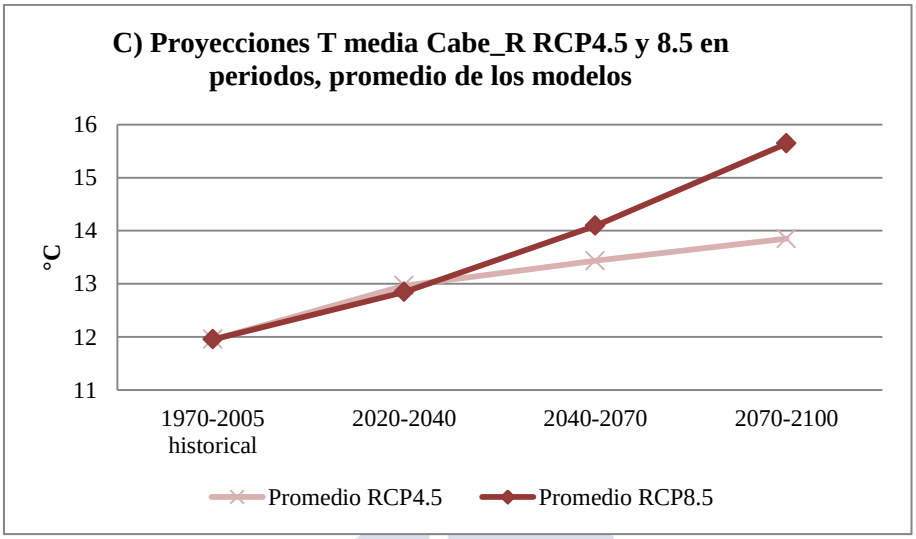


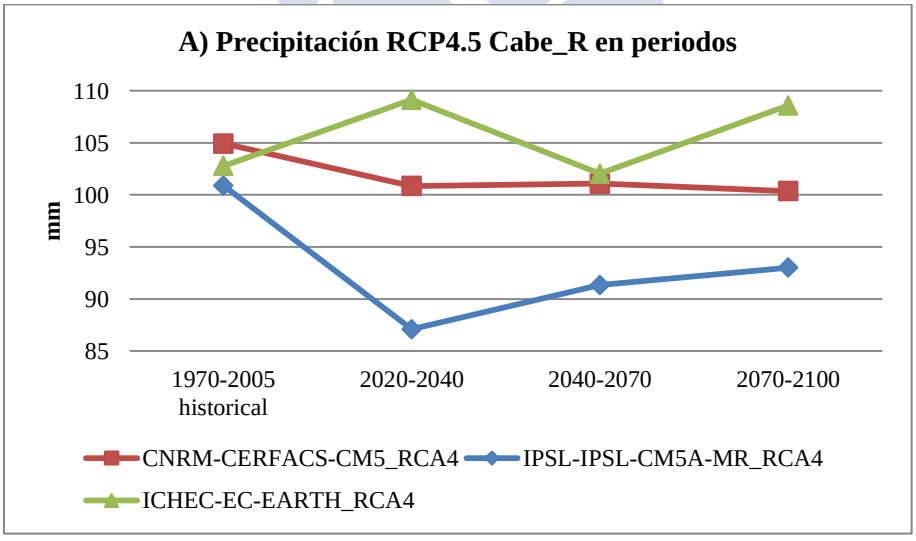
Figura 5-9 A) y B) resultados para Cabe_R de proyección de temperatura media para los periodos desde el histórico hasta 2100, C) promedios de los modelos en los escenarios RCP4.5 y 8.5. Elaboración propia.

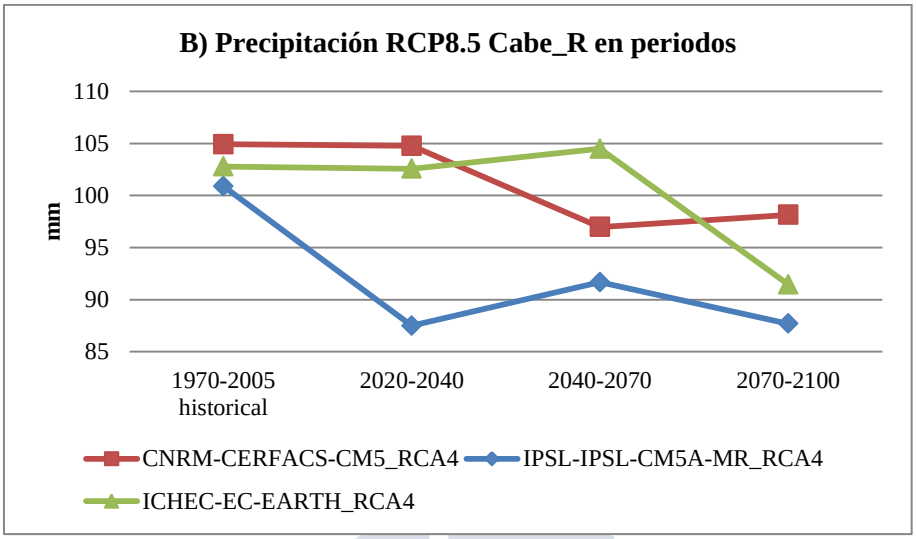
El incremento en el escenario RCP8.5 es más drástico que el RCP4.5 como es de esperarse por las mismas características del modelo de tener un mayor forzamiento radiativo por m^2 de superficie. Todos los modelos inician aproximadamente en el mismo valor con el promedio del escenario histórico. Los resultados encontrados en este trabajo con los RCP para la temperatura, coinciden con los de otros autores que utilizaron los escenarios SRES, lo que respalda que hay una correlación entre los escenarios de cambio climático.

5.5.2 Proyección de la precipitación en la subcuenca Cabe_R

Las gráficas individuales de promedio mensual de cada modelo se encuentran en el anexo digital AD-19. En la figura 5-10 se muestra como cada modelo en cada escenario, presenta diferentes fluctuaciones que no siguen una tendencia suavizada como en el caso de la temperatura y cada tendencia sigue patrones diferentes. En la figura 5-10 C), se encuentra el promedio de los modelos por escenario RCP, en el que se observa la tendencia de la disminución del promedio de las precipitaciones en ambos escenarios hacia el 2100 respecto al periodo histórico, es casi idéntica para los dos RCPs. Sin

embargo, se puede notar que en el periodo del 2070-2100 hay un desfase de 8 mm entre los RCPs y en el que el RCP4.5 inclusive aumenta 3mm respecto al periodo anterior. Esto se puede explicar debido a que el modelo ICHEC-EC-EARTH_RCA4 incrementa el promedio con su tendencia individual. Este comportamiento parece ser común en la simulación de la precipitación, por lo que una de las recomendaciones de Euro-Cordex es la de tratar de utilizar el promedio de la mayor cantidad de modelos posibles, a fin de minimizar estos modelos que difieren drásticamente. En el caso de este trabajo, la proyección de la precipitación según el RCP4.5 debería considerarse con muchas reservas y se recomendaría aumentar la cantidad de modelos que simulen este escenario. Por otro lado, el RCP8.5 también lleva una tendencia individual no uniforme entre los tres modelos, pero el promedio parece más lógico.





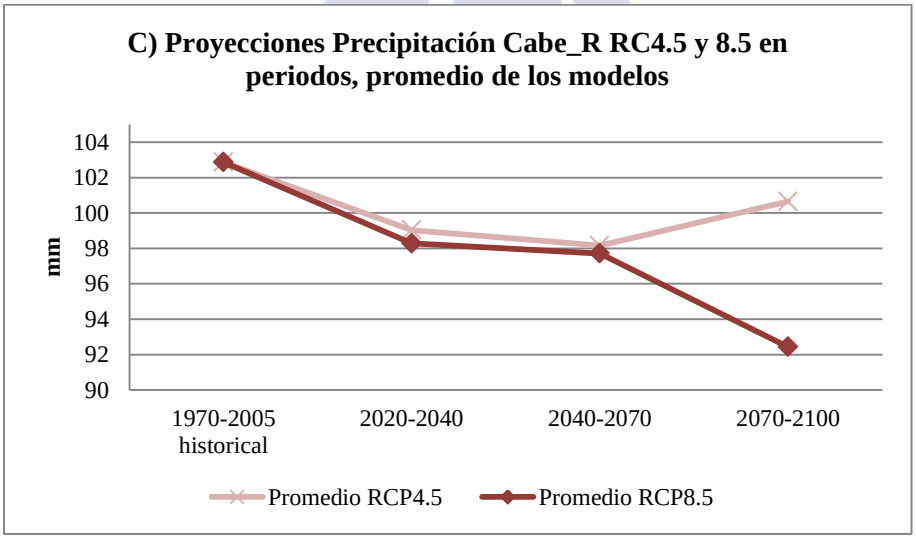


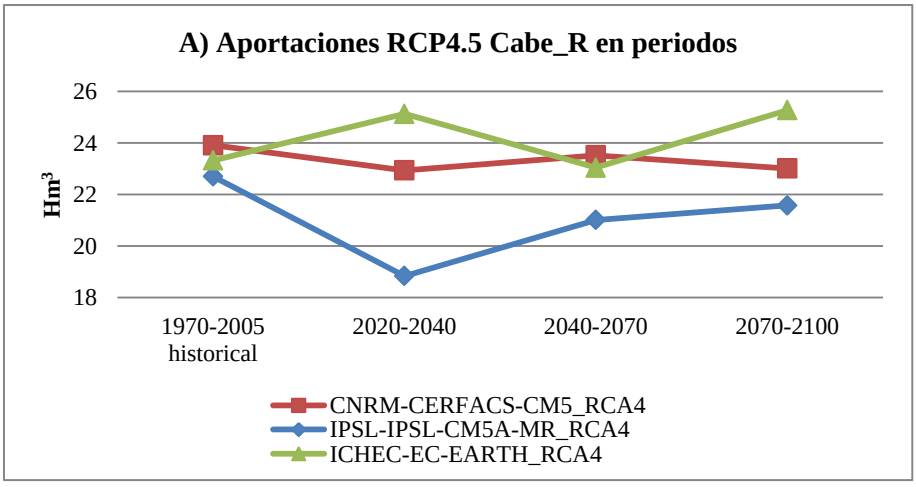
Figura 5-10 A) y B) Resultados para Cabe_R de proyección de precipitación mensual para los periodos desde el histórico hasta 2100, C) promedios de los modelos en los escenarios RCP4.5 y 8.5. Elaboración propia.

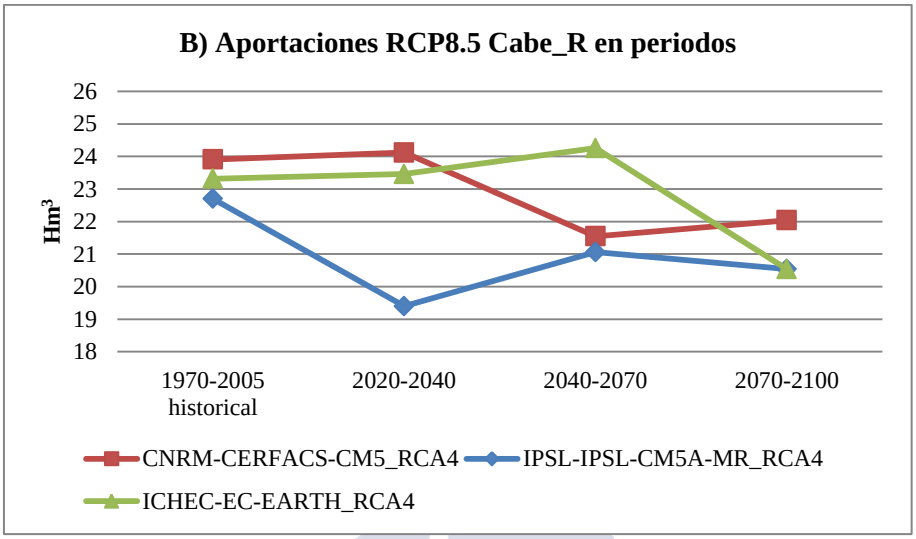
Este comportamiento en la precipitación coincide con la gran variedad de estudios (por ejemplo en Álvarez, et al., 2011) de proyección de cambio climático en donde se afirma que la

precipitación no sigue un comportamiento regular y tendencia como la temperatura. Cada uno de los modelos responde diferente ante el parámetro de la precipitación, ya que bases físicas y matemáticas internas de cada modelo son diferentes y resultan más sensibles a la precipitación que a la temperatura. Como ya se ha mencionado antes, esta situación con la precipitación es recurrente en la modelación climática.

5.5.3 Proyección del caudal en la subcuenca Cabe_R

Las gráficas individuales de promedio mensual de cada modelo se encuentran en el anexo digital AD-19. Los caudales de aportación son el resultado de la simulación individual de los datos extraídos para cada modelo EUR-11. Los caudales como se aprecia en la figura 5-11, no siguen un patrón de comportamiento lineal al igual que la precipitación. Se puede observar que las tendencias individuales para cada modelo en las secciones A) y B) siguen patrones independientes, que tiene la explicación de la relación con la precipitación. Para el RCP8.5, la tendencia individual también sigue patrones individuales que generan cierta incertidumbre, por lo que igualmente un mayor número de modelos simulados y promediados sería lo más recomendable. Sin embargo en el promedio de los modelos para elRCP8.5 entre los periodos parece más comprensible, teniendo una diferencia entre el inicio y el final de 2.27 Hm^3.





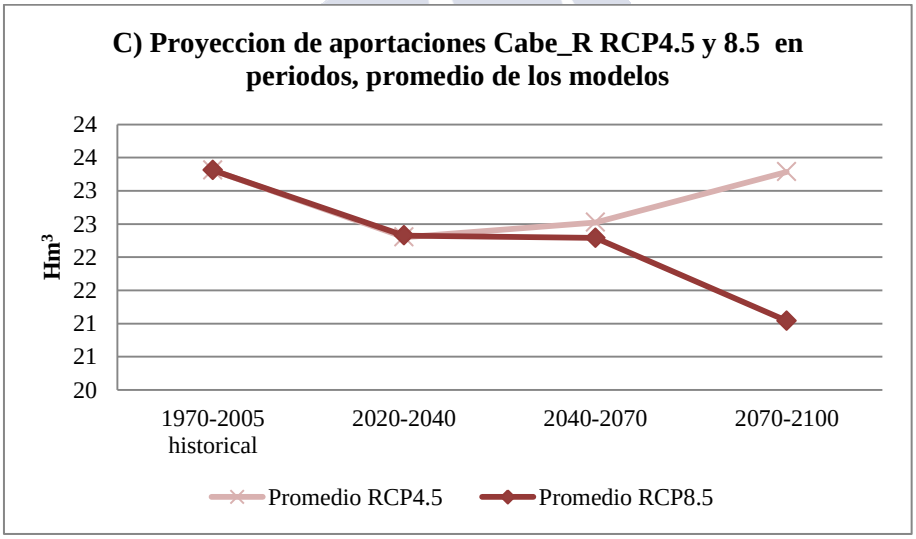


Figura 5-11 A) y B) Resultados para Cabe_R de proyección de la aportación media para los periodos desde el histórico hasta 2100, C) promedios de los modelos en los escenarios RCP4.5 y 8.5. Elaboración propia.

La simulación del caudal presenta éste comportamiento ya que el caudal está en función de la ocurrencia de la precipitación. Cada uno de los modelos funciona con una parametrización y configuración

diferente, por lo que es natural que cada uno tenga una proyección con cierto grado de diferencia, pero siempre dentro de un rango considerable con los otros modelos, como es en este caso de los tres modelos utilizados. Por tal motivo, los expertos en la modelación climática (IPCC, 2014), sugieren utilizar el promedio de la mayor cantidad de modelos posibles.

En la figura 5-12 se muestra la variación de la aportación media mensual en la subcuenca del Cabe_R, proyectada por el promedio de los modelos Euro-Cordex EUR-11, para los escenarios RCP4.5 y 8.5. Se puede observar que ambos escenarios presentan un aumento en el caudal medio mensual en los meses de invierno (de diciembre a marzo), lo que se traduce en inviernos con mayor escorrentía, y una disminución en los meses de primavera-verano-otoño (abril a noviembre), lo que significa veranos con menor disponibilidad de recursos hídricos. Esto se traduce en la posibilidad de tener una mayor concentración de lluvias en los meses de diciembre a marzo. La mayor variación se presenta para los mes de diciembre y enero, en donde pasa hay una diferencia de 5.65 y 7 Hm^3 respectivamente hacia mayores caudales, mientras que en los meses de mayo y junio hay una diferencia de 3.81 y 3.92 Hm^3 hacia menores caudales. Estos resultados respaldan al estudio realizados por Bates et al. (2008), Álvarez et al. (2011), Raposo et al. (2013) y Samper et al. (2016) (comentados en las secciones 2.2.1 y 2.6.3.2), los cuales concluyen con la variabilidad en las escorrentías, recargas de acuíferos y caudales, debidos a los efectos del cambio climático. También en la figura 5-12 es posible apreciar como los cambios en la distribución del caudal a lo largo del año no son en gran medida de magnitud volumétrica, pero si en la variabilidad temporal de la subcuenca. Los efectos de esta variabilidad también tienen efectos en el embalse de Vilasouto, que además de ser el único dentro de la cuenca, tiene una capacidad limitada, por lo que variabilidad en las aportaciones causaran que pase más tiempo sin recibir agua y periodos cortos con grandes avenidas. Esta situación requerirá de una adaptación en las medidas de gestión para evitar problemas en abastecer a las demandas dentro de la cuenca. A partir de este resultado, es en donde se hace el enlace con el modelo de simulación para la gestión de recursos

hídricos, con el fin de analizar el comportamiento de la variación en las aportaciones. Los datos de la gráfica se encuentran en el anexo digital AD-19.

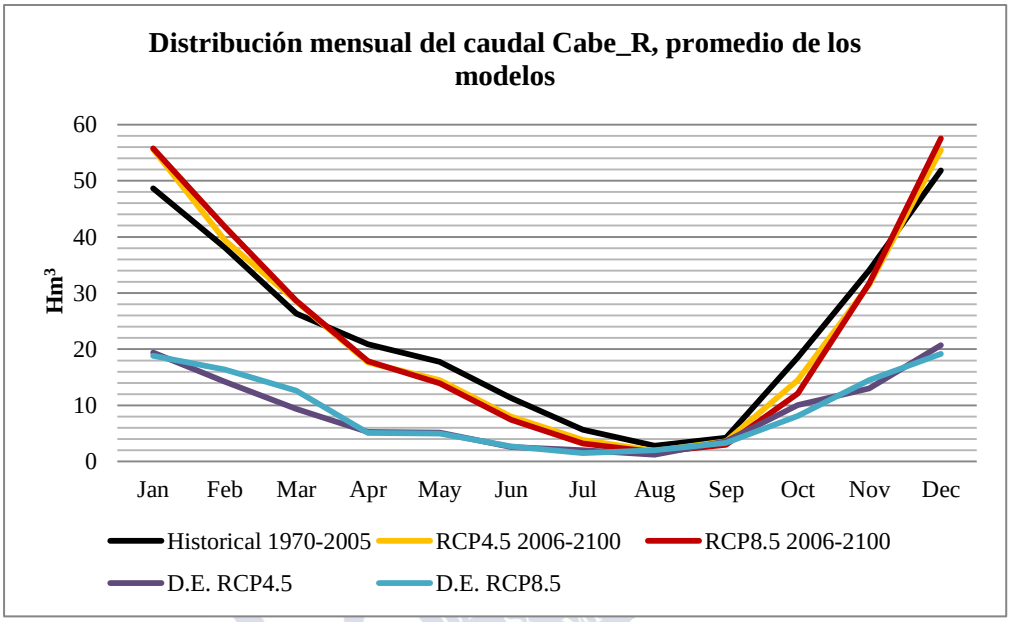


Figura 5-12 Distribución del promedio mensual de aportaciones en la cuenca Cabe_R para los escenarios histórico, RCP4.5 y RCP8.5, promedio de los modelos. Elaboración propia.

En la figura 5-13 se muestra el resultado de la proyección 2006-2100 del promedio anual de los tres modelos para los escenarios RCP4.5 y 8.5 iniciando desde el periodo histórico. La línea roja que representa al escenario RCP8.5 es la que muestra mayores variaciones en magnitud de máximos y mínimos, lo que puede interpretarse como un aumento en la frecuencia y cantidad de años secos y años húmedos. Sin embargo en la magnitud con el RCP4.5 no tiene gran diferencia. Con esta figura 5-13 se puede ver que el promedio entre las proyecciones de los modelos no es muy diferente o de gran magnitud. Por ejemplo se puede ver que en los años 2016, 2029, 2032, 2038, 2052 se tienen una tendencia totalmente opuestas, lo que se traduce que a la hora de simular hidrológicamente los escenarios, presentan

resultados diferentes en cuanto a aportaciones de caudal. Los datos del gráfico se encuentran ubicados en el anexo digital AD-09.

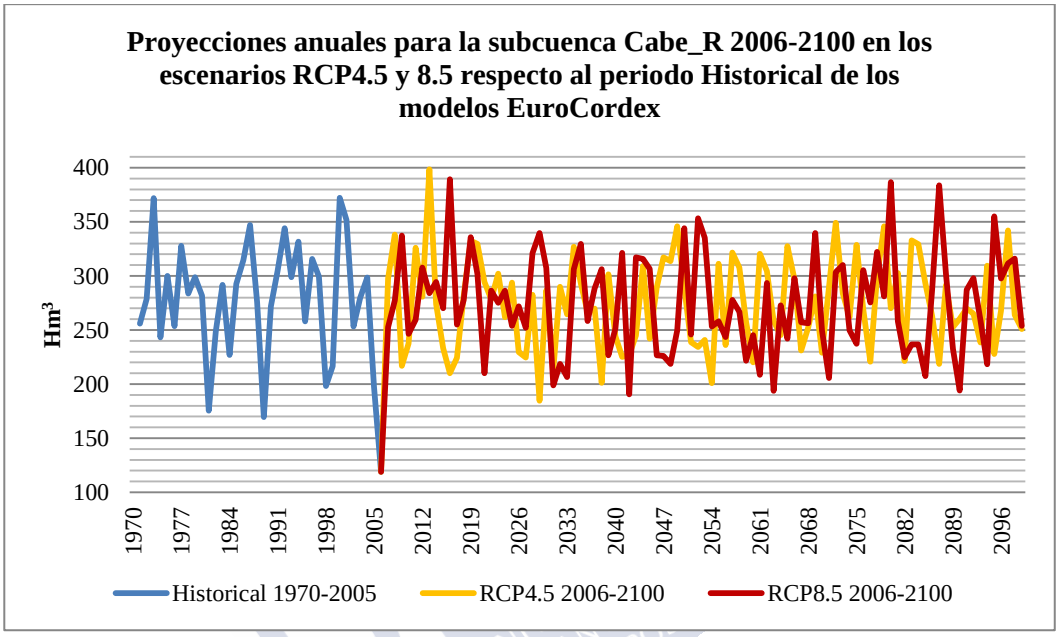


Figura 5-13 Proyecciones anuales para la subcuenca Cabe_R 2006-2100 en los escenarios RCP4.5 y 8.5 respecto al periodo histórico de los modelos Euro-Cordex. Elaboración propia.

Con este resultado en la figura 5-13, se aprecia la tendencia similar al periodo histórico, lo que se resume en una proyección futura de caudal probable para la subcuenca Cabe_R. Estos resultados son útiles para visualizar la tendencia que tendrá la variable de caudal hacia el futuro y recomendablemente se debe corroborar con datos observados según transcurra el tiempo y sea posible contar con dicha información. Los resultados de las proyecciones no deben ser considerados como pronósticos, si no como referencias de los posibles cambios en el futuro a mediano y largo plazo, además de validar los resultados simulados con el paso del tiempo cuando se tengan futuros datos observados. Tal como se menciona en la sección 2.3, todos los modelos y simulaciones están sujetos a un grado de incertidumbre

que, a pesar de que se han mejorado los modelos de simulación, aun no es posible replicar los procesos naturales del plante Tierra.

5.6 SIMULACIÓN DE FLUJOS DE AGUA EN AQUATOOL

A continuación se presentan los esquemas de flujo para el análisis de la gestión del agua, generados para cumplir con el objetivo de esta tesis de ensamblar modelos en el proceso hidrológico de una cuenca, desde la generación del recurso hídrico hasta su gestión en el uso. Es en este esquema de flujo donde se resume y se unen el grupo de metodologías utilizadas previamente. En el AD-17 se encuentran los archivos de las simulaciones en AQUATOOL de ambos escenarios, río Cabe_R y río Colorado.

El proceso completo de ensamble de los modelos se realizó para la subcuenca del río Cabe_R en la región de Galicia, España, mientras que para la subcuenca del río Colorado en la parte mexicana solamente se realiza el ejercicio para la gestión del agua debido a la situación de la propia cuenca que más adelante se explicará cómo se generó el esquema y los datos que lo alimentan, así como las asunciones que se han tenido que realizar.

Como se ha mencionado en la sección 2.3, de acuerdo con Bates et al. (2008) es necesario mejorar la cantidad y calidad los datos observados y su accesibilidad para conocer más a fondo la realidad y de manera más confiable las simulaciones que se puedan ejecutar a través de los modelos, ya que la calidad de los resultados del modelo dependen principalmente de la calidad de los datos de entrada.

5.6.1 Esquema de flujo de la subcuenca del río Cabe_R

El esquema de la figura 5-14 es una simplificación del esquema existente en el Plan Hidrológico Miño-Sil 2015-2021 (CHMS, 2015) para el sistema de explotación Cabe, de manera que coincide con la subcuenca Cabe_R, desarrollado igualmente con el software AQUATOOL. Adicionalmente se ha agregado el régimen del caudal ecológico, como una demanda para poder analizar su garantía de cumplimiento con varios escenarios.

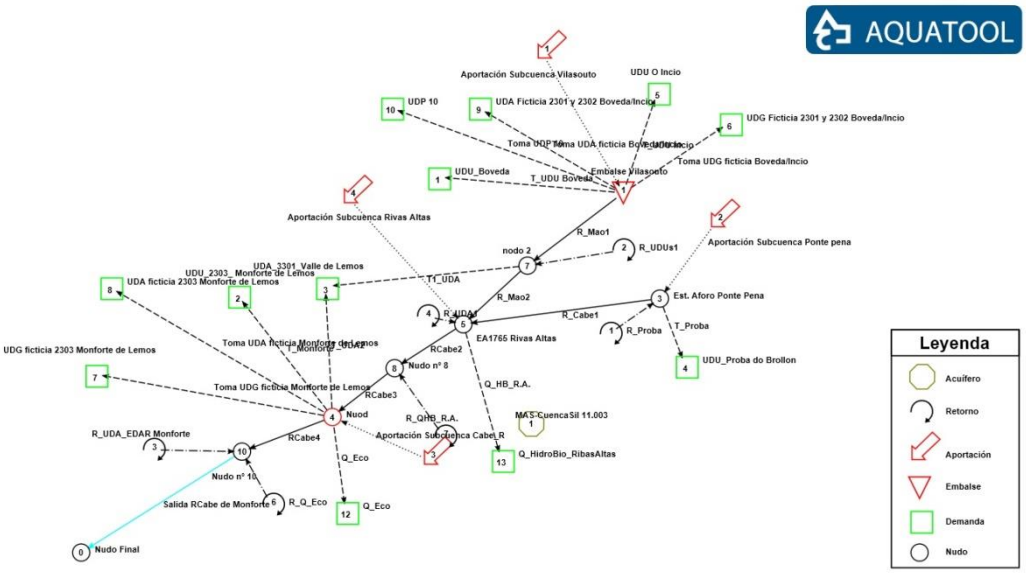


Figura 5-14 Esquema de flujo para el sistema Cabe_R. Elaboración propia.

El esquema de la figura 5-14 se representa desde la cabecera de la subcuenca con sus aportaciones iniciales de Vilasouto y Ponte Pena hasta el punto de salida del nodo final ubicado físicamente en la salida del río Cabe de la ciudad de Monforte de Lemos.

Los datos de las aportaciones son obtenidas de los resultados previos de este trabajo de tesis desde el modelo hidrológico con los datos climatológicos y con los de las proyecciones de cambio climático de los escenarios histórico y RCP8.5, estimación de los caudales mínimos ecológicos derivados de métodos hidrológicos e hidrobiológicos, se puede consultar el en anexo digital AD-09.

5.6.1.1 Calibración de AQUATOOL en el embalse de Vilasouto

Para calibrar el funcionamiento de simulación de flujos del AQUATOOL, se utilizan puntos de control en donde se cuenta con datos observados, a fin de poder comparar el comportamiento de la simulación con los flujos de agua con la realidad. Los niveles de

reserva observados en el embalse de Vilasouto, el caudal de salida del embalse y la estación automática de foro ubicada en Ribas Altas (Estación EA1765) sirven para poder evaluar la simulación de flujos de AQUATOOL en el esquema del Cabe_R. En este caso no se cuenta con ninguna estación medición aguas abajo de la estación EA1765. En la figura 5-15 se muestran la graficas entre valores observados reales y simulados por AQUATOOL para los niveles de reserva del embalse. Sin embargo, en las reservas del embalse se puede observar que las tendencias en la bajada del nivel se cumplen en tiempo, pero no en la magnitud. Esto puede ser ocasionado por la variabilidad real de las demandas en el sistema, ya que las demandas de entrada del software son las demandas medias mensuales. Se muestra también en la línea de color verde, el resultado que la CHMS obtuvo en la simulación reportada en el Plan Hidrológico para el sistema de la subcuenca Cabe, la cual está mucho más alejada de la realidad en magnitud y tendencia. En el AD-10 se encuentran los cálculos y gráficos para la comprobación de la calibración de las simulaciones de AQUATOOL en el Cabe_R.

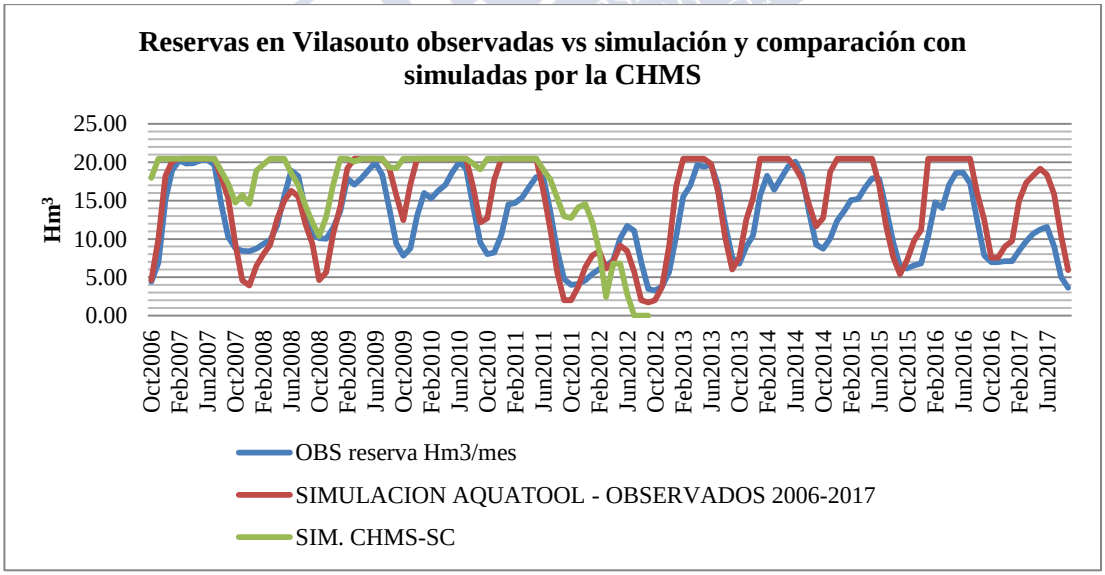


Figura 5-15 Reservas en Vilasouto observadas vs simulación y comparación con simuladas por la CHMS. Elaboración propia.

Este punto del proceso de la metodología, se puede comprobar que todo lo realizado anteriormente es representativo de la realidad hidrológica del sistema estudiado. Cualquier error que se hubiera cometido en los pasos anteriores de la metodología se reflejaría al momento de simular en AQUATOOL, por ejemplo en los niveles del embalse de Vilasouto. Si las aportaciones estuvieran sobre o infra estimadas, se notaría directamente en los niveles del embalse. AQUATOOL no tiene ajustes automáticos en los parámetros o para la calibración en la simulación como Visual-Balan, por lo que los resultados de los flujos en tiempo y magnitud deben coincidir entre lo observado y lo simulado sin restitución al régimen natural. La diferencia entre los resultados de la CHMS y los de este trabajo, recaen en los datos utilizados como observados, mientras que los utilizados por la CHMS fueron generados por el software SIMPA, en este trabajo se utilizó la información de Meteogalicia y se utilizaron métodos de interpolación espacial para generar las series de datos en los puntos de interés.

En la figura 5-16 se muestra la gráfica de los caudales reales observados y los simulados con AQUATOOL en este trabajo en la salida del embalse de Vilasouto y en la estación EA1765 para el periodo de 2006 a 2017. Para el caso de la estación EA1765 se incluye el caudal ecológico estimado para ese punto a partir del estudio hidrobiológico de la Dirección General del Agua reporta en el Plan Hidrológico Miño-Sil de la CHMS (2015). El resultado de comparar los caudales observados sin restitución al régimen natural contra los caudales simulados por AQUATOOL, es considerado como la calibración del modelo AQUATOOL. El valor del coeficiente de Nash-Sutcliffe obtenido fue de 0.38 (satisfactorio) para la salida del embalse de Vilasouto y de 0.87 (excelente) para la estación automática en Ribas Altas EA1765.

En la siguiente sección 4.6.1.1 se describe como ha sido estimado el caudal ecológico que fue utilizado como demanda en el esquema del sistema Cabe_R.

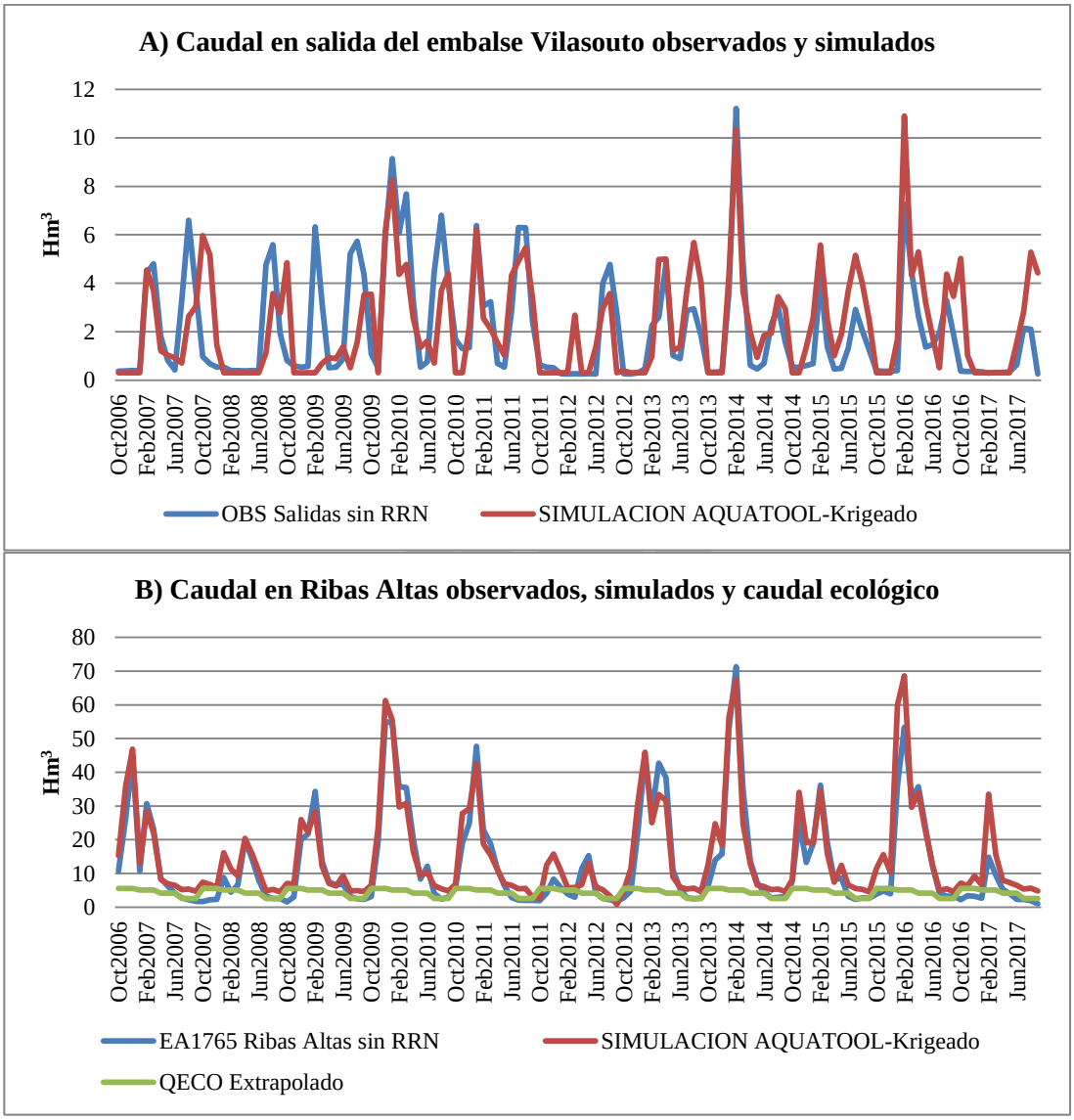


Figura 5-16 Caudales de salida del embalse de Vilasouto y en Ribas Altas EA1765 reales observados, simulados con AQUATOOL y caudal ecológico. Elaboración propia.

La similitud entre los caudales observados y simulados, refleja que tan cerca de la realidad está trabajando la simulación. Los

resultados de la calibración en Ribas Altas muestran que el desarrollo del esquema en AQUATOOL es confiable para ser considerado como herramienta para realizar análisis de la gestión de recursos hídricos y para las alternativas que sean planteadas. Esta ventaja de poder simular acciones, permite una mayor libertad de propuestas a los analistas, ya que realizar ensayos reales a nivel de la subcuenca de prueba y error, sería complejo y costoso. En el caso de que esta calibración no fuera satisfactoria, sería necesario revisar los parámetros de cada elemento en AQUATOOL a fin de ajustar la operación del sistema y tratar de que los resultados de la simulación sean más parecidos a la realidad.

5.6.1.2 Caudal ecológico en el sistema Cabe_R

El punto más apropiado para poder medir el cumplimiento del caudal ecológico ha sido determinado en la estación EA1765 que es de donde se calculó la subcuenca de Ribas Altas. En este punto se cuenta con información de aforo y es en donde los valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe han sido los mejores tanto en el modelo hidrológico Visual-Balan, como en AQUATOOL. Para calcular el caudal ecológico se decidió utilizar como referencia los caudales aconsejados que han sido reportados en el estudio hidrobiológico de la Dirección General de Agua dentro del Plan Hidrológico Miño-Sil 2015-2021, para las dos "Masas de Agua" que coinciden estar dentro del área de estudio. Se trata de la masa de agua río Cabe I y la masa de agua del río Mao II.

En la figura 5-17 se muestra la ubicación de las dos masas de agua con las que se cuenta con caudales aconsejados por el estudio hidrobiológico, río Cabe I y Mao II (color azul). La masa de agua del río Cabe I cuenta con un área de 153.45 km^2 y la del río Mao II con un área de 89.6 km^2. La subcuenca del embalse del Vilasouto tiene un área de 49.25 km^2 (color verde) considerando el punto de salida, la descarga del embalse. El área de color amarillo es la diferencia restante de la subcuenca de Ribas Altas en relación con las tres áreas anteriores. Esta área de color amarillo corresponde a la masa de agua "Rego do Val do Teixugo" en su totalidad y a una parte de la masa de

agua del río Cabe II. El cálculo de esta área (color amarillo) es estimada en 57.78 km^2.

Para estimar el caudal ecológico derivado de los caudales aconsejados del estudio hidrobiológico en la masa de agua del río Mao II y río Cabe I, han sido extrapolados por su proporción en relación para las dos áreas aguas abajo (áreas gris y amarilla de la figura 5-17). En la tabla 5-10 se muestran los caudales ecológicos estimados para las áreas mencionadas de la figura 5-17.

Tabla 5-10 Caudales hidrobiológicos extrapolados para la estación EA1765. Elaboración propia.

	M.A. Río Cabe I	M.A. Río Mao II	Rest. SbC. Ribas Altas	EA1765 Ribas Altas
Mes	Hm^3/mes	Hm^3/mes	Hm^3/mes	Hm^3/mes
Oct	1.47	1.84	1.20	4.51
Nov	1.47	1.84	1.20	4.51
Dec	1.47	1.84	1.20	4.51
Jan	1.31	1.71	1.12	4.14
Feb	1.31	1.71	1.12	4.14
Mar	1.31	1.71	1.12	4.14
Apr	1.08	1.39	0.91	3.38
May	1.08	1.39	0.91	3.38
Jun	1.08	1.39	0.91	3.38
Jul	0.74	0.84	0.55	2.13
Aug	0.74	0.84	0.55	2.13
Sep	0.74	0.84	0.55	2.13

Para conocer el caudal ecológico proporcional en la salida de la subcuenca Cabe_R (tabla 5-11), el área de color gris de la figura 5-17 que es de 75.55 km^2, se extrapoló su valor a partir de los valores obtenidos para la EA1765 en Ribas Altas. Se realizó de esta manera ya que el caudal ecológico estimado para la EA1765 ya incluye la influencia de los caudales hidrobiológicos de las masas de agua río Cabe I y Mao II.

Tabla 5-11 Caudal ecológico calculado del caudal aconsejado por el estudio hidrobiológico para la salida de la subcuenca Cabe_R. Elaboración propia.

	SbC. Cabe_R
Mes	Hm^3/mes
Oct	5.48
Nov	5.48
Dec	5.48
Jan	5.03
Feb	5.03
Mar	5.03
Apr	4.11
May	4.11
Jun	4.11
Jul	2.58
Aug	2.58
Sep	2.58

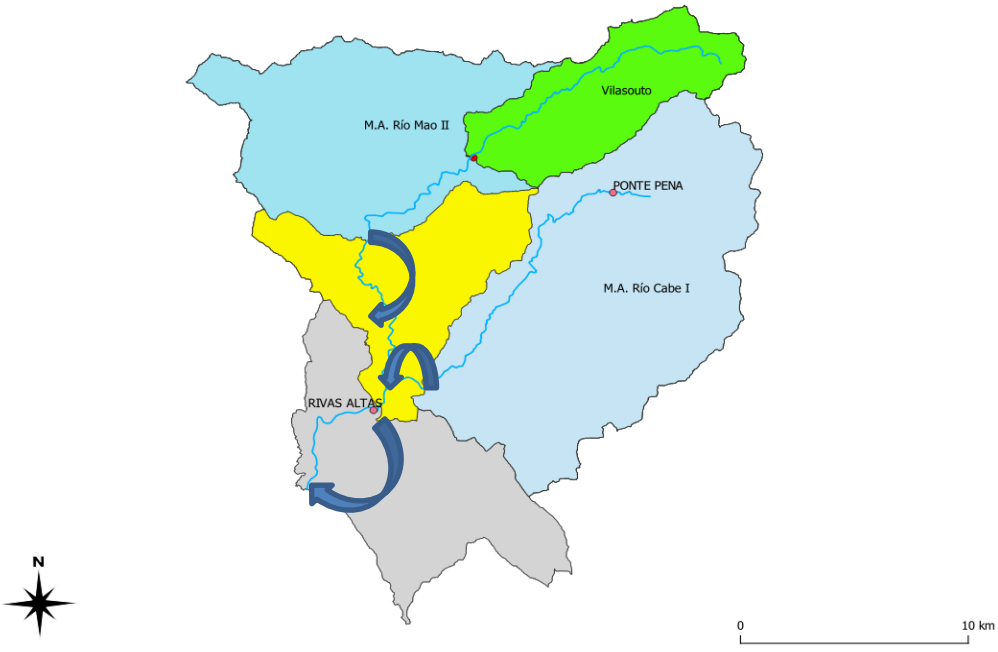


Figura 5-17 Extrapolación de caudal aconsejado aguas arriba y abajo de la masa Mao II dentro del sistema Cabe_R. Elaboración propia.

Adicionalmente, se ha realizado el cálculo de los caudales mínimos mediante los percentiles 5 y 15% de las aportaciones de caudal para las subcuencas de Ribas Altas y Cabe_R, a fin de compararlas con los caudales ecológicos estimados por métodos hidrobiológicos. En la tabla 5-12 se muestra la comparación entre los caudales mínimos por percentiles 5 y 15 y los ecológicos. En el anexo digital AD-09 se encuentran los cálculos para los caudales ecológicos y percentiles.

Tabla 5-12 Comparación entre caudales ecológicos y mínimos por percentiles 5 y 15% para Ribas Altas y Cabe_R. Elaboración propia.

	EA1765, Ribas Altas			SbC. Cabe_R		
	Q Eco.	Q Per.5%	Q Per.15%	Q Eco.	Q Per.5%	Q Per.15%
Mes	Hm^3/mes	Hm^3/mes	Hm^3/mes	Hm^3/mes	Hm^3/mes	Hm^3/mes
Oct	4.51	2.08	2.47	5.48	2.24	2.81
Nov	4.51	4.20	7.18	5.48	4.62	7.97
Dec	4.51	7.98	11.22	5.48	9.18	12.81
Jan	4.14	9.88	13.69	5.03	11.51	16.02
Feb	4.14	9.62	15.84	5.03	11.39	18.90
Mar	4.14	7.09	12.03	5.03	8.32	14.08
Apr	3.38	7.50	7.72	4.11	8.65	8.82
May	3.38	7.07	7.37	4.11	8.17	8.55
Jun	3.38	3.15	4.55	4.11	3.78	5.18
Jul	2.13	0.75	1.49	2.58	0.89	1.74
Aug	2.13	0.18	0.47	2.58	0.22	0.51
Sep	2.13	0.37	0.58	2.58	0.41	0.63
Suma total	42.46	59.87	84.58	51.61	69.37	98.01

En la tabla anterior se observa que los caudales ecológicos extrapolados a partir de los caudales aconsejados, son mayores para los meses de octubre y diciembre, pero menores desde el mes de enero hasta junio del percentil 15% e inclusive que el percentil 5% de las aportaciones estimadas según los datos observados. Por una parte se podría pensar que los caudales ecológicos son posibles de cumplir, ya que representan menos del 5% del flujo mensual. Sin embargo, según lo declarado en el Plan Hidrológico vigente de la CHMS, el embalse de Vilasouto presenta indicios de tensión en los indicadores físico-químicos (alto contenido en amonio y cianobacterias, y estado trófico

de eutrofia). Por tal motivo, seria impropio afirmar que las masas aguas abajo del embalse de Vilasouto cuentan con un buen estado ecológico, cuando las situación del mismo embalse no cumple con las condiciones de optimas de calidad en el agua.

La estimación del caudal ecológico de un río es todo un proceso complejo y laborioso llevado a cabo por la ciencia de la Limnología. En este trabajo de tesis, no se pretende realizar una valoración del caudal ecológico, sino simplemente realizar una extrapolación del estudio de referencia utilizado, para tener una idea del volumen de agua que debería fluir a la salida de la cuenca en estudio y poder considerar esta demanda ambiental. Se tiene en cuenta que el resultado del caudal ecológico aquí estimado es totalmente discutible.

5.6.2 Garantías en el sistema de la subcuenca Cabe_R

Los criterios para evaluar las garantías de satisfacción de la demanda que fueron utilizados son los establecidos en la Instrucción de Planificación Hidrológica y se encuentran pre-establecidos en el software AQUATOOL.

5.6.2.1 Datos observados 2006-2017

Los fallos en la garantía encontrados para la simulación en AQUATOOL para el periodo de datos observados de 2006-2017 se muestran en la tabla 5-13. Los meses en donde se presentan y coinciden los fallos para las UDAs y UDGs son en octubre del 2011 y en septiembre y octubre del 2012. Para los caudales ecológicos, las fallas se presentan en septiembre y octubre del 2011 y en agosto, septiembre y octubre del 2012. Para las UDUs no se presenta ningún fallo. Cabe señalar que a las UDUs se les ha dado una prioridad mucho más importante que al resto de las demandas, como ocurriría en una situación real. Al resto de las demandas se les ha asignado la misma prioridad.

Los resultados obtenidos para las garantías de los datos observados 2006-2017 difieren de lo reportado en el Plan Hidrológico del Miño-Sil (pág. 240, capítulo 4), en donde no se presenta ningún fallo en el sistema. Esta diferencia puede deberse a que los caudales de aportaciones son distintos entre los calculados en este estudio y los del

Plan Hidrológico. Prueba de ello se respalda con la figura 5-15, en donde las reservas del embalse de Vilasouto no coinciden con las reales en los datos de la CHMS, lo que indica que las esas aportaciones pueden estar sobre estimadas o con una distribución temporal diferente. Por lo tanto, al posiblemente estar sobrestimadas las aportaciones en el Plan Hidrológico y al ser simuladas en AQUATOOL, resultan en una ausencia de fallos en las garantías de las demandas. Por otra parte, la similitud de las reservas reales en Vilasouto con las simuladas en este trabajo de tesis, indica que las simulaciones en AQUATOOL representan mejor la realidad que los resultados encontrados en el plan hidrológico 2015-2021.

Tabla 5-13 Fallos en la garantía para el sistema Cabe_R en el periodo de observados 2006-2017. Elaboración propia.

Demanda	No. Fallos	Garantía (%)	Garantía Vol. (%)	Max. Déficit un mes (Hm^3)	Max. Déficit 2 meses (Hm^3)
UDA_3301_Valle de Lemos	1	99.2	99.1	0.034	0.034
UDG Ficticia 2301 y 2302 Boveda	2	98.5	99.4	0.021	0.023
UDG ficticia 2303 Monforte de Lemos	1	99.2	99.4	0.012	0.012
UDA ficticia 2303 Monforte de Lemos	1	99.2	99.0	0.011	0.011
UDA Ficticia 2301 y 2302 Boveda	1	99.2	99.3	0.045	0.045
UDP 10	1	99.2	99.5	0.032	0.032
Q_Eco_Cabe_R	3	97.7	99.3	1.857	2.073

También como se menciona en la sección 2.3, sigue habiendo un desajuste entre los modelos climáticos dependiendo de la escala a la que se genera y extrae la información. Es de esperar que si los datos de entrada utilizados en el Plan Hidrológico de la CHMS y los utilizados en este trabajo, tienen diferente origen o procesamiento por los modelos hidrológicos (SIMPA y Visual-Balan) en los datos observados, los resultados no sean iguales aun que si deben conservar una cierta coherencia en magnitud.

5.6.2.2 Datos escenario RCP8.5 2020-2100

Para simular las garantías en el sistema Cabe_R en el periodo 2020-2100 se utilizó únicamente el RCP8.5, que es el escenario con mayor disminución en la proyección del caudal y se dejaron las mayores demandas correspondientes al 2016 respecto al horizonte 2033 que se indica en el Plan Hidrológico. El Promedio mensual de volumen almacenado del embalse de Vilasouto de 17.59 Hm^3 en el periodo 2020-2100 del escenario RCP8.5 se muestra en la figura 5-18. La curva de los niveles mensuales promedio, se corresponden a los meses de precipitación durante el año hidrológico y la respectiva desviación estándar. Sin embargo, en la simulación se considera la tasa de evaporación constante debido a la limitación AQUATOOL, cuando en la realidad con el aumento esperado de temperatura, la evaporación se incrementa también.

Los resultados de la simulación del escenario RCP8.5 muestran que no se presenta ningún fallo en las garantías de las demandas para todo el periodo 2020-2100. El escenario RCP8.5 presenta los mayores decrementos en la precipitación y en las aportaciones, por lo que se puede suponer que el RCP4.5 tampoco presentaría fallos en las garantías de las demandas. Las demandas se han mantenido estáticas en todo el periodo de simulación, aunque en las estimaciones del Plan Hidrológico de la CHMS, se tienen previstas ligeras disminuciones en las mismas demandas en el horizonte al 2033 (8% para la UDU y 11% para la UDA, mencionados en las tablas 3-5 y 3-8). Si estas disminuciones se aplicaran en las simulaciones, se debería presentar aún menor probabilidad de fallos en el sistema del Cabe_R.

En la figura 5-19 se muestran los niveles del embalse de Vilasouto y sus desviaciones estándar para los periodos tres periodos 2040, 2070, 2100, en la cual se puede apreciar que existe una disminución progresiva para cada periodo, ocasionado por la disminución en las aportaciones. También la desviación estándar es más elevada en los meses de verano en la progresión de los periodos.

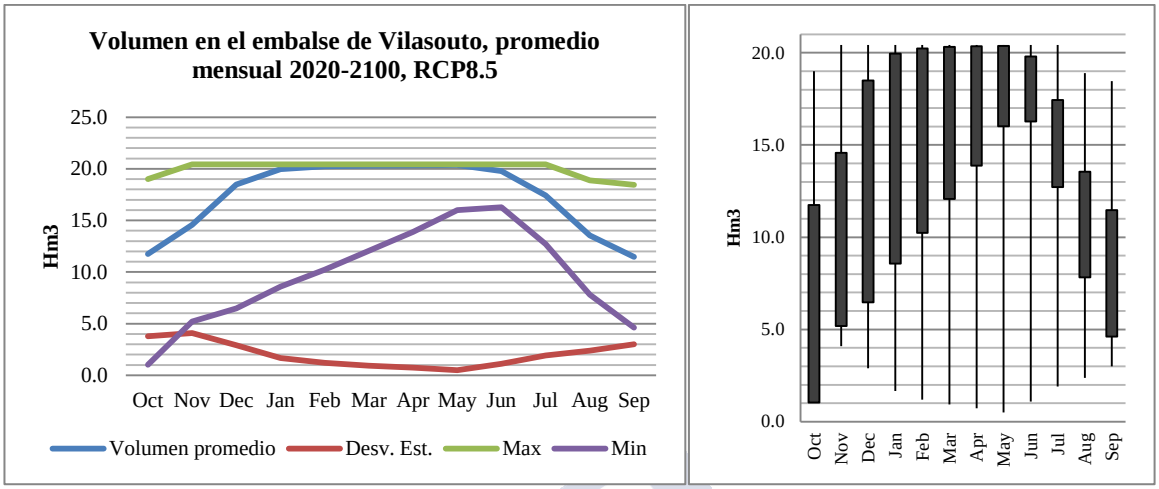


Figura 5-18 Volumen del embalse de Vilasouto, promedio mensual 2020-2100, para el RCP8.5. Elaboración propia.

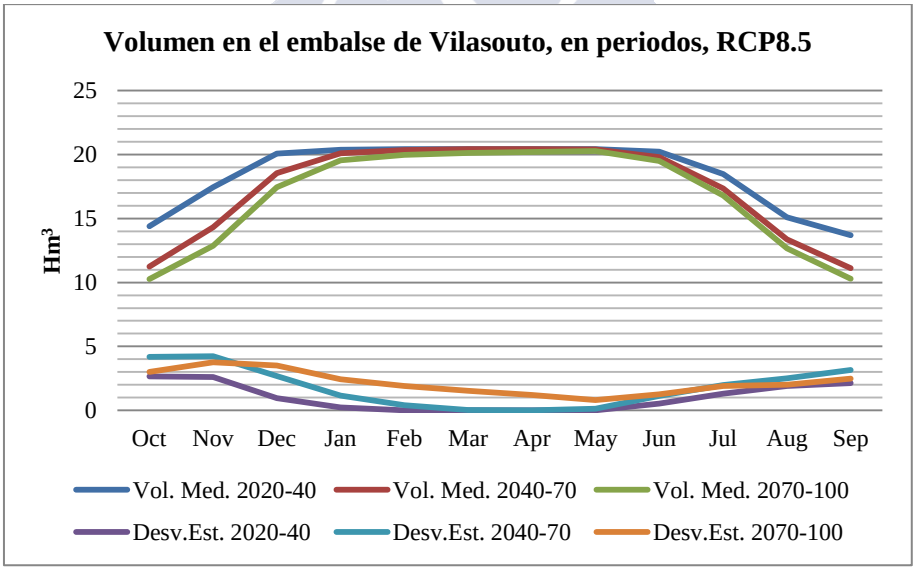


Figura 5-19 Volumen en el embalse de Vilasouto, en periodos 2020-2040, 2040-2070, 2070-2100 y sus desviaciones estándar, para el RCP8.5. Elaboración propia.

El elemento del acuífero de la cuenca del Sil en el esquema del sistema del Cabe_R está situado como un elemento de depósito, ya que no se cuenta con datos de las extracciones y sus respectivos usos. Tiene un funcionamiento nulo en los flujos del sistema.

5.6.3 Evaluación de la alternativa de gestión de agua en el sistema Cabe_R

Para elaborar una propuesta de alternativa en la gestión del agua en el sistema Cabe_R, se revisaron las conclusiones del trabajo de tesis de Cuesta (2001) que tratan sobre la zona regable del Valle de Lemos. Esta zona regable corresponde a las UDAs del esquema mostrado en la figura 4.25. Dentro de las conclusiones de Cuesta (2001), se encontraron las siguientes que se pueden relacionar al presente trabajo de tesis:

- Conclusión 2.4. Reducir el 38.6% de consumo de agua en la demanda agrícola no es suficiente para evitar el exceso de volumen de agua empleada en riego.
- Conclusión 6. El 50% de los regantes no tiene acceso al agua debido a la infraestructura actual.
- Conclusión 15. Es necesario conocer los caudales y volúmenes suministrados en las fincas mediante aforadores.
- Conclusión 16. Mejorar las técnicas de riego entre los agricultores.

Para contribuir a las mencionadas conclusiones se ha simulado es escenario de la figura 4.25 pero con la siguiente variante, “Reducción del consumo al 50% de la demanda UDA_3301_Valle de Lemos”.

Con esta propuesta se atiende la conclusión 2.4 que menciona que el ahorro 38.6% no es suficiente para disminuir las grandes cantidades de agua que se utilizan en el valle para riego. La disminución en la demanda simplemente se ha disminuido en los datos de entrada del elemento de la demanda UDA_3301_Valle de Lemos, del consumo declarado por la CHMS a la mitad. No se especifica la manera en la que esta reducción puede ser lograda, como técnicas de riego y dosis

de riego ajustadas. Se considera que la propuesta aquí realizada va enfocada únicamente a la cantidad de uso de agua y no a las técnicas para llegar a tal reducción. La simulación se realizó con el escenario RCP8.5 en el periodo 2006-2100.

Con esta reducción aplicada al esquema se observó el comportamiento que reflejaba en el resto de los flujos y demandas. Las siguientes contribuciones se pueden afirmar:

- En los caudales ecológicos calculados se aseguran en cumplimiento para el escenario RCP8.5, en donde no se presenta fallo alguno en la garantía.
- Se estima que en el periodo 2020-2040 podría haber una media de 17.69 Hm^3 de disponibilidad mensual después de cumplir con las otras demandas.
- La disponibilidad de agua después de hacer la reducción de consumo en la UDA_3301_Valle de Lemos se podría asignar al 50% de regantes a los que no se les hace entrega del agua o a otro uso de interés en la región.
- El volumen de agua ahorrada se podría asignar a las reservas del embalse de Vilasouto para asegurar la disponibilidad en el futuro. Para el escenario RCP8.5 en muchas ocasiones los niveles quedan entre 10 y 5 Hm^3.

En la figura 5-20 se muestra el caudal mensual que fluye por la salida de la cuenca Cabe_R después de haber satisfecho todas las demandas del sistema y con la disminución en la UDA_3301_Valle de Lemos. Se tiene un promedio de 17.69 Hm^3 mensuales con máximos de 116.08, mínimos de 0.2 y desviación estándar de 20.5.

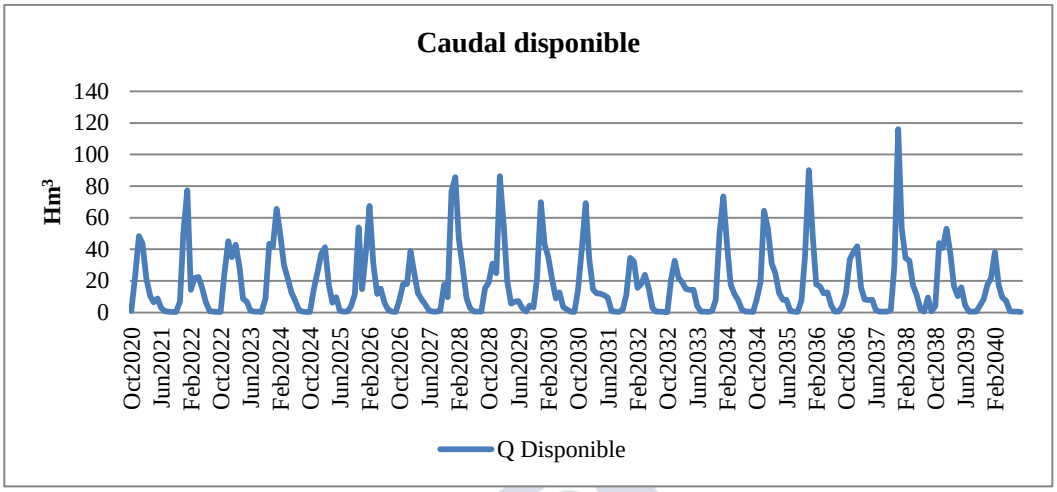


Figura 5-20 Caudales en la salida del Cabe_R, considerado como caudal disponible en el periodo 2020-2040. Elaboración propia.

En la proyección del mismo escenario alternativo hasta el 2100 en lugar del 2040, la disponibilidad media mensual aumenta ligeramente a 18.21 Hm^3.

La propuesta de alternativa observar los efectos de reducir en 50% la demanda UDA_3301_Valle de Lemos, trata de contribuir con un ejemplo sencillo de como la cadena de modelos propuestos en la metodología de esta tesis, puede servir para contabilizar los recursos hídricos en el sistema y como simular acciones de cambios para evaluar su potencial efecto. Las propuestas de simulación de acciones normalmente estarán orientadas por los diferentes intereses que el analizador o tomador de decisiones tenga para cierto momento de la época en la que se realice el análisis.

5.6.4 Esquema de flujo de la subcuenca del río Colorado, Mexicali

El esquema en la figura 5-21 representa el flujo de agua en el sistema del río Colorado en la ciudad de Mexicali, Baja California, que es el último tramo del cauce natural de la cuenca transfronteriza del río Colorado. El esquema fue construido a partir de la información publicada por el borrador de plan hidrológico del gobierno del estado

de Baja California a través de la Comisión Estatal del Agua de Baja California (CEABC) y en el informe llamado “Cierre de indicadores 2017” de la misma institución. Además se utilizó el esquema encontrado en el estudio de Howes, et al., (2012), el cual muestra los flujos de agua en el balance hídrico en el Valle de Mexicali.

Para un tramo de las conducciones denominada “Canal Independencia” (C_Indepe., en el esquema) fue posible estimar las perdidas por fugas, que son reportadas por el CEABC. Los coeficientes A, B y C que se ingresan en la conducción de tipo 2 que son necesarios para calcular las perdidas mediante la fórmula $P=a+b*Q^c$. Los resultados para estos coeficientes son A=0, B=0.07885 y C=1.05377.

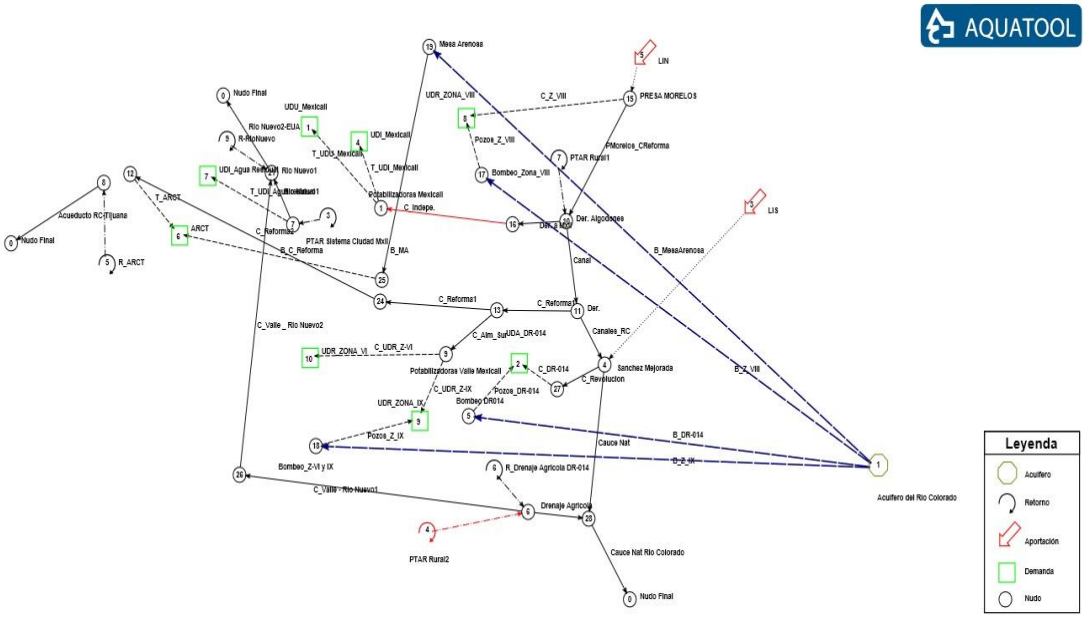


Figura 5-21 Esquema de flujo para el sistema del río Colorado en Mexicali. Elaboración propia.

En la tabla 5-14 y en la figura 5-22 se presenta la estadística mensual, promedio, mínima, máxima, desviación estándar y porcentaje de distribución de las entregas de agua del río Colorado a

México. El porcentaje de distribución se considera como un Factor de Variación en el Tiempo (FVT), que más adelante será utilizado para estimar la demanda agrícola. Se puede observar que en marzo y abril es cuando México recibe la mayor cantidad de agua y en octubre la menor cantidad.

Tabla 5-14 Estadística mensual de entregas a México 2005-2018. Elaboración propia con datos del (CILA, 2018).

Promedio mensual de entregas					
	Hm^3	Hm^3	Hm^3	Hm^3	% (FVT)
Mes	Promedio	Min	Max	Desv. EST	Distribución
Ene	167.39	147.50	214.62	17.38	0.089
Feb	196.87	173.02	229.09	16.25	0.105
Mar	253.94	220.10	286.66	16.22	0.136
Abr	240.32	211.85	258.21	14.64	0.128
May	133.86	104.17	152.07	11.82	0.072
Jun	138.37	105.68	166.47	15.63	0.074
Jul	147.74	119.75	163.40	12.19	0.079
Ago	125.00	114.53	145.22	7.35	0.067
Sep	114.32	109.79	127.05	4.17	0.061
Oct	89.88	72.11	130.34	16.40	0.048
Nov	118.96	98.25	142.35	11.81	0.064
Dic	145.28	109.52	173.11	19.36	0.078
Total	1871.93				1

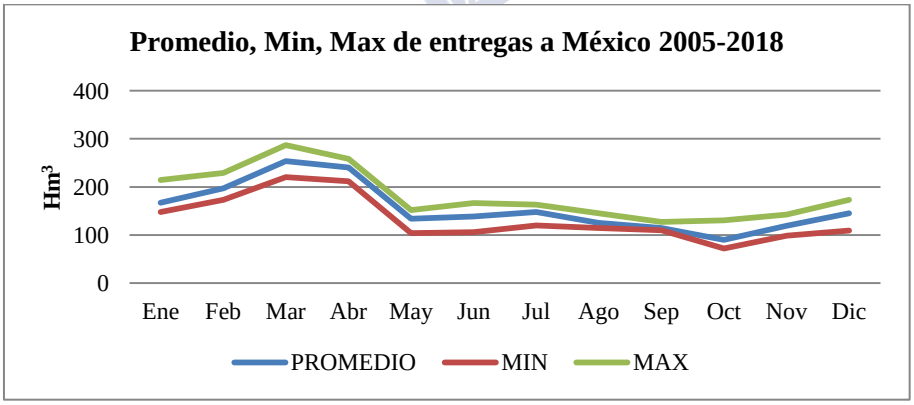


Figura 5-22 Promedio, mínima, máxima y desviación estándar mensual de las entregas a México del río Colorado. Elaboración propia con datos del (CILA, 2018).

En la tabla 5-15 se muestran las demandas mensuales agrícolas calculadas a partir del FVT al ser multiplicado el volumen anual en 2015-2016 de agua superficial y subterránea distribuido para la demanda agrícola según los datos de la CONAGUA (2018). Según esta fuente, se tiene asignada una cantidad de hasta 700 Hm^3 de agua subterránea para agua agrícola en el DR-014 provenientes de pozos federales (500 Hm^3) y de pozos particulares (200 Hm^3), con la que se riegan 64,702 ha. De agua superficial se considera que se distribuyen 1450.1 Hm^3 anuales proveniente del río Colorado, con la que se riegan 128,501 ha. Este cálculo es necesario debido a la ausencia de datos detallados mensuales respecto a esta demanda, que además es necesaria para representarla en AQUATOOL. Más detalles se pueden consultar en el anexo digital AD-12.

En la figura 5-23 se presenta la gráfica con la demanda agua potable de Mexicali (suma de la demanda urbana, industrial y rural), la agrícola y la demanda del acueducto que va para la ciudad de Tijuana y otras ciudades del estado de B.C. Se puede observar la proporción mucho mayor de la demanda agrícola en comparación de las otras dos.

Tabla 5-15 Distribución mensual de la demanda agrícola en el DR-014. Elaboración propia con datos (CONAGUA, 2018).

Mes	FVT en entregas LIN y LIS	DEMANDA SUPERFICIAL Hm^3	DEMANDA SUBTERRANEA Hm^3 (Valle Mexicali)	DEMANDA TOTAL DR-014 Hm^3
ENERO	0.089	129.67	62.594	192.262
FEBRERO	0.105	152.50	73.618	226.122
MARZO	0.136	196.71	94.959	291.673
ABRIL	0.128	186.17	89.867	276.034
MAYO	0.072	103.70	50.058	153.756
JUNIO	0.074	107.19	51.741	158.927
JULIO	0.079	114.45	55.247	169.694
AGOSTO	0.067	96.83	46.744	143.578
SEPTIEMBRE	0.061	88.56	42.749	131.306
OCTUBRE	0.048	69.62	33.610	103.235
NOVIEMBRE	0.064	92.15	44.485	136.640
DICIEMBRE	0.078	112.54	54.328	166.873
Total	1.000	1450.100	700.000	2150.100

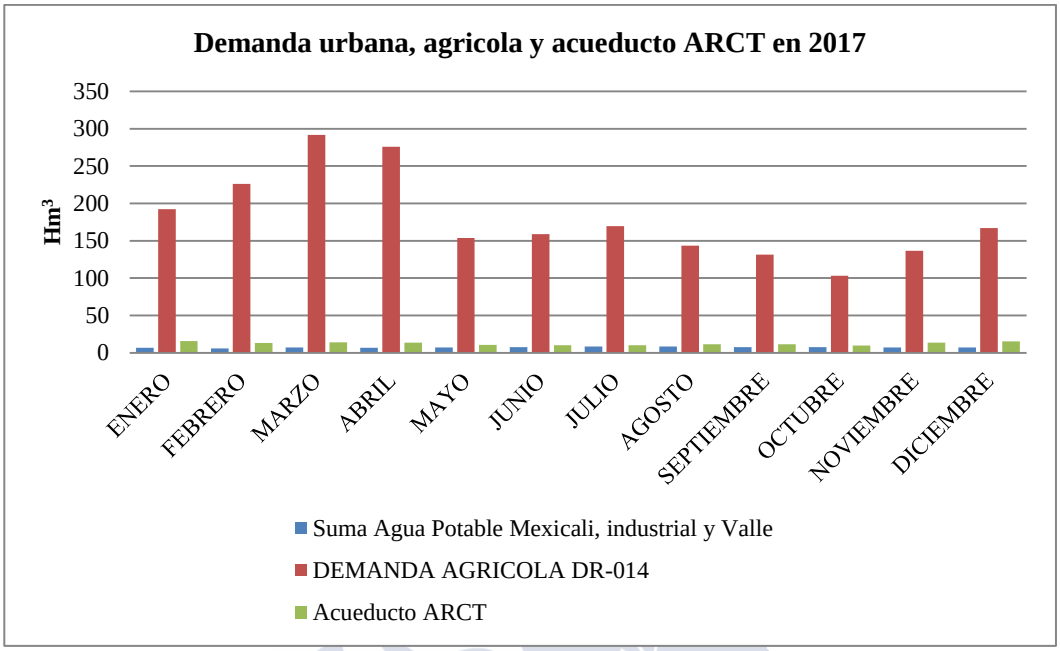


Figura 5-23 Demanda de agua urbana, agrícola y del Acueducto ARCT en 2017. Elaboración propia con datos (CEABC, 2017) y (CONAGUA, 2018).

En la tabla 5-16 se muestra la proyección al 2020 de las entregas mensuales a México estimadas, a partir de los niveles de la presa Hoover reportados en el Programa de Operación Anual (AOP) del USBR (los más recientes al momento de realizar este trabajo de tesis) y las reducciones ("ahorros") aplicables según lo establecido en el ACTA 323 (CILA, 2017). Según los niveles de la presa esperados y los acuerdos del Acta, se aplican dos reducciones a México. La primer reducción es al nivel de 1082.3 pies (pies sobre el nivel del mar) y de una cantidad de 51 Hm^3 a restar de la entrega anual. La segunda reducción se da al nivel de la presa de 1073.9 pies, con una cantidad de 37 Hm^3 a restar de la entrega anual. Se utiliza un FVT2 calculado a partir del FVT calculado anteriormente de la entrega promedio mensual a México. En el AD-15 Proyecciones 2020-2040 río Colorado, se muestra en la hoja de Excel los pasos para el cálculo de este segundo Factor de Variación en el Tiempo. También en este AD se encuentran los datos reportados en el AOP y cálculos intermedios

para la estimación de la entrega reducida esperada. En la última columna se muestra la entrega mensual reducida estimada a México, que se expresa aportación reducida calculada en Hm^3 en cada mes hasta agosto del 2020.

Tabla 5-16 Aportación o entrega reducida calculada para México al 2020. Elaboración propia.

Mes	Año	Presa Hoover, Elevación al final del mes (ft)	Reducción aplicable (Mm^3 o Hm^3)[9]	FVT2	Reducción mensual calculada (Hm^3)	Aportación (entrega) mensual promedio (Hm^3)	Aportación reducida calculada (Hm^3)
Oct.	2017	1082.3	51	0.0292	1.49	89.88	88.39
Nov.	2017	1080.95		0.0387	1.97	118.96	116.99
Dic.	2017	1082.52		0.0473	2.41	145.28	142.87
Ene.	2018	1087.5		0.0543	2.77	166.99	164.22
Feb.	2018	1088.21		0.0632	3.22	194.39	191.16
Mar.	2018	1088.11		0.0823	4.20	253.10	248.91
Abr.	2018	1084.49		0.0780	3.98	239.94	235.96
May.	2018	1080		0.0434	2.21	133.43	131.21
Jun.	2018	1076.81		0.0451	2.30	138.63	136.33
Jul.	2018	1077.43		0.0479	2.44	147.36	144.92
Ago.	2018	1078.88		0.0402	2.05	123.45	121.40
Sep.	2018	1078.53		0.0372	1.90	114.44	112.54
Oct.	2018	1077.85		0.0292	1.49	89.88	88.39
Nov.	2018	1076.69		0.0387	1.97	118.96	116.99
Dic.	2018	1079.18		0.0473	2.41	145.28	142.87
Ene.	2019	1082.41		0.0543	2.77	166.99	164.22
Feb.	2019	1083.66		0.0632	3.22	194.39	191.16
Mar.	2019	1080.85		0.0823	4.20	253.10	248.91
Abr.	2019	1076.62		0.0780	3.98	239.94	235.96
			Suma	1.000	51		
May.	2019	1073.09	37	0.055	2.05	133.43	131.38
Jun.	2019	1070.58		0.058	2.13	138.63	136.50
Jul.	2019	1070.77		0.061	2.26	147.36	145.10
Ago.	2019	1072.77		0.051	1.90	123.45	121.55
Sep.	2019	1072.29		0.048	1.76	114.44	112.68
Oct.	2019	1071.94		0.037	1.38	89.88	88.50
Nov.	2019	1069.95		0.049	1.83	118.96	117.13

[9] Según lo establecido en el Acta 323 respecto al nivel en que se encuentre la presa Hoover (Lago Mead).

Dic.	2019	1070.04		0.060	2.23	145.28	143.05
Ene.	2020	1071.78		0.069	2.57	166.99	164.43
Feb.	2020	1072.09		0.081	2.99	194.39	191.40
Mar.	2020	1068.46		0.105	3.89	253.10	249.22
Abr.	2020	1063.52		0.100	3.69	239.94	236.25
May.	2020	1059.13		0.055	2.05	133.43	131.38
Jun.	2020	1054.53		0.058	2.13	138.63	136.50
Jul.	2020	1053.11		0.061	2.26	147.36	145.10
Ago.	2020	1053.22		0.051	1.90	123.45	121.55
			Suma	1.000	37		

Otro factor que respalda la probabilidad de que los niveles de la presa Hoover en el lago Mead se vean comprometidos o con tendencias a disminuir, es lo que Hodgkins et al. (2005) afirman sobre que el aumento de la temperatura en la cuenca del río Colorado causada por el cambio climático, lo cual significa que una mayor proporcion de precipitaciones invernales cae en forma de lluvia en lugar de nieve. Esto provocaría que la temporada de deshielo se inicie antes de la primavera que es cuando normalmente ocurre, generando una concentración de caudales en menor tiempo. Uno de los problemas de que se concentren los flujos en poco tiempo, es que las presas retengan el agua por más tiempo, lo que también se traduce en mayores pérdidas por evaporación. Se puede considerar que el agua en forma de nieve, sirve como reservas en las que la perdida por evaporación es nula. El USBR (2016) también coincide con una posible reducción en las cantidades que denomina como "equivalente de agua de nieve" (SWE) causado por una tendencia de aumento en la temperatura. Lo anterior coincide con Bates et al. (2008), que también menciona que según las proyecciones del IPCC en el AR5 con los nuevos RCP, que el río Colorado podrían tener disminuciones en los caudales, impidiendo que se abastezcan las demandas de agua actuales.

Para incorporar estas aportaciones (entregas) reducidas calculas al esquema de AQUATOOL, las aportaciones 2018-2020 se dividieron en las fracciones mensuales que se entregan por el LIN y LIS. Estas fracciones mensuales también están calculadas en el AD-15 Proyecciones 2020-2040 río Colorado, de manera que cada aportación

mensual del 2018 al 2020 pueda ser proporcional a lo que siempre se recibe por el LIN y LIS. En el mismo anexo se pueden consultar el cálculo extrapolado hasta el año 2040. Si las tendencias de decremento del nivel de la presa Hoover continúan de manera lineal estimadas del 2005 al 2018 en este estudio, para Julio del año 2026 se alcanzaría el mayor nivel de reducción establecido en el ACTA 323 de 185 Hm^3 de la entrega anual correspondiente a México.

5.6.5 Garantías en el sistema de la subcuenca río Colorado en Mexicali, B.C.

Primeramente, es importante notar que en las estimaciones de las demandas, aportaciones y otras características del esquema, se han hecho asunciones importantes debido a la dificultad de obtener o a la ausencia de datos públicos para este escenario del río Colorado en la ciudad de Mexicali. El periodo simulado en AQUATOOL corresponde a 35 años hidrológicos de 2005 al 2040. Se ha dado más prioridad a las demandas urbanas e industriales (incluyendo el ARCT) sobre la demanda agrícola del DR-014. Las estimaciones de las aportaciones del 2020 al 240 se han realizado siguiendo la tendencia lineal de decremento de niveles de la presa Hoover y la tendencia lineal de la relación de las disminuciones a aplicar del Acta 323.

En las simulaciones no ha sido agregada ninguna demanda ecológica o similar, ya que a la fecha de este trabajo de tesis no existen datos oficiales ni planes de establecer un caudal de este tipo por parte de la CILA. Si bien es un tema importante, el objetivo de esta tesis es evaluar las demandas existentes en el sistema actual.

Los resultados para la simulación en el periodo 2005-2040 muestran en la siguiente tabla 5-17 en donde todas las demandas se cumplen a excepción de 9 fallos en la demanda agrícola (D.A.) del DR-014, con una garantía de 93.6%, garantía volumétrica de 98.9%, máximo déficit mensual de 94.96 Hm^3 y máximo déficit de dos meses de 107.98 Hm^3. Los criterios utilizados para evaluar las garantías han sido los del IPH 2008 (criterio UTAH DWR) [10] para demandas

[10] Fallo anual 50% Demanda Agrícola (D.A.), Fallo 2 años 75% D.A., Fallo 10 años 100% D.A.

agrícolas. Cabe mencionar que el criterio del IPH ha sido diseñado para España y no en México, por lo que se está aplicando tal cual y no con un ajuste relativo a las condiciones del escenario del río Colorado. Se ha realizado de esta forma porque no se encontró algún criterio equivalente en la información de la parte mexicana. Estos fallos en el abastecimiento agrícola del DR-014, se puede pensar que muy probablemente fueron satisfechos por una mayor extracción de agua subterránea por parte de los usuarios o alguna medida de adaptación de riego. No existen datos públicos de un control exacto sobre la extracción de agua subterránea. Los fallos se presentan en el periodo 2005-2020 coinciden tres en octubre de los años 2011, 2013, 2015 y 2016, tres en mayo, junio y julio del 2012 y el último en diciembre del 2013. En los años de proyección de 2019 y 2020 no se presenta ningún fallo en las garantías del sistema, a pesar de las reducciones aplicadas a las aportaciones. Sin embargo, para el periodo del 2020-2040 se presentan 18 fallos que inician en enero del 2038, probablemente generados por las disminuciones calculadas respecto a las disminuciones en las entregas a México hasta el 2040 según las tendencias. El acueducto ARCT no presenta fallos en la garantía para el primer periodo calculado 2005-2020. Esta demanda presenta déficit en las entregas hasta el año 2034 y continúan 18 fallos hasta el 2040 con una máxima magnitud mensual de 14.66 Hm^3. A pesar de que las garantías parecen estar por encima del 90%, esta es una demanda urbana en la que los fallos son más críticos que los del caso de la demanda agrícola, ya que dejar por un periodo de tiempo sin agua a la población de una ciudad tiene consecuencias de mayor impacto social y económico. Además, el déficit en dos meses consecutivos llega a ser de 25.28 Hm^3 que posiblemente tendría que ser cubierto por entregas de agua de emergencia desde San Diego a Tijuana como ya se ha realizado en el pasado. De acuerdo con la figura en el capítulo 3 (3-11), la tendencia de la demanda del acueducto ha pasado de 105 a 149 Hm^3 anuales, lo que de continuar así, causaría fallos aún más graves en las garantías de la demanda. Las demandas rurales Zona_VIII y Zona_IX no presentan fallos en la garantía para el primer periodo calculado hasta el 2020. Esta demanda presenta déficit en las entregas hasta el año 2038, con un total de 12 fallos hasta el 2040. Estas

demandas rurales que son de mucho menor volumen comparadas con las otras dos demandas anteriores (DR-014 y ARCT) y en caso de presentarse en un caso real, podrían ser abastecidas con agua subterránea o del mismo volumen agrícola. También es importante considerar que las demandas se mantienen estáticas en el tiempo, cuando en la realidad deberían tender a aumentar. Este parámetro no se modificó para no aumentar la incertidumbre.

Tabla 5-17 Resultado de fallos en la simulación de las garantías 2005-2040 en el sistema del río Colorado en Mexicali. Elaboración propia.

Demanda	No. Fallos 2005-2020	No. Fallos 2020-2040	Garantía (%)	Garantía Volumétrica (%)	Max. Déficit mensual (Hm^3)	Max. Déficit 2 meses (Hm^3)
UDA_DR-014	9	18	93.6	98.9	94.96	107.58
ARCT	0	18	95.7	97.3	14.659	25.28
UDR_ZONA_VIII	0	12	97.1	97.2	0.421	0.726
UDR_ZONA_IX	0	12	97.1	99.3	0.287	0.391

Los fallos que presenta la demanda agrícola del DR-014 muestran la importancia de hacer más eficiente el uso de agua en esta demanda para, ya que se está utilizando el 90% del volumen total del uso consuntivo en esta actividad. Los fallos de para el DR-014 y el volumen que estos representan también son una evidencia de que la situación en el sistema actual se encuentran al límite de poder garantizar el abastecimiento en las demandas. De ser posible lograr reducir el consumo en la demanda agrícola, también garantizaría la satisfacción de todas las otras demandas. No se tienen datos oficiales sobre las eficiencias y de los sistemas de riego en el DR-014, pero por conocimientos populares de esta área de estudio, se puede decir que casi el total de los cultivos se riega por técnicas de inundación. Los datos de la FAO indican que la eficiencia de la técnica de inundación abarca entre 40 y 60% de las cantidades aplicadas, lo que quiere decir que aproximadamente la mitad del agua no se queda para el cultivo. Si bien en la zona del valle de Mexicali, una parte de estos excedentes de agua se infiltran al acuífero y otra parte genera un caudal que llega a la Ciénega de Santa Clara que se mantiene de estas aguas, aunque sea

agua de baja calidad. Por una parte aumentar la eficiencia del sistema de riego reduciría el consumo, pero consecuentemente también los flujos que llegan a la Ciénega, por lo que cualquier acción al respecto en este escenario debe cuidar la integridad de ambos usuarios. Si fuera posible ahorrar agua mediante eficiencia de aspersores o goteo que llega hasta un 90-95%, el resto del agua no utilizada y no contaminada por la actividad agrícola puede ser dirigida al propósito ambiental de la Ciénega.

A pesar de que las simulaciones muestran que no se presentan grandes fallos volumétricos en las demandas urbanas en el sistema del Mexicali, hay que remarcar que las demandas se consideraron invariables al 2040. Es importante notar que la tendencia real de las demandas, sobre todo la urbana, tiene una tendencia a incrementarse al proporcionalmente con el aumento de la población. También, el consumo de agua per cápita tiende a ser mayor proporcionalmente a la temperatura ambiental, que para la zona de Mexicali se espera se incremente entre 2 y 5 grados en el horizonte al 2100.

El acuífero del río Colorado es considerado como uno de tipo depósito en las simulaciones de AQUATOOL, ya que al no contar con datos físicos ni de niveles, no se puede interpretar el comportamiento de ésta masa de agua. Sin embargo, los comportamientos que tiene el acuífero en el sistema no se pueden considerar como información válida para la gestión de los recursos hídricos en el sistema. Por los datos de extracción bruta y recarga, así como del estatus otorgado por la CONAGUA, se determina que el acuífero se encuentra en sobre-explotación y que la manera en que se está gestionando no es sostenible.

Todos los estudios científicos sobre cambio climático y los impactos en los recursos hídricos realizados en la cuenca alta del río Colorado, coinciden en la tendencia de aumento de temperaturas y disminución en la precipitación, consecuentemente también una disminución en el caudal y los recursos hídricos disponibles. Por lo tanto, los resultados obtenidos de la simulación en AQUATOOL para el sistema de gestión del agua en Mexicali, como el menos peor de los

escenarios, ya que si se consideran todas las variables posibles socioeconómicas y climáticas posibles, el resultado podría ser aún más grave en cuanto a fallos en las garantías. También deben ser considerados con mucha reserva los resultados obtenidos, debido a la gran cantidad de asunciones y ajustes que se hizo a la información de entrada debido a la ausencia de datos detallados oficiales de la misma.

Otra demanda que no se está considerando es la de incorporar las necesidades de flujos ambientales al cauce natural del río Colorado estimados por Hinojosa-Herta & Carrillo-Guerrero (2010). Se trata de una cifra de entre 390 y 600 Hm^3 anuales que detallan en la tabla 3-13, que requerirían de ajustes en las demandas del sistema de Mexicali. Esta demanda de flujos ambientales causaría más estrés en el cumplimiento de las garantías de las otras demandas, ya que si se siguen los ejemplos de otras cuencas en el mundo, la demanda ecológica está en segundo lugar de jerarquía solo después de la urbana. Esta es otra razón para mejorar la eficiencia en los volúmenes consumidos de la demanda agrícola.

Los resultados anteriores en las simulaciones de AQUATOOL para el sistema de Mexicali, sirven para visualizar la vulnerabilidad que tiene la garantía del abastecimiento de agua en Mexicali y Baja California, así como reafirmar la importancia que tiene la gestión técnica y política de la CILA para coordinar proyectos como los que se han propuesto en el Acta 323 mencionados en la sección 3.2.6 para generar nuevas fuentes de agua. Este tipo de herramientas de simulación en la gestión tienen un gran potencial para contribuir a la hora de la planificación de los proyectos como los que la CILA propone, para evaluar su viabilidad, efectividad y riesgos. Un trabajo a futuro a partir de ésta tesis, puede ser la simulación en el sistema de Mexicali de alguno de estos proyectos, para evaluar la funcionabilidad del mismo. Aunado a esta propuesta de trabajos futuros, es importante mejorar la calidad de los datos de entrada para reducir la incertidumbre y buscar algún punto de calibración dentro del sistema.

5.6.6 Evaluación del impacto en la demanda de la Cervecería Constellations Brand en el sistema del río Colorado

Se decidió agregar la demanda próxima de la Cervecería Constellations Brand (CCB) al sistema del río Colorado en Mexicali para evaluar el comportamiento y evaluar si es posible cumplir con la garantía, al mismo tiempo de evaluar la posible afectación al sistema en las otras demandas.

En el esquema de AQUATOOL se agregó la demanda de agua de la CCB en cuatro demandas, una por fase, y se les dio una prioridad escalonada, suponiendo dos escenarios.

En el primer escenario, las cuatro fases se abastecen de 5 Hm^3/año de fuente de agua superficial, cada fase con 1.75 Hm^3/año. El agua se abastece desde el nodo de plantas potabilizadoras de la CESPM. En este primer escenario se asumió que los 15 Hm^3/año de agua subterránea son asignados para la CCB y abastecidos totalmente, pero no son simulados en el esquema, pues solamente se buscó evaluar el impacto en las fuentes de agua superficiales. El periodo de tiempo de evaluación fue 35 años hidrológicos de 2005-2040.

En un segundo escenario se abastecen las 4 fases con los 20 Hm^3/año de agua superficial, en el que se evalúa la influencia en el sistema, ya que de esta forma es como se puede tener un impacto significativo en las otras demandas del sistema. La razón para plantear este segundo escenario, es porque la forma de abastecer la demanda de la CCB con fuentes de agua renovables sería de agua superficial. El periodo de tiempo de evaluación es del 2005-2040 igual que el escenario anterior.

En la figura 5-24 se muestra el esquema de AQUATOOL para el sistema del río Colorado en Mexicali con la adición de la demanda de la CCB.

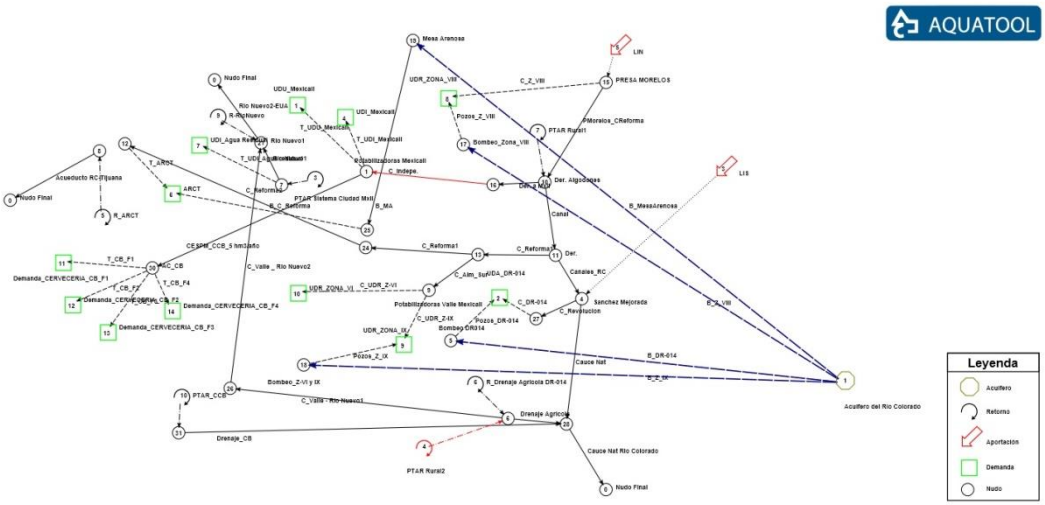


Figura 5-24 Esquema del sistema del río Colorado en Mexicali con la adición de la demanda de la CCB. Elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones en AQUATOOL para el primer escenario con demanda de 5 Hm^3/año de agua superficial son los siguientes:

- La demanda de la CCB fue puesta en prioridad, solo después de las demandas existentes en el sistema de Mexicali.
- En las demandas urbanas e industriales no se presentan déficit en las garantías.
- Para la demanda de ARCT se presentan 17 fallos en la garantía partir del 2035 y aumentando progresivamente hasta el 2040, posiblemente causados por las disminuciones en las entregas de agua a México.
- Para la demanda agrícola del DR-014 se presentan los mismos fallos entre el 2005-2020, pero se incrementan en gran medida a partir del 2038, igualmente causados por las disminuciones en las entregas de agua a México.

- Las demandas rurales Zona_VIII y IX también presentan fallos después del 2038, muy debido a la misma razón que los fallos en el acueducto y demanda agrícola.
- La demanda de la CCB presenta fallos mensuales a partir del 2037 con 68% de déficit.

Aunque la presencia de la demanda de la CCB se podría considerar que entraría en realidad a partir del 2019 o 2020, donde los datos de aportaciones corresponden a pronósticos y cálculos. Por esta razón se evaluó su presencia desde el 2005 para conocer qué pasaría con garantía si hubiese existido en el periodo donde se tienen datos observados. En este periodo 2005-2018 la demanda de la CCB presenta hasta 10 fallos mensuales de 68% de magnitud y hasta tres meses seguidos.

Un dato importante a mencionar, es que los volúmenes de agua demandados por la CCB para la producción de cerveza, están basados en la relación de 3.5 litros de agua para producir un litro de cerveza. Este sería en todo caso el más óptimo de los escenarios de producción según Water Footprinting (2009), ya que el promedio mundial de produccion ronda los 5 litros de agua por litro de cerveza. Esto significa que en la realidad, la demanda de agua por parte de la CCB podría ser mayor que la declarada.

Los resultados de las simulaciones en AQUATOOL para el segundo escenario con demanda una de 20 Hm^3/año de agua superficial son los siguientes:

- La demanda de la CCB fue puesta en la prioridad, después de las demandas existentes en el sistema de Mexicali.
- En las demandas urbanas e industriales no se presentan déficit en las garantías.
- El ARCT presenta 20 fallos a partir de enero del 2032 progresivamente hasta el 2040 en donde las magnitudes de los fallos llegan hasta una máxima de 15.36 Hm^3.

- La demanda agrícola del DR-014 presenta hasta 25 fallos importantes a partir del 2037, con magnitudes de van de 1.08 hasta 94.96 Hm^3 en algunos meses. Entre el 2005 y 2018 se mantienen en los mismos meses aun que aumentan respecto a la primer evaluación en el sistema sin la demanda de la CCB
- Mismo que el escenario anterior las demandas rurales Zona_VIII y IX también presentan fallos después del 2038, muy debido a la misma razón que los fallos en el acueducto y demanda agrícola.
- La demanda de la CCB presenta fallos mensuales un par de años antes que el escenario anterior, a partir del 2035 con 68% de déficit.

Se puede decir la misma afirmación del caso anterior (demanda de 5 Hm^3/año) para este escenario de 20 Hm^3/año para la demanda de la CCB en el periodo de datos observados 2005-2018. En este segundo escenario, la demanda de la CCB también presenta hasta 10 fallos mensuales de 68% de magnitud y hasta tres meses seguidos.

Los fallos entre 2005-2018 de este segundo escenario cumplen el pronóstico, pues si la demanda anual de 5 Hm^3 se presentó problemas para cumplir con la garantía, la de 20 Hm^3 era de esperarse que también presentara fallos. Incluso, el segundo escenario termina agravando el problema de las otras demandas a partir del 2037.

En la figura 5-25 se encuentran resultados de la simulación del sistema del río Colorado en Mexicali, en donde se ha simulado la demanda de 5 Hm^3 y 20 Hm^3 de la CCB desde el 2005. La incorporación de la demanda presenta 10 fallos en el periodo de datos observados 2005-2018.

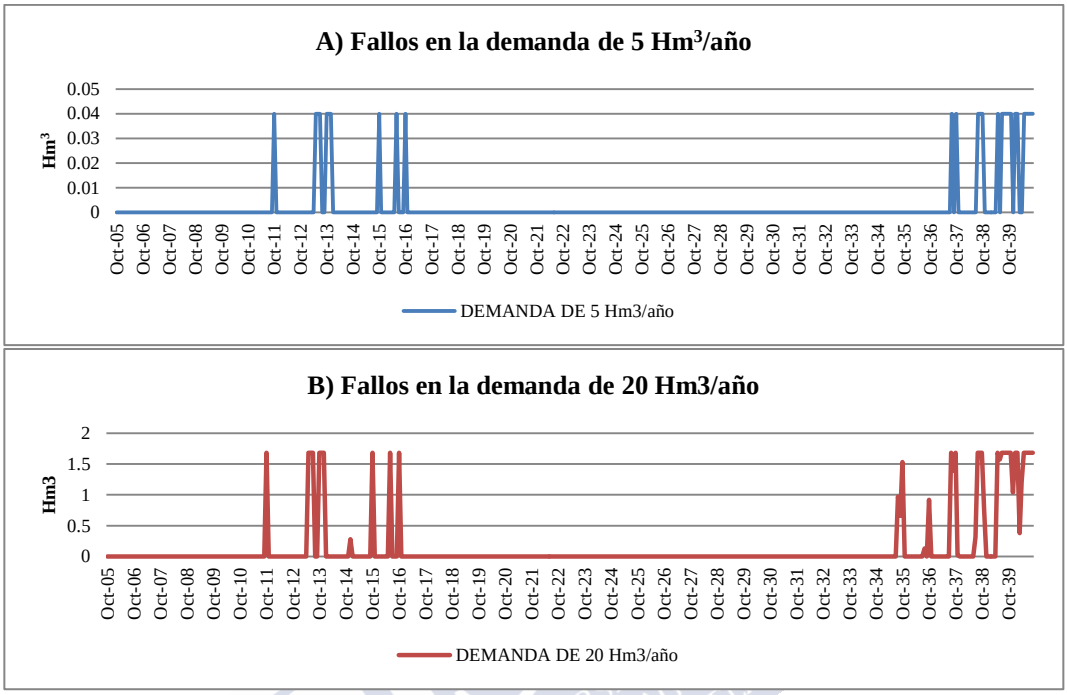


Figura 5-25 Fallos en la garantía de la demanda de la CCB para 5 y 20 Hm^3 por año en el sistema del río Colorado en Mexicali, elaboración propia.

Estos escenarios fueron realizados para conocer las garantías de la demanda de la CCB en un periodo de entrega de agua real y no estimado a futuro, ya que en el periodo 2020-2040 la demanda agregada presenta solamente ligeros fallos. Esta diferencia de los fallos entre el periodo observado y el estimado se deben a que en el periodo 2020-2040 las entregas de agua calculadas están más suavizadas que las del periodo real 2005-2018. Con este resultado da una realidad más confiable del posible impacto que tendría la demanda de la CCB en el sistema del río Colorado en Mexicali. Los resultados de la simulación entre 2005-2020 para la demanda de 5 Hm^3 muestran que se tiene un total de 10 fallos en el suministro de la demanda con un volumen de 0.04 Hm^3 en cada fallo, mientras que para la simulación de la demanda de 20 Hm^3 se presentan 11 fallos con un volumen de 1.68 Hm^3 en 10 de los fallos y un fallo de 0.28 Hm^3.

La aplicación de AQUATOOL en el sistema de flujos de agua del río Colorado en Mexicali y los resultados obtenidos anteriormente, muestran la utilidad para desarrollar análisis de "qué pasaría si…", como en el caso de agregar la demanda de la CCB con la que se puede considerar que la garantía de su abastecimiento toca los límites de la seguridad hídrica, de un sistema que ya se puede considerar que se encuentra en estrés hídrico.

5.6.7 Trabajos futuros para el sistema de Mexicali en la subcuenca del río Colorado

Después de realizar la experiencia de búsqueda, recolección y procesamiento de datos, simulaciones e interpretación de los resultados para el caso de la subcuenca del río Colorado en Mexicali, se proponen los siguientes trabajos futuros que involucran temas desde la disponibilidad de datos hasta nuevos enfoques de análisis para la situación actual y futura. Estas propuestas tienen la finalidad de facilitar la información para los trabajos futuros en esta área de estudio y sugerir una dirección en las investigaciones. La primera propuesta hubiera sido de gran utilidad para el desarrollo del estudio en este trabajo de tesis. Las siguientes propuestas están enfocadas al ordenamiento de los datos y a ejemplos de por dónde conducir la información.

Primero, desarrollar una base de datos con la mayor cantidad de datos posibles y con el mayor periodo disponible para los parámetros meteorológicos, flujos de distribución de agua dentro del sistema, demandas de agua, parámetros físicos del subsuelo e hidrogeológicos, flujos y niveles en cuerpos de agua, extracción de agua subterránea, entregas de agua en el LIN y LIS, datos agrícolas de extensiones, cultivos y aplicación de riegos, eficiencia del riego, tratamientos de agua, retornos al río, etc. Segundo, se podría trabar en una plataforma SIG en la que se identifiquen todos los elementos como en el esquema de AQUATOOL y en los que la información de la base de datos este contenida, visible y disponible.

Tercero, generar y calibrar un modelo base como el presentado en este trabajo de tesis, el cual servirá para evaluar el comportamiento

desde propuestas para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos, hasta para valorar el impactos de cambio climático, o el costo-beneficio de por ejemplo proyectos como los propuestos por la CILA para generación de fuentes de agua o algún tipo de reservorios de agua para Mexicali.

USC UNIVERSIDADE DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

USC
UNIVERSIDADE
DE SANTIAGO
DE COMPOSTELA

6 CONCLUSIONES

Se han utilizado técnicas distintas en la estimación de los pronósticos de los recursos hídricos para cada caso de estudio. Esto refleja independencia que cada caso tiene debido a la información y datos de los que se disponen para cada uno. Sin embargo, ambos estudios son aptos para la aplicación de la metodología propuesta y la simulación de gestión con el software AQUATOOL.

6.1 ESCENARIO EN LA CUENCA DEL RÍO CABE

1. En cuenca del río Cabe, los efectos del cambio climático se verán reflejados principalmente en la variabilidad estacional anual y muy ligeramente en una reducción de la magnitud de la cantidad de caudal. Sin embargo, para el escenario RCP8.5 podría aumentar la frecuencia de años secos y años húmedos. Las actuales demandas urbanas tienen garantizado el total de su demanda, mientras que la demanda agrícola tienen un 97.7% de garantía de cumplimiento con los recursos hídricos disponibles y con los criterios actuales del IPH para la garantía. Para el escenario RCP8.5 es posible que en los años cercanos al 2100 se presenten fallos para el caudal ecológico.

2. Si fuera posible aplicar una reducción de consumo del 50% en las demandas agrícolas, resultaría en una disponibilidad recursos hídricos en el caudal aun con los impactos del cambio climático en los recursos hídricos. Estos recursos hídricos podrían ser destinados al 50% de regantes que no tienen acceso al agua, acción que tendría que ser acompañada de mejoras en la infraestructura de riego y canales.

3. La calibración del modelo de gestión AQUATOOL de este trabajo ha sido más precisa que la reportada en el Plan Hidrológico del

Miño-Sil vigente, apegándose mejor a los datos observados de las reservas del embalse de Vilasouto. Esto se ve reflejado en la similitud de en los caudales observados y simulados en las estación de medición de Ribas Altas y en la salida del embalse de Vilasouto con validaciones de excelente y satisfactorio según el coeficiente de Nash-Sutcliffe.

4. Los escenarios RCP4.5 y 8.5 presentan un aumento en la temperatura media para el área de estudio de la subcuenca del río Cabe, siendo de mayor intensidad para le RCP8.5 por la naturaleza del escenario. Respecto a la precipitación se proyecta mayor precipitación en invierno y disminución en verano, lo que resulta proporcional al caudal.

5. Los mapas Euro-Cordex son la información más reciente de cambio climático, sin embargo se presenta la necesidad de reproyectar los mapas para extraer información de zonas más pequeñas y de corregir el sesgo de cada uno de los modelos utilizados. Para poder corregir el sesgo es indispensable contar con datos meteorológicos observados de al menos 30 años. Es necesario tomar con cierta cautela las correcciones del sesgo ya que implica una modificación a los datos de los modelos de simulación climática y la respectiva influencia que esto tiene sobre la simulación hidrológica. Los resultados de los modelos de simulación climática son recomendables para medir posibles las tendencias de las variables climáticas para proyecciones a futuro, con la reserva de que pueden representar promedios anuales o estacionales y no periodos de tiempo cortos como días.

6. EL modelo hidrológico Visual-Balan es capaz de representar correctamente las condiciones hidrológicas con datos de 11 años hidrológicos (2006-2017) en la cuenca del río Cabe, arrojando resultados de calibración del grado de excelente, bueno y satisfactorio para las subcuenca que integran el Cabe.

7. La técnica de interpolación espacial de krigeado regresión muestra ser una herramienta funcional para determinar valores meteorológicos diarios o mensuales en una región hidroclimática

como Galicia. Es necesario mejorar los códigos de programación para reducir los tiempos de procesamiento de días.

8. La ausencia de datos de niveles piezométricos en el área son necesarios ya que su ausencia limita al modelo hidrológico Visual-Balan para poder representar mejor la realidad del balance hídrico. La supervisión y gestión del agua subterránea no es menos importante que la superficial, ya que éstas son las reservas de agua para años de sequía.

9. La propuesta de alternativa de reducir en 50% la demanda agrícola en el Valle de Lemos, trata de contribuir con un ejemplo sencillo de como la cadena de modelos propuestos en la metodología de esta tesis, puede servir para contabilizar los recursos hídricos en el sistema y como simular acciones de cambios evaluando su efecto. Las propuestas de simulación de acciones normalmente estarán orientadas por los diferentes intereses que el analizador o tomador de decisiones tenga para cierto momento de la época en la que se realice el estudio.

6.2 Escenario de la subcuenca del río Colorado

10. La subcuenca del río Colorado en Mexicali presenta una situación complicada, iniciando con la poca disponibilidad de datos oficiales y de estudios científicos realizados en la región. Debido a esto se han hecho asunciones para realizar las simulaciones en este escenario del río Colorado en la ciudad de Mexicali.

11. Aún a pesar de las posibles reducciones aplicadas a las entregas de agua de EUA a México en los acuerdos del Acta 323, si se mantienen las demandas actuales, el sistema no presentaría fallos en las garantías. Este resultado debe ser tomado con muchas reservas debido a datos y condiciones que han sido asumidos. También se debe trabajar en mejorar la eficiencia del sistema de riego para reducir la demanda agrícola.

12. Agregar una nueva demanda de agua como la que está siendo planteada por la empresa cervecera, generaría desde ligeros hasta grandes fallos en el sistema de agua superficial de Mexicali.

13. Numerosas soluciones se podrían crear para introducir la demanda buscada de la cervecería en el sistema del río Colorado en Mexicali, combinando las demandas agrícola e industrial y mediante negociaciones de manejo integral. Los conflictos sociales en Mexicali desde el año 2016 contra la CCB apoyada por el gobierno del estado de B.C., muestran la carencia de comunicación y cooperación entre los usuarios.

14. Los pronósticos estimados para los recursos hídricos del caso del río Colorado tienen base en la tendencia de la disminución de los niveles de la presa Hoover, niveles que representan el comportamiento hidrológico de la cuenca y la utilización de los recursos para las diversas demandas. Por un lado los usos tienen una tendencia a aumentar y otro las aportaciones tienen a disminuir en un futuro próximo, según los estudios de impacto del cambio climático. Esto respalda las posibilidades de que los niveles de la presa continúen disminuyendo y consecuentemente se apliquen restricciones a las entregas de agua a la parte mexicana del río Colorado.

15. Los recursos hídricos son vitales para la supervivencia de las comunidades humanas y la filosofía del manejo integrado de recursos hídricos parece estar ausente en la situación de Mexicali. El síntoma de conflicto por los recursos naturales, es una de las advertencias que Diamond (2005) menciona en el colapso de las sociedades humanas.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adler, R., 2007. *Restoring Colorado River Ecosystems: a Troubled Sense of Inmensity,* Washington, D.C.: Island Press.

AEMET, 2017. *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5,* Madrid: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Agencia Estatal de Meteorología.

agua.org.mx, 2018. *¿Qué es el agua?.* [Online] Available at: https://agua.org.mx/que-es/ [Accessed 09 Enero 2019].

agua.org.mx, 2019. *Visión general del Agua en México.* [Online] Available at: https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/ [Accessed 08 Abril 2019].

Álvarez, V., Taboada, J. J. & Lorenzo, M. N., 2011. *Cambio climático en Galicia en el siglo XXI: Tendencias y variabilidad en temperaturas y precipitaciones,* Santiago de Compostela, España: MeteoGalicia. Xunta de Galicia.

Andreu, J., Solera, A., Capilla, J. & Ferrer, J., 2007. *Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta. Versión 3.00. Manual del Usuario,* Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Andreu, J., Solera, A. & Haro, D., 1998. *Modelo OPTIGES de Optimización de la Gestión de Esquemas de Recursos Hídricos,* Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

animalpolitico, 2017. *Dan marcha atrás a la ley que permitía privatizar el agua en Baja California ante las protestas.* [Online] Available at: https://www.animalpolitico.com/2017/01/ley-agua-baja-california/
[Accessed 06 Mayo 2019].

animalpolitico, 2018. *Habitantes de Mexicali y policías municipales se enfrentan por construcción de planta cervecera.* [Online]
Available at: https://www.animalpolitico.com/2018/01/mexicali-planta-cervecera/
[Accessed 06 Mayo 2019].

ASCE, 1996. *Hydrology Handbook.* Segunda ed. New York: Library of Congress Catalog.

Bakeaz, 2003. *Participación ciudadana en relación con la Directiva Marco del Agua,* Bilbao: Bakeaz.

Ballester, A. & La Calle, A., 2015. *Gobernanza del agua. Participación pública en la planificación hidrológica,* Zaragoza: Fundación Nueva Cultura del Agua.

Batchelor, C., Hoogeveen, J., Faures, J. & Peiser, L., 2017. *Water accounting and auditing, A sourcebook,* Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S. & Palutikof, J. P., 2008. *El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático,* Ginebra, Suiza: Secretaría del IPCC.

Benyus, J. M., 1997. *Biomimicry.* s.l.:Harper Perennial.

BOE, 1985. *Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas,* Madrid: Boletín Oficial del Estado.

Bruinsma, J., 2003. *World Agriculture: Towards 2015/2030. An FAO Perspective,* London: Earthscan.

Burton, J., 2003. *Integrated Water Resources Management on a Basin Level - Atraining manual,* Canada: UNESCO.

CEABC, 2016. *Programa hídrico del estado de Baja California, visión 2035 - Resumen ejecutivo,* Mexicali, B.C.: s.n.

CEABC, 2017. *Informe mensual Diciembre 2017,* Mexicali: Comision Estatal del Agua de Baja California.

CHMS, 2015. *Plan hidrológico del ciclo 2015-2021,* Madrid: Confederación Hidrográfica del Miño-Sil.

CHMS, 2017. *Confederación Hidrográfica Miño-Sil.* [Online] Available at: https://www.chminosil.es/es/chms/organismo/funciones [Accessed 23 01 2018].

Christensen, J., Boberg, F., Christensen, O. & Lucas-Picher, P., 2008. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophys. Res. Lett.,* Issue 35.

Christensen, N. S. et al., 2004. The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado river basin. *Climatic Change,* Issue 62, p. 337–363.

CILA, 2017. *Acta 323. Ampliación de las medidas de cooperación y adopcion de un plan binacional de contingencia ante la escasez de agua en la cuenca del río Colorado,* Ciudad Juárez, Chihuahua: Comisión Internacional de Límites y Aguas.

CILA, 2017. *Acta 323. Apliación de las medidas de cooperación y adopción de un plan binacional de contingencia ante la escasez de agua en la cuenca del río Colorado,* Ciudad Juárez, Chihuahua: Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos de América.

CILA, 2017. *Las Aguas Subterráneas y la jurisdicción de la CILA.* [Online]

Available at: http://www.cila.gob.mx/as/baasmxeu.pdf [Accessed 10 Diciembre 2018].

CILA, 2018. *Comisión Internacional de límites y aguas entre México y Estados Unidos.* [Online] Available at: https://cila.sre.gob.mx/cilanorte [Accessed 21 04 2018].

CILA, 2018. *Entregas de Agua a México del Río Colorado.* [Online]
Available at: https://cila.sre.gob.mx/cilanorte/index.php/avisos/116-entregasagua-rc
[Accessed 10 Enero 2018].

climate4impact, 2011. *Exploring climate model data.* [Online] Available at: https://climate4impact.eu/impactportal/documentation/backgroundandtopics.jsp?q=general_climate_information
[Accessed 15 01 2018].

Climate4Impact, 2018. *IS-ENES Climate4Impact.* [Online] Available at: https://climate4impact.eu/impactportal/documentation/backgroundandtopics.jsp?q=bias_correction
[Accessed 16 Mayo 2018].

CO2.Earth, 2019. *CO2.Earth.* [Online] Available at: https://www.co2.earth/ [Accessed 10 04 2019].

Cohen, M. & Henges-Jeck, C., 2001. *Missing Water, The Uses and Flows of Water in the Colorado River Delta Region.* Oakland, California: Pacific Institute for Studies in Development Environment and Security.

CONAGUA, 2018. *Estadisticas del Agua en México, edición 2018*, Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.

Constellations Brands, 2018. *Manifestación de impacto ambiental modalidad general proyecto: "Construcción y operación de planta cervecera",* s.l.: Centro de Capacitación y Asesoría Profesional S.A. de C.V..

Cuesta, T. S., 2001. *Gestión y uso del agua en la zona regable del valle de Lemos, Lugo,* Lugo: Universidad de Santiago de Compostela.

Cuesta, T. S. et al., 2005. Social aspects influencing water management in the Lemos valley irrigation district, Spain. *Irrigation and drainage,* Issue 54, p. 125–133.

Custodio, E., Llamas, M. R. & Samper, J., 1997. *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Seminario de la AIH-GE,* Las Palmas de Gran Canaria y Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.

Dai, A. & Trenberth, K. E., 2002. Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations. *J. Hydrometeorol,* Issue 3, pp. 660-687.

Döll, P., Flörke, M., Mörker, M. & Vassolo, S., 2003. *Impact of climate change on water resources and irrigation water requirements: a global analysis using new climate change scenarios.* Freiburg, Germany, Proc. Tag der Hydrologie.

Eden, J. M., Widmann, M., Maraun, D. & Vrac, M., 2014. Comparison of GCM- and RCM-simulated precipitation following stochastic postprocessing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres,* Issue 119, pp. 11,040 - 11,053.

Ehret, U. et al., 2012. Should we apply bias correction to global and regional climate model data?. *Hydrology and Earth System Sciences,* Issue 16, pp. 3391-3404.

Emery, X., 2013. *Geoestadística,* s.l.: Ingeniería de Minas.

Euro-Cordex, 2017. *Coordinated Downscaling Experiment - European Domain EURO-CORDEX.* [Online]

Available at: http://euro-cordex.net/060374/index.php.en [Accessed 17 01 2018].

EURO-CORDEX, 2017. *Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use,* s.l.: EURO-CORDEX community.

Fanlo, A., 2016. *La gestión del agua en España,* La Rioja: Confederaciones Hidrográficas.

FAO, 2019. *Water Accounting and Auditing.* [Online] Available at: http://www.fao.org/land-water/water/water-management/water-accounting/en/
[Accessed 07 Marzo 2019].

Forbes México, 2016. *Constellation Brands invertirá 1,500 mdd en Mexicali.* [Online] Available at: https://www.forbes.com.mx/constellation-brands-invertira-1500-mdd-mexicali/
[Accessed 20 Septiembre 2018].

Fowler, H. & Kilsby, C., 2007. Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England. *Climatic Change,* Issue 80, p. 337–367.

Francés, P. A. et al., 2017. *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC AR5,* Madrid: AEMet.

Gayathri, K. D., Ganasri, B. P. & Dwarakish, G. S., 2015. A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia,* Issue 4, pp. 1001-1007.

Geografía Septentrional, 2018. *Sobre las contradictorias cifras de Constellation Brands.* [Online] Available at: https://geografiaseptentrional.wordpress.com/2018/05/30/sobre-las-contradictorias-cifras-de-constellation-brands/
[Accessed 10 Enero 2019].

Giorgi, F., 2008. *Regionalization of climate change information for impact assessment and adaptation,* s.l.: WMO.

Glenn, E. et al., 2001. Ecology and Conservation Biology of the Colorado River Delta. *Journal of Arid Environments,* pp. 49: 5-15.

Golubev, V. S., 2001. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: a reassessment. *Geophys. Res. Lett.,* Issue 28, p. 2665–2668.

GWP, INBO, 2009. *Manual para la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas,* Londres: Global Water Partnership, International Network of Basin Organization.

Hargreaves, G. H. & Allen, R. G., 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* I(129), pp. 53-63.

Hay, L. E. & Clark, M. P., 2003. Use of statistically and dynamically downscaled atmospheric model output for hydrologic simulations in three mountainous basins in the western United States. *J. Hydrol.,* Issue 282, p. 56–75.

Hay, L. E., Wilby, R. J. L. & Leavesley, G. H., 2000. A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. *J. Am.Water Resour. Assoc.,* Issue 36, p. 387–397.

Hengl, T., 2009. *A Practical Guide to Geostatistical Mapping.* Amsterdam: University of Amsterdam.

Hinojosa-Herta, O. & Carrillo-Guerrero, Y., 2010. *Las cuencas hidrográficas de México. La cuenca binacional del río Colorado.* Primera ed. México: INECC.

Hodgkins, G. A., Dudley, R. W. & Huntington, T. G., 2003. Changes in the timing of high river fl ows in New England over the 20th century. *J. Hydrol. ,* 1-4(278), pp. 244-252.

Hodgkins, G. A., Dudley, R. W. & Huntington, T. G., 2005. Summer low fl ows in New England during the 20th century. *J. Am. Water Resourc. Assoc.*, 2(41), pp. 403-412.

Huntington, T. G., 2006. Evidence for intensifi cation of the global water cycle: review and synthesis. *J. Hydrol.*, Issue 319, pp. 83-95.

IGN, 2016. *España en mapas - Instituto Geográfico Nacional*. [Online]
Available at: http://www.ign.es/web/ign/portal/espana-en-mapas [Accessed 11 Enero 2019].

INBO;GWP, 2009. *Manual para la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas*, Francia: Global Water Partnership (GWP) y la Red Internacional de Organismos de Cuenca (INBO).

INE, 2018. *España en cifras 2018*, Madrid: Instituto Nacional de Estadística.

IPCC, 2000. *Informe especial del Grupo de trabajo III del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, s.l.: PNUMA.

IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment* , Cambridge, UK: Cambridge University Press.

IPCC, 2012. *A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC, 2013. *Afirmaciones principales del Resumen para responsables de políticas*, Bern: WGI Technical Support Unit.

IPCC, 2013. *Data Distribution Center*. [Online] Available at: http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html [Accessed 17 01 2018].

IPCC, 2014. *Cambio climático 2014: Informe de síntesis,* Ginebra, Suiza: IPCC.

IPCC, 2014. *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático,* Ginebra, Suiza: IPCC.

IPCC-GTI, 2013. *Cambio Climático: Bases Físicas. Quinto Informe de Evaluación del IPCC, Grupo de Trabajo I,* Madrid: AEMET.

IPCC-GTII, 2008. *El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático,* Ginebra: Secretaría del IPCC.

IPH, 2008. *Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica,* Madrid: BOE.

Islam, Z., 2011. *Literature Review on water resources modeling,* Alberta: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta.

Jacob, D. et al., 2007. An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. *Climatic Change,* Issue 81, p. 31–52.

Jacob, D. et al., 2014. EURO-CORDEX new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change,* pp. 563-578.

Kaspar, F., 2003. *Model Development and Uncertainty Analysis of a Global Hydrological Model, PhD thesis,* Kassel: University of Kassel.

Kleinn, J. et al., 2005. Hydrologic simulations in the Rhine basin driven by a regional climate model. *J. Geophys. Res.,* Issue 110.

La Jornada, 2017. *Planta de Constellation Brands en BC tendrá acueducto, pero no agua.* [Online] Available at: https://www.jornada.com.mx/2017/02/24/estados/029n1est [Accessed 10 Agosto 2018].

Lavín, M. & Sánchez, S., 1999. On How the Colorado River Affected the Hydrography of the Upper Gulf of California. *Continental Shelf Research,* pp. 19: 1545-1560.

Leander, R. & Buishand, T., 2007. Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *J. Hydrol.,* Issue 332, pp. 487-496.

Lindero Norte, 2017. *Columna "Golpe de Realidad": La verdad sobre la instalación de Constellation Brands en Mexicali.* [Online] Available at: https://linderonorte.com/2017/01/20/columna-golpe-de-realidad-la-verdad-sobre-la-instalacion-de-constellation-brands-en-mexicali/ [Accessed 15 Septiembre 2018].

Lopez Garcia, J., 1993. Restitución de datos de aforo al régimen natural. In: J. Andreu, ed. *Conceptos y métodos para la planificación hidrológica.* Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, pp. 69-74.

Luecke, D. et al., 1999. *A Delta Once More.* Boulder, Colorado: Environmental Defense Fund.

MAGRAMA, 2013. *Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC, grupo de trabajo I,* Madrid: AEMet.

MAGRAMA, 2015. *Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Miño – Sil (2015-2021), Capitulo 4,* s.l.: Confederación Hidrográfica del Miño-Sil.

MAGRAMA, 2017. *Anuario de Estadística, avance 2017,* Madrid: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

MAPAMA, 2017. *Proyecto piloto para la utilización de la predicción estacional en la gestión de embalses,* Madrid: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

Maraun, D., 2012. Nonstationarities of regional climate model biases in European seasonal mean temperature and precipitation sums. *Geophys. Res. Lett.*, Issue 39.

Martínez De Teresa, B., 2015. Estudio de los recursos hídricos en España: Análisis y caracterización en la cuenca del Tajo. *Espacio, Tiempo y Forma Serie VI Geograf ía,* VI(8-9), p. 169–230.

Mayer, A. & Muñoz-Hernandez, A., 2009. Integrated Water Resources Optimization Models:An Assessment of a Multidisciplinary Tool for Sustainable Water Resources Management Strategies. *Geography Compass,* 3(3), p. 1176–1195.

McKinney, D. C. et al., 1999. *Modeling water resources management at the basin level: review and future directions,* Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.

MeteoGalicia, 2018. *MeteoGalicia.* [Online] Available at: http://www.meteogalicia.gal/web/informacion/notaIndex.action?request_locale=es
[Accessed 16 Octubre 2017].

Mitchell, T. D. & Hulme, M., 1999. Predicting regional climate change: living with uncertainty. *Progress in Physical Geography,* 1(23), pp. 57-78.

MITECO, 2018. *Ministerio para la Transición Ecológica - Sistema Español de Gobernanza del Agua.* [Online] Available at: https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion-agua/0%20Catalogo%20gobernanza%20del%20agua_tcm30-215766.pdf
[Accessed 11 Enero 2019].

MITECO, 2019. *El Proceso de Planificación.* [Online] Available at: https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/nuevo-proceso-planificacion/ [Accessed 19 Abril 2019].

Momblanch, A., 2016. *Assessment of Ecosystem Services and Water Accounting Methodologies forIntegrated Water Resources Management in water scarce basins,* Valencia: Universitat Politècnica de València.

Moradkhani, H. & Sorooshian, S., 2008. *General review of rainfall-runoff modeling: model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis. Hydrological modeling and the water cycle,* s.l.: Springer.

Moron, V., Robertson, A. W., Ward, M. N. & Ndiaye, O., 2008. Weather types and rainfall over Senegal, Part II: Downscaling of GCM simulations. *J. Climate,* Issue 21, p. 288–307.

Morrison, J., Postel, S. & Gleick, P., 1996. *The Sustainable Use of Water in the Lower Colorado River Basin,* Oakland, California: Pacific Institute for Studies in Development and Environmental Security.

Moss, R. et al., 2008. *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies.,* Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Moss, R. et al., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature,* 11 February, Volume 463, pp. 747-756.

Naciones Unidas, 2018. *Cambio Climático.* [Online] Available at: http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html [Accessed 10 Enero 2019].

Naciones Unidas, 2018. *Escasez de agua.* [Online] Available at: http://www.unwater.org/water-facts/scarcity/ [Accessed 10 Enero 2019].

Nakicenovic, N. et al., 2000. *Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.

Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology,* 10(3), pp. 282-290.

Neira, X. X., Álvarez, C. J., Cuesta, T. S. & Cancela, J. J., 2005. Evaluation of water-use in traditional irrigation An application to the Lemos Valley irrigation district, northwest of Spain. *Agricultural water management,* Issue 75, pp. 137-151.

ONU, 2018. *Agua.* [Online] Available at: http://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html [Accessed 09 Enero 2019].

ONU, 2018. *UN WATER.* [Online] Available at: http://www.unwater.org/water-facts/ [Accessed 09 Enero 2019].

Paredes, J., Solera, A. & Andreu, J., 2007. *Modelo GESCAL para la simulación de la calidad del agua en sistemas de recursos hídricos. Manual de usuario. Versión 1.0,* Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Perevochtchikova, M. & Arellano-Monterrosas, J., 2008. Gestión de cuencas hidrográficas: experiencias y desafíos en México y Rusia. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales,* 3(4), pp. 313-325.

Piani, C. et al., 2010. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *J. Hydrol.,* Issue 395, p. 199–215.

proceso.com.mx, 2018. *Mexicali: La violencia por la disputa del agua.* [Online]
Available at: https://www.proceso.com.mx/519431/mexicali-la-violencia-por-la-disputa-del-agua
[Accessed 06 Mayo 2019].

Prudhomme, C., Jakob, D. & Svensson, C., 2003. Uncertainty and climate change impact on the fl ood regime of small UK catchments. *J. Hydrol.,* Issue 277, pp. 1-23.

Qian, T., 2006. Simulation of global land surface conditions from 1948–2004. Part I: Forcing data and evaluations. *J. Hydrometeorol.,* Issue 7, pp. 953-975.

Raposo, J. R., Dafonte, J. & Molinero, J., 2013. Asseing the impact of future climate change on groundwater recharge in Galicia Costa. *Hydrogeology Journal,* Issue 21, pp. 459-479.

Raposo, J. R., Molinero, J. & Dafonte, J., 2012. Parameterization and quantification of recharge in crystalline fractured bedrocks in Galicia-Costa (NW Spain). *Hydrology and Earth System Sciences,* Issue 16, p. 1667–1683.

Robock, A. & Co-authors, 2000. The global soil moisture data bank. *Bull. Amer. Meteor. Soc.,* Issue 81, pp. 1281-1299.

Robock, A. & Co-authors, 2005. *Forty fi ve years of observed soil moisture in Ukraine: no summer desiccation (yet),* s.l.: Geophys. Res. Lett..

Rodríguez, C., Flessa, K. & Dettman, D., 2001. Effects of Upstream Diversion of Colorado River Water on the Estuarine Bivalve Mollusc Mulinia coloradoensis. *Conservation Biology,* pp. 15: 249-258.

Rossiter, D. G., 2017. *An introduction to geostatistics with R/gstat.* 3.8 ed. New Yrk: Cornell University, Section of Soil & Crop Sciences.

Samper, J., 1999. *Manual del usuario del programa Visual Balan 2.0,* Coruña: Universidade Da Coruña.

Samper, J. et al., 2005. Modelos hidrológicos y sistemas de información geográfica para la estimación de los recursos hídricos: Aplicación de GIS-Balan a varias cuencas Españolas. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo,* Volume VII.

Samper, J., Huguet, L., Ares, J. & García-Vera, M. A., 1999. *Modelos interactivos de balance hidrológico.* Tenerife, Estudios de la Zona No Saturada del Suelo.

Samper, J. et al., 2016. *Evaluación de los recursos hídricos y de los efectos del cambio climático en las aguas subterráneas en el municipio de Abegondo, Galicia.* Madrid, AIH-GE.

Schmidli, J., Frei, C. & Vidale, P. L., 2006. Downscaling from GC precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *Int. J. Climatol.,* Issue 26, p. 679–689.

Shabalova, M., van Deursen, W. & Buishand, T., 2003. Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model. *Clim. Res,* Issue 23, pp. 233-246.

Sharma, D., Das Gupta, A. & Babel, M. S., 2007. Spatial disaggregation of bias-corrected GCM precipitation for improved hydrologic simulation: Ping River Basin, Thailand. *Hydrol. Earth Syst. Sci.,* Issue 11, p. 1373–1390.

Sheridan, S. C. & Lee, C. C., 2010. Synoptic climatology and the general circulation model. *Progress in Physical Geography*, 1(34), pp. 101-109.

Solera Solera, A., Paredes Arquiola, J. & Andreu Álvarez, J., 2015. *AQUATOOL+, Manual de usuario,* Valencia: UPV.

Sorooshian, S., Sharma, K. D. & Wheater, H., 2008. *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas,* New York: Cambridge University Press.

SPABC, 2012. *Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Baja California,* Mexicali: Secretaria de Protección al Ambiente de Baja California.

Sun, F. B., Roderick, M. L., Lim, W. H. & Farquhar, G. D., 2011. Hydroclimatic projections for the Murray-Darling Basin based on an ensemble derived from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 climate models. *Water Resour. Res.*, Issue 47.

Terink, W., Hurkmans, R. T. W. L., Torfs, P. J. J. F. & Uijlenhoet, R., 2010. Evaluation of a bias correction method applied to downscaled precipitation and temperature reanalysis data for the Rhine basin. *Hydrology and Earth System Sciences,* Issue 14, pp. 687-703.

Themessl, M. J., Gobiet, A. & Leuprecht, A., 2011. Empirical statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *Int. J. Climatol.*, Issue 31, pp. 1530-1544.

Todini, E., 2007. *From traditional to sustainable water management: new approaches and tools.* Bochum, Germany, Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico Ambientali, Università di Bologna.

UNESCO, 2003. *World Water Development Report: Water for Life, Water for People,* Barcelona: Paris and Berghahn Books.

UNESCO, 2018. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarollo de los Recursos Hídricos 2018 - Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua,* París, Francia: UNESCO.

USBR, 2011. *Basin Report: Colorado,* s.l.: US Bureau of Reclamation.

USBR, 2016. *West-Wide Climate Risk Assessments: Hydroclimate Projections,* Denver, Colorado: U.S. Department of the Interio - Bureau of Reclamation.

USBR, 2018. *Lake Mead at Hoover dam, end of month elevation (feet).* [Online]
Available at: https://www.usbr.gov/lc/region/g4000/hourly/mead-elv.html
[Accessed 12 Febrero 2019].

USBR, 2019. *Annual Operating Plan Recipients.* [Online]
Available at: https://www.usbr.gov/lc/region/g4000/24mo/index.html
[Accessed 12 Febrero 2019].

USBR, 2019. *Sequía en la Cuenca del Río Colorado, Perspectivas utilizando datos abiertos.* [Online]
Available at: https://cida-test.er.usgs.gov/bluedragon/dev/es/
[Accessed 12 Febrero 2019].

USGS, 2016. *Water Science Photo Gallery - How much water is on Earth?.* [Online]
Available at: https://water.usgs.gov/edu/gallery/global-water-volume.html
[Accessed 09 Enero 2019].

USGS, 2017. *¿En dónde se encuentra el agua en la tierra?.* [Online]
Available at: https://water.usgs.gov/gotita/earthwherewater.html
[Accessed 09 Enero 2019].

USGS, 2018. *Water Science for Schools.* [Online]
Available at: https://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html
[Accessed 20 01 2019].

Valencia, J. C., 2007. *La gestión integrada de los recursos hídricos en México: nuevo paradigma en el manejo del agua.* México, CONAGUA.

Ven Te Chow, D. R. M. L. W. M., 1994. *Hidrología aplicada.* s.l.:McGraw Hill.

Water Accounting, 2016. *Water Accounting: Background.* [Online]
Available at: http://wateraccounting.org/background.html [Accessed 07 Marzo 2019].

Water Footprinting, 2009. *Identifying & addressing water risks in the value chain,* London: WWF & SABMiller.

WMO, 2012. *International glossary of hydrology.* WMO-No. 385 ed. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.

WMO, 2017. *World Meteorological Organization, Commission for Climatology.* [Online]
Available at: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/faqs.php#q1 [Accessed 15 01 2018].

Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V. & Lettenmaier, D. P., 2004. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change,* Issue 62, pp. 189-216.

WWDR, 2018. *Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua,* París, Francia: UNESCO.

Zamora-Arroyo, F. et al., 2005. *Conservation Priorities in the Colorado River Delta, Mexico and the United States,,* Tucson, Arizona: Sonoran Institute, Environmental Defense, University of Arizona, Pronatura Noroeste, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) y World Wildlife Fund.

Zhang, Y., 2009. *Introduction to Geostatistics | Course Notes,* Wyoming: s.n.