
Estudio de vulnerabilidad, adaptación y mitigación al Cambio Climático para proyectos hidroeléctricos

Informe técnico sobre el impacto hidrológico del Cambio Climático en las cuencas de estudio

Fase IV y V



Instituto Costarricense de Electricidad

Sabana Norte, San José
Costa Rica

Preparado por:



Centre de Recerca Aplicada en Hidrometeorologia
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

CRAHI-UPC

Edifici ParcUPC K2M S104
C/ Jordi Girona, 1-3, 08034 Barcelona
www.crahi.upc.edu

9 de marzo de 2015

CLASIFICACIÓN
CONFIDENCIAL

Esta página ha sido dejada en blanco intencionadamente para facilitar la paginación de la impresión a doble cara.

ÍNDICE

1. Planteamiento general	2
2. Cuencas de estudio.....	4
3. Impacto en base a variables climatológicas.....	5
3.1. Estimación de la variables medias de cuenca	6
3.2. Lluvia anual de cuenca	6
3.3. Lluvia mensual de cuenca.....	8
3.4. Lluvia diaria de cuenca para época seca y época húmeda.....	10
3.5. Evapotranspiración potencial de cuenca.....	12
4. Impacto hidrológico en base a caudales	14
4.1. Metodología de análisis	14
4.2. Curvas de caudales clasificados para escenarios futuros.....	15
4.3. Evolución del volumen turbinable anual	17
4.4. Evolución del caudal turbinable para época seca y época húmeda	19
4.5. Evolución del caudal turbinable para caudales altos y caudales bajos	21
4.6. Evolución del caudal turbinable por períodos mensuales	25
5. Conclusiones	27
6. Referencias	28

1. Planteamiento general

En este informe se analiza el impacto hidrológico que producirá el Cambio Climático sobre las 16 cuencas estudiadas en Costa Rica. Para analizar estos impactos se han utilizado los escenarios climáticos proporcionados por las simulaciones del modelo meteorológico WRF forzado por el Modelo de Circulación General GCM MPI-ECHAM6 (en las figuras se utiliza la etiqueta de ECHAM6 para referirse a él).

El planteamiento general del estudio de los efectos hidrológicos del cambio climático en Costa Rica se muestra en la Figura 1. El período histórico sirve de referencia para evaluar el cambio de régimen hidrológico en los 4 escenarios futuros (desde 2020 hasta 2050), que se han denominado quinquenios porque disponen de 5 años de datos calculados por el modelo meteorológico. Ahora bien, para analizar adecuadamente el régimen climático de Costa Rica, caracterizado por una diferencia marcada entre períodos húmedos y períodos más secos, todos los análisis que se han realizado en términos hidrológicos en las cuencas de estudio se corresponden con la definición del año hidrológico en Costa Rica, que toma como fecha de inicio el 1 de mayo del mismo año. Por tanto, dentro de cada quinquenio sólo se ha analizado el período que comprende 4 años hidrológicos completos. Así, se descartan los 4 meses iniciales de datos (que cumplen la función de calentamiento del modelo hidrológico) y los 8 meses finales (que no se pueden considerar un año hidrológico completo).

El planteamiento consiste en ajustar un modelo hidrológico que reproduzca el régimen hidrológico de cada cuenca (a escala temporal diaria), para posteriormente aplicarlo en los escenarios climáticos futuros. El régimen de caudales se caracterizará por diferentes variables sintéticas (medias anuales, medias mensuales, distribución estadística). A partir de las diferencias observadas entre el régimen de caudales históricos (representando el presente) y el régimen de caudales futuros, se podrá analizar si existen cambios de régimen hidrológico asociado al cambio climático.

El período histórico es la referencia de comparación, y ha sido utilizado también para calibrar el modelo hidrológico GR4J en cada una de las cuencas, usando datos de caudal observado ("Informe técnico sobre la calibración del modelo hidrológico en las cuencas de estudio" de la Fase II). Para ello, se han utilizado las variables de entrada (precipitación y evapotranspiración potencial) proporcionadas por el modelo meteorológico WRF-CFSR, que corresponde a un reanálisis forzando que las condiciones de contorno coincidan con observaciones climáticas del período histórico analizado.

Ahora bien, por motivos de coherencia, la referencia de comparación para el período histórico no corresponde a la simulación de caudales utilizando la salida del modelo meteorológico de reanálisis WRF-CFSR, sino a la que se obtiene con los datos de precipitación y evapotranspiración del mismo modelo climático MPI-ECHAM6 que se utilizará para analizar el impacto futuro aplicándolo al periodo histórico (Figura 2).

Para cualquier escenario, siempre que se hace referencia a la lluvia procedente de los modelos meteorológicos (WRF-CFSR) o climático (MPI-ECHAM6,) corresponde a la salida de los modelos corregida por una máscara multiplicativa de corrección de sesgo, obtenida a partir de un ajuste con los valores observados en estaciones pluviométricas en el período histórico. Estas máscaras de corrección de sesgo han sido detalladas en el "Informe técnico sobre la correlación espacial obtenida con la salida del modelo de mesoescala y la climatología histórica del país" del presente proyecto.

Debido a la gran cantidad de gráficos que se han elaborado para hacer el análisis (se han estudiado 16 cuencas), a la hora de mostrar los resultados en el informe, se ha optado por incluir únicamente los obtenidos en 3 de las cuencas, incorporando el resto de gráficos en anejos. Se han escogido las cuencas 2406-Balsa y 3104-Remolino, que ofrecen resultados con un patrón bastante similar al resto de cuencas, y 0909-Oriente, donde los resultados obtenidos (junto con la cuenca 0912-Pascua) ofrecen un patrón diferente.

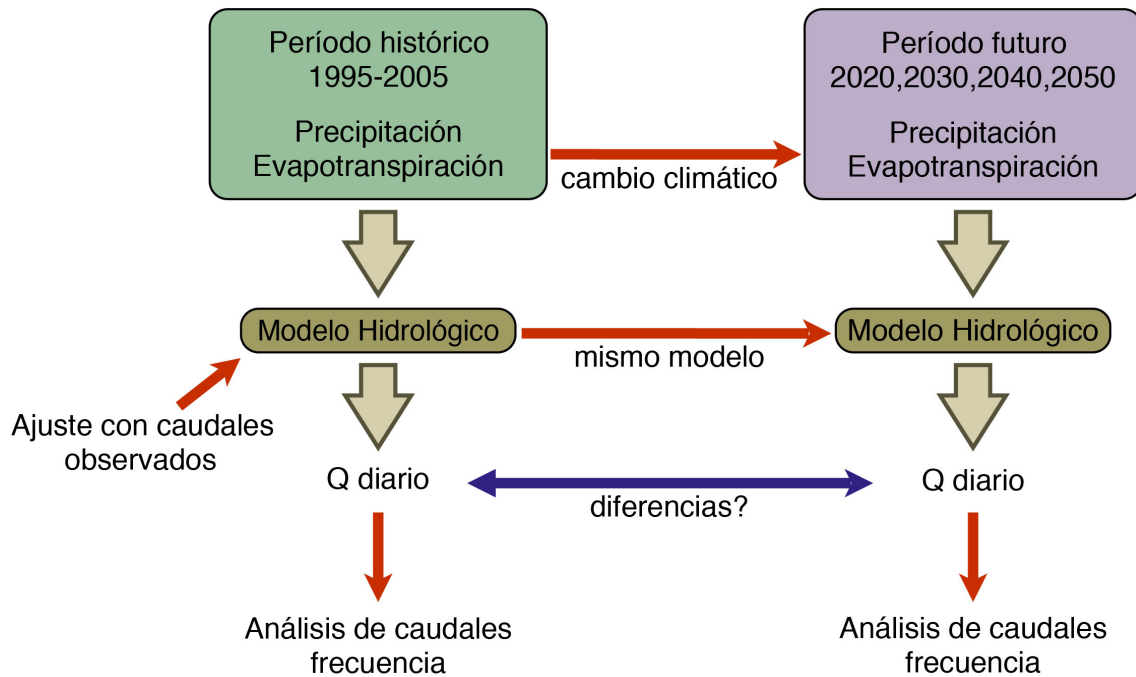


Figura 1. Esquema general de actuación para la evaluación del cambio de régimen hidrológico a causa del cambio climático en una cuenca con medidas o estimaciones de caudal.

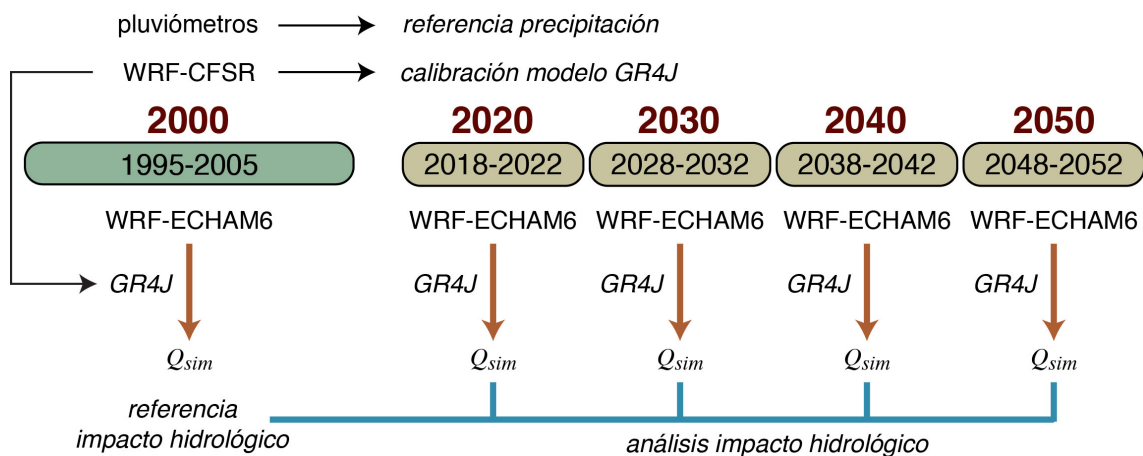


Figura 2. Esquema general de obtención de la referencia para evaluar el impacto hidrológico a causa del Cambio Climático en una cuenca.

2. Cuencas de estudio

Las cuencas de estudio han sido presentadas en el "Informe técnico sobre la calibración del modelo hidrológico en las cuencas de estudio" de la Fase II. Aquí se realiza un breve recordatorio.

Tabla 1. Lista de cuencas estudiadas.

<i>Punto de desagüe de cuenca</i>	<i>Código</i>	<i>PH Cuenca</i>	<i>Superficie (km²)</i>
Presa Cachí	F021	Reventazón	771.2
Tapantí Arriba	0922	Reventazón	181.0
Oriente	0909	Reventazón	229.1
Pascua	0912	Reventazón	337.4
Presa Toro1	F001	Toro	73.2
Peñas Blancas S.P.	1431	Peñas Blancas	155.5
Londres	2801	Naranjo	216.4
Presa Arenal	FAR1	Arenal	497.4
Cariblanco C.M.	FCB1	Cariblanco	140.3
Balsa	2406	Ventanas	1633.4
El Rey	2601	Pirrís	663.9
Tabacales	2604	Pirrís	246.7
Savegre	2904	Savegre	472.6
El Brujo	3103	Diquís	2395.0
Remolino	3104	Diquís	1074.2
Caracucho	3107	Diquís	1176.3

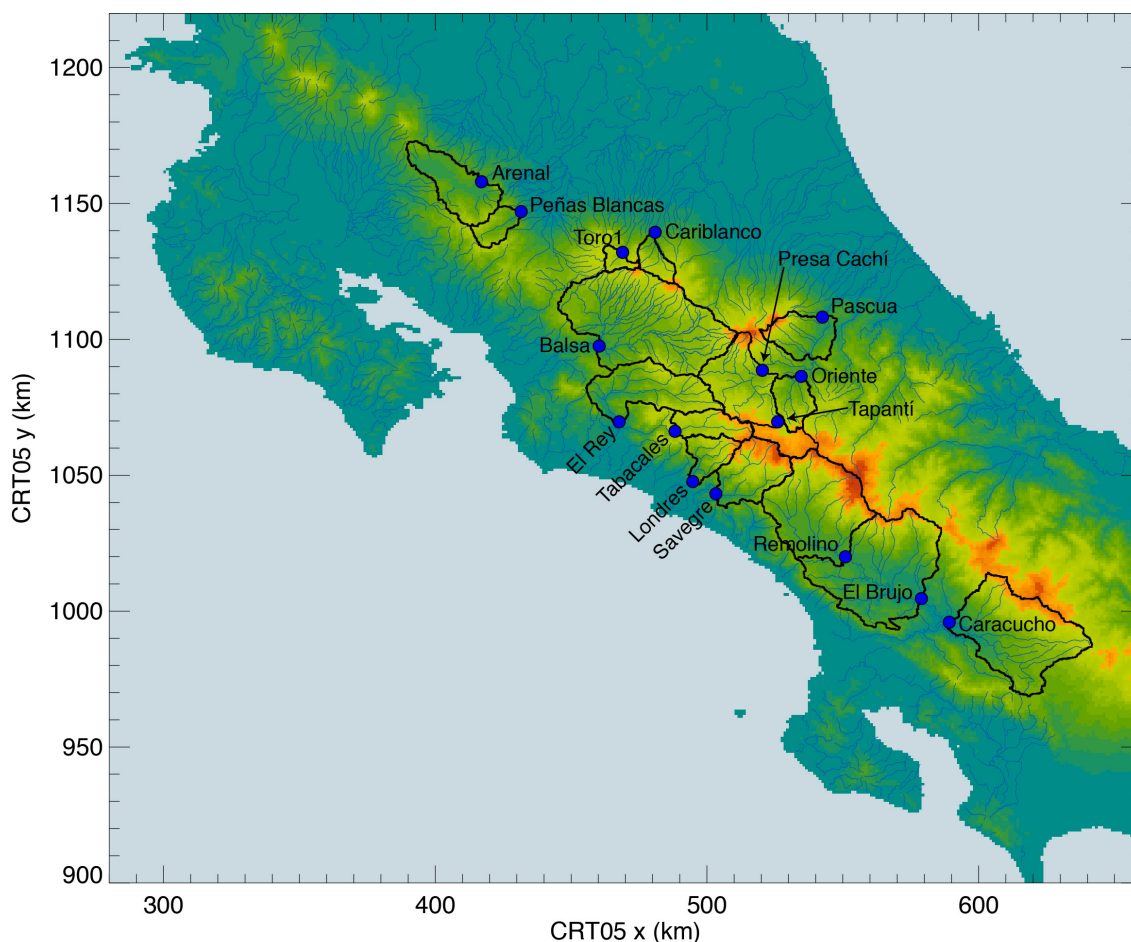


Figura 3. Situación de las cuencas estudiadas en Costa Rica. Algunas cuencas incorporan otras cuencas aguas arriba: el Brujo incorpora Remolino, Presa Cachí incorpora Tapantí.

3. Impacto en base a variables climatológicas

El modelo hidrológico requiere el conocimiento de dos variables climatológicas a nivel de cuenca: se trata de la lluvia y la evapotranspiración potencial (las variables de entrada del modelo hidrológico). Previamente al análisis hidrológico en base a caudales, es interesante realizar un análisis sobre estas variables de entrada, ya que pueden indicar la tendencia en el impacto hidrológico, y en el análisis global pueden mostrar si esa tendencia se magnifica o se contrae.

En el "Informe técnico sobre la regionalización dinámica con el modelo meteorológico de mesoescala" ya se ha analizado el impacto del Cambio Climático sobre la lluvia, tanto a nivel anual como mensual. Este impacto se ha analizado para las regiones climáticas definidas en Costa Rica. Si bien el impacto sobre la lluvia en una cuenca debe guardar cierta similitud con el obtenido sobre la región climática en la que se encuentra la cuenca, pueden encontrarse diferencias significativas en algunos casos, principalmente en cuencas de pequeña magnitud o en cuencas con topografía muy abrupta.

El impacto sobre la lluvia y la evapotranspiración a nivel de cuenca se analiza respetando la definición de año hidrológico en Costa Rica. Por tanto, en el período

histórico se analizan 10 años de datos diarios, mientras que en los escenarios futuros se analizan 4 años.

3.1. Estimación de la variables medias de cuenca

El modelo hidrológico utilizado es de tipo agregado, y trabaja con variables de entrada que representan un valor característico en la cuenca de aplicación. Como valor característico se toma la media espacial dentro de la cuenca. Así, para cada paso de tiempo (día), se calcula la media espacial de los valores diarios que afectan la cuenca (se encuentran dentro de ella). Para ello, se calcula previamente un campo de lluvia a escala fina (1 km de resolución) derivado del campo resultante del modelo meteorológico (que tiene una resolución menor, 5 km), y posteriormente se realiza la media de los valores en los píxeles de 1 km de resolución que se encuentran dentro de la cuenca. Esto se realiza para la precipitación diaria, y para la evapotranspiración potencial (que se calcula a partir de las variables proporcionadas por el downscaling del modelo climático MPI-ECHAM6, ver "Informe técnico sobre la calibración del modelo hidrológico en las cuencas de estudio" de la Fase II).

3.2. Lluvia anual de cuenca

Para cada período analizado, se ha calculado la lluvia media anual. Las siguientes figuras muestran la evolución temporal de la lluvia anual para algunas de las cuencas. Los resultados en todas las cuencas se encuentran en el Anejo 1. Los valores se incluyen en la Tabla 2.

En adición a la lluvia anual media de cuenca proveniente del modelo climático MPI-ECHAM6, en estas figuras se muestra la misma variable obtenida para el período histórico con el modelo meteorológico WRF-CFSR, así como la estimada mediante interpolación a partir de observaciones en pluviómetros (usando el método de la lámina delgada o splines, Dubrule, 1984).

Hay que hacer notar que los valores de lluvia anual obtenidos mediante interpolación de datos de pluviómetros, si bien deben ser los más realistas, no pueden ser considerados como una referencia, ya que en varias cuencas la cobertura de pluviómetros es muy pobre (no se dispone de ningún pluviómetro con datos dentro de la cuenca en el período histórico).

En el período histórico (10 años hidrológicos completos), se ha calculado la lluvia de cada año y con estos datos se ha obtenido la desviación típica (σ) asociada a cada estimación de lluvia (pluviómetros, CFSR y ECHAM6). Con estos valores, se ha construido un intervalo de confianza aproximado alrededor de la media dado por $\pm 2\sigma$, que en una función de probabilidad normal corresponde al 95%.

En la mayoría de cuencas se ha observado una evolución de la lluvia anual para los diferentes períodos muy similar: de un decrecimiento notable para el período 2020, se produce un incremento importante para el período 2030, estabilizándose en 2040 y 2050 en valores similares a los del 2000. Únicamente se observa una tendencia distinta a la descrita en las cuencas 0909-Oriente y 0912-Balsa (localizadas en la cuenca del río

Reventazón aguas abajo del embalse Cachí), aunque las diferencias respecto la referencia histórica son poco importantes, mucho menores que en las otras cuencas.

Si bien las variaciones de lluvia anual que se darían en los años 2020 y 2030 son importantes en muchas cuencas, la variación interanual dada por la propia lluvia del modelo MPI-ECHAM6 (estimada con el intervalo de confianza del 95% en el período histórico) es también muy elevada. Por tanto, las variaciones de los escenarios futuros se encuentran dentro de la horquilla de variación interanual ya observada en el período histórico.

Tabla 2. Lluvia anual estimada en las cuencas de estudio para los diferentes periodos analizados.

Cuenca	Pluvios 2000	CFSR 2000	ECHAM6 2000	ECHAM6 2020	ECHAM6 2030	ECHAM6 2040	ECHAM6 2050
F021-Presa Cachí	3657	4009	4752	4104	5766	5047	4764
0922-Tapantí Arriba	4398	6602	7463	6323	9172	8022	7534
0909-Oriente	6054	5677	7424	7310	8117	8220	7522
0912-Pascua	4523	4360	5374	5833	5901	5463	5667
F001-Toro1	4645	6191	8584	7746	10644	9346	8972
1431-Peñas Blancas	4430	5637	7338	6175	8925	7803	7037
2801-Londres	4186	5865	7562	6265	9271	7894	7440
FAR1-Presa Arenal	4543	3624	2174	1733	2565	2250	2013
FCB1-Cariblanco	5303	6152	2284	2148	2810	2447	2439
2406-Balsa	2955	2588	2690	2088	3435	2698	2620
2601-El Rey	2825	2624	2487	1769	3222	2428	2321
2604-Tabacales	2990	5267	4011	3281	5076	4210	3960
2904-Savegre	4245	5237	4898	3827	6013	4961	4910
3103-El Brujo	4165	3258	4400	3195	5275	4389	4237
3104-Remolino	4351	3552	5081	3677	6140	4991	4993
3107-Caracucho	4405	3363	3344	2511	3816	3338	3117

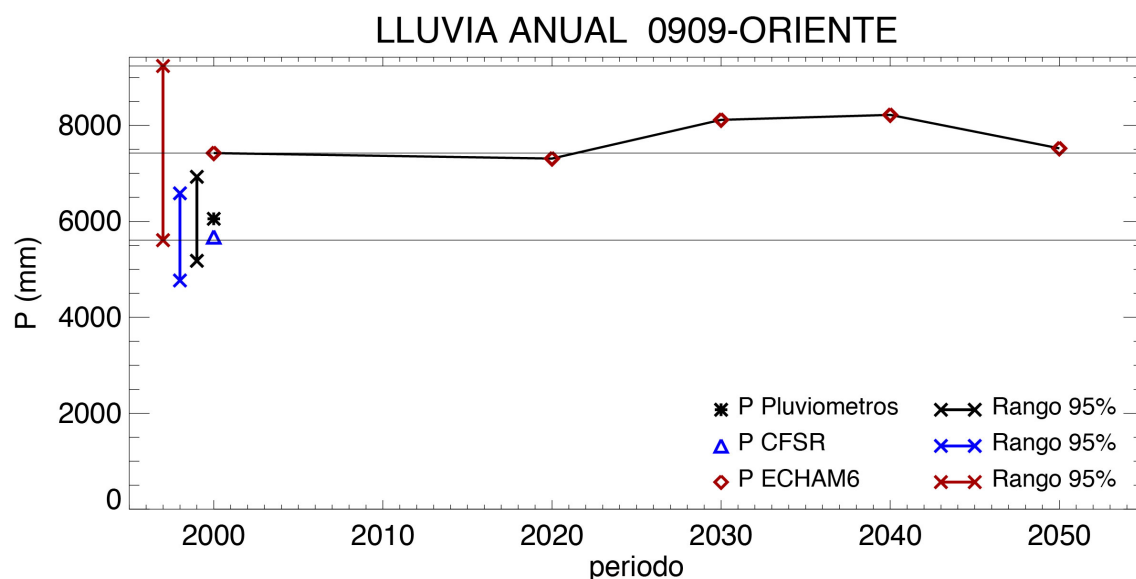


Figura 4. Evolución de la lluvia media anual en la cuenca 0909-Oriente.

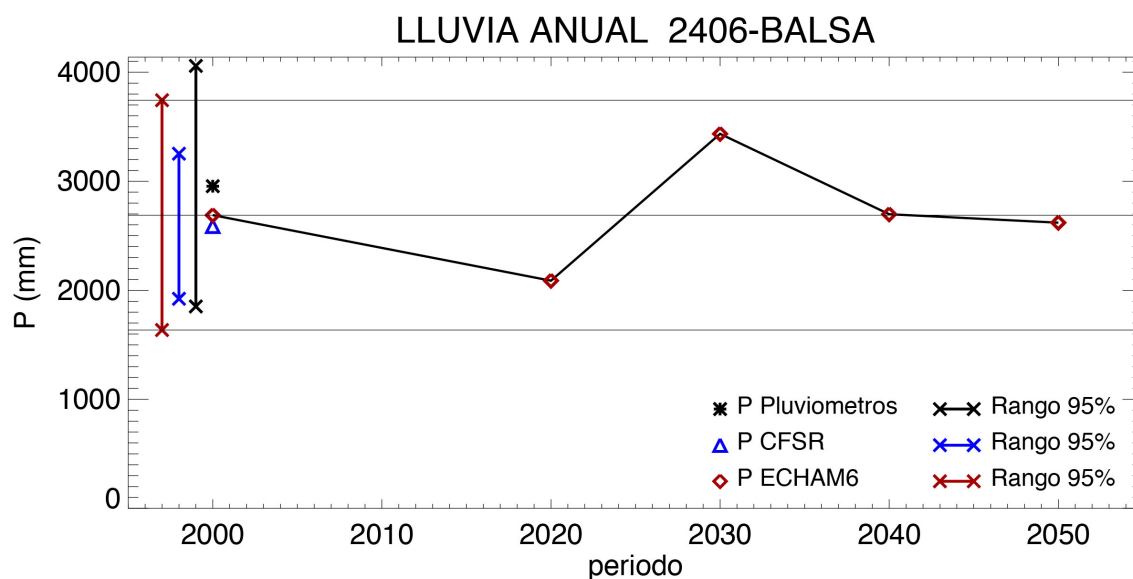


Figura 5. Evolución de la lluvia media anual en la cuenca 2406-Balsa.

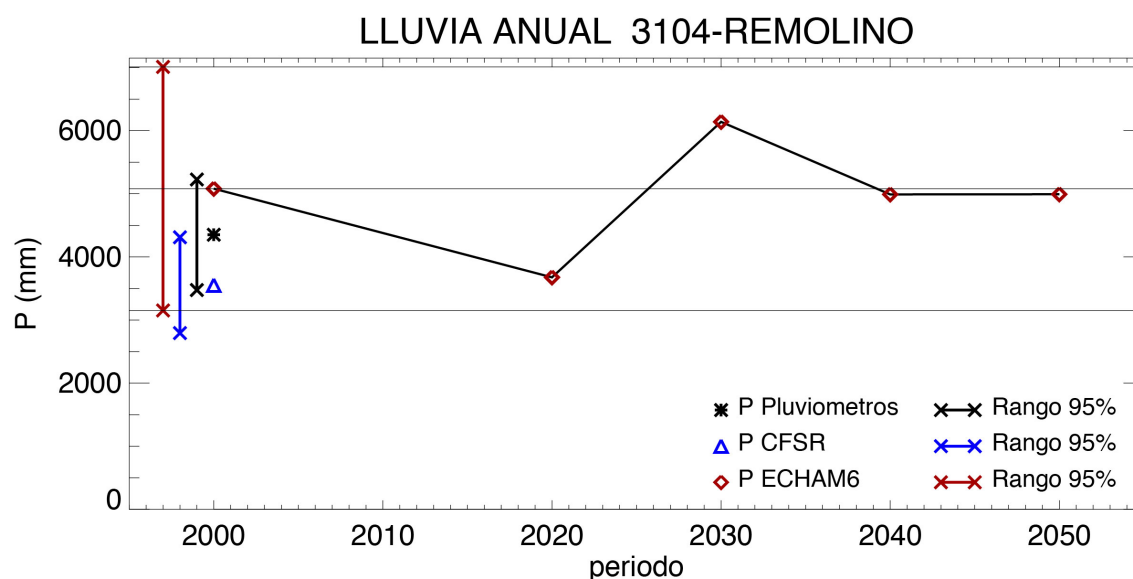


Figura 6. Evolución de la lluvia media anual en la cuenca 3104-Remolino.

3.3. Lluvia mensual de cuenca

Se ha analizado la evolución temporal de la lluvia mensual para los diferentes escenarios. Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos en algunas cuencas. Los resultados en todas las cuencas se encuentran en el Anejo 2. Por motivos de claridad, en estas figuras sólo se incluyen los valores asociados al modelo MPI-ECHAM6 (en las figuras aparece con la etiqueta simplificada de ECHAM6).

A partir de estos resultados, es difícil deducir que existan cambios en la lluvia mensual debidos al Cambio Climático. El período 2028-2032 parece significativamente más lluvioso que el resto de escenarios, generalmente para todos o la mayoría de meses,

aunque el mes de noviembre suele ser donde se produce el cambio más acusado. Pero estas diferencias no pueden ser claramente atribuidas a una tendencia producida por el Cambio Climático, si no a variaciones interanuales propias de la climatología.

LLUVIA MENSUAL 0909-ORIENTE

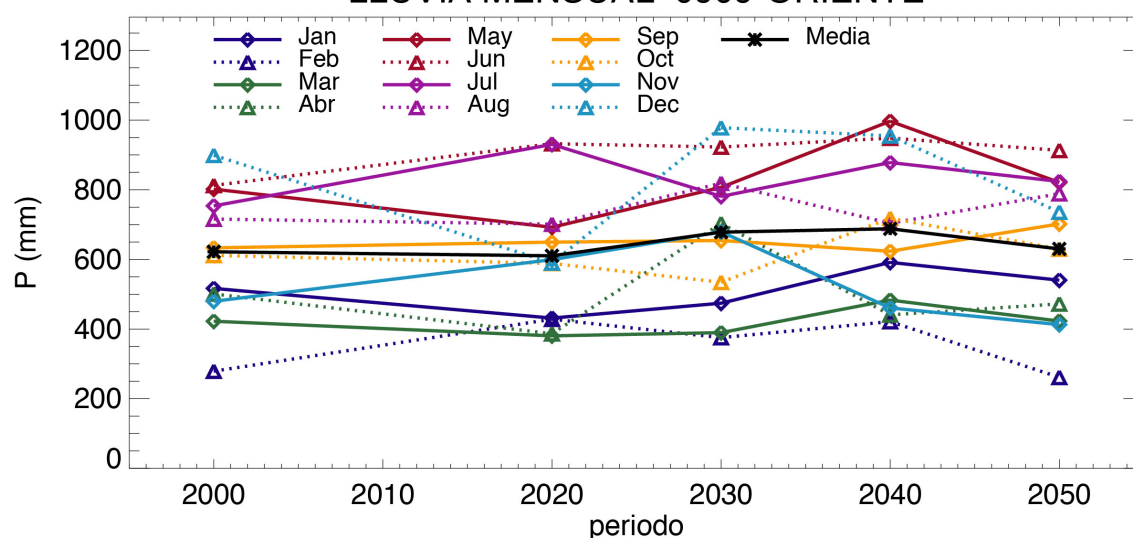


Figura 7. Evolución de la lluvia media mensual en la cuenca 0909-Oriente.

LLUVIA MENSUAL 2406-BALSA

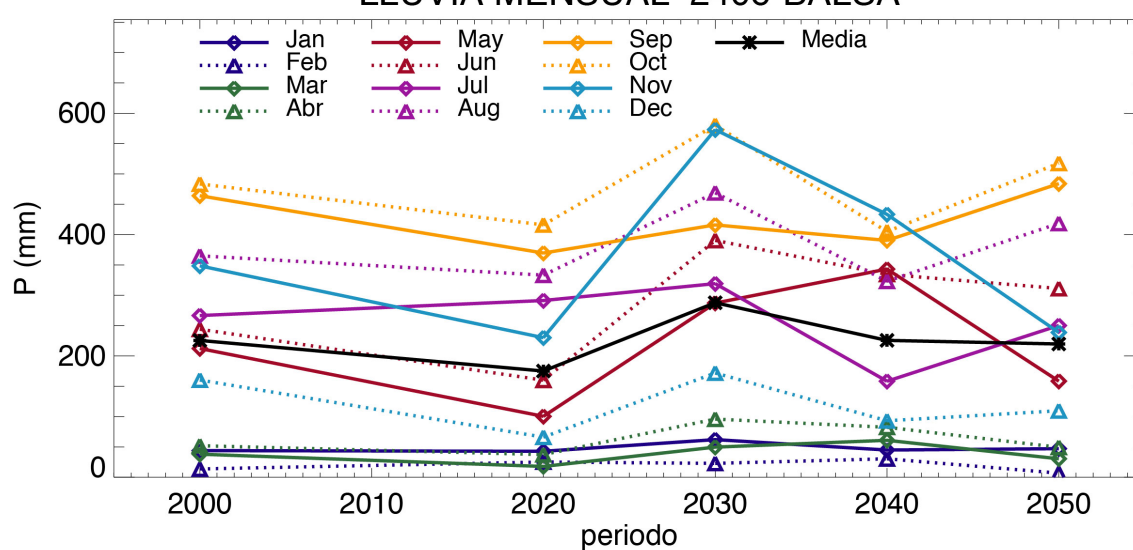


Figura 8. Evolución de la lluvia media mensual en la cuenca 2406-Balsa.

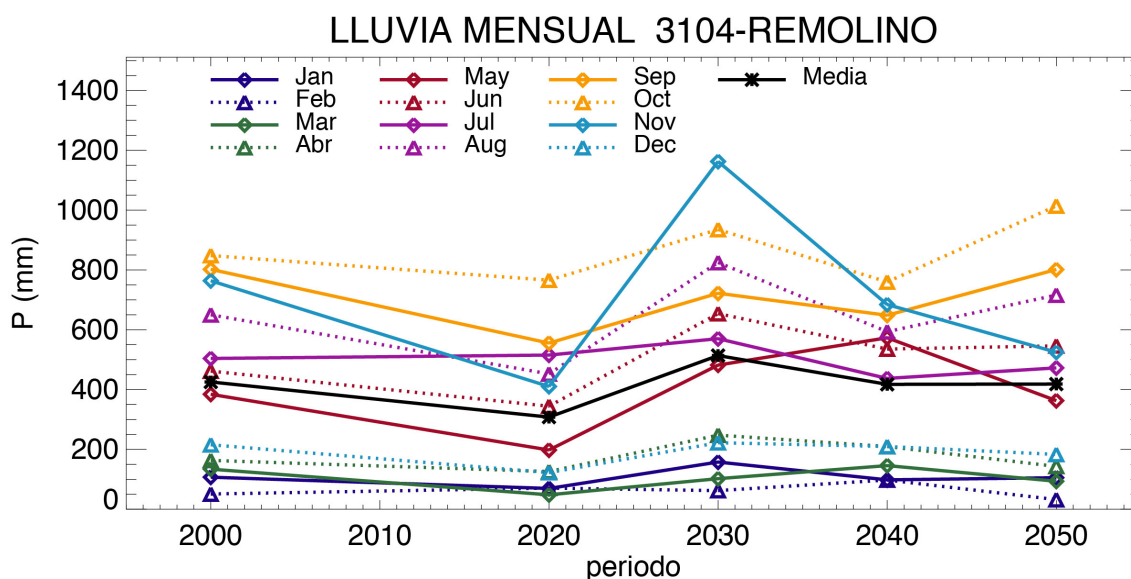


Figura 9. Evolución de la lluvia media mensual en la cuenca 3104-Remolino.

3.4. Lluvia diaria de cuenca para época seca y época húmeda

Dado que en Costa Rica suele haber una época con grandes precipitaciones y otra con precipitaciones escasas, siendo la diferencia entre ellas bastante marcada, es interesante analizar si existe alguna tendencia temporal en la lluvia asociada a cada una de estas épocas. Además, este análisis puede ser más sintético y claro que el realizado a partir de la lluvia mensual.

Aunque pueden encontrarse diferencias en cada una de las regiones climáticas de Costa Rica, normalmente se define la separación de la época húmeda de la época seca por el siguiente criterio mensual, tomado del documento "Integración de actividades y estudios de seguridad energética (énfasis en generación hidroeléctrica) ante el Cambio Climático":

- Época húmeda: mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre.
- Época seca: diciembre, enero, febrero, marzo, abril.

Así, se han creado gráficos de lluvia diaria media asociada a cada una de estas épocas. Se incluyen los valores asociados a los pluviómetros y al modelo WRF-CFSR para el período histórico, y también se incluye el intervalo de confianza asociado al 95% para el período histórico de referencia (sólo para la lluvia proveniente del modelo climático MPI-ECHAM6). A continuación se muestran los resultados obtenidos en algunas cuencas. En el Anejo 3 se muestran el resto.

Salvo en las cuencas 0909-Oriente, 0912-Pascua y FCB1-Cariblanco, se ha observado que las diferencias entre la lluvia de época húmeda y la lluvia de época seca suelen ser del orden de un factor 3, en algunos casos superior. Estas diferencias suelen ser mucho mayores que las asociadas al cambio de período de análisis (Cambio Climático).

Normalmente, en todas las cuencas se observa que la evolución temporal de la lluvia en período seco y húmedo es similar, y se asemeja a la tendencia de la media anual. Existen excepciones, como el caso de la cuenca 0912-Pascua, en que la lluvia para

época seca coincide con la lluvia de época húmeda para el período 2000 y también para 2030. La explicación de este fenómeno se encuentra en que en ambos períodos se simularon episodios de lluvia importantes durante el mes de diciembre (mes definido dentro de la época seca).

LLUVIA DIARIA 0909-ORIENTE

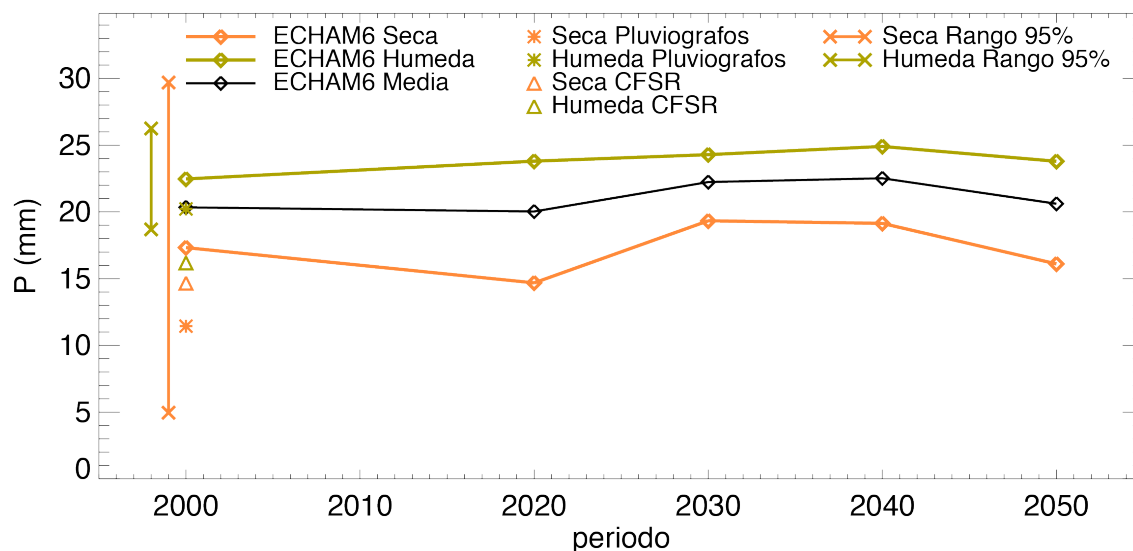


Figura 10. Evolución de la lluvia diaria media en época seca y húmeda para la cuenca 0909-Oriente.

LLUVIA DIARIA 2406-BALSA

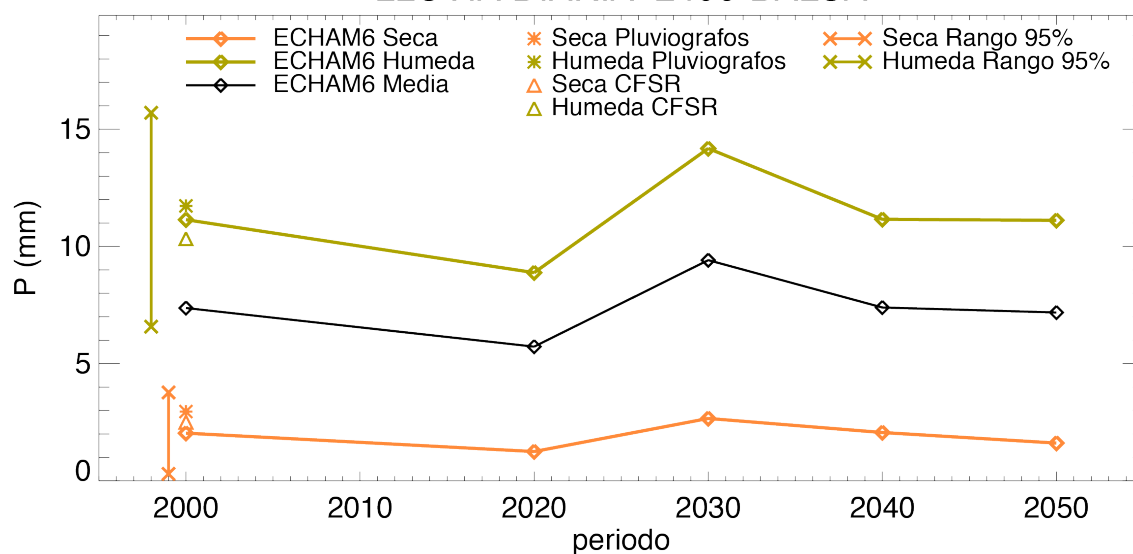


Figura 11. Evolución de la lluvia diaria media en época seca y húmeda para la cuenca 2406-Balsa.

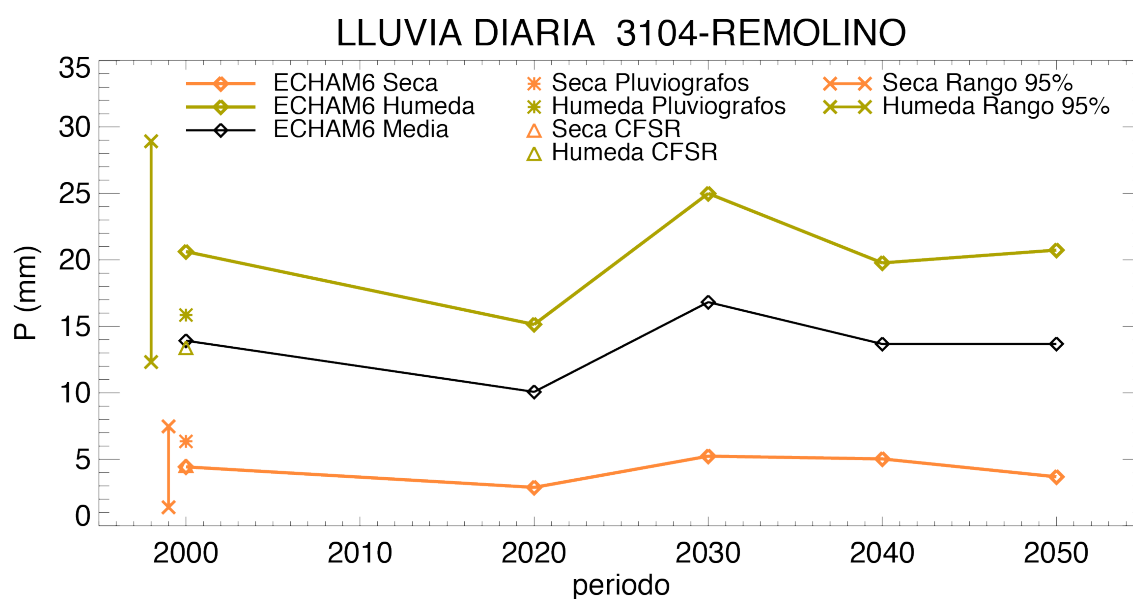


Figura 12. Evolución de la lluvia diaria media en época seca y húmeda para la cuenca 3104-Remolino.

3.5. Evapotranspiración potencial de cuenca

Al igual que se ha hecho con la lluvia media anual, para cada período analizado se ha calculado la evapotranspiración potencial *ETP* media del período, aplicando el método de Makkink (deducida de las variables de salida del modelo de downscaling climático MPI-ECHAM6, ver "Informe técnico sobre la calibración del modelo hidrológico en las cuencas de estudio" de la Fase II). Las siguientes figuras muestran la evolución temporal de la *ETP* media de cuenca (expresada en términos diarios) para algunas de las cuencas. Los resultados en todas las cuencas se encuentran en el Anejo 4.

En adición a la *ETP* media de cuenca proveniente del modelo climático MPI-ECHAM6, en estas figuras se muestra la misma variable obtenida para el período histórico utilizando la simulación del modelo meteorológico WRF-CFSR.

Al igual que en otros análisis, se ha calculado la desviación típica (σ) asociada a los valores anuales de *ETP* del período histórico (10 años). Con estos datos se ha obtenido el intervalo de confianza del 95% ($\pm 2\sigma$).

Estas figuras muestran cambios poco importantes de la evapotranspiración potencial en los escenarios futuros, y parecen poder ser explicados a partir de la cantidad de lluvia recibida durante el período analizado. De este modo, parece que la disminución de *ETP* producida en el período 2028-2032 tendría una relación directa con un incremento de la lluvia durante el mismo período. Por otra parte, la variación interanual del período histórico (estimada por el intervalo de confianza del 95%) es claramente superior a la observada entre las medias obtenidas en cada escenario.

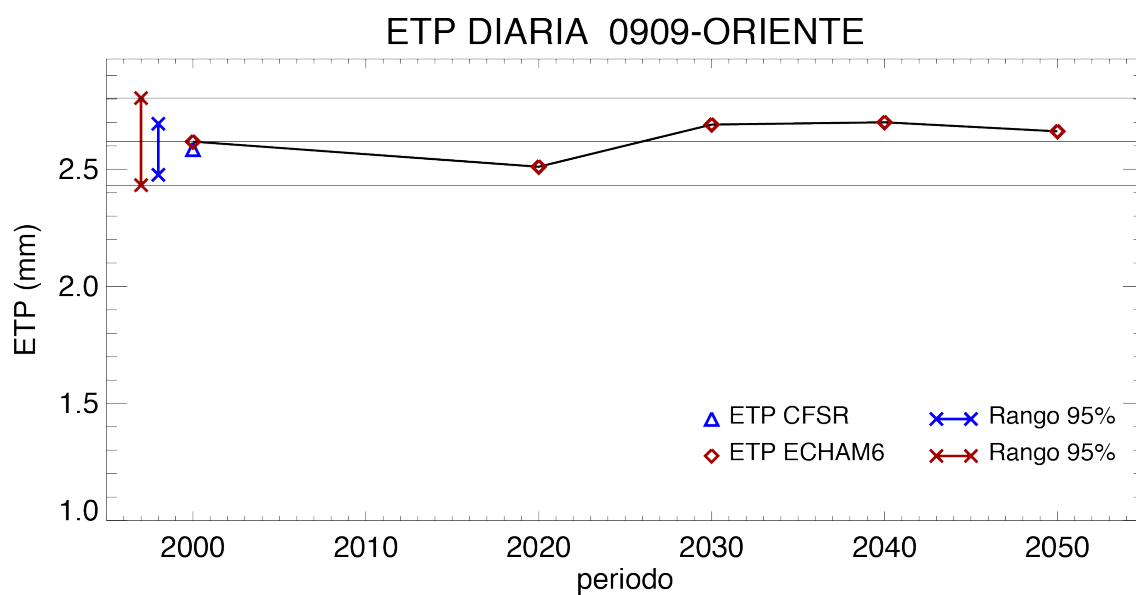


Figura 13. Evolución de la *ETP* diaria media para la cuenca 0909-Oriente.

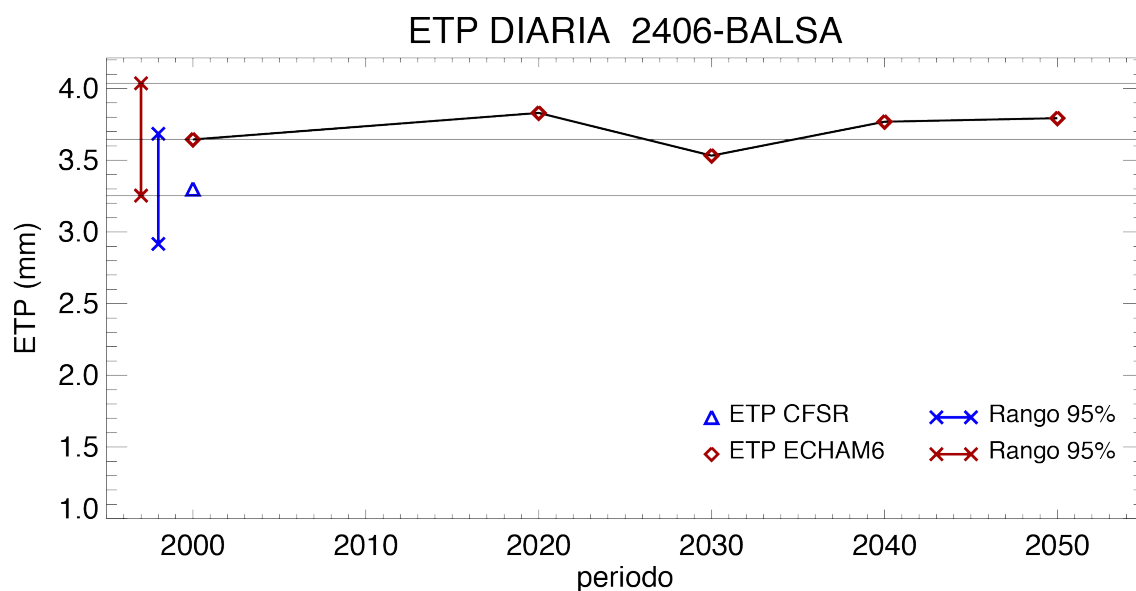


Figura 14. Evolución de la *ETP* diaria media para la cuenca 2406-Balsa.

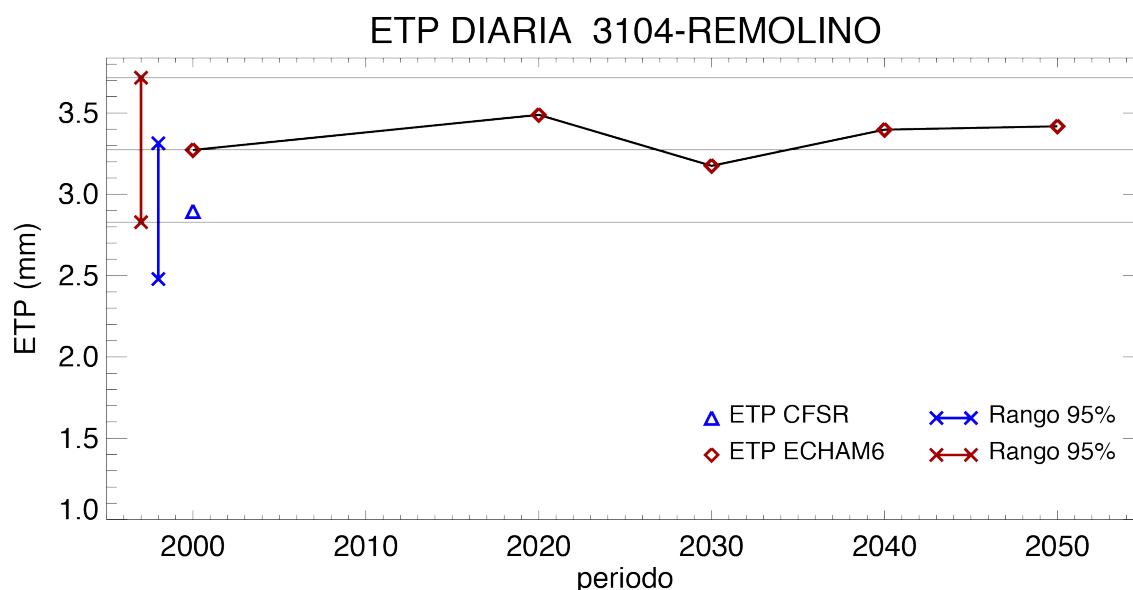


Figura 15. Evolución de la *ETP* diaria media para la cuenca 3104-Remolino.

4. Impacto hidrológico en base a caudales

4.1. Metodología de análisis

La manera de analizar los cambios en el régimen de caudales de una cuenca ha sido introducido en el "Informe técnico sobre la calibración del modelo hidrológico en las cuencas de estudio" de la Fase II. Allí se usaba la curva de caudales clasificados para caracterizar el régimen de caudales. Recordemos que esta curva proporciona, de manera sintética, información de los días del año en que se espera un caudal superior a uno dado.

Además, dentro de la curva de caudales clasificados se definía un rango de días válidos (entre 30 y 360), que representaba una aproximación del tramo de interés de la curva: la que determina el volumen turbinable a lo largo de un año. Este volumen turbinable se calcula a partir del área limitada debajo de la curva (Figura 16), teniendo en cuenta que los caudales menores a Q_{min} (asociado a 360 días) no pueden ser turbinados, y que el caudal máximo a turbinar es Q_{max} (asociado a 30 días).

El volumen turbinable anual así definido será el valor que sintetizará el régimen de caudales en cada período de tiempo y en cada una de las cuencas estudiados.

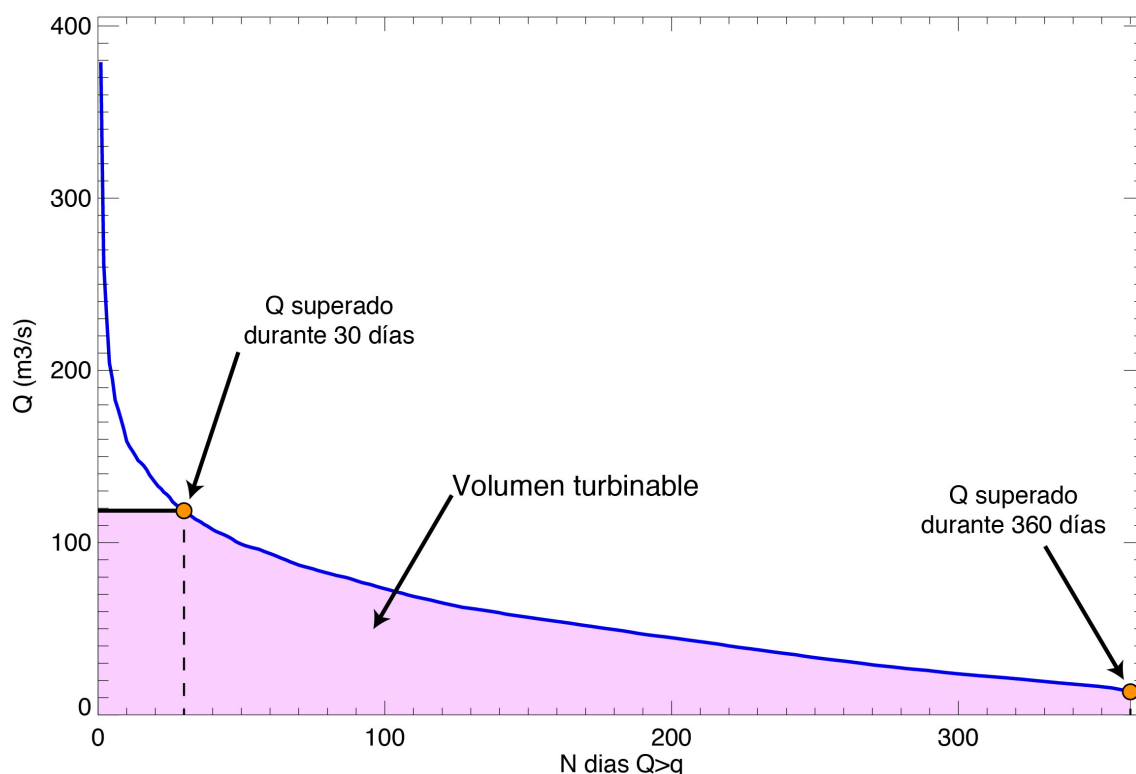


Figura 16. Cálculo del volumen turbinable anual a partir de una curva de caudales clasificados, asociando el rango válido de caudales a los días 30 y 360.

4.2. Curvas de caudales clasificados para escenarios futuros

A continuación se muestran las curvas de caudales clasificados obtenidas en 3 de las cuencas, a partir de caudales simulados usando los diferentes escenarios climatológicos simulados por el modelo climático MPI-ECHAM6. El resto de resultados se incluye en el anejo 5.

A la vista de los resultados, el período 2030 se presenta muy húmedo, con caudales sistemáticamente superiores a la referencia (línea verde, período histórico), mientras que el período 2020 se presenta considerablemente seco. 2040 y 2050 se presentan con un régimen de caudales similares a los período histórico, algo superiores.

Estas observaciones no son de aplicación en las cuencas 0909-Oriente y 0912-Balsa, puesto que todas las curvas obtenidas son bastante similares, aunque normalmente se refleja un régimen de caudales ligeramente superior en todos los escenarios futuros.

En general, se observa una marcada tendencia a reproducir el patrón dado por la lluvia anual, que ofrece un decremento importante para el período 2020 y un aumento también considerable en 2030.

En todo caso, estas afirmaciones son genéricas a partir de la observación de las curvas de caudales clasificados. En algunos casos se observan matices en la forma de estas curvas, que permiten pensar que el régimen de caudales se modifica no sólo en proporción, si no que existe también un cambio temporal (incremento del estiaje, por ejemplo). Esto será analizado más adelante.

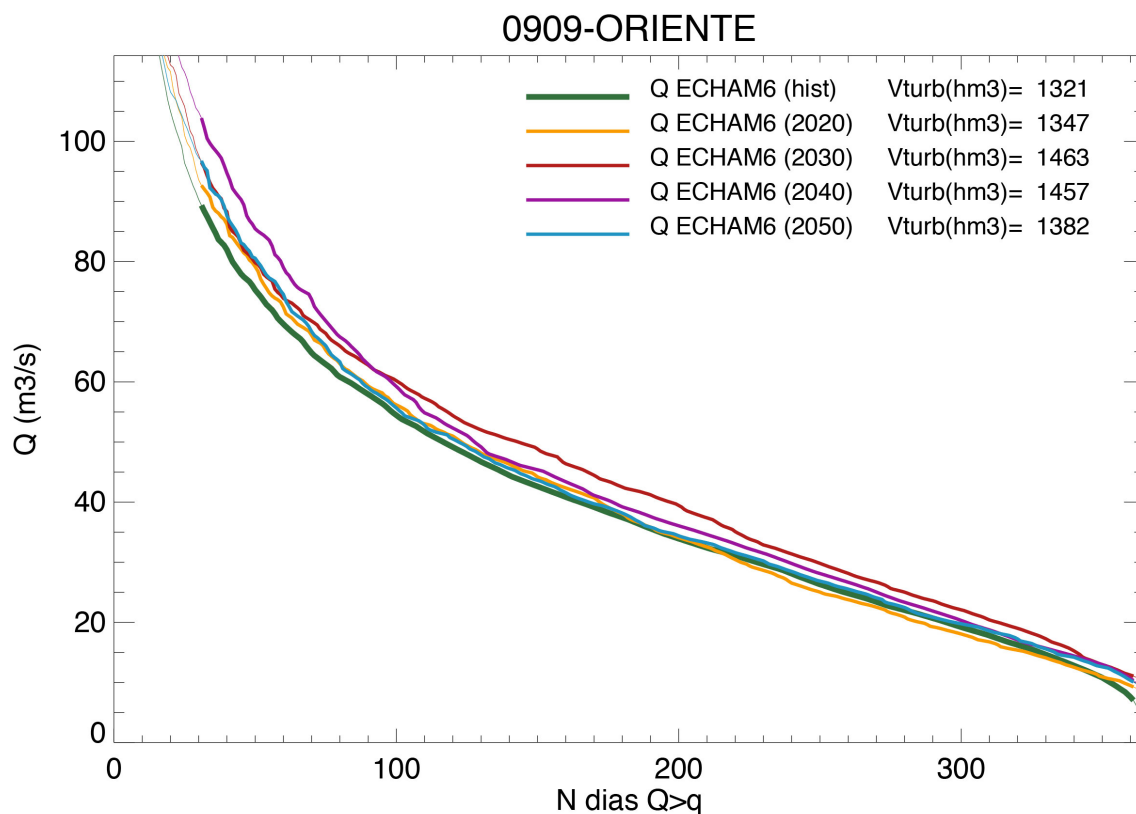


Figura 17. Curvas de caudales clasificados usando los escenarios climático MPI-ECHAM6, para la cuenca 0909-Oriente.

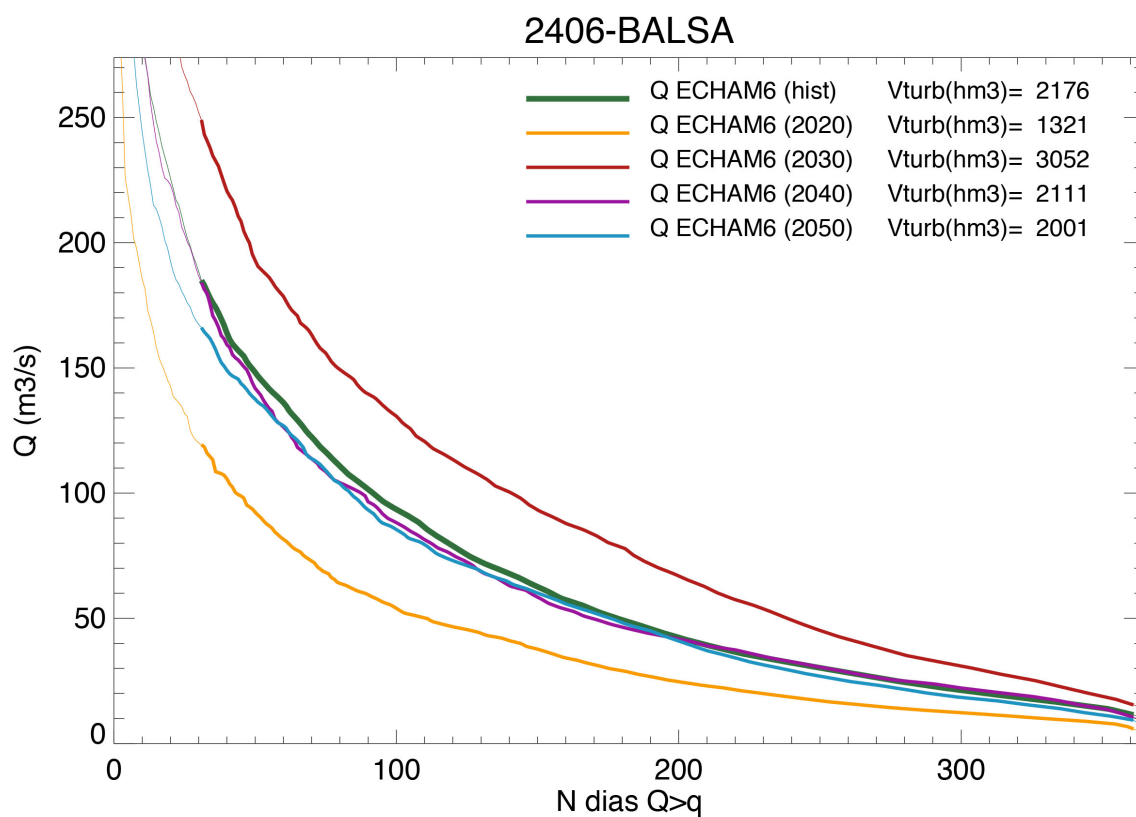


Figura 18. Curvas de caudales clasificados usando los escenarios climático MPI-ECHAM6, para la cuenca 2406-Balsa.

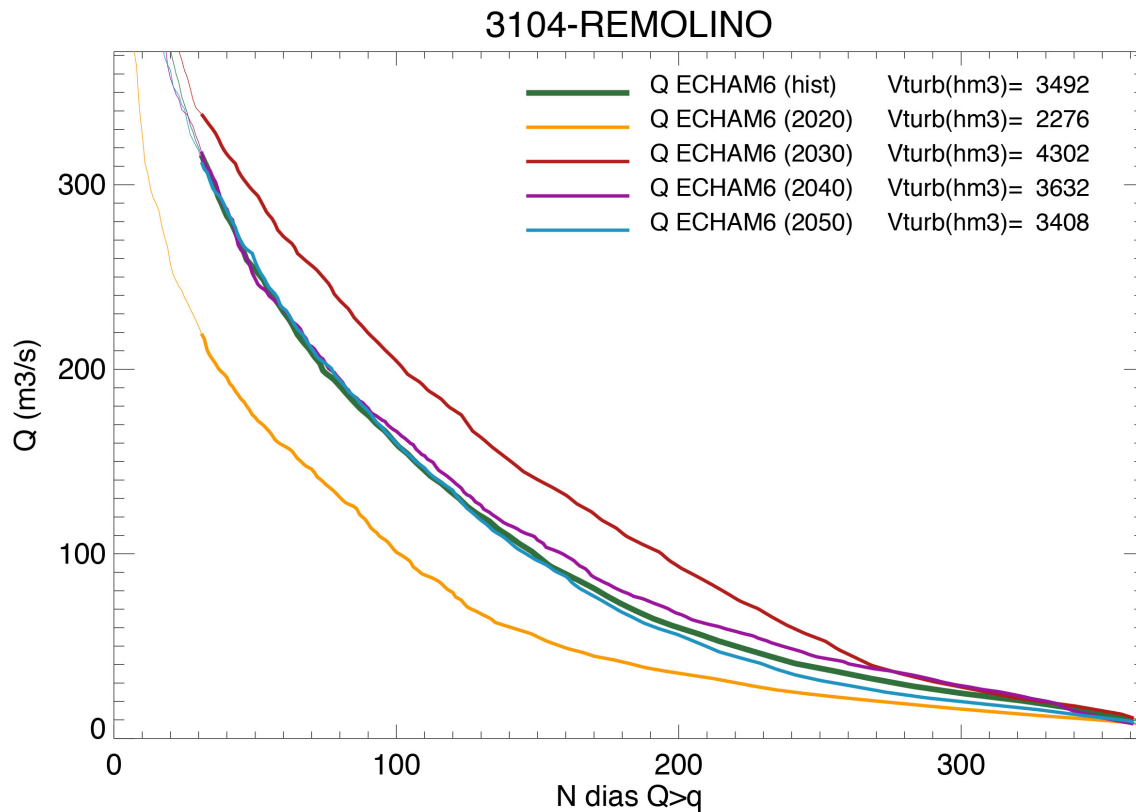


Figura 19. Curvas de caudales clasificados usando los escenarios climático MPI-ECHAM6, para la cuenca 3104-Remolino.

4.3. Evolución del volumen turbinable anual

Se ha calculado el volumen turbinable anual a partir de las curvas de caudales clasificados asociadas a los caudales simulados en cada período analizado. Las siguientes figuras muestran la evolución temporal del caudal turbinable para las 3 cuencas escogidas. Los resultados en todas las cuencas se encuentran en el Anejo 6.

La referencia para evaluar el impacto producido por el Cambio climático es el volumen turbinable obtenido a partir de la simulación del modelo climático MPI-ECHAM6 en el período histórico. Ahora bien, buscando la completitud, se muestran también los valores asociados a los caudales observados y caudales simulados usando variables de entrada procedentes de WRF-CFSR, que han sido utilizados para la calibración del modelo hidrológico. Precisamente porque ha existido un ajuste del modelo hidrológico en base a caudales observados, los valores asociados a WRF-CFSR son prácticamente idénticos a los asociados a caudales observados.

Con el propósito de asignar un intervalo de confianza probabilístico a los volúmenes turbinables del período histórico (10 años hidrológicos completos), se ha calculado el volumen turbinable de cada año (a partir de los caudales de ese año). Con esos datos se ha obtenido la desviación típica (σ), y se ha construido un intervalo de confianza aproximado alrededor de la media dado por $\pm 2\sigma$, que en una función de probabilidad normal corresponde al 95%.

Estas figuras muestran una evolución del caudal turbinable muy relacionada con la evolución de la lluvia anual de cada período. Para cada cuenca, existe una semejanza muy clara entre estas figuras y las obtenidas en el apartado 3.2 correspondientes a la evolución de la lluvia anual.

Por otra parte, a la vista de la variabilidad interanual estimada por el intervalo de confianza del 95% en el período histórico (en particular la proporcionada por los resultados del modelo climático MPI-ECHAM6), se puede pensar que las diferencias observadas en los escenarios futuros (incluso en los escenarios 2020 y 2030) pueden ser en buena parte explicadas por la propia variabilidad interanual (están dentro del intervalo de confianza de la variabilidad interanual).

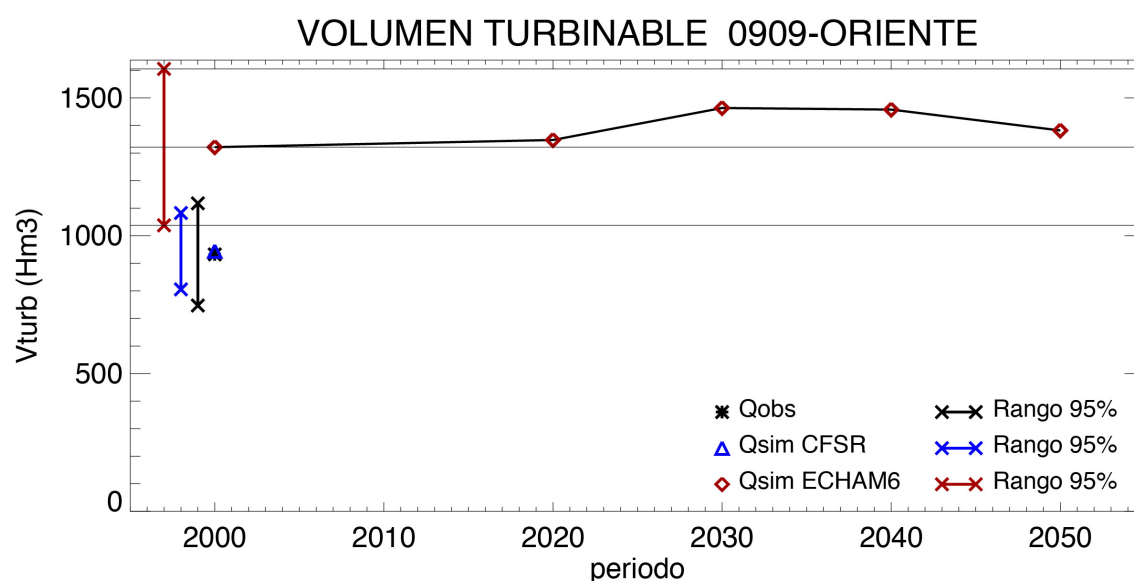


Figura 20. Evolución del volumen turbinable anual en la cuenca 0909-Oriente.

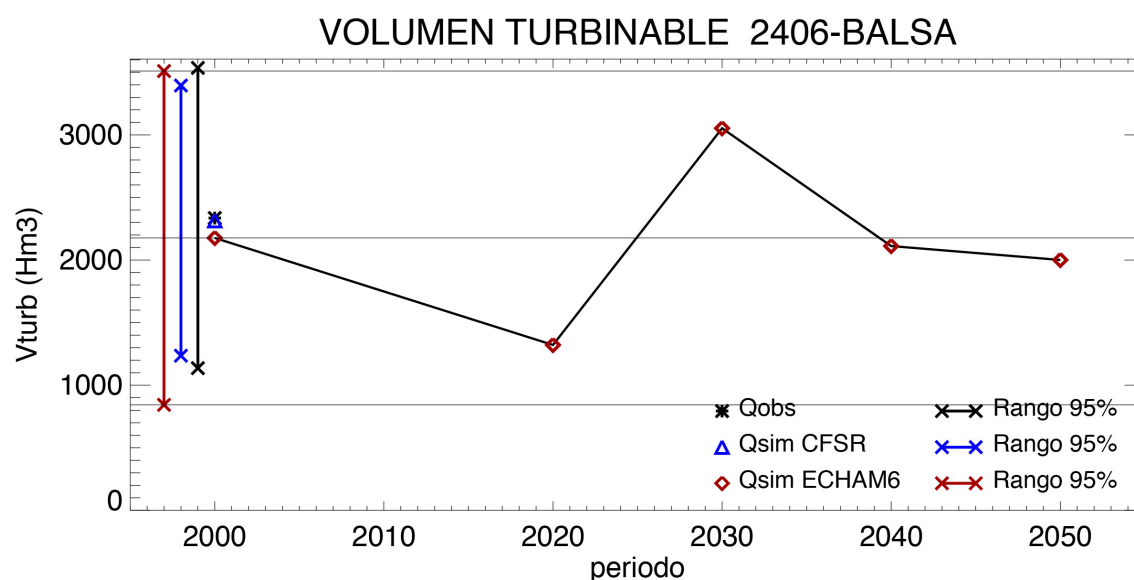


Figura 21. Evolución del volumen turbinable anual en la cuenca 2406-Balsa.

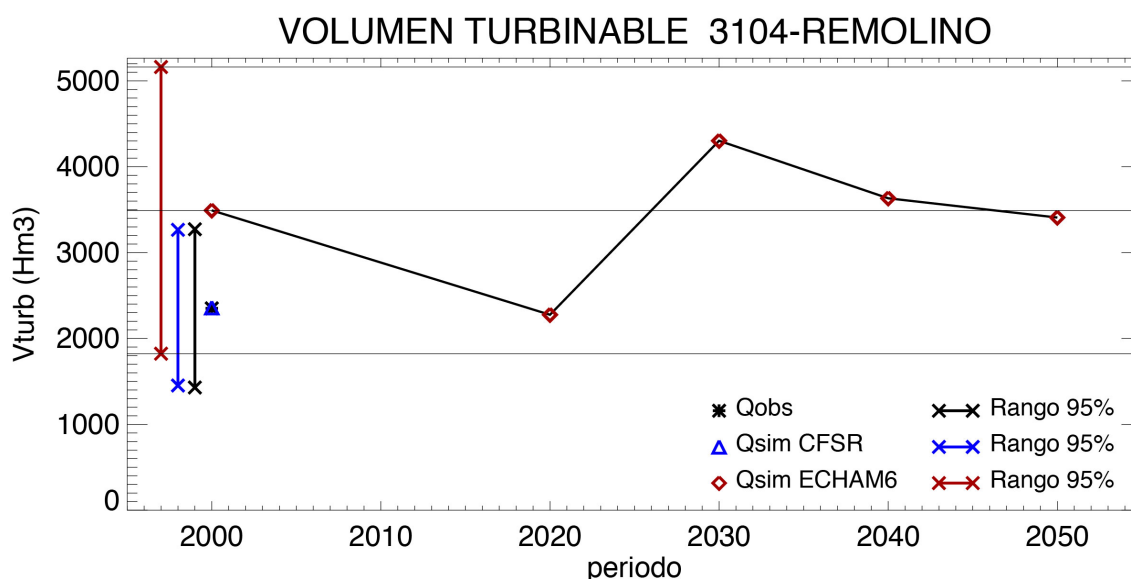


Figura 22. Evolución del volumen turbinable anual en la cuenca 3104-Remolino.

4.4. Evolución del caudal turbinable para época seca y época húmeda

Para analizar el diferente comportamiento de los caudales en época seca y época húmeda, se ha hecho un estudio similar al llevado a cabo con la lluvia (apartado 3.4). Al igual que en ese análisis, se ha tomado como indicador de estacionalidad el mes (ciertos meses han sido asignados a época seca, el resto a época húmeda). Aunque en el proceso de transformación de lluvia en escorrentía superficial existe una cierta inercia que lleva a que la separación entre época seca y húmeda sea todavía menos marcada que en el caso de la lluvia, con los caudales se ha seguido el mismo procedimiento de separación utilizado con la lluvia (misma definición de ambos periodos).

En adición a los resultados obtenidos usando los caudales simulados con las salidas del modelo climático MPI-ECHAM6, se incluyen los valores asociados a los caudales observados y caudales simulados con las salidas del modelo meteorológico WRF-CFSR para el período histórico. Además, de manera similar a otros apartados, también se incluye el intervalo de confianza asociado al 95% para el período histórico de referencia (por claridad, sólo para el caso del modelo climático MPI-ECHAM6).

Para que las unidades sean coherentes, el volumen turbinable se ha expresado en términos de caudal medio a lo largo de cada época. A continuación se muestran los resultados en las 3 cuencas escogidas. Los resultados en todas las cuencas se encuentran en el Anejo 7.

En la mayoría de cuencas se observa una diferencia importante entre el régimen de caudales de la época seca y la época húmeda, pero esta diferencia es menor que en términos de lluvia. Curiosamente, en la cuenca FCB1-Cariblanco la época seca suele ofrecer caudales mayores que la época húmeda. Esto es debido a que en las simulaciones del modelo climático MPI-ECHAM6 existen episodios de lluvia importantes durante el mes de diciembre (definido dentro de la época seca), cuya

influencia sobre los caudales se traslada durante un mayor período dentro de la época seca.

No se observa un comportamiento diferente en la evolución de estos caudales turbinables, dependiendo de si la época es seca o húmeda.

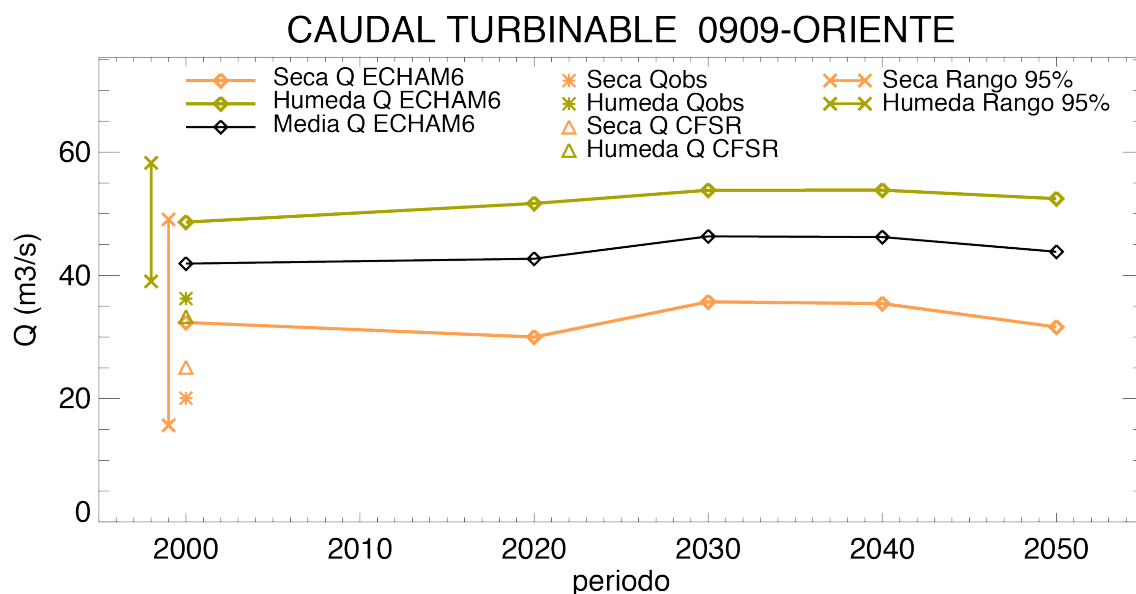


Figura 23. Evolución del caudal turbinable medio para época seca y época húmeda en la cuenca 0909-Oriente.

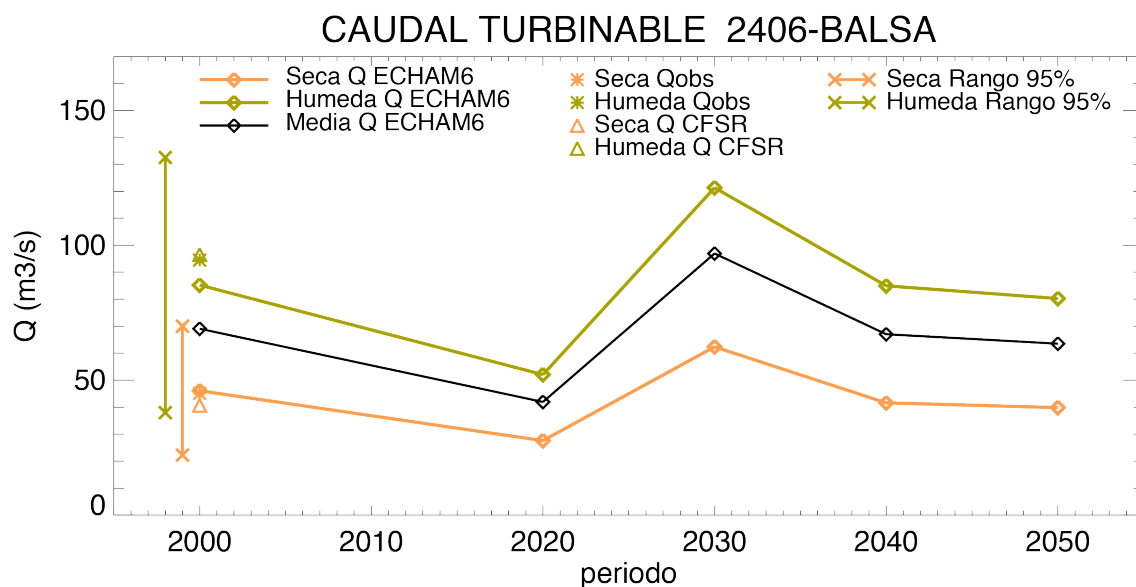


Figura 24. Evolución del caudal turbinable medio para época seca y época húmeda en la cuenca 2406-Balsa.

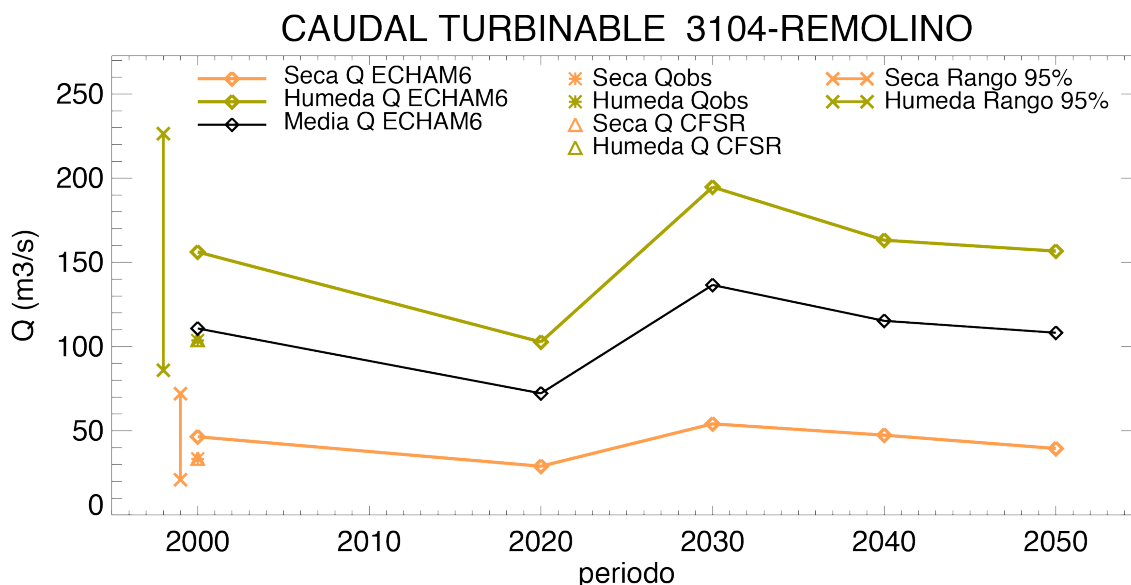


Figura 25. Evolución del caudal turbinable medio para época seca y época húmeda en la cuenca 3104-Remolino.

4.5. Evolución del caudal turbinable para caudales altos y caudales bajos

El análisis anterior (apartado 4.4) ha mostrado que existen diferencias notables entre el régimen de caudales de entre época seca y el régimen de época húmeda. Ahora bien, no ha permitido deducir que existan diferencias entre ellas por lo que respecta al impacto inducido por el Cambio Climático: la evolución sigue el mismo patrón temporal, y parece directamente relacionada con la lluvia anual de cada escenario analizado.

Otra manera de separar el régimen de caudales consiste en dividir la curva de caudales clasificados en dos zonas: la zona de caudales altos (zona izquierda) y la zona de caudales bajos (zona derecha). Aunque los caudales altos no tienen porque darse en la época húmeda, y los caudales bajos no tienen porque darse en la época seca, esta separación puede ilustrar si el régimen de caudales varía en los escenarios futuros. En particular, es interesante observar si los estiajes son más pronunciados.

Para separar la zona de caudales altos de la zona de caudales bajos, dentro de la curva de caudales clasificados se ha definido un día límite, fijado en 195. Este valor obedece a la media entre los dos días límites fijados para definir el volumen turbinable (30 y 360 días).

En adición a los resultados obtenidos usando los caudales simulados con las salidas del modelo climático MPI-ECHAM6, se incluyen los valores asociados a los caudales observados y caudales simulados con las salidas del modelo WRF-CFSR para el período histórico. Además, de manera similar a otros apartados, también se incluye el intervalo de confianza asociado al 95% para el período histórico de referencia (por claridad, sólo para el caso del modelo climático MPI-ECHAM6).

A continuación se muestran los resultados en las 3 cuencas. Además, para clarificar las diferencias respecto al período histórico de referencia, se han mostrado otras figuras donde la variable representada es la diferencia respecto al caudal turbinable obtenido en

el período histórico. Los resultados del resto de cuencas se muestran en el Anejo 8 y Anejo 9.

En varias cuencas se observa que mientras el caudal turbinable asociado a caudales altos se incrementa en escenarios futuros, el caudal turbinable asociado a caudales bajos se incrementa muy poco, o incluso es menor al del período histórico. Esto sucede principalmente para el escenario 2050 (por ejemplo, en 0922-Tapantí y F001-Toro1). Ahora bien, no se trata de un fenómeno sistemático, y además su magnitud es insignificante respecto a los cambios observados entre diferentes escenarios futuros, por lo que no es posible derivar ninguna conclusión destacable.

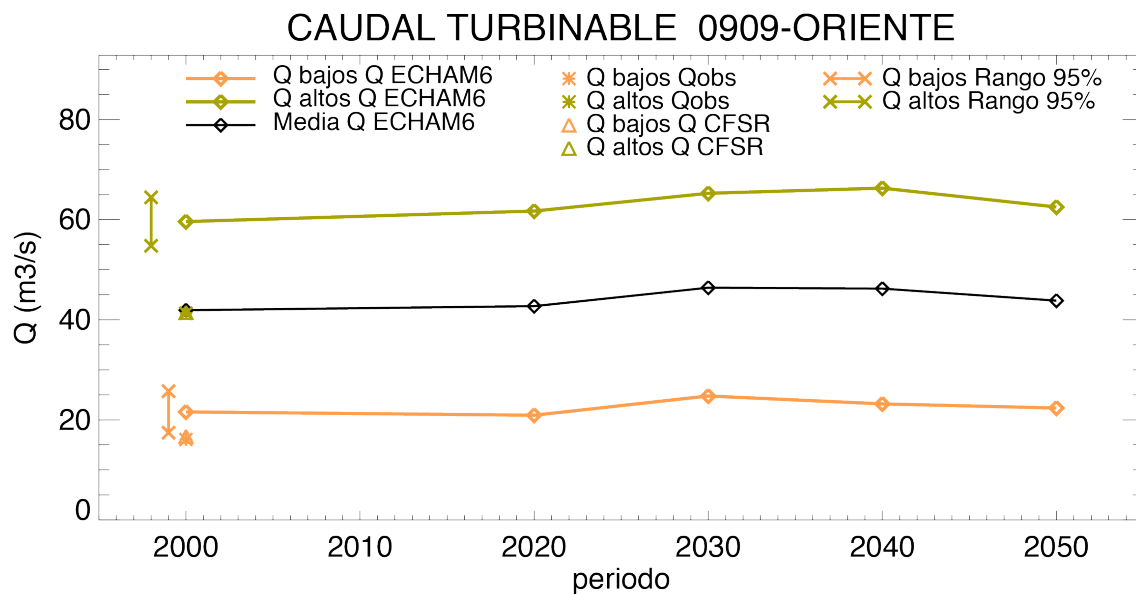


Figura 26. Evolución del caudal turbinable medio para caudales bajos y caudales altos en la cuenca 0909-Oriente.

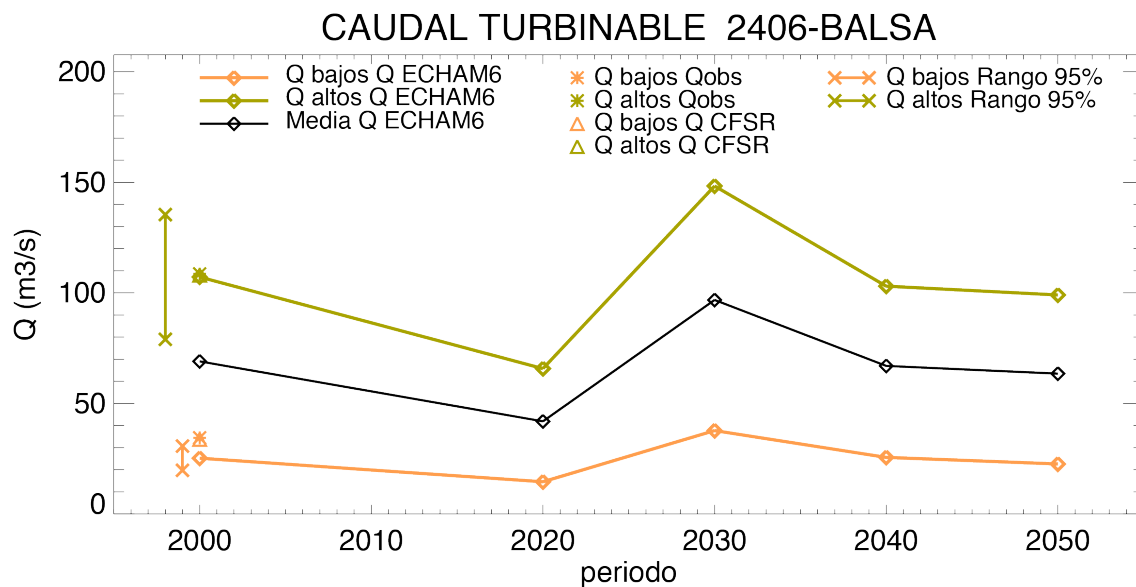


Figura 27. Evolución del caudal turbinable medio para caudales bajos y caudales altos en la cuenca 2406-Balsa.

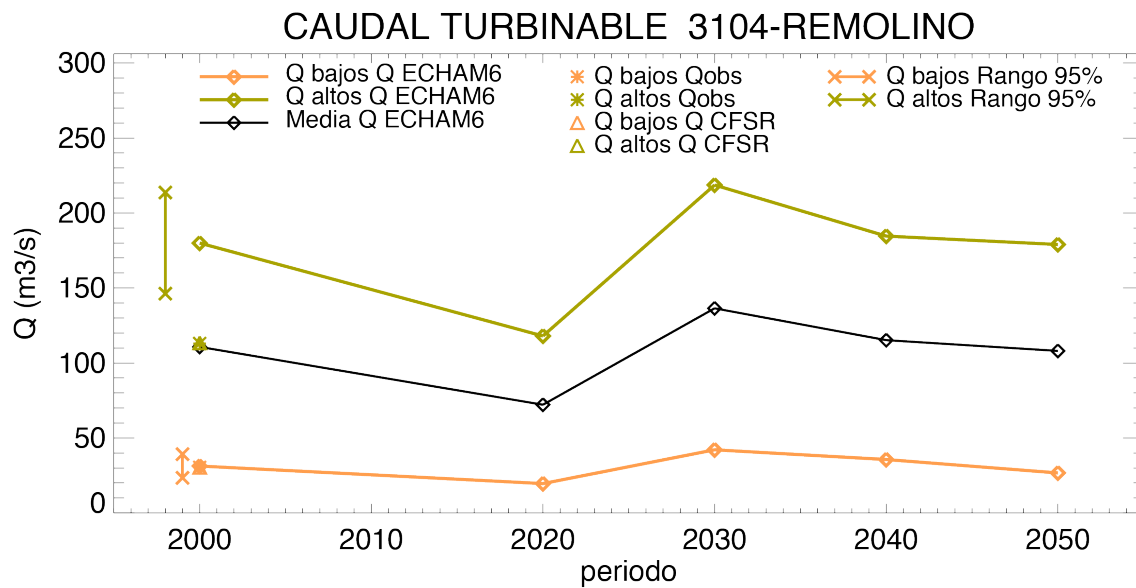


Figura 28. Evolución del caudal turbinable medio para caudales bajos y caudales altos en la cuenca 3104-Remolino.

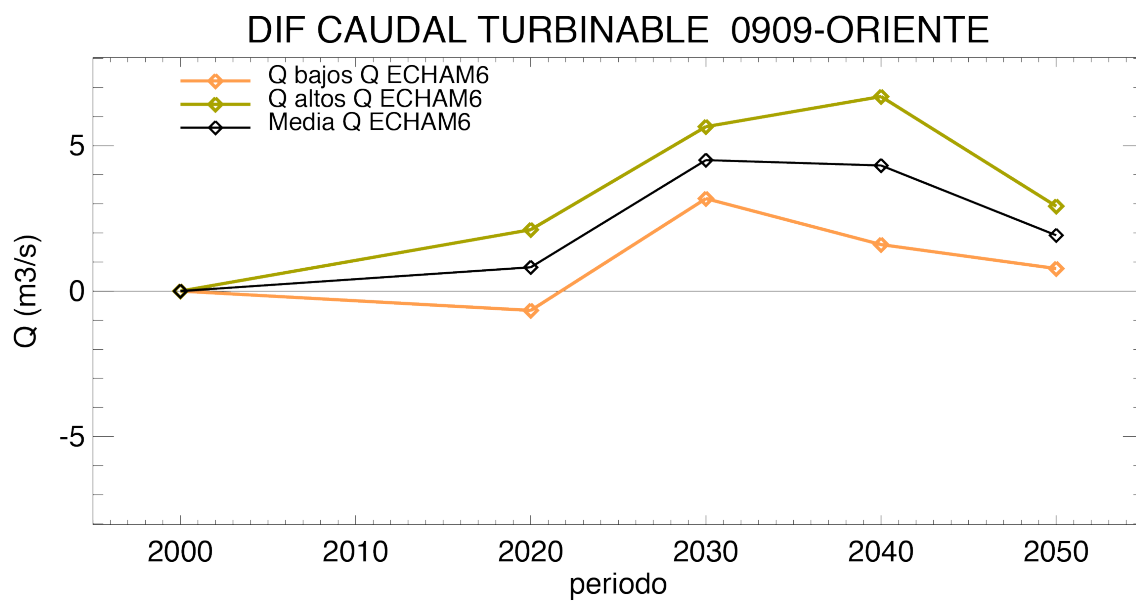


Figura 29. Evolución del caudal turbinable medio para caudales bajos y caudales altos en la cuenca 0909-Oriente. Diferencia respecto al período histórico.

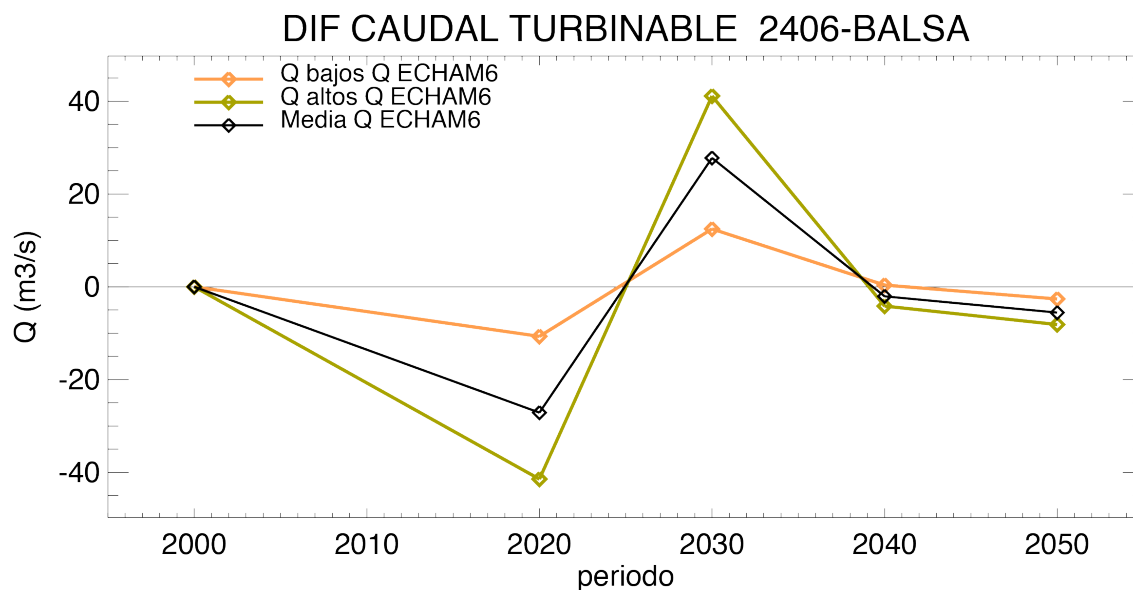


Figura 30. Evolución del caudal turbinable medio para caudales bajos y caudales altos en la cuenca 2406-Balsa. Diferencia respecto al período histórico.

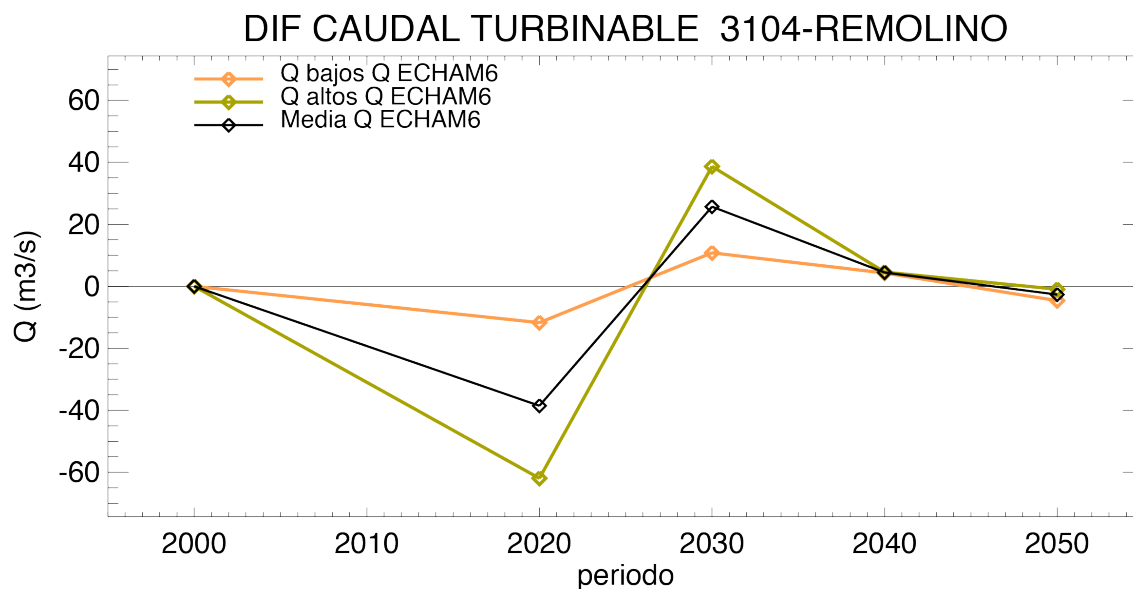


Figura 31. Evolución del caudal turbinable medio para caudales bajos y caudales altos en la cuenca 3104-Remolino. Diferencia respecto al período histórico.

4.6. Evolución del caudal turbinable por períodos mensuales

Finalmente, se ha realizado el análisis mensual de los caudales turbinables. Para cada mes del año, se ha calculado la media del caudal turbinable dentro de los días de cada período que cumplen la condición de pertenecer al mes dado. En cada cuenca, el caudal máximo y el caudal mínimo turbinable se ha obtenido de la curva de caudales clasificados de cada el período o escenario analizado, teniendo en cuenta el criterio de 30 días (Q_{max}) y 360 días (Q_{min}).

Las siguientes figuras muestran los resultados obtenidos en las tres cuencas de ejemplo seleccionadas. Los resultados en todas las cuencas se encuentran en el Anejo 10. Por motivos de claridad, en estas figuras sólo se incluyen los valores asociados al modelo climático MPI-ECHAM6.

Estas figuras de caudal turbinable mensual presentan cierta similitud con las figuras de lluvia media mensual (apartado 3.3). Ahora bien, el caudal turbinable mensual mantiene un patrón mucho más claro, dado por la época del año a la que pertenece. Esto obedece a que el régimen de caudales tiene una inercia temporal mucho mayor que la lluvia (si es que ésta tiene alguna). Por poner un ejemplo, aunque la lluvia asociada a un determinado mes sea particularmente pequeña en relación a la media (o a la referencia del período histórico), si en los meses antecedentes al analizado se ha dado una precipitación dentro de lo normal para esos meses, el régimen de caudales del mes analizado va a estar dentro del rango habitual: caudales altos en mes de época húmeda, caudales bajos en mes de época seca.

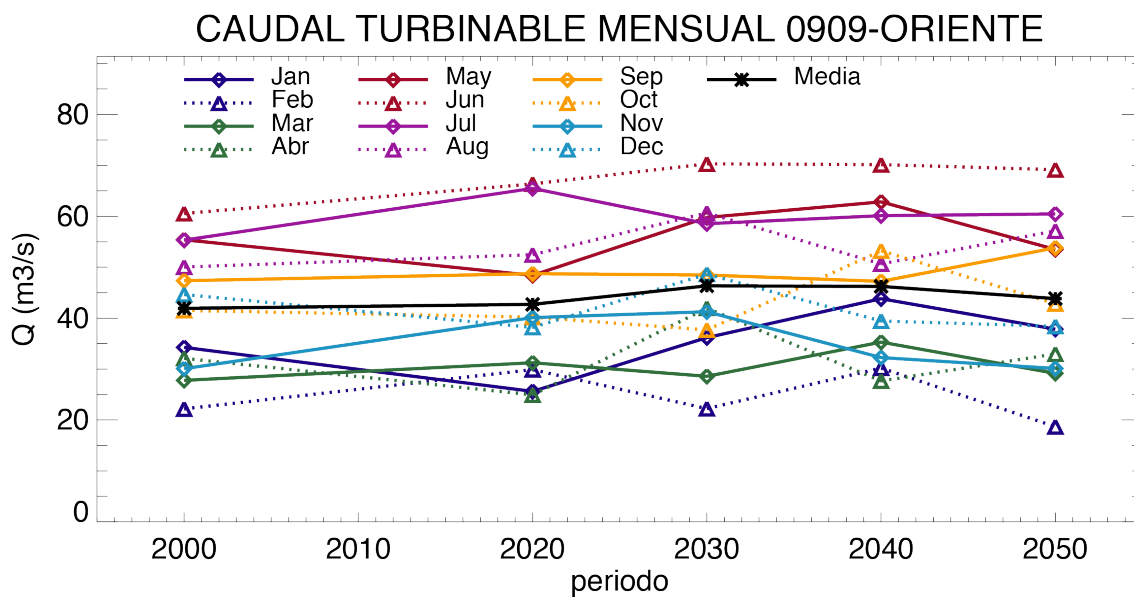


Figura 32. Evolución del caudal turbinable medio mensual en la cuenca 0909-Oriente.

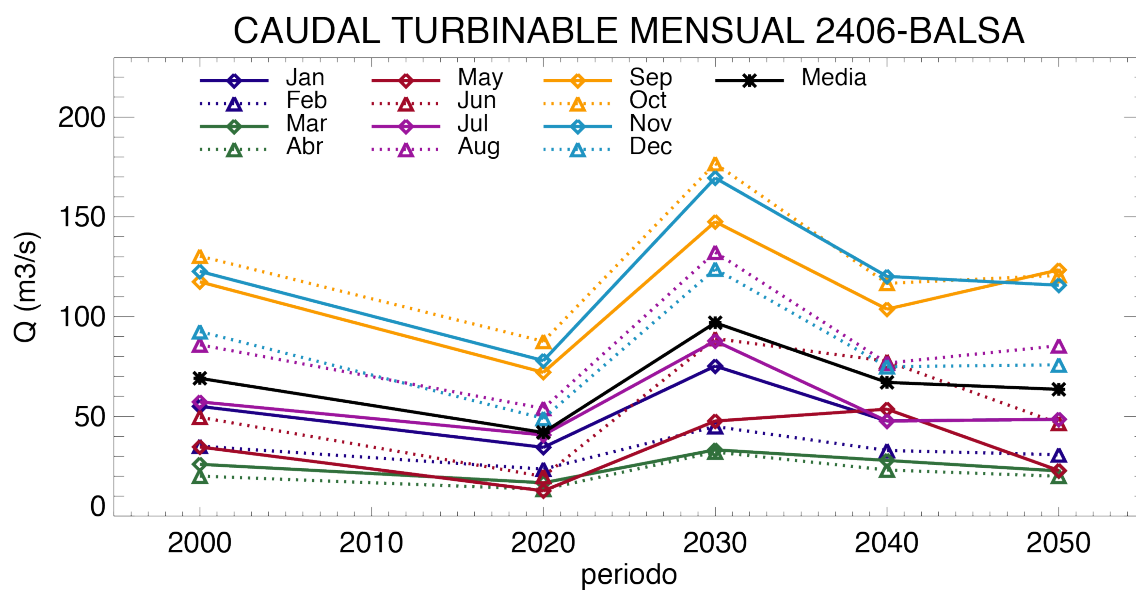


Figura 33. Evolución del caudal turbinable medio mensual en la cuenca 2406-Balsa.

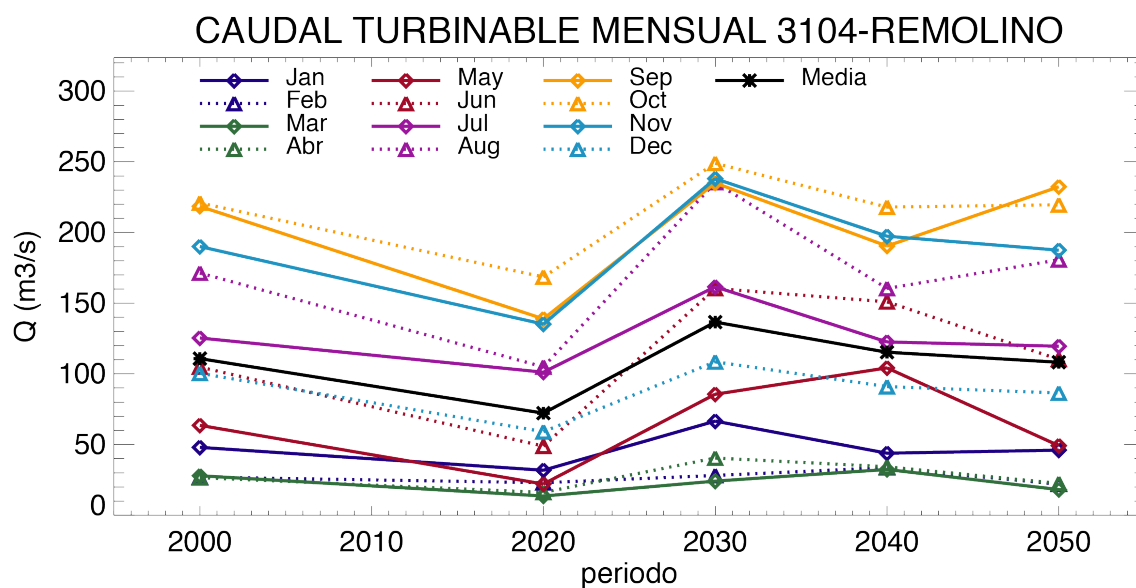


Figura 34. Evolución del caudal turbinable medio mensual en la cuenca 3104-Remolino.

5. Conclusiones

Los análisis realizados muestran una tendencia poco clara en la evolución del potencial hidroeléctrico de Costa Rica debida al Cambio Climático, hasta el año 2050.

De manera extensiva a la mayoría de cuencas analizadas, los modelos meteorológicos utilizados producen simulaciones que indican un decremento de la precipitación media en el escenario 2018-2022, y un incremento importante en el escenario 2028-2032, siendo las variaciones poco importantes en los otros dos escenarios futuros estudiados (2038-2042 y 2048-2052).

En relación a la evapotranspiración potencial estimada a partir de variables de salida de los mismos modelos meteorológicos, no se observa ningún cambio remarcable en los escenarios futuros.

Una vez transformadas las variables climáticas en una variable que representa el potencial de generación hidroeléctrica de una cuenca (el volumen turbinable anual), se ha observado que la evolución temporal muestra un patrón muy similar al obtenido con la lluvia anual. Por tanto, es un patrón que se puede considerar con muy poco cambio y que proporciona valores muy cercanos a la referencia histórica para los escenarios futuros más alejados en el tiempo.

Además, la propia variación interanual de las variables analizadas (lluvia o volumen turbinable), puede explicar buena parte de las diferencias observadas en escenarios futuros.

Los análisis realizados mediante una separación entre época seca y época húmeda, o caudales altos y caudales bajos, no aportan ninguna evidencia de que en el futuro exista un cambio de comportamiento remarcable debido al Cambio Climático. Las épocas secas tendrán un comportamiento similar, las épocas húmedas también. Tampoco hay evidencias para afirmar que en el futuro vaya a existir una tendencia a aumentar los extremos del régimen de caudales, sea por puntas de caudal mayores, o por períodos de caudales bajos más prolongados.

Así, el estudio presente no aporta ninguna evidencia que el Cambio Climático vaya a alterar el régimen de caudales en el futuro (hasta 2050), en ninguna de las cuencas estudiadas en Costa Rica.

Por lo que la principal conclusión es que la propia variación iter-anual dentro del periodo histórico e intra-anual, debido a las épocas secas y húmedas, implica una variación en el régimen de los caudales y en la disponibilidad de potencia de generación hidroeléctrica muy superior a la variabilidad que los modelos climáticos anticipan para Costa Rica en el horizonte aquí estudiado.

De hecho, el estudio confirma que en términos de lluvias medias sobre cuencas intermedias o grandes, y sobre su régimen de caudales la variabilidad esperable es inferior a la que ya se observa (intra-anual e interanual).

Como conclusión se puede sugerir que si el ICE tiene medidas y recursos para resistir durante la época seca que actualmente caracteriza el clima de Costa Rica, está preparado para adaptarse a la situación climática esperable durante los próximos 35 años.

6. Referencias

- Dubrule, O. (1984). Comparing splines and kriging. *Computers and Geosciences*, **10**: 327-338.
- Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Ambiente y Energía. Integración de actividades y estudios de seguridad energética (énfasis en generación hidroeléctrica) ante el Cambio Climático. 157 pag.