



**MEMORIA DE ACTUACIÓN.
DESCRIPCIÓN DE LAS
ACTIVIDADES REALIZADAS
DENTRO DEL PROYECTO:**

**“Análisis del impacto del
cambio climático sobre
especies piscícolas y
ecosistemas fluviales
(AICCEPEF)”**

ÍNDICE

1. Introducción
 - 1.1. Antecedentes
 - 1.2. Objetivos del proyecto

2. Metodologías empleadas
 - 2.1. Metodología FIC (Regionalización Estadística)
 - 2.2. Diseño del modelo termométrico

3. Resultados
 - 3.1. Selección del área de estudio y recogida de datos de las variables meteorológicas de temperatura y precipitación.
 - 3.2. Cálculo de los parámetros característicos de cada río.
 - 3.3. Proyecciones de escenarios de clima futuro
 - 3.4. Contraste de los resultados con los requerimientos térmicos de la especie indicadora elegida (trucha común) y evaluación de la evolución de su hábitat.
 - 3.5. Valoración final de resultados de las proyecciones.
 - 3.6. Identificación de otros factores intervinientes en la regulación térmica de los ríos.
 - 3.7. Análisis de la relevancia de los factores identificados en los ríos en estudio.
 - 3.8. Análisis de las posibilidades de manipulación de dichos factores, y evaluación de la eventual eficacia del manejo de los mismos.
 - 3.9. Diseño de un plan de medidas y guía para su selección e implementación.

4. Conclusiones
5. Bibliografía

ABSTRACT

Los ríos representan unas de las mayores fuentes de biodiversidad del planeta. Son ecosistemas frágiles con una gran vulnerabilidad y expuestos a numerosas amenazas. Cambios en sus características determinarán la pervivencia futura de numerosas especies fluviales. Un factor clave de dichas características es la temperatura, que representa el eje central del balance energético. Precisamente una parte significativa de la variabilidad termométrica del agua se explica gracias a los flujos de energía aire-agua, de modo que los ecosistemas fluviales se encuentran sujetos a las variaciones estacionales, y también climáticas. Es justamente en estas últimas donde se ha centrado este trabajo, con el objeto de analizar los posibles cambios futuros que puedan poner en riesgo la existencia de especies como la trucha común (*Salmo trutta*), que se erige como un indicador del estado de estos ecosistemas. Para ello se generaron simulaciones climáticas de alta resolución espacial y temporal usando regionalización estadística, de temperatura de ríos trucheros del centro y sur peninsular con el fin de anticipar estos riesgos y poder diseñar planes de gestión y mitigación para prevenir los efectos negativos sobre las comunidades de organismos de aguas frías. Los resultados muestran que el cambio climático podría calentar el agua de las zonas más bajas pudiendo reducir sensiblemente la viabilidad de algunas poblaciones por la reducción de sus áreas de residencia y eventual aislamiento de poblaciones.

Agradecimientos: este proyecto ha sido apoyado por el Ministerio de Transición Ecológica en la convocatoria de 2018 sobre "Concesión de subvenciones a entidades del tercer sector u organizaciones no gubernamentales que desarrollen actividades de interés general consideradas de interés social en materia de investigación científica y técnica de carácter medioambiental".

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La temperatura del agua es un factor clave en los procesos físicos, químicos y biológicos en ríos y arroyos (Caissie 2006, Webb et al. 2008) y, en consecuencia, ejerce una gran influencia sobre el éxito biológico de los peces y otros organismos acuáticos (Wootton 1990, Jobling 1995, Nukazawa et al. 2011). La temperatura es uno de los principales rasgos del nicho ecológico de las especies poiquilotermas (e.g., Angilletta 2009, Finstad et al. 2011, Magnuson y Destasio 1997, Santiago et al. 2016, Wehrly et al. 2003): la temperatura del agua, más allá de ser un mero condicionante fisiológico, es una característica del hábitat, un eje del nicho multidimensional que ocupa una especie en alguna o en todas las fases de su desarrollo (Magnuson et al. 1979). La temperatura es clave en el balance energético de los peces, afectando a la tasa de ingesta de alimento, la tasa metabólica y el rendimiento del crecimiento (Forseth y Jonsson 1994, Elliott et al. 1995, Elliott y Hurley 1999, 2001, Elliott y Allonby 2013, Forseth et al. 2009). La temperatura está también implicada en otras muchas funciones tales como el metabolismo de las proteínas (McCarthy y Houlihan 1997), la osmorregulación (McCormick et al. 1997), la maduración reproductiva y la función sanguínea (Jeffries et al. 2012), el ciclo reproductivo (Warren et al. 2012), la gametogénesis (Lahnsteiner y Leitner 2013), la función cardíaca (Vornanen et al. 2014), la expresión génica (Meshcheryakova et al. 2016, White et al. 2012), la susceptibilidad a los contaminantes (Reid et al. 1997), las relaciones ecológicas (Fey y Herren 2014, Hein et al. 2013), el comportamiento de los peces (Colchen et al. 2016) e incluso su “personalidad” (Frost et al. 2013).

El flujo de energía en la interfase aire/agua es uno de los factores más importantes que determinan la temperatura de la superficie de una masa de agua (Edinger et al. 1968). Este flujo de energía es debido a la radiación neta de onda corta (radiación solar) –el componente dominante-, la radiación neta de onda larga, la evaporación, y la convección –frecuentemente inapreciable- (Caissie 2006). Así, la temperatura de un río puede explicarse porque la radiación calienta el agua y su entorno inmediato (lecho fluvial y aire) estableciéndose una estrecha relación entre la temperatura del aire y del agua (Mohseni y Stefan, 1999). Se ha comprobado empíricamente que la temperatura del aire puede explicar con precisión la variabilidad de la temperatura de un río o arroyo (86-96%) (Crisp y Howson 1982). Otros factores importantes se pueden agrupar en: la topografía, el caudal circulante y las características del lecho fluvial (Caissie 2006). Así mismo, en las zonas de cabecera con descargas subterráneas, la temperatura del agua de un río guarda una estrecha relación con la temperatura del agua del acuífero que lo alimenta (O’Driscoll y DeWalle 2006).

La temperatura del agua no es constante y experimenta variaciones a escala diaria y anual. En condiciones de estabilidad atmosférica, las fluctuaciones diarias suelen tener su mínimo alrededor del amanecer, y el máximo a media tarde. En los tramos fríos de cabecera, las variaciones diarias son generalmente pequeñas, incrementándose a medida que el río va haciéndose más grande y menos dominado por las descargas subterráneas y más por las condiciones meteorológicas (Caissie 2006). Las temperaturas del aire y del agua oscilan en paralelo aunque las fluctuaciones del agua presentan un retardo respecto de las fluctuaciones de la temperatura del aire (Stefan y Preud'Homme 1993, Matuszek y Shuter 1996, Stoneman y Jones 1996, Mohseni et al. 1998). La masa de agua también influye sobre su propia estabilidad térmica, ya que la capacidad térmica es función del calor específico y la masa (Stelczer 1987). Esto significa que una masa de agua mayor (un río, un lago mayor) es más termoestable que otra menor. Por debajo de 30°C (temperatura aproximada a la que el calor específico es mínimo), a menor temperatura, mayor calor específico y, consecuentemente, a igual masa, mayor capacidad térmica. Lógicamente, estos efectos están a su vez bajo la influencia de la relación de aumento de superficie expuesta a la atmósfera en relación al aumento de masa (Stefan y Preud'Homme 1993).

En cuanto a las variaciones estacionales, los ríos son generalmente enfriados en verano y calentados en invierno a través de los flujos del lecho fluvial (Caissie y Giberson 2003). Los flujos de calor a través del lecho pueden ser especialmente importantes en otoño debido a un significativo gradiente térmico resultante del calor residual del verano acumulado en el terreno (Alexander et al. 2003). El flujo de calor a través del lecho fluvial es principalmente función del calentamiento geotérmico producido por conducción y la transferencia de calor advectivo por la contribución del agua subterránea y el intercambio hiporreico (Lapham 1989). Su importancia es relativa contra el efecto del intercambio con el aire (Evans et al. 1998), pero puede ser muy significativa para explicar la reducción del rango de variación de la temperatura de un río frente a lo esperado por la sola acción de los principales factores mencionados anteriormente (especialmente la radiación). Salvo que exista influencia geotérmica, la temperatura media del agua subterránea suele encontrarse alrededor de $\pm 1^\circ\text{C}$ la temperatura media anual del aire (Allan 1995).

En condiciones naturales, la temperatura de las aguas corrientes en la zona templada de la Tierra normalmente varía entre 0°C y 25°C , llegando a los 30°C en ríos tropicales (Lewis 2008), y pudiendo rozar los 40°C en ríos de zonas desérticas cálidas (Matthews y Zimmerman, 1990). Temperaturas por encima de estos valores solo se dan de modo natural en aguas volcánicas y manantiales calientes (Meybeck et al. 1996).

La temperatura del aire mostró en todo el mundo una tendencia ascendente durante el pasado siglo, siendo más pronunciada desde principios de los años setenta (Brunet et al. 2007, IPCC 2013). El 5º Informe de Evaluación

(Assessment Report –AR-) del IPCC (IPCC 2013) predice que los aumentos generalizados de temperatura del aire continuarán durante el siglo XXI, y éstos incluirán las áreas de distribución natural de la trucha común en el Oeste Paleártico. Las predicciones para fin de siglo en el área mediterránea y la mayor parte de Europa, muestran incrementos de la temperatura del aire de 4,5°C (hasta 6,0°C en verano) en el peor de los escenarios (RCP 8.5 [IPCC 2013]) y una reducción media de la precipitación de alrededor del 19% (24% en verano). El aumento de la temperatura media anual del aire desde Polonia hacia el Este y el Norte se predice que sea alrededor de los 6,0°C, y 2,5°C en la fachada Atlántica de Europa. Durante el verano el incremento será menos acusado en el Centro y Este de Europa (3,5°C) y más en el área Atlántica (4,5°C). Los cambios en la precipitación anual se harán progresivamente mayores desde el área Mediterránea hacia el Norte, sin que se prevean cambios significativos en latitudes medias de Europa Central, pero aumentando alrededor del 15% en el área Báltica y del 25% en el Ártico Escandinavo. Van Vliet et al. (2013), utilizando el escenario SRES A2 del 4º Informe de Evaluación (AR) del IPCC (Nakicenovic et al. 2000, IPCC 2007), predicen que este incremento afectará a la temperatura de los ríos produciendo un aumento de más de 2,5°C en el Sur de Europa, en el rango de 2,0-2,5°C en Europa Central y Sudeste de la Península Escandinava, y entre 1,0°C y 2,0°C en las Islas Británicas y el resto (la mayor parte) de la Península Escandinava.

Como consecuencia de los cambios descritos, los ecosistemas acuáticos ya han sufrido alteraciones de la temperatura del agua a nivel planetario (e.g., Chessman 2009 –Australia-, Kaushal et al. 2010 –Norte América-, Orr et al. 2015 –Europa-, Chen et al. 2016 –Asia-). El calentamiento del agua se verá acentuado por la reducción de caudal en muchos ríos, como ha sido mostrado por varios autores (Moatar y Gailhard 2006, Pekarova et al. 2008). Los ríos con caudal base bajo son más sensibles al calentamiento (Carlson et al. 2015). Aunque no se espera que aumenten las sequías en un futuro próximo en el área Mediterránea (IPCC 2013), el incremento de la temperatura del aire podría producir un aumento de la evapotranspiración y una reducción del agua disponible en ríos y arroyos. Consecuentemente, el cambio climático incrementará las afecciones a los ecosistemas acuáticos (Webb 1996, Wade 2006, Webb y Nobilis 2007, Woodward et al. 2010, Arismendi et al. 2012) y a la disponibilidad de hábitat para muchas especies de peces debido al aumento de la temperatura y a la reducción de caudal circulante (Hughes 2000, Parmesan 2006). Van Vliet et al. (2013) predicen reducciones del caudal medio en el rango del 25-50% en latitudes del Sur y Centro de Europa (en la parte superior del rango en el Sur, y en la parte inferior del rango en latitudes del Centro, incluidas las Islas Británicas), e incrementos entre el 0% y 25% en la Península Escandinava, que podría incrementarse hasta el 50% en el interior. No obstante, no debe olvidarse que los escenarios climáticos utilizados por van Vliet et al. (2013) son más benignos que los más recientes del 5º Informe de Evaluación del IPCC (2013). Estas

alteraciones pueden afectar especialmente a los peces de agua fría, que han demostrado ser muy sensibles al calentamiento climático (Williams et al. 2015). Por ejemplo, entre los salmónidos, DeWeber y Wagner (2015) encontraron que la temperatura era el determinante más importante de la probabilidad de ocurrencia de la trucha de arroyo (*Salvelinus fontinalis*).

Por otra parte, además de la reducción en la cantidad de agua circulante por los ríos, hay que tener en cuenta el uso consuntivo de agua debido al desarrollo de actividades como la agricultura que, paradójicamente, muestra una tendencia creciente que se reflejará en el incremento del déficit hídrico en la zona Mediterránea (Iglesias et al. 2007) a menos que se adopten medidas técnicas y políticas de adaptación (Iglesias et al. 2011).

Como conclusión provisional, ante todos estos indicios y predicciones regionales cabe apuntar a que las poblaciones de trucha común se pueden ver sometidas a condiciones límite de hábitat térmico y físico (hidráulico) durante el presente siglo en la retaguardia de su área de distribución natural, y que esta circunstancia puede originar cambios en sus patrones geográficos de distribución.

La Fundación para la Investigación del Clima (FIC) ya ha trabajado en proyectos encaminados a evaluar el impacto del cambio climático en materia de hidrología, aunque hasta ahora las investigaciones se han centrado en la evaluación de los cambios esperables en los recursos hídricos.

Así, hemos participado en el Proyecto “Medium & Long-term strategies to manage flooding events in urban & peri-urban areas (SW0801)”, subcontratados por CEAQUA para la generación de escenarios locales de clima futuro con objeto de analizar los impactos del cambio climático sobre la hidrología, y en particular sobre las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (curvas IDF). Fruto de las investigaciones realizadas en ese proyecto surgió una publicación científica, Rodríguez et al. 2013: “Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain)”.

Como consecuencia del éxito de ese proyecto, recientemente hemos participado en uno similar, pero para la Comunidad de Madrid, financiado por el Canal de Isabel II. En este proyecto se han generado también escenarios locales de clima futuro, y actualmente se están utilizando para evaluar sus impactos sobre la hidrología y las curvas IDF.

Igualmente hemos participado en el proyecto “Impacto del cambio climático en las aguas fluviales de la Cuenca del Ebro”, generando también escenarios locales de clima futuro.

De la misma forma participamos en el proyecto “Investigación científica para la evaluación de impactos del cambio climático sobre los ecosistemas fluviales en España, y definición de medidas de adaptación para su protección” (2013) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, centrado en la

evolución futura de ríos adscritos a las cuencas del Duero, Tajo, Mijares y Turia entre otros.

En todo caso, el equipo técnico de la FIC tiene una experiencia de más de 20 años en la generación de escenarios locales de cambio climático para ambas variables (Ribalaygua et al., 2013a), por lo que los antecedentes en este campo son muy extensos, y no se incluyen en aras de la brevedad. Baste decir que la FIC ha generado una parte importante de los escenarios oficiales utilizados en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de España (Brunet et al., 2008), y en particular los utilizados dentro de ese Plan Nacional de Adaptación en los estudios de impactos sobre hidrología (realizados por el CEDEX, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas), y sobre biodiversidad animal (Araujo et al., 2011) y vegetal (Felicísimo et al., 2010).

En materia de ecología fluvial, el equipo adscrito a este proyecto cuenta con una dilatada experiencia investigadora que incluye la participación en los más importantes congresos internacionales y la publicación de sus investigaciones en revistas de primer orden en su disciplina. La trayectoria investigadora de José María Santiago y del Grupo de Investigación de Hidrobiología, surgido del Laboratorio de Hidrobiología de la Escuela Superior de Ingenieros de Montes (Universidad Politécnica de Madrid) se ha desarrollado a lo largo de tres décadas de trabajo sobre los ecosistemas fluviales, particularmente sobre las comunidades de macroinvertebrados y peces y en la dinámica de los sistemas de ribera. Los aspectos aplicados de su investigación se centran en la evaluación de los impactos de la actividad humana en los ríos, en la gestión de la pesca, en el análisis de paisajes fluviales y en la restauración río y riberas. Al final de este documento se adjuntan resúmenes de sus trayectorias investigadoras.

Se combinan por tanto los antecedentes en materia de simulación del clima y de ecosistemas fluviales, para configurar un punto de partida inmejorable para las investigaciones objeto del presente proyecto.

1.2. Objetivos del proyecto

En el proyecto “*Análisis del impacto del cambio climático sobre especies piscícolas y ecosistemas fluviales (AICCEPEF)*” se ha estudiado temperatura de los ríos ubicados en el centro y sur peninsular bajo diferentes proyecciones climáticas a escala local generadas mediante una técnica de *downscaling* estadístico (FICLIMA) a partir de un conjunto de modelos climáticos pertenecientes al *Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5)*.

El **objetivo principal** de la presente investigación es generar **modelos** de **alta resolución** espacial y temporal de la **temperatura de los ríos** analizados del centro y sur peninsular con el objeto de predecir el efecto que el **cambio climático** pueda ocasionar sobre sus **ecosistemas fluviales** y, en particular, en

el **hábitat térmico** para, en consecuencia, poder diseñar planes de gestión y mitigación adecuados para prevenir sus efectos negativos sobre las comunidades de **organismos de aguas frías** y, más específicamente, sobre la trucha común como indicadora del estado de salud de dichas cuencas.

Como **objetivos específicos** dentro del proyecto se han planteado los que se describen a continuación:

➤ **Construir modelos de funcionamiento térmico de los ríos en estudio.**

En un trabajo previo del equipo de investigación que lleva a cabo este proyecto se desarrolló un modelo para relacionar variables meteorológicas sencillas y altamente disponibles, con la temperatura del agua. Fruto de esos trabajos vieron la luz dos artículos científicos en que queda descrito dicho modelo (Santiago *et al.* 2016 y 2017). En este proyecto hemos empleado dicho modelo para el proceso de reconstrucción histórica de la temperatura de los ríos y la extrapolación a futuro de la misma a partir de las predicciones derivadas de los diferentes escenarios de cambio climático.

➤ **Predecir el funcionamiento térmico de dichos ríos en escenario de cambio climático** y el **impacto** que pudieran tener los cambios esperados sobre las especies acuáticas de **agua fría**, en particular la **trucha común**.

Una vez que contamos con los modelos para la predicción de la temperatura de los ríos a partir de la temperatura del aire, se aplicarán al modelo de temperatura del agua fluvial las simulaciones también a escala local obtenidas a partir de Modelos Climáticos del 5º Informe de Evaluación del IPCC.

En los ríos seleccionados se encuentran las poblaciones naturales más meridionales de trucha común (*Salmo trutta*), especie muy sensible al aumento de la temperatura debido a sus requerimientos psicrófilos (Stoneman y Jones 2000), siendo ésta una de las principales razones por la que se ha elegido a esta especie como indicadora de los efectos ecológicos de un eventual calentamiento. Aplicando las predicciones de cambio climático a dichos ríos podrá simularse cómo van a evolucionar esos ríos desde el punto de vista térmico y cómo se va a ver afectado el hábitat térmico de la trucha común y, en consecuencia, la viabilidad de sus poblaciones ante este escenario de cambio climático.

➤ **Definir**, como consecuencia de todo lo anterior, las **prioridades de protección y conservación** de los **ríos** y de las **especies fluviales** amenazadas por el calentamiento global.

Con objeto de alcanzar los objetivos anteriores, se dispone a definir las estrategias de actuación de cara a los impactos previstos y, así, poder prevenir los efectos negativos mediante medidas de mitigación de dichos efectos indeseables del cambio climático. De esta manera se definirán medidas de adaptación concretas que permitan asegurar la conservación del medio fluvial y sus especies, y por tanto contribuir a la protección del medio ambiente.

El adecuado conocimiento del efecto de las proyecciones de cambio climático sobre los ríos, obtenido de la aplicación de la herramienta desarrollada en este proyecto de investigación científica, permitirá valorar la adecuación de los diferentes factores atenuadores de la temperatura que funcionan en los ríos, cuál es su estado actual en los mismos, y cómo podrían ser manejados para obtener unos resultados adecuados al objetivo de la atenuación y, en su caso, incluso la posible compensación de la tendencia creciente de la temperatura en los ríos.

En la bibliografía científica existe abundante material sobre el efecto de los diferentes factores condicionantes de la temperatura de los ríos, ya sean factores naturales o artificiales. Su correcto análisis e interpretación para los diferentes casos en estudio podrá arrojar luz sobre la eficacia de su gestión como medios para mitigar los efectos indeseables del calentamiento global en nuestro ámbito geográfico de investigación, pudiendo contribuir, sin duda, al diseño de estrategias de protección y conservación de los ríos conducentes a la consecución del objetivo propuesto.

Para alcanzar los objetivos expuestos anteriormente, el estudio se distribuyó en las siguientes actividades:

| | | Descripción de la actividad |
|--------------------|--|---|
| Actividad 1 | Recogida de datos de las variables meteorológicas de temperatura y precipitación. | Al inicio del proyecto se recopilan datos meteorológicos de superficie a partir de las redes meteorológicas disponibles. Se verifican unos estándares de calidad de datos a partir de diversos filtros de cantidad y calidad entre los que se incluye un filtro de inhomogeneidades con técnica propia (Monjo et al. 2013). |
| Actividad 2 | Recogida de datos de temperatura de los ríos seleccionados. | Se recopilan datos observados de temperatura del agua de los ríos para construir un banco de datos observados suficiente para construir las relaciones entre las variables meteorológicas superficiales (temperatura del aire, especialmente) y la temperatura de los propios ríos. |
| Actividad 3 | Generación de un modelo para la temperatura del | Tal y como se realiza en los estudios de este tipo (Santiago et al, 2016; Santiago et al, 2017), es |

| | | |
|--------------------|---|--|
| | agua. | necesario construir o seleccionar de entre los preexistentes un modelo que relacione las variables meteorológicas superficiales (temperatura del aire, especialmente) y la temperatura de los propios ríos. Esta actividad necesita de un modelado experimental que permita estimar la precisión de tal modelo. |
| Actividad 4 | Proyección de escenarios climáticos para las próximas décadas. | Utilizando la metodología de regionalización estadística de la FIC (Ribalaygua et al, 2013), se generan los múltiples escenarios climáticos basándose en los diferentes escenarios futuros (RCP) del Quinto Informe del IPCC. Hay que tener en cuenta que se generan diferentes proyecciones de clima futuro y por ello se generan diferentes proyecciones de vulnerabilidad, por lo que el análisis de impacto se realiza sobre el conjunto de esas proyecciones, teniendo las conclusiones finales un carácter probabilístico. |

➤ Tabla 1. Actividades realizadas en el marco del proyecto AICCEPEF.

2. Metodologías utilizadas

Para simular las proyecciones climáticas futuras se ha utilizado una metodología de *downscaling* estadístico (FICLIMA) desarrollada por la FIC, que permite simular series diarias de temperatura y precipitación a lo largo del siglo XXI y cuyas proyecciones se han utilizado para calcular los bio-indicadores identificados dentro del proyecto.

2.1. Metodología de regionalización estadística FICLIMA

A día de hoy, la herramienta más potente en la simulación del clima futuro son los Modelos Climáticos Globales y concretamente los *Earth System Models* (ESMs). Estos modelos muestran una capacidad notable para reproducir las principales características de la circulación atmosférica general. El problema surge cuando se evalúan los resultados a una escala más pequeña (es decir, se seleccionan unos pocos puntos de la rejilla de trabajo) donde las variables, especialmente en superficie, no se aproximan a los valores observados en la realidad.

Estas limitaciones se pueden explicar por varias razones, en general relacionadas con la insuficiente resolución espacial de los modelos que a día de hoy es de unos 2^o-3^o de latitud/longitud:

- La topografía (cordilleras, líneas de costa, etc.) es descrita con poco detalle lo que hace que algunos forzamientos relacionados con la misma y de extraordinaria importancia a nivel local sean omitidos y por lo tanto no tenidos en cuenta por el modelo.

- Algunos de los procesos atmosféricos que se presentan a una escala inferior a la de la rejilla de trabajo de los modelos (y que por lo tanto tienden a no ser reflejados por éstos) se recogen mediante parametrizaciones directas, es decir, son representados por un ajuste directo de los parámetros en el modelo. Esas parametrizaciones son ajustadas de manera estadística en todo el planeta pudiendo ser ineficientes en regiones concretas.
- La parametrización del flujo de energía desde las escalas sinópticas (106 km²) hasta las de una escala inferior a la rejilla de trabajo afecta a la fiabilidad de las menores escalas resueltas.

Dado que en la mayor parte de los estudios de evaluación de impactos es necesaria la presencia de escenarios climáticos con resolución local de variables cercanas a la superficie terrestre (temperatura a 2 m., precipitación, etc.), surge la necesidad de adaptar la información proporcionada por los ESMs (de baja resolución espacial) a la información requerida por los modelos de impacto (de mayor resolución espacial-local en superficie). Este proceso de regionalización es conocido como *downscaling*.

Existen dos maneras principales de afrontar el problema de la regionalización:

- A. **Aproximaciones estadísticas** (*downscaling estadístico*). Se obtienen relaciones empíricas entre variables a gran escala procedentes de los Modelos Climáticos Globales y variables de alta resolución (en superficie).
- B. **Aproximaciones por modelización dinámica** (*downscaling dinámico*). Estos modelos incrementan su resolución sobre la región de interés. Puede realizarse de dos maneras, o bien con una técnica de “zoom” de la propia rejilla del modelo o bien mediante el anidamiento de un Modelo de Área Limitada (LAM) en las condiciones de contorno suministradas por el Modelo Climático. Son los denominados Modelos Regionales del Clima (RCM, del inglés *Regional Climate Model*).

Las aproximaciones estadísticas tienen mucho menor coste computacional (lo que permite aplicarlas a multitud de Modelos Climáticos y escenarios de emisiones), pero sufren de una incertidumbre implícita consecuencia de aceptar la hipótesis de que los campos de efectos en superficie de alta resolución son función exclusiva de las condiciones dinámicas y termodinámicas a gran escala en la atmósfera, considerando las características de la topografía fijas. Es dudoso que en un marco de cambio climático no varíe ningún forzamiento mesoescalar (albedo, humedad del suelo, campos atmosféricos a baja resolución...). Adicionalmente, las relaciones estadísticas entre campos atmosféricos de baja resolución y las variables en superficie a escala local son siempre imperfectas pudiendo resultar no-estacionarias, lo que significa que, aunque estas relaciones se verifiquen en el clima actual, no tienen por qué

hacerlo en un clima futuro (un problema conocido como problema de la estacionariedad).

Las aproximaciones dinámicas cuentan con una base física más fuerte (aunque también utilizan relaciones estadísticas en las parametrizaciones). Actualmente, la resolución de los RCMs es de unos 25 Km, lo que resulta insuficiente para simular correctamente variables en superficie a escala local, especialmente en zonas de topografía compleja. Por otro lado, tienen el inconveniente de un coste computacional elevadísimo que pocas instituciones pueden permitirse.

| | A FAVOR | EN CONTRA | APLICACIONES |
|--------------------------------|--|--|--|
| Downscaling dinámico | <ul style="list-style-type: none"> • Simula mecanismos climáticos. • No realiza asunciones <i>a priori</i> sobre cómo están relacionados el clima presente y el futuro. • Herramientas científicas permanentemente actualizadas. • Los continuos avances en ordenadores hacen que cada vez se generen más rápidamente y sean más baratos de ejecutar. • Estimula la colaboración entre científicos del clima y de otras disciplinas de estudio. | <ul style="list-style-type: none"> • Muy costoso, tanto en términos de necesidades informáticas como de formación del personal. • Los resultados son sensibles a las parametrizaciones iniciales. • El posible sesgo existente en los MCG se puede propagar a la escala local. • El formato de salida de los modelos puede no ser útil a otras disciplinas de análisis científico, y es necesario un tratamiento de datos posterior. | <ul style="list-style-type: none"> • Áreas geográficas con pocos datos iniciales de partida. • Estudios asociados con extremos climáticos y variabilidad no-lineal, como los sanitarios. • Relaciona los resultados con procesos climáticos. • Permite incluir impactos sobre el uso del suelo sobre los resultados. |
| Downscaling estadístico | <ul style="list-style-type: none"> • Muy barato (funciona con mucha velocidad en ordenadores personales con software libre). • Aprovecha la experiencia estadística entre investigadores. • Puede corregir los sesgos propios de los MCG. • Permite evaluar los resultados climáticos sobre un grupo de MCGs y sobre diversos escenarios. | <ul style="list-style-type: none"> • Asume que las relaciones entre el clima local y el de gran escala permanecen constantes. • No incorpora mecanismos climáticos. • No está ajustado para capturar varianzas o eventos extremos. | <ul style="list-style-type: none"> • Medias climáticas, y ciertos rangos de variabilidad. • Regiones ricas en datos meteorológicos, como las latitudes medias del hemisferio norte. • Permite comparar el clima presente y el futuro de forma consistente. • Puede realizar tests sobre diversos predictores. • Permite medir las escalas de variables hasta lugares concretos. |

Tabla 2. Diferencias ente *downscaling* estadístico y dinámico. (Fuente: Patz, et al., 2005)

La necesidad de regionalizar

La metodología FICLIMA de regionalización es una metodología de *downscaling* estadístico. Necesita por lo tanto de una selección previa de campos a utilizar como predictores y una, vez seleccionados éstos, realiza un tratamiento basado en la metodología de análogos. En lo que sigue pasaremos a describir con un cierto grado de detalle los fundamentos de la metodología FICLIMA; si lo que se desea es un mayor detalle, puede acudir a Ribalaygua et al. (2013).

En términos generales, la metodología sigue el siguiente esquema: se selecciona un día problema “X”, cuyos campos atmosféricos (geopotenciales, temperaturas a distintos niveles de presión...) de baja resolución son conocidos (mediante las salidas de los Modelos Climáticos Globales para el día “X”). A partir de esos campos conocidos, se pretende estimar el valor de las variables meteorológicas en superficie (temperaturas máxima y mínima, precipitación...) para el día “X” en un punto concreto del territorio (observatorio).

El método trabaja en dos pasos sucesivos:

1. El primer paso, denominado estratificación analógica, consiste en seleccionar de un banco de datos aquellos n días con configuraciones atmosféricas más similares a las del día problema “X”. La medida de similitud utilizada compara el parecido entre las variables empleadas para caracterizar las situaciones sinópticas atmosféricas; esas variables determinan el forzamiento sinóptico causante de los descensos y ascensos de aire, generadores de nubosidad y precipitación. Se busca, además, aportar información sobre la dirección del viento en superficie, lo que permite estudiar los efectos que la topografía ejerce en la distribución espacial de la nubosidad y de la precipitación.
2. El segundo paso aplica métodos diferentes en función de la variable que se quiera calcular:
 - Para estimar las temperaturas mínimas y máximas diarias, se realiza, por cada variable, una regresión lineal múltiple con selección automática de predictores. La población de trabajo va a estar compuesta por los n días seleccionados en el paso previo. Como predictores se tienen, por un lado, los valores de las variables atmosféricas en la vertical del punto para el que se quiere estimar la temperatura en superficie y por otro, predictores potenciales. Dichos predictores potenciales son un indicador de la duración de la noche en el día en cuestión (proporciona información sobre el potencial de calentamiento / enfriamiento radiativo) y un promedio ponderado de las temperaturas de los días anteriores (se considera el efecto de la inercia térmica del suelo). Una vez establecida la relación lineal existente entre los predictores seleccionados y el predictando

(temperatura mínima, máxima o precipitación), se aplica dicha relación a los valores de los predictores del día "X" para estimar el valor del predictando en dicho día.

La influencia fuertemente no-lineal que la nubosidad y la precipitación ejercen sobre la temperatura en superficie ha sido corregida en la estratificación analógica. Al seleccionar los días con configuraciones atmosféricas más similares, se garantiza que las condiciones de precipitación y nubosidad también lo sean y por tanto, también, su influencia sobre el predictando. Obtenemos, de esta manera, relaciones lineales más robustas. Un ejemplo de esto es la relación entre el espesor de la baja troposfera y la temperatura a 2 m, que es de carácter no-lineal. Cuando se trata de días con cielos cubiertos, la temperatura máxima va a depender fuertemente del espesor, entre ambas variables se tendrá una relación bastante lineal. Sin embargo, en días con cielos despejados, la dependencia de la temperatura máxima con el espesor es menor, dependiendo, principalmente, de la insolación y esta a su vez de la época del año.

- Para el caso de la precipitación se han probado varias aproximaciones. La más simple de todas ellas contempla la estima por simple promediado de los k días análogos más parecidos a "X". Además de estimar la cantidad de lluvia, este método permite obtener la probabilidad de lluvia o tiempo seco. En el estudio de las series obtenidas se detectó que, aunque el comportamiento de la predicción de precipitación media en un periodo era aceptable, el número de días de lluvia se sobreestimaba claramente. Ello se debe a que se estaba asociando lluvia a todos los días con probabilidad no nula, aunque ésta fuese muy baja. Para corregir este error, se introdujo una corrección estadística que permite obtener el número de días de lluvia en un mes a partir de las probabilidades de lluvia de cada uno de los días del mes. Conocido el número de días de lluvia y la cantidad de lluvia, se distribuye ésta entre los días con mayor probabilidad y cantidad esperada de precipitación. De esta forma se obtienen mejoras no sólo para el número de días de lluvia, sino también para lluvias extremas y periodos de sequía.

Aunque algunas de las debilidades intrínsecas del método de *downscaling* estadístico son insalvables debido a la propia naturaleza de tal método (dependencia de un conjunto de observatorios meteorológicos con datos fiables y que cubran un periodo temporal extenso; necesidad de sucesivas pruebas de adaptación de la metodología hasta determinar los campos que mejor recogen la variabilidad climática en la zona de estudio), la metodología FICLIMA presenta algunas ventajas con respecto a otras metodologías estadísticas:

| | |
|--|--|
| | El problema de la estacionariedad va a ser minimizado gracias al criterio de selección de predictores, basado en consideraciones teóricas que reflejen las relaciones físicas entre predictores y predictandos, relaciones físicas que no deben cambiar a lo largo del tiempo. |
| | Cuando se utiliza el método de selección de análogos, y dado que la simulación final estará basada en los días más análogos, el valor asignado a la variable meteorológica estudiada estará limitado por el valor observado que tenga en esos días análogos, es decir, su margen de variabilidad vendrá dado por la propia variabilidad del pasado (nunca calcularíamos valores superiores o inferiores). Sin embargo, el segundo paso introducido en la metodología FICLIMA nos permite superar esa limitación: las relaciones lineales diarias establecidas para temperatura y la redistribución de la precipitación en base a la función de distribución permiten simular valores que pueden exceder la limitación de los valores observados iniciales. |

Tabla 3. Ventajas de la metodología FICLIMA frente a otras metodologías de *downscaling* estadístico

Con el fin de asegurar que las proyecciones climáticas han sido generadas de la forma más rigurosa posible, se proceden a realizar un proceso de verificación de la metodología y otro de la validación de los modelos climáticos.

Verificación de la metodología de *downscaling*

El proceso de verificación consiste en la comparación de los datos observados (de las diferentes estaciones meteorológicas) con los datos simulados obtenidos mediante la aplicación de la metodología de *downscaling* sobre el reanálisis (en nuestro estudio, ERA40). Comparando los dos conjuntos de datos, observados y simulados, se puede evaluar si la metodología es capaz de simular correctamente el clima actual (y del pasado reciente). La información resultante es muy importante y tiene que ser tomada en cuenta cuando se trabaje con escenarios climáticos futuros.

La metodología se ha aplicado al reanálisis Europeo ERA40 del ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) para el periodo 1958-2000. El reanálisis ERA40 proporciona "observaciones" de los predictores, y cubre con una rejilla de $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$ toda la superficie terrestre, con resolución seis-horaria (4 datos al día). No obstante, esa información de relativa alta resolución (espacial y temporal), debe relajarse a la de los Modelos Climáticos que se vayan a utilizar posteriormente (rejillas de 2 a 3° de resolución, y en general con un único dato al día), ya que en esta verificación se pretende evaluar el error de la metodología de *downscaling* aplicada en las mismas condiciones que se vayan a aplicar luego a los GCMs. Esto es importante, ya que algunas metodologías de *downscaling*, y la de la FIC entre ellas, mejoran su capacidad

de regionalización cuanto mayor resolución espacial y temporal tenga la información de entrada (los predictores). Por ello, si no se relajase la resolución espacial y temporal del ERA40 a la de los GCMs que se va a regionalizar, obtendríamos errores de verificación menores de lo que en realidad se debería considerar (y corregir).

Lo primero que se debe hacer es obtener los valores de los predictores a partir de la información proporcionada por el ERA40. El siguiente paso es el de obtener las situaciones sinópticamente análogas a las que se presentaron durante el periodo común entre observaciones y reanálisis, en nuestro caso 1958-2000. Esta parte del proceso tiene un elevado coste computacional, ya que para cada día del periodo de verificación (1958-2000) se determinan las situaciones más similares del periodo de referencia (1958-2000), exceptuando los 5 días anteriores, los 5 posteriores y el mismo día problema para evitar el fenómeno denominado *overfitting* o sobreajuste.

Una vez determinadas las situaciones análogas a cierto día problema x , se obtiene el valor simulado de la variable meteorológica a estudiar para ese día x . Realizando este proceso para cada uno de los días del periodo de verificación se obtiene una serie simulada por regionalización de ERA40 para cada uno de los observatorios.

Es importante resaltar que no es necesario que existan observaciones de los predictandos de todos los días del periodo de verificación (cosa que muy raramente sucede), ya que en la serie simulada por regionalización del ERA40 cada día se corresponde con una fecha real. Por tanto, las comparaciones entre las observaciones y la serie simulada por regionalización del ERA40 se realizan día a día (con los días de los que haya observación). Este aspecto es esencial, ya que, si una metodología de regionalización es capaz de reproducir las observaciones día a día, eso sugiere que se están captando las relaciones físicas entre predictores y predictandos, y por tanto el problema de la estacionariedad, la principal desventaja de las metodologías estadísticas, se reduce.

Validación de los modelos climáticos

En general, los modelos climáticos tienden a simular un clima presente más cálido/frío o húmedo/seco de lo que éste es en realidad y la magnitud con la que se alejan de la realidad varía en función de la región concreta en la que se esté trabajando dado que la simulación de los modelos se realiza a escala global. Dado que cada modelo trabaja de forma diferente en la simulación del clima surge la necesidad de evaluar el comportamiento de cada modelo en la zona de estudio que permita determinar cómo de bueno es dicho modelo simulando el clima presente de la región y si su uso es adecuado o por el contrario no se debería trabajar con él. El proceso mediante el cual se evalúa el comportamiento de un modelo climático es lo que se conoce como validación. Este proceso consiste en comparar las series simuladas obtenidas mediante regionalización del reanálisis (ERA40, en nuestro caso) con las series simuladas obtenidas mediante regionalización del escenario *Historical* de cada modelo (su simulación de control) para un periodo común del pasado, en este caso 1958-2000. *Historical* corresponde a la ejecución de un experimento concreto relativo a datos del pasado y no es por lo tanto un escenario futuro de cambio climático. Su misión es la de permitir disponer de un experimento que nos muestre si el modelo climático a emplear es capaz de reflejar la variabilidad climática natural y por eso abarca un periodo del pasado, el periodo 1951 – 2005 (aunque algunos modelos hacen comenzar tal periodo más atrás).

Debe hacerse notar que la disponibilidad de los datos de los modelos climáticos debe agradecerse al WCRP (*World Climate Research Programme*), un programa de la Organización Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization – WMO*) que es el responsable de la iniciativa *Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5)*, y el desarrollo de la infraestructura necesaria para su almacenamiento y descarga (tanto de hardware como de software) al Departamento de Energía de los Estados Unidos de América. A cada uno de los grupos de trabajo de los modelos empleados debe agradecerse también el trabajo realizado en su modelización y en su ejecución.

Los escenarios de clima futuro

Los Escenarios de Clima Futuro suelen asociarse en los estudios de Cambio Climático a escenarios de emisiones en tanto que descripciones plausibles de cómo serán los cambios futuros en un amplio rango de variables: socioeconómicas, tecnológicas, energéticas, uso del suelo, emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs), y contaminantes del aire. Para cumplir esta función, se desarrollaron conjuntos de escenarios de emisiones como los IS92 o los SRES (los asociados al cuarto informe del IPCC). Pero en la comunidad científica surgió la necesidad de escenarios provistos de una información más

detallada. Atendiendo a esta necesidad, el IPCC propone la definición de nuevos escenarios. En este caso, la propuesta consiste en que sea la comunidad científica quien defina dichos escenarios mediante la colaboración conjunta de los responsables de los distintos centros que generan Modelos Climáticos y de los responsables de los centros de Modelos de Evaluación Integrada. La idea de aunarlos reside en que estos últimos proporcionan una información adicional sobre aspectos socioeconómicos que completan la información generada por los modelos.

Los nuevos escenarios futuros a usar, los asociados al quinto informe del IPCC, han recibido el nombre de *Representative Concentration Pathways* (RCPs) y su definición se basa en los siguientes criterios:

- 1) Los RCPs se deben basar en escenarios de emisiones ya existentes elaborados por distintos centros y recogidos en la literatura. Al mismo tiempo cada RCP debe, por sí mismo, ser una descripción plausible e internamente coherente con el futuro,
- 2) deben proporcionar información de todos los forzamientos radiativos necesarios para la modelización climática (uso del suelo, emisiones de GEIs y contaminantes del aire),
- 3) deben estar armonizados, es decir, la transición continua entre el periodo histórico (el experimento *Historical*) y los periodos futuros debe garantizarse y,
- 4) deben ofrecer información hasta el 2100 y estar disponibles para simular aún más allá.

El nombre de los RCPs refleja dos de sus principales características:

1. **Representative**: hace referencia a la idea de que un RCP representa a un conjunto de escenarios de emisiones ya existentes. Es decir, el RCP debe ser compatible tanto con los escenarios extremos como con los medios.
2. **Concentration Pathway**: este término hace hincapié en que los RCPs no son productos finales, sino que son la herramienta (el input) hacia la generación de escenarios de emisiones, de ahí el uso de concentraciones en vez de emisiones. Los RCP se entienden como un conjunto suficientemente consistente de las componentes de forzamiento radiativo pero no son un conjunto completo de proyecciones climáticas, socioeconómicas y de emisión.

La comunidad científica (formada por más de 20 grupos de trabajo de todo el mundo) determinó en septiembre de 2008 en París que los nuevos escenarios

serían los RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 (el nombre hace referencia al forzamiento radiativo alcanzado en 2100); la figura 1 representa el comportamiento de tales escenarios a lo largo del tiempo, expresado como forzamiento radiativo. La figura 4 muestra las características de la definición de cada escenario o RCP.

CMIP5 New scenarios: Representative Concentration Pathways

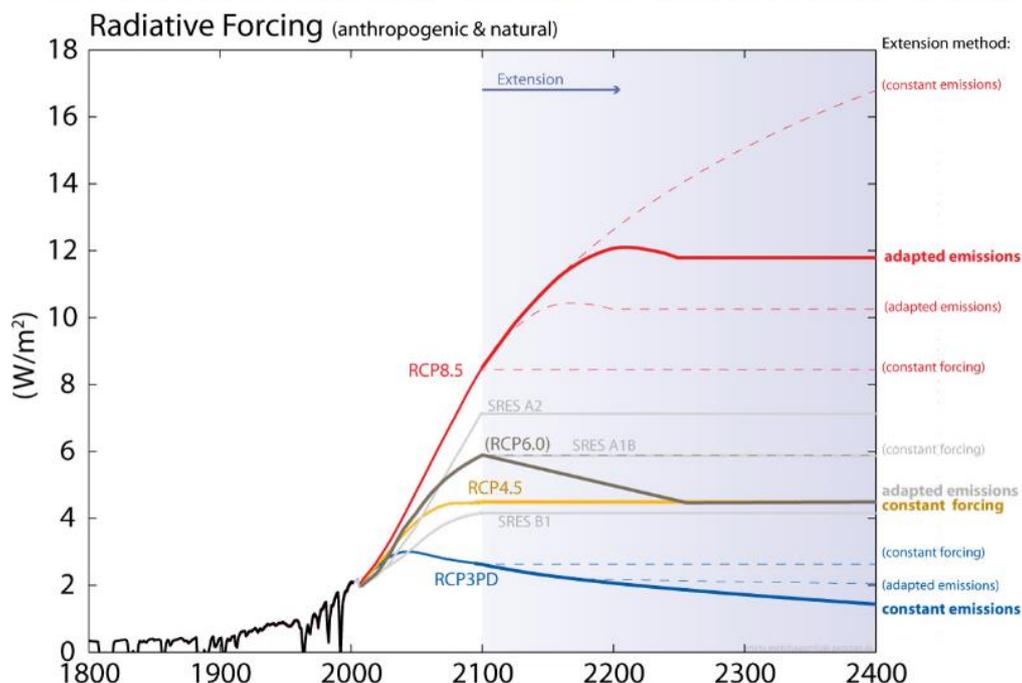


Figura 1. Forzamiento radiativo a lo largo del siglo XXI asociado a los diferentes RCPs y su relación con los escenarios del 4º informe del IPCC (SRES). El escenario RCP2.6 aparece con su nombre originario, RCP3PD. Fuente: Meinshausen, Smith, et al. (2011).

| RCP | Características |
|-----|---|
| 2.6 | Se alcanza un pico de 3 W/m ² antes de 2100 para luego descender hasta los 2.6 W/m ² |
| 4.5 | Se estabiliza sin sobrepasar el nivel de 4.5 W/m ² (equivalente a unos 650 ppm) en el 2100 |
| 6.0 | Se estabiliza sin sobrepasar el nivel de 6.0 W/m ² (equivalente a unos 850 ppm) en el 2100 |
| 8.5 | Alcanza 8.5 W/m ² (equivalente a unos 1370 ppm de CO ₂ eq.) en 2100 y no se estabilizan los niveles hasta el 2050 |

Tabla 4. Características principales de los diferentes RCPs.

Junto con los nuevos RCPs se formó el CMIP5 (*Climate Model Intercomparison Project 5*) con el objetivo de crear una base de trabajo donde poner a disposición de la comunidad científica toda la información climática a emplear en los trabajos relacionados con el 5º informe del IPCC.

Debido a la enorme información generada por los diferentes centros de investigación, el CMIP5 ha dividido la información en diferentes niveles con el objetivo de que todos los centros de investigación aporten un mínimo de información común que permita la comparación entre ellos. Así, el primer nivel, denominado “Core” y que debe ser proporcionado por todos los miembros, lo forman los RCPs 4.5 y 8.5. En un segundo nivel y denominado “Tier 1” se encuentran los RCPs 2.6 y 6.0 y experimentos más detallados, y en el último nivel, denominado “Tier 2” se encuentran experimentos más complejos, como, por ejemplo, los *Extended Concentration Pathways*, extensiones de los RCPs hasta el año 2300.

La elección del modelo climático empleado en este estudio no ha sido determinada por ningún criterio científico específico ya que, dado lo reciente de los modelos asociados al CMIP5, todavía no existe la suficiente literatura científica relativa al comportamiento de todos los modelos existentes, con lo que por ahora es completamente imposible establecer una clasificación (mejores modelos / peores modelos) de los modelos existentes. Para la selección del modelo elegido de entre los existentes se impuso que

1. Mostrara un buen comportamiento en el pasado informe del IPCC o al menos fueran generados por los mismos organismos científicos, buscando un cierto grado de confianza en la capacidad de los equipos involucrados a la hora de generar un modelo y,
2. Otorgue preferencia a modelos tipo ESM (*Earth System Model*) o Modelos de Sistema Terrestre, esto es, modelos climáticos más avanzados. Estos modelos poseen un conjunto de ecuaciones que describen los procesos que tienen lugar dentro y entre la atmósfera, el océano, la criosfera y la biosfera marina y terrestre. Estas ecuaciones recogen los mecanismos físicos, químicos y biológicos que gobiernan a los elementos del sistema terrestre y también incluyen erupciones volcánicas y variaciones de la radiación solar entrante. Su principal avance frente a los Modelos de Circulación General tradicionales es que permiten la interacción del sistema con el ciclo del carbono y tienen en cuenta la bioquímica y la biogeología marina.

La corrección del error sistemático

Tal y como hemos comentado anteriormente, si necesitamos que los datos regionalizados en un punto de un cierto modelo climático se puedan interpretar

en sus valores absolutos y no sólo en términos de incrementos relativos entonces debemos corregir los posibles errores que han conducido introducir sesgos en la regionalización para así poder obtener valores que podamos estudiar en su magnitud absoluta. Esta corrección es lo que denominamos Corrección del Error Sistemático. Por lo tanto, antes de estudiar las simulaciones obtenidas al regionalizar las proyecciones futuras de los 9 modelos considerados debemos llevar a cabo la corrección de tal error.

Sea cual sea el método de corrección empleado, buscaremos no corregir todos los datos de la misma forma (no sumarles o multiplicarles la misma cantidad), sino de forma proporcional, de manera que a los valores que tengan mayor error se les apliquen mayores correcciones, y los valores que tengan menor error se les apliquen menores correcciones. Para determinar qué valores tienen mayor o menor error estudiaremos la función de distribución de esos valores, comparando la función de distribución de los valores observados frente a los de ERA40 regionalizados, y la de los valores de ERA40 regionalizados frente a la de los modelos regionalizados. En concreto usaremos la función de distribución acumulada empírica o ECDF (*Empirical Cumulative Distribution Function*) que nos permite, al comparar dos entre sí, comparar la diferencia entre las mismas magnitudes (en rigor, entre los mismos cuantiles, ya que estamos trabajando con funciones de distribución) y establecer relaciones de proporcionalidad entre las magnitudes que dependerán de las propias magnitudes en sí. Este método nos proporciona una forma no-lineal (como buscábamos) de establecer las diferencias entre dos grupos de datos diferentes; la medida de esas diferencias será lo que nos permita corregir el error entre ambos grupos de datos.

La forma de aplicar este método se ejemplifica en la figura 2. Aunque en rigor el método está basado en el uso de la ECDF, aquí hemos representado el periodo de retorno de cada cantidad de precipitación (que gráficamente es más ilustrativa que la temperatura), entendido como la inversa de su probabilidad, dado que visualmente es mucho más ilustrativo (y también es una manera de representar su función de distribución). Lo que vamos a ver es un ejemplo de la forma en que funciona la corrección, donde los círculos negros representan valores observados; los azules, valores simulados del periodo de control (se correspondería con el experimento Historical de un modelo climático); y los verdes, los valores simulados de un escenario futuro.

En resumen, el proceso de generación de escenarios de clima futuro a escala local a partir de la metodología FICLIMA comprende: 1) un proceso de caracterización climática de la zona a través de la cual se determinan los predictores potenciales a emplear; 2) verificación de la metodología, es decir, el funcionamiento de la misma en la zona de estudio; 3) validación de los modelos climáticos a emplear, es decir, determinar la manera en la que cada modelo climático simula el clima actual; 4) generar las proyecciones climáticas a partir

de varios modelos climáticos bajo diferentes escenarios de clima futuro y 5) corregir el error sistemático asociado al proceso completo de regionalización. Llegados a este punto se disponen de proyecciones climáticas robustas que se utilizan en el estudio de las temperaturas fluviales.

2.2. Diseño del modelo termométrico

El modelo original de Mohseni et al. (1998) es:

$$T_s = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + e^{\gamma(\beta - T_a)}}$$

donde T_s es la temperatura media diaria del agua (DMST, de las siglas en inglés de *daily mean stream temperature*), T_a es la temperatura media del aire (DMAT, de las siglas en inglés de *daily mean air temperature*), μ es la temperatura mínima estimada del agua, α es la temperatura máxima estimada del agua, β representa la temperatura a la que es máxima la tasa de cambio de la temperatura del agua con respecto a la temperatura del aire, y γ es el valor de dicha tasa de cambio a la temperatura β .

El componente de la trayectoria de la temperatura introducido modifica el modelo del siguiente modo:

$$T_s = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + e^{\gamma(\beta - T_a)}} + \lambda(\Delta T_a)$$

donde λ es un coeficiente que representa la resistencia de DMST a cambiar con respecto a la variación de DMAT en un día (ΔT_a).

Los parámetros del modelo se estimaron mediante regresión no-lineal, aplicando técnicas de *bootstrap* en bloques para corregir el efecto de la autocorrelación sobre la significación paramétrica (Freedman y Peters 1984). Los cálculos se realizaron con el software R (R Core Team 2016), calculando un intervalo de confianza del 95%. Para comprobar la idoneidad del modelo modificado se usaron el criterio de información bayesiano (BIC), el criterio de información de Akaike (AIC) y el error cuadrático medio (RMSE).

3. Resultados

3.1. Selección del área de estudio y recogida de datos de las variables meteorológicas de temperatura y precipitación

Este estudio ha sido realizado en una serie de ríos trucheros del centro y sur de la Península Ibérica. Estos ríos están comprendidos entre las latitudes 40.1° y 39.6°N para el caso de los ríos del interior central, y entre 37.2° y 36.9°N para el caso de los ríos meridionales. Ordenados de norte a sur han sido: Júcar, Cabriel, Mira (todos ellos en la provincia de Cuenca), y Alhorí, Andarax, Bayarcal, Dilar, Genil, Monachil, Poquiera y Trevélez, éstos últimos nacientes en el Parque Nacional de Sierra Nevada, drenando hacia las cuencas del Atlántico y Mediterráneo.

En total se han registrado las temperaturas del agua en 19 estaciones de muestreo pertenecientes a los 11 ríos antes referidos.

Estos ríos han sido elegidos por reflejar una notable diversidad de regímenes hídricos y condiciones geológicas que enriquecerán los resultados y conclusiones de este estudio. Por otra parte, el río Júcar y sus afluentes albergan las poblaciones más meridionales de la trucha común en el extremo oeste Paleártico, junto con las poblaciones relictas en la cabecera de Sierra Nevada (además de las de las sierras Prebéticas pertenecientes al Segura y en el Atlas marroquí). Esta especie se ha elegido como indicadora en este estudio de los efectos del cambio climático sobre los ríos debido a sus requerimientos psicrófilos y a que, como se ha dicho, las poblaciones de los ríos en estudio se encuentran en el frente geográfico más sensible de la especie en sus áreas nativas.

La información climática relativa a los ríos y estaciones de muestreo se ha buscado entre las estaciones meteorológicas de la AEMET que presentaron mejores condiciones de proximidad y extensión temporal de series de datos de temperatura diaria del aire. Dichas estaciones aparecen adjuntas en la Tabla 5.

| Río | Estación de muestreo | código | altitud (m s.n.m.) | estación meteorológica | distancia | días con datos |
|----------|----------------------|--------|--------------------|------------------------------------|-----------|----------------|
| Júcar | Júcar-Huélamó | JUC1 | 1180 | Cuenca (8096) | 31 | 521 |
| Júcar | Júcar-Uña | JUC2 | 1100 | Cuenca (8096) | 22 | 521 |
| Júcar | Júcar-Villalba | JUC3 | 960 | Cuenca (8096) | 19 | 521 |
| Cabriel | Cabriel-Boniches | CAB | 1020 | Motilla del Palancar (8155) | 51 | 521 |
| Mira | Mira | MIR | 780 | Motilla del Palancar (8155) | 39 | 521 |
| Alhorí | Alhorí1 | ALH1 | 1800 | Guadix (Instituto Técnico) (5112A) | 21 | 2865 |
| Alhorí | Alhorí2 | ALH2 | 1500 | Guadix (Instituto Técnico) (5112A) | 19 | 2385 |
| Andarax | Andarax1 | AND1 | 1820 | Laujar Monterrey (6308) | 5 | 1198 |
| Andarax | Andarax2 | AND2 | 1190 | Laujar Monterrey (6308) | 1 | 310 |
| Andarax | Andarax3 | AND3 | 1023 | Laujar Monterrey (6308) | 1 | 624 |
| Bayárcal | Bayárcal | BAY | 1713 | Laujar Monterrey (6308) | 12 | 2539 |
| Dilar | Dilar1 | DIL1 | 1650 | Granada (base aérea) (5514) | 16 | 802 |
| Dilar | Dilar2 | DIL2 | 1300 | Granada (base aérea) (5514) | 14 | 271 |
| Dilar | Dilar3 | DIL3 | 950 | Granada (base aérea) (5514) | 11 | 2339 |
| Genil | Genil1 | GEN1 | 1300 | Granada (base aérea) (5514) | 25 | 254 |
| Genil | Genil2 | GEN2 | 1173 | Granada (base aérea) (5514) | 22 | 2710 |
| Monachil | Monachil | MON | 1283 | Granada (base aérea) (5514) | 15 | 1354 |
| Poqueira | Poqueira | POQ | 1500 | Orgiva (6247) | 12 | 251 |
| Trevélez | Trevélez | TRE | 1479 | Orgiva (6247) | 19 | 916 |

Tabla 5. Relación de estaciones de muestreo de temperatura en los ríos, altitud de las mismas, estación meteorológica asociada, distancia euclídea entre la estación de muestreo y la estación meteorológica, y días con datos completos de la temperatura del agua.

Recopilación de información climática histórica

Las temperaturas máxima y mínima diarias del aire se han obtenido de las estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet) especificadas en el apartado anterior.

Antes de emplear tales datos se hace necesario un trabajo previo de control de calidad de los datos y de la homogeneización de éstos.

El **control de calidad** de los datos consiste en desarrollar un conjunto de pruebas sobre tal serie que garantice que los datos son coherentes dentro de la propia serie de estudio. Los dos controles automáticos principales a emplear en un control de calidad son:

1. Coherencia básica. Rechazo directo de valores manifiestamente erróneos, como por ejemplo las precipitaciones negativas.
2. Puntos atípicos u *outliers*. Valores desacomodadamente atípicos dentro de un conjunto dado de datos, es decir, valores que parecen provenir de fuentes de datos diferentes o haber sido generados de una forma distinta al resto de los datos. En este caso, la dificultad teórica de su detección provendrá de la definición que hagamos de “atípicos”. En la práctica, la detección se refiere generalmente a valores de magnitud absoluta desacomodadamente alta.

El control de calidad realizado sobre los datos diarios suministrados no ha mostrado ningún problema ni en su coherencia básica ni en la detección de *outliers*.

La **homogeneización** de los datos de una serie temporal hace referencia al control de calidad de los datos en tanto que elementos de una serie temporal, es decir, estudia la posible coherencia de los datos exactamente en el orden en el que son presentados. Nótese que los controles anteriores podrían realizarse sobre las mismas series pero desordenadas, pero no nos informan sobre la posible variabilidad temporal de los datos, algo que casi siempre viene ligado cuanto menos a ciclos anuales.

Debe hacerse notar que el proceso de homogeneización de una serie puede presentarse también como parte del proceso general del control de la calidad de los datos de una serie; si se presenta aquí como un punto separado es para subrayar la importancia de tal proceso y de sus resultados.

Para realizar la búsqueda de inhomogeneidades, empleamos un test de comparación de distribuciones de Kolmogorov-Smirnov, un test estadístico no-paramétrico (que no presupone distribuciones de la variable a estudiar, por tanto) que nos proporciona un p-valor que podemos emplear como medida del parecido entre dos años. Si un cierto año ha sido marcado como posible indicador de inhomogeneidad entonces se le somete a una prueba más genérica, averiguando el p-valor de cada uno de los años de toda la serie con respecto a esos dos años. Si se presenta un salto o una ruptura entre todos esos p-valores en los años que estamos considerando entonces sí que se considera que tenemos una inhomogeneidad verdadera para toda la serie.

Veamos ahora como ejemplo el caso real de uno de los observatorios empleados en este estudio, el observatorio de identificador 8402 (Bugarra). La figura 2 muestra los resultados obtenidos para la temperatura máxima al aplicarle el test de homogeneidad.

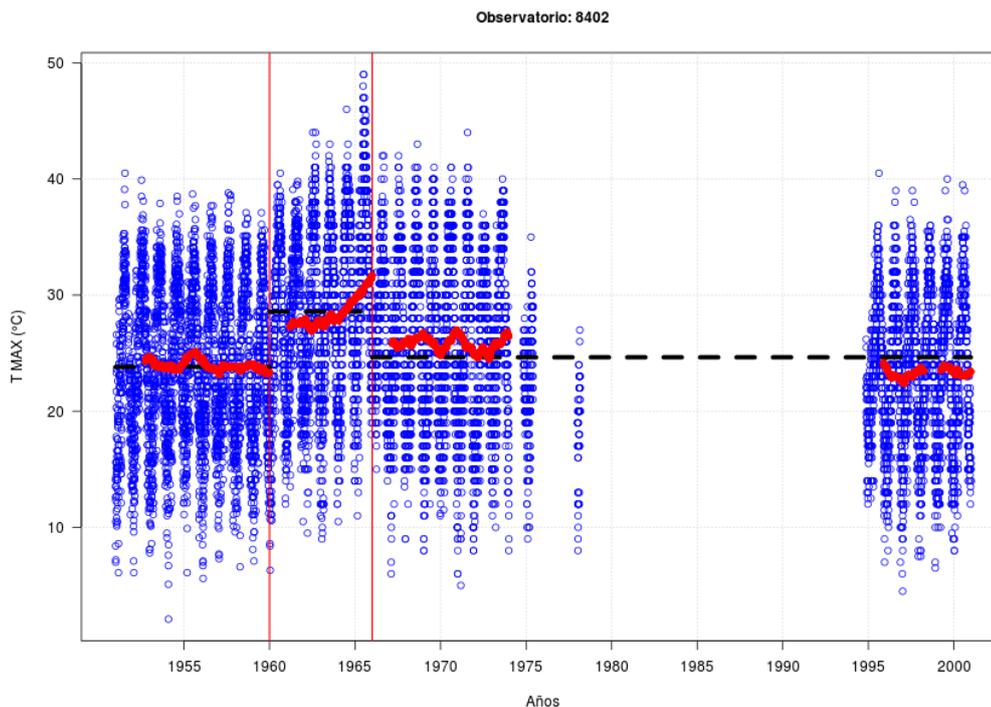


Figura 2. Datos diarios de temperatura máxima del observatorio de Bugarra (8402). Las líneas verticales rojas muestran las inhomogeneidades detectadas por el test. Para cada sub-periodo de datos, las líneas discontinuas negras muestran el valor promedio y las rojas la media móvil anual.

Como se puede apreciar mediante mera inspección visual de la representación gráfica de los valores diarios de la temperatura máxima (figura 2), entre los años 1960 y 1965 se presenta una fuerte irregularidad de los datos. Esa irregularidad ha sido perfectamente detectada por el test de homogeneidad (las líneas rojas verticales), y por lo tanto los datos de tal periodo deben ser rechazados.

Gracias a la densidad de observatorios prioritarios y a la existencia de secundarios no ha sido necesario realizar un trabajo de interpolación de observatorios sobre puntos de interés.

Muestreo de campo para recogida de datos de temperatura real del agua para la creación de los modelos

Las temperaturas del agua han sido obtenidas con termógrafos sumergibles programados para registrar temperaturas cada 2 horas (Minilog® II de Vemco®, y Hobo® Water Temperature Pro v2, de Onset®). Los termógrafos fueron anclados al fondo de los ríos en lugares protegidos de la incidencia directa de la radiación solar.

La información era descargada periódicamente de los termógrafos en el mismo campo por medio de un interfaz de lectura y un ordenador portátil. Durante los muestreos se ha perdido 3 termógrafos: 1 por robo, y 2 por arranque de su anclaje en momento de crecida. Otro termógrafo se recuperó averiado. Las

visitas periódicas permitieron el reemplazo minimizando la pérdida de datos, así como la recolocación de aquellos termógrafos que hubiesen resultado desplazados de su ubicación idónea. Cuando se produjo este desplazamiento, se realizó una comprobación en gabinete para eliminar aquellos datos que no tuvieran garantía de calidad.

En la recogida de datos de campo se ha contado con la inestimable colaboración del Dr. Fernando Alonso (datos de la cuenca del Júcar), el Dr. Enrique Larios y el staff del Parque Nacional de Sierra Nevada.

3.2. Cálculo de los parámetros característicos de cada río

En primer lugar, se muestran los valores de los parámetros obtenidos para el modelo de Mohseni et al. (1998) sin modificar y, a continuación (+ ΔT_a), aquéllos correspondientes al modelo mejorado desarrollado en este estudio. Además de los valores del estimador, se muestra el error estándar, el *t-value*, el valor del estimador de *t* y el grado de significación del valor obtenido (códigos de significación: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1). Así mismo, se emplearon los valores obtenidos de aplicar el criterio de información de Akaike (AIC) y la *deviance*, así como el coeficiente de determinación. A continuación se muestran las tablas ANOVA y *p-value* para los observatorios representativos de las regiones analizadas.

| JÚCAR-HUÉLAMO (p-value = 0.028) | | | | |
|---------------------------------|----------|---------------|---------|----------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| pr1 | 1.69332 | 1.18489 | 1.429 | 0.153582 |
| pr2 | 21.76964 | 1.46167 | 14.894 | < 2e-16 |
| pr3 | 0.13784 | 0.02293 | 6.012 | 3.47E-09 |
| pr4 | 15.87712 | 0.77978 | 20.361 | < 2e-16 |
| pr5 | -0.15832 | 0.04262 | -3.715 | 0.000225 |

| JÚCAR-UÑA (p-value = 0.028) | | | | |
|-----------------------------|----------|---------------|---------|----------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| pr1 | 1.69781 | 1.18325 | 1.435 | 0.151929 |
| pr2 | 21.76842 | 1.4604 | 14.906 | < 2e-16 |
| pr3 | 0.13791 | 0.02292 | 6.016 | 3.39E-09 |
| pr4 | 15.87945 | 0.77928 | 20.377 | < 2e-16 |
| pr5 | -0.15824 | 0.04261 | -3.713 | 0.000227 |

| JÚCAR-VILLALBA (p-value = 6.324e-05) | | | | |
|--------------------------------------|----------|---------------|---------|----------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| pr1 | 5.99227 | 0.6466 | 9.267 | < 2e-16 |
| pr2 | 21.52183 | 0.76091 | 28.284 | < 2e-16 |
| pr3 | 0.16673 | 0.02068 | 8.063 | 5.24E-15 |

| | | | | |
|-----|----------|---------|--------|----------|
| pr4 | 15.56837 | 0.53979 | 28.841 | < 2e-16 |
| pr5 | -0.15906 | 0.03516 | -4.524 | 7.53E-06 |

CABRIEL-BONICHES (p-value = 0.31)

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-----|----------|------------|---------|----------|
| pr1 | 6.58331 | 1.06532 | 6.18 | 2.72E-09 |
| pr2 | 16.10714 | 0.73573 | 21.893 | < 2e-16 |
| pr3 | 0.22644 | 0.05407 | 4.188 | 3.95E-05 |
| pr4 | 10.77215 | 0.81858 | 13.16 | < 2e-16 |
| pr5 | -0.34096 | 0.03518 | -9.693 | < 2e-16 |

MIRA-MIRA (p-value = 0.1162)

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-----|----------|------------|---------|----------|
| pr1 | 0.71793 | 4.59 | 0.156 | 8.76E-01 |
| pr2 | 18.22376 | 2.07278 | 8.792 | 2.84E-16 |
| pr3 | 0.14944 | 0.06001 | 2.49 | 1.34E-02 |
| pr4 | 8.79444 | 2.44577 | 3.596 | 0.000392 |
| pr5 | -0.45354 | 0.04461 | -10.167 | < 2e-16 |

TREVÉLEZ-TREVÉLEZ (p-value = 0.1595)

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-----|----------|------------|---------|----------|
| pr1 | 3.91184 | 0.53214 | 7.351 | 4.52E-13 |
| pr2 | 16.54773 | 0.81277 | 20.36 | < 2e-16 |
| pr3 | 0.15998 | 0.02094 | 7.64 | 5.72E-14 |
| pr4 | 20.031 | 0.5904 | 33.928 | < 2e-16 |
| pr5 | -0.18162 | 0.0242 | -7.504 | 1.53E-13 |

POQUEIRA-POQUEIRA (p-value = 0.8367)

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-----|----------|------------|---------|----------|
| pr1 | -2.16804 | 3.66514 | -0.592 | 5.55E-01 |
| pr2 | 27.7333 | 13.80921 | 2.008 | 4.57E-02 |
| pr3 | 0.06869 | 0.03457 | 1.987 | 4.80E-02 |
| pr4 | 27.25021 | 10.04756 | 2.712 | 7.16E-03 |
| pr5 | -0.13624 | 0.02459 | -5.54 | 7.78E-08 |

MONACHIL-MONACHIL (p-value = 0.8694)

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-----|----------|------------|---------|----------|
| pr1 | -2.5038 | 4.06808 | -0.615 | 0.5388 |
| pr2 | 28.40088 | 15.31698 | 1.854 | 0.0649 |
| pr3 | 0.06633 | 0.03571 | 1.858 | 6.44E-02 |
| pr4 | 27.57266 | 11.12509 | 2.478 | 0.0139 |
| pr5 | -0.14087 | 0.02508 | -5.617 | 5.28E-08 |

GENIL-2 (p-value = 2.338e-08)

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-----|----------|------------|---------|----------|
| pr1 | -41.43 | 58.26408 | -0.711 | 0.4771 |
| pr2 | 62.95583 | 62.61406 | 1.005 | 0.31477 |
| pr3 | 0.02464 | 0.02875 | 0.857 | 3.91E-01 |
| pr4 | 18.10675 | 6.96447 | 2.6 | 0.00938 |
| pr5 | -0.26205 | 0.01648 | -15.899 | < 2e-16 |

DILAR-1 (p-value = 2.215e-08)

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-----|-----------|------------|---------|----------|
| pr1 | -41.11705 | 57.12251 | -0.72 | 0.47171 |
| pr2 | 62.48309 | 61.04291 | 1.024 | 0.30612 |
| pr3 | 0.02483 | 0.02854 | 0.87 | 3.84E-01 |
| pr4 | 17.98074 | 6.72745 | 2.673 | 0.00757 |
| pr5 | -0.26206 | 0.01648 | -15.898 | < 2e-16 |

DILAR-3 (p-value = 1.313e-15)

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-----|-----------|------------|---------|----------|
| pr1 | -11.52405 | 6.71022 | -1.717 | 0.086 |
| pr2 | 25.87148 | 3.16166 | 8.183 | 4.51E-16 |
| pr3 | 0.05428 | 0.01389 | 3.91 | 9.51E-05 |
| pr4 | 9.38219 | 3.75103 | 2.501 | 0.0124 |
| pr5 | -0.17973 | 0.01232 | -14.583 | < 2e-16 |

ANDARAX-1 (p-value = 0.01584)

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-----|----------|------------|---------|----------|
| pr1 | 1.0066 | 0.64975 | 1.549 | 0.122 |
| pr2 | 16.94736 | 0.55167 | 30.72 | <2e-16 |
| pr3 | 0.1347 | 0.01206 | 11.169 | <2e-16 |
| pr4 | 15.07093 | 0.4164 | 36.193 | <2e-16 |
| pr5 | -0.19126 | 0.01577 | -12.129 | <2e-16 |

ANDARAX-2 (p-value = 3.253e-07)

| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
|-----|----------|------------|---------|----------|
| pr1 | 6.18702 | 0.15318 | 40.391 | < 2e-16 |
| pr2 | 15.67829 | 0.23963 | 65.428 | < 2e-16 |
| pr3 | 0.443 | 0.05195 | 8.527 | 1.06E-15 |
| pr4 | 16.65863 | 0.27776 | 59.974 | < 2e-16 |
| pr5 | -0.09687 | 0.04411 | -2.196 | 0.0289 |

| ANDARAX-3 (p-value = 0.1539) | | | | |
|-------------------------------------|----------|---------------|---------|----------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| pr1 | 3.28293 | 0.58485 | 5.613 | 2.67E-08 |
| pr2 | 18.22653 | 0.47364 | 38.482 | < 2e-16 |
| pr3 | 0.17322 | 0.01613 | 10.741 | < 2e-16 |
| pr4 | 14.66379 | 0.35272 | 41.574 | < 2e-16 |
| pr5 | -0.25675 | 0.0235 | -10.925 | < 2e-16 |

| BAYARCAL (p-value = 2.2e-16) | | | | |
|-------------------------------------|----------|---------------|---------|----------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| pr1 | 3.60043 | 0.10856 | 33.16 | <2e-16 |
| pr2 | 14.64026 | 0.14436 | 101.42 | <2e-16 |
| pr3 | 0.31457 | 0.01283 | 24.52 | <2e-16 |
| pr4 | 16.87063 | 0.1332 | 126.65 | <2e-16 |
| pr5 | -0.17427 | 0.01709 | -10.2 | <2e-16 |

| ALHORÍ-1 (p-value = 2.2e-16) | | | | |
|-------------------------------------|-----------|---------------|---------|----------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| pr1 | 1.967669 | 0.121919 | 16.139 | <2e-16 |
| pr2 | 14.76297 | 0.18535 | 79.649 | <2e-16 |
| pr3 | 0.220155 | 0.008106 | 27.161 | <2e-16 |
| pr4 | 17.484394 | 0.157711 | 110.863 | <2e-16 |
| pr5 | -0.128026 | 0.013675 | -9.362 | <2e-16 |

| ALHORÍ-2 (p-value = 2.2e-16) | | | | |
|-------------------------------------|----------|---------------|---------|----------|
| | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| pr1 | 2.33529 | 0.14597 | 15.999 | < 2e-16 |
| pr2 | 14.70245 | 0.20665 | 71.147 | < 2e-16 |
| pr3 | 0.22928 | 0.01026 | 22.354 | < 2e-16 |
| pr4 | 16.79205 | 0.18637 | 90.101 | < 2e-16 |
| pr5 | -0.13265 | 0.017 | -7.802 | 9.09E-15 |

3.3. Proyecciones de escenarios de clima futuro

Como se ha mencionado en el apartado de metodología, previa generación de escenarios de clima futuro han de llevarse a cabo los procesos de verificación y validación que nos permiten corregir el error sistemático a las series “puras” para obtener los escenarios futuros finales.

En los cálculos para las próximas décadas las variables meteorológicas usadas han sido:

| Campo | Fuente |
|---------------|---|
| Temperatura | Obtenida mediante <i>downscaling</i> de cada uno de los modelos climáticos y para los RCPs 4.5 y 8.5. |
| Precipitación | Obtenida mediante <i>downscaling</i> de cada uno de los modelos climáticos y para los RCPs 4.5 y 8.5. |

Tabla 6. Relación de variables meteorológicas necesarias.

Los modelos climáticos que se han utilizado en el estudio y sus características se resumen en la tabla 7.

| Climatic Model | Spatial /temporal Resolution | Research Center | References |
|----------------|---|---|--|
| GFDL-ESM2M | 2 ^o x2,5 ^o daily | <u>National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)</u> , E.E.U.U. | Dunne et al. (2012) |
| CanESM2 | 2,8 ^o x2,8 ^o daily | Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CC-CMA), Canadá. | Chylek et al. (2011) |
| CNRM-CM5 | 1,4 ^o x1,4 ^o daily | CNRM (Centre National de Recherches Meteorologiques), Meteo-France, Francia. | Voldoire et al. (2013) |
| BCC-CSM1-1 | 1,4 ^o x1,4 ^o daily | Beijing Climate Center (BCC), China Meteorological Administration, China. | Xiao-Ge et al. (2013) |
| HADGEM2-CC | 1,87 ^o x1,25 ^o daily | Met Office Hadley Center, United Kingdom. | Collins et al. (2008) |
| MIROC-ESM-CHEM | 2,8 ^o x2,8 ^o daily | Japan Agency for marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI), and National Institute for Environmental Studies (NIES), Japan. | Watanabe et al. (2011) |
| MPI-ESM-MR | 1,8 ^o x1,8 ^o daily | Max-Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Germany. | Raddatz et al. (2007); Marsland et al. (2003) |
| MRI-CGCM3 | 1,2 ^o x1,2 ^o daily | Meteorological Research Institute (MRI), Japan. | Yukimoto et al. (2011) |
| NorESM1-M | 2,5 ^o x1,9 ^o daily | Norwegian Climate Centre (NCC), Norway. | Bentsen et al. (2012); Iversen et al. (2012) |

Tabla 7. Relación de modelos climáticos usados en el estudio.

Verificación de la metodología

La verificación es un proceso en el cual se analiza la capacidad de la metodología aplicada para simular el clima pasado; en este caso se comparan las series de observaciones simuladas mediante la regionalización del reanálisis

ERA40 (tanto de precipitación como de temperatura) con las observaciones reales del periodo común (1958-2000) de la zona de estudio.

En cuanto a la variable de Temperatura, los resultados de la verificación son buenos, con unos valores de MAE notablemente por debajo de aquellos que se obtendrían mediante un mero uso de la climatología como predictor, cometiendo un error medio inferior a 2°C en la predicción diaria. El *Bias* se comporta de la manera esperada, con un valor aproximado de 0 (figura 3).

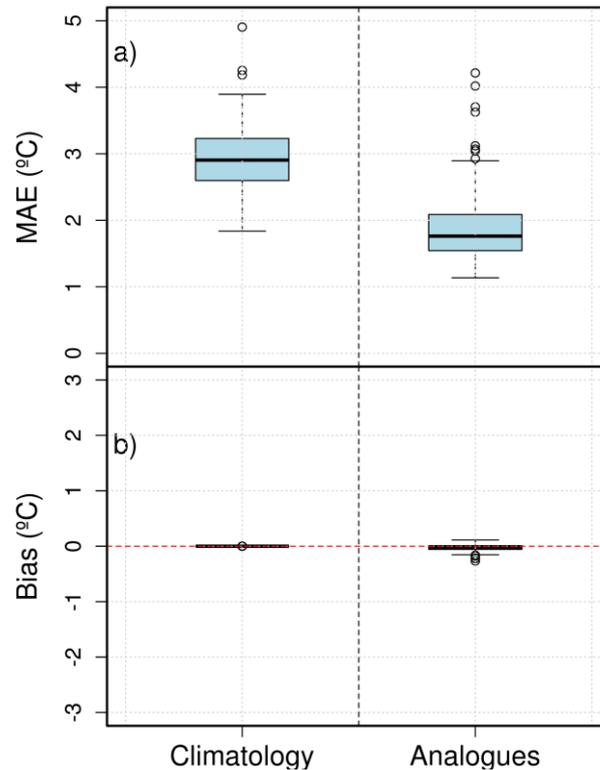


Figura 3. Resultados del proceso de verificación de la Temperatura donde se han comparado los resultados de regionalizar el ERA40 frente a datos observados para las estaciones de los ríos analizados (derecha). Con el fin dar calidad a los resultados, se representa a la izquierda los resultados de tomar de referencia la climatología de cada estación. Los estadísticos empleados son el MAE (a) y el Bias (b).

Respecto a la Precipitación, los resultados de los estadísticos son muy satisfactorios. El valor del MAE se encuentra bajo el de la climatología, con un error medio de menos de 2mm. El *Bias* se sitúa en torno a 0, mientras que en el test KS la mediana de las estaciones se haya por encima del valor umbral de la significancia, lo que mostraría que la distribución de datos obtenida del *downscaling* presenta un comportamiento igual a la serie observada original (figura 4).

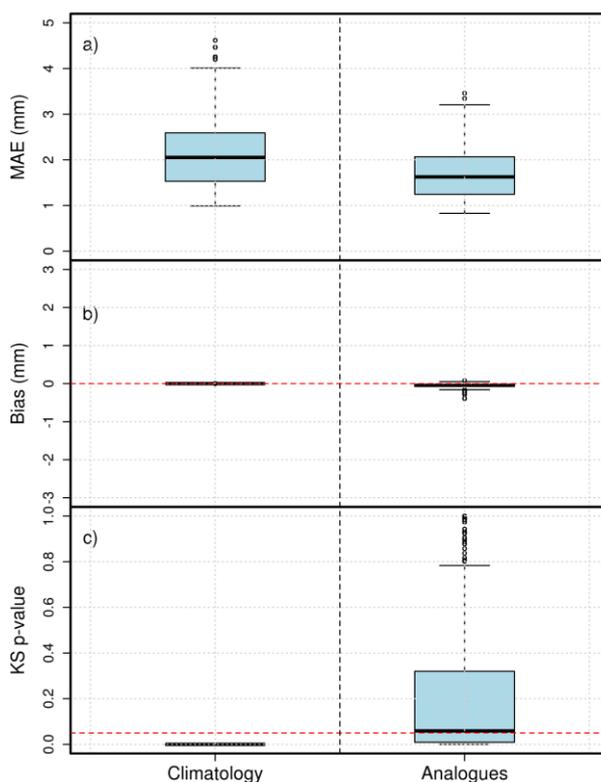


Figura 4. Resultados del proceso de verificación de la Precipitación donde se han comparado los resultados de regionalizar el ERA40 frente a datos observados para las estaciones de los ríos analizados (derecha). Con el fin de dar calidad a los resultados, se representa a la izquierda los resultados de tomar de referencia la climatología de cada estación. Los estadísticos empleados son el MAE (a), el *Bias* (b) y el test Kolmogorov-Smirnov (c).

Validación de la metodología

Mediante la validación, se estudia el error introducido por el Modelo de Circulación General (MCG) utilizado. Para ello se comparan las series obtenidas al regionalizar las salidas de control del modelo con las series obtenidas mediante la aplicación de la metodología FICLIMA verificada con anterioridad sobre las proyecciones de los MCG para un periodo común (1958-2000).

Los resultados obtenidos de la validación de la variable Temperatura son buenos. El estadístico *Bias* muestra una tendencia general de los modelos a sobreestimar el valor de la temperatura alrededor de 0,5 o C, siendo en CNRM-CM5 el modelo con el menor sesgo. La relación de SD es buena para prácticamente todos los modelos, con una SD semejante a la observada, con la excepción del GFDL-ESM2M, cuyo cociente es elevado. El test KS es ampliamente aprobado por todos los modelos (figura 5).

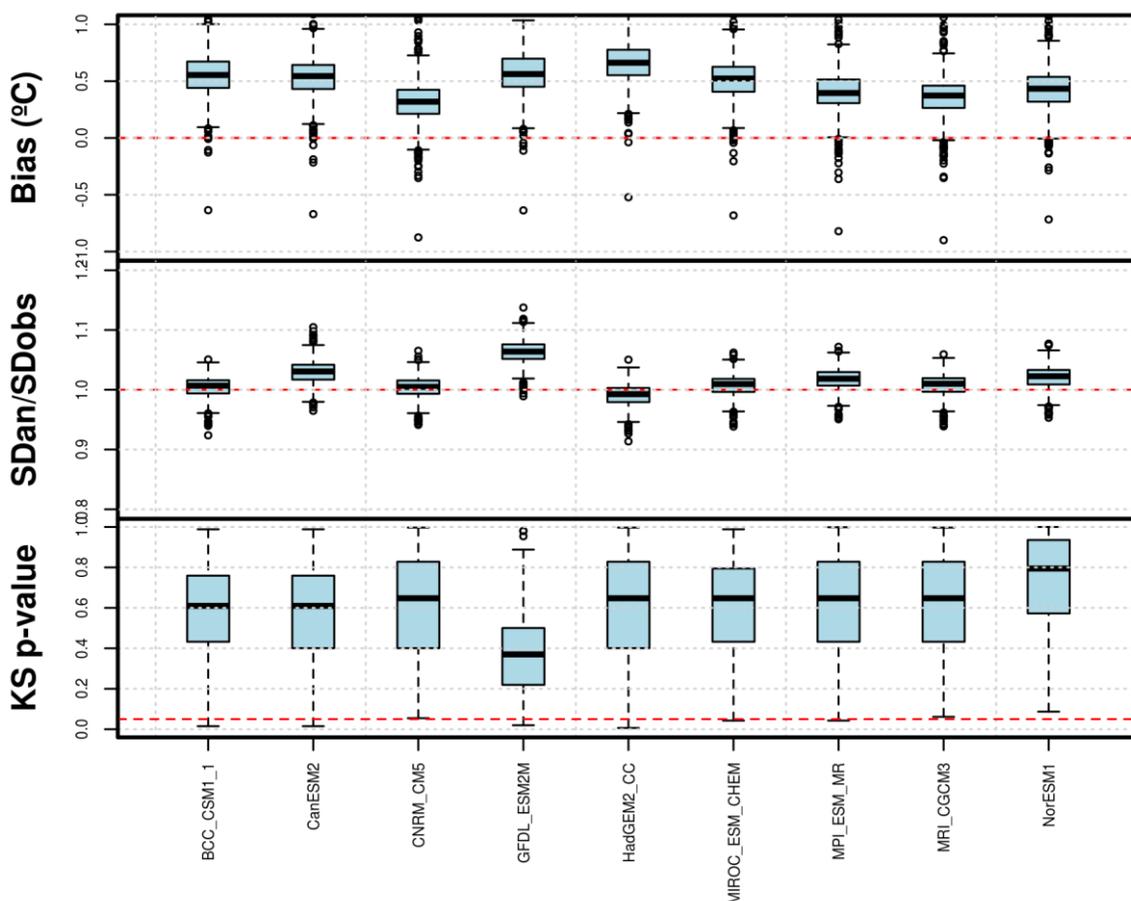


Figura 5. Resultados del proceso de validación de la Temperatura para los MCG regionalizados a las estaciones de los ríos analizados. Los estadísticos empleados son el Bias (superior), el cociente entre sendas SD (medio) y el test Kolmogorov-Smirnov (inferior).

Respecto a la Precipitación los resultados son igualmente muy buenos. Se observa que, en este caso, los modelos tienden a subestimar ligeramente el total de precipitación, entre 0 y -0.15mm/día en el peor de los casos. La relación de SD es buena con la salvedad del modelo MIROC-ESM-CHEM, cuyo valor es algo bajo comparado al resto. En cuanto al test KS entre la salida de control de los MCG y la obtenida mediante el método FICLIMA, todos los modelos lo superan satisfactoriamente, lo que muestra la buena similitud entre ambas distribuciones (figura 6).

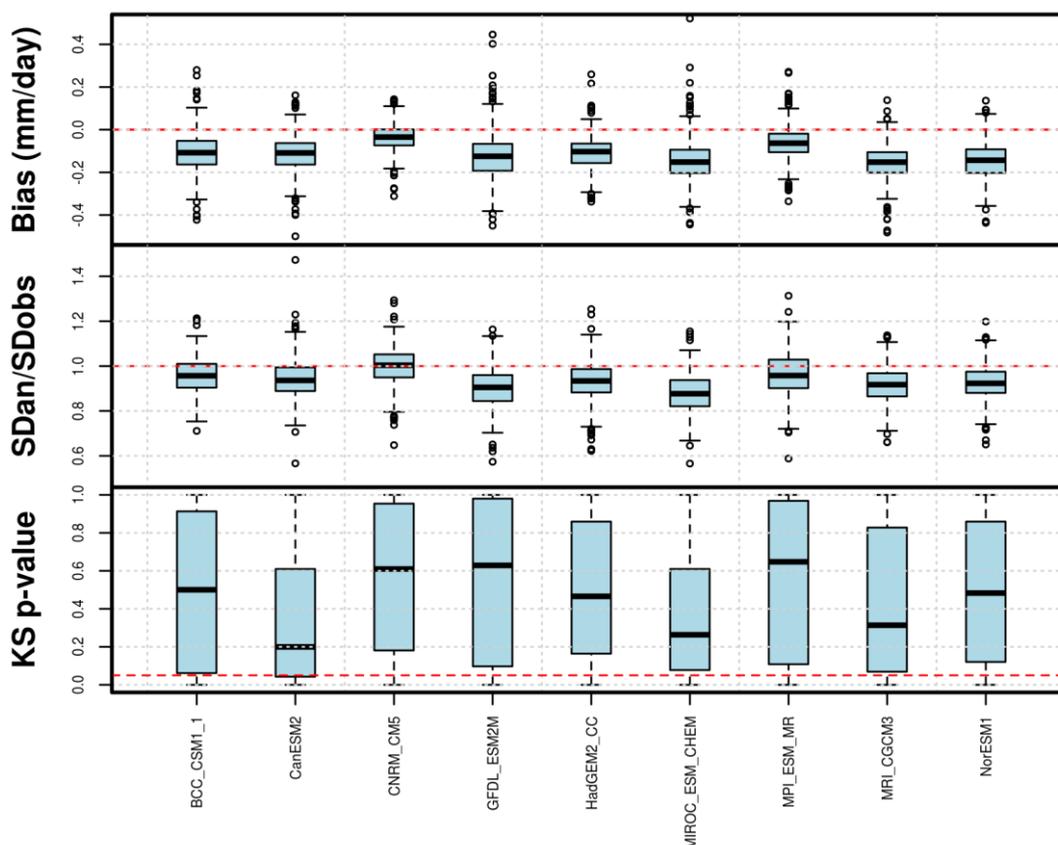


Figura 6. Resultados del proceso de validación de la Precipitación para los MCG regionalizados a las estaciones de los ríos analizados. Los estadísticos empleados son el Bias (superior), el cociente entre sendas SD (medio) y el test Kolmogorov-Smirnov (inferior).

Escenarios climáticos futuros de Temperatura

Antes de estudiar las implicaciones de estas figuras debemos describir con detalle cómo se han construido para comprender qué significa. Lo que se muestra es la evolución estacional de la variable para cada RCP como la mediana de todos los resultados obtenidos para cada Modelo Climático (por ejemplo, la correspondiente a RCP8.5 se construye con todos los escenarios RCP8.5 disponibles, uno por cada modelo que proporcione tal escenario) y para cada observatorio; tales medianas son las líneas gruesas pintadas. Las áreas sombreadas representan, para cada RCP, la dispersión de los datos para todos los modelos y todos los observatorios, donde el límite superior es el percentil 90 y el inferior el percentil 10 de todos los datos. Cada valor concreto se calcula como la media móvil de 30 años: un valor concreto asociado al año 2050 se corresponde con la media móvil del periodo 2020 – 2050, es decir, los 30 años anteriores al año referenciado. Los cálculos se muestran contra el promedio obtenido frente al periodo 1971 – 2000, es decir que el valor 0 de las gráficas se corresponde con la media de ese promedio, con lo que cualquier cambio se referencia contra ese valor. La línea discontinua vertical representa el año en que acaba el experimento *Historical* (el año 2005) y comienzan los escenarios RCP. Cada estación del año aparece identificada por las iniciales en inglés de

los meses que la forman (DJF -*December, January, February*; MAM -*March, April, May*; JJA -*June, July, August*; SON -*September, October, November*).

Aunque se podría trabajar en base a estadísticas anuales (es decir, que podríamos representar una única gráfica con datos anuales), en el caso de variables tan fuertemente dependientes de la estación del año como la temperatura es mucho más adecuado estudiar conclusiones estacionales que anuales – adviértase que una única gráfica anual enmascararía el diferente comportamiento en la gráfica de, por ejemplo, el verano y el invierno.

La inclusión de las zonas sombreadas se debe a la necesidad de incluir algún criterio de variabilidad que informe del margen de variación que cabe esperar de las simulaciones, aun cuando la mediana (una medida estadística robusta de centralización) nos informa de aquello que se considera el valor central de entre los más probables.

La figura 7 nos muestra los incrementos estacionales esperados de la Temperatura Máxima como promedio para todos los observatorios. Resulta evidente el fuerte incremento esperado de tal variable a lo largo de todo el siglo XXI, especialmente para el verano, seguido de la primavera y el otoño, siendo invierno la estación del año que muestra menores incrementos (aun siendo significativos).

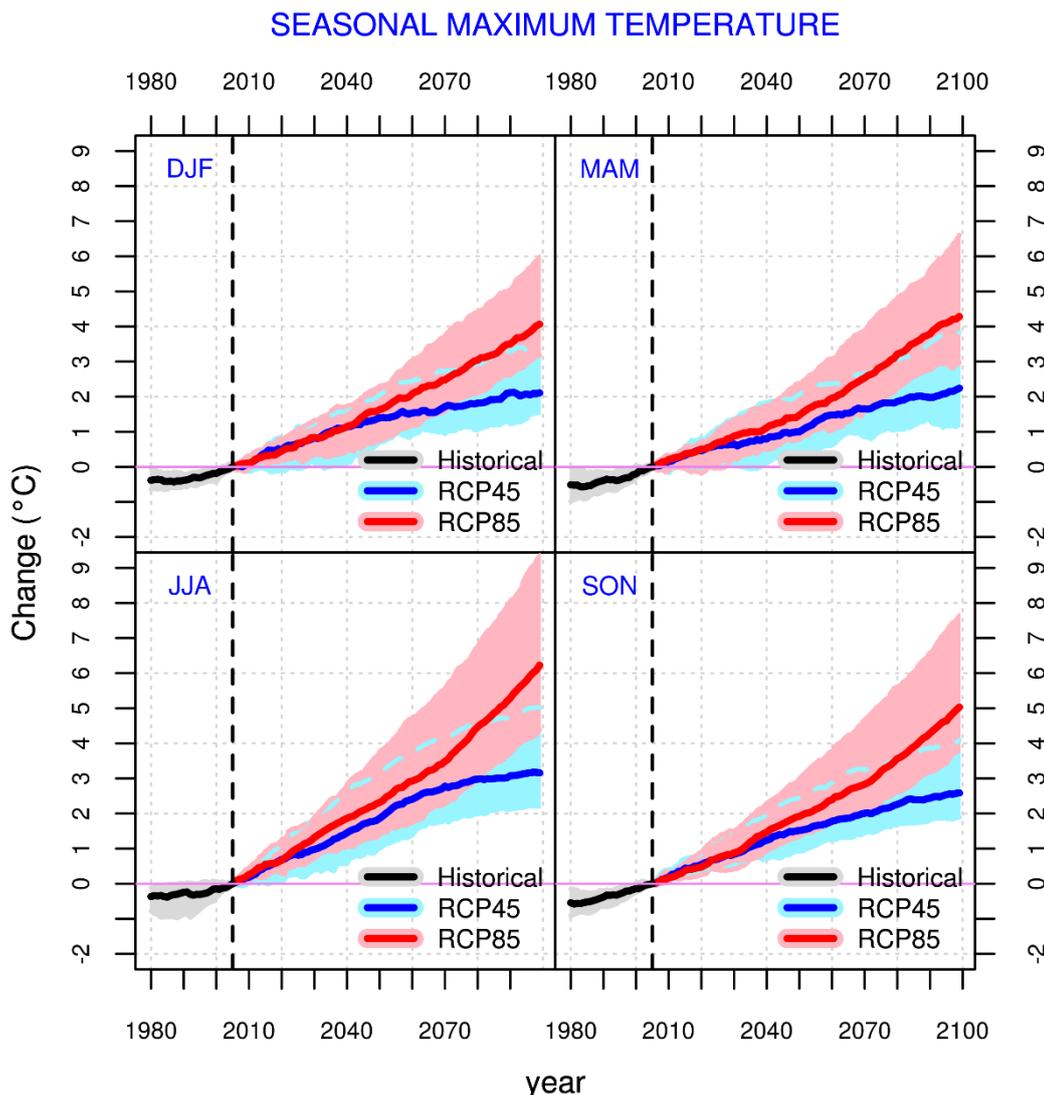


Figura 7. Incrementos estacionales relativos esperados de la Temperatura Máxima para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1971 – 2000 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento Historical y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos sobre todos los observatorios. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

La figura 8 nos muestra los incrementos estacionales esperados de la Temperatura Mínima como promedio para todos los observatorios. De nuevo resulta evidente el fuerte incremento esperado de tal variable a lo largo de todo el siglo XXI. El verano es de nuevo la estación con mayores incrementos, seguido de la primavera y el otoño, siendo invierno la estación del año que muestra menores incrementos (aun siendo de nuevo notablemente intensos). Nótese que los incrementos de la Temperatura Mínima, aunque elevados, son inferiores a los esperados para Temperatura Máxima.

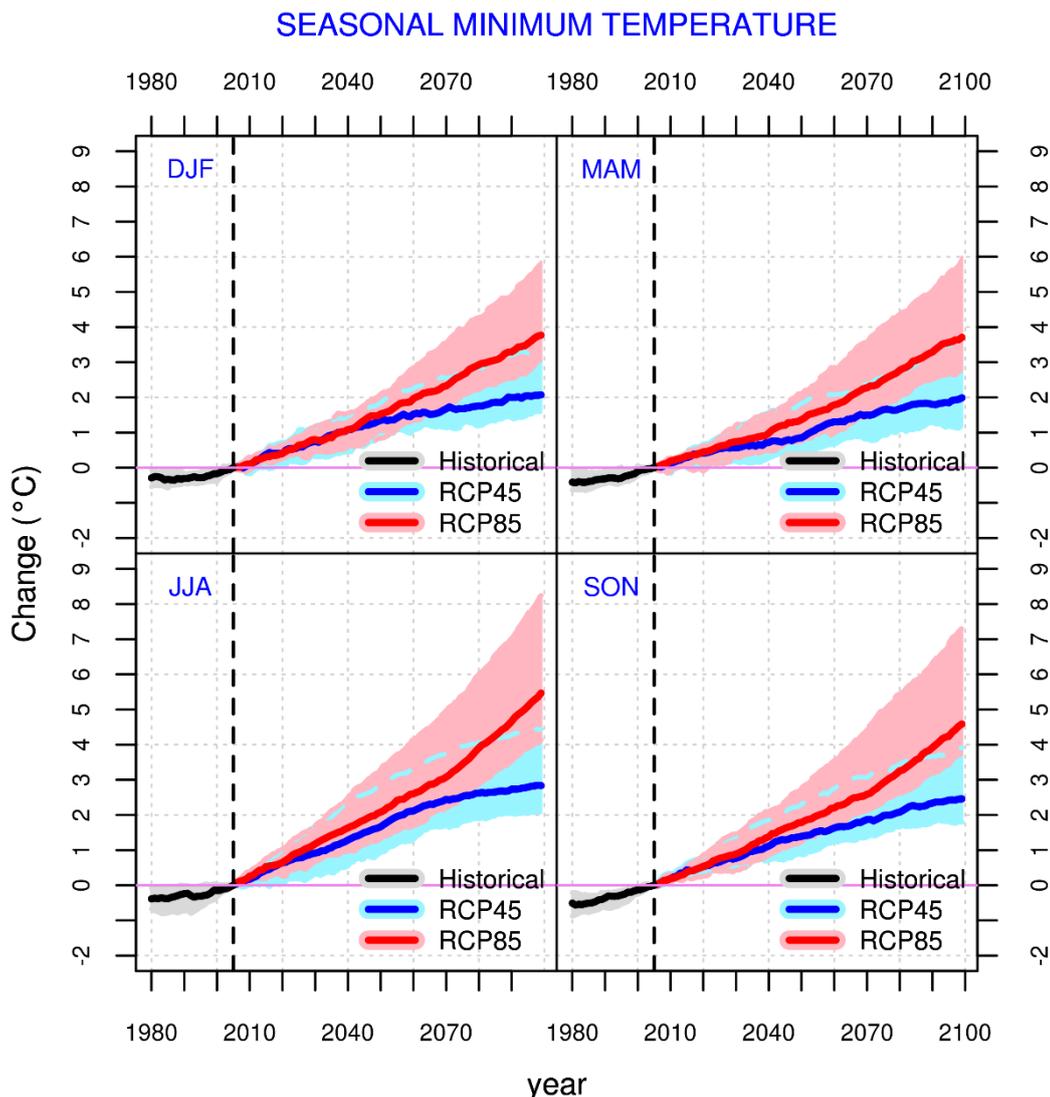


Figura 8. Incrementos estacionales relativos esperados de la Temperatura Mínima para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1971 – 2000 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento *Historical* y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos sobre todos los observatorios. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

Escenarios climáticos futuros de Precipitación

La precipitación presenta distintas tendencias dependiendo de la estación del año que se analice. Exceptuando los meses de primavera, la precipitación tiende a disminuir ligeramente, alcanzando en el año 2050 un descenso medio de entre un 4% y un 6%. Esta tendencia descendente será más marcada en los meses de otoño, con disminuciones de hasta un 10%. En cambio, en primavera las proyecciones más probables sugieren un ligero aumento de la precipitación, que podría ser de hasta un 8% (figura 9). Hay que resaltar que todas estas tendencias presentan un nivel muy alto de incertidumbre, habiendo un abanico de

proyecciones que sugieren desde descensos en la precipitación de un 20% hasta aumentos de un 20%.

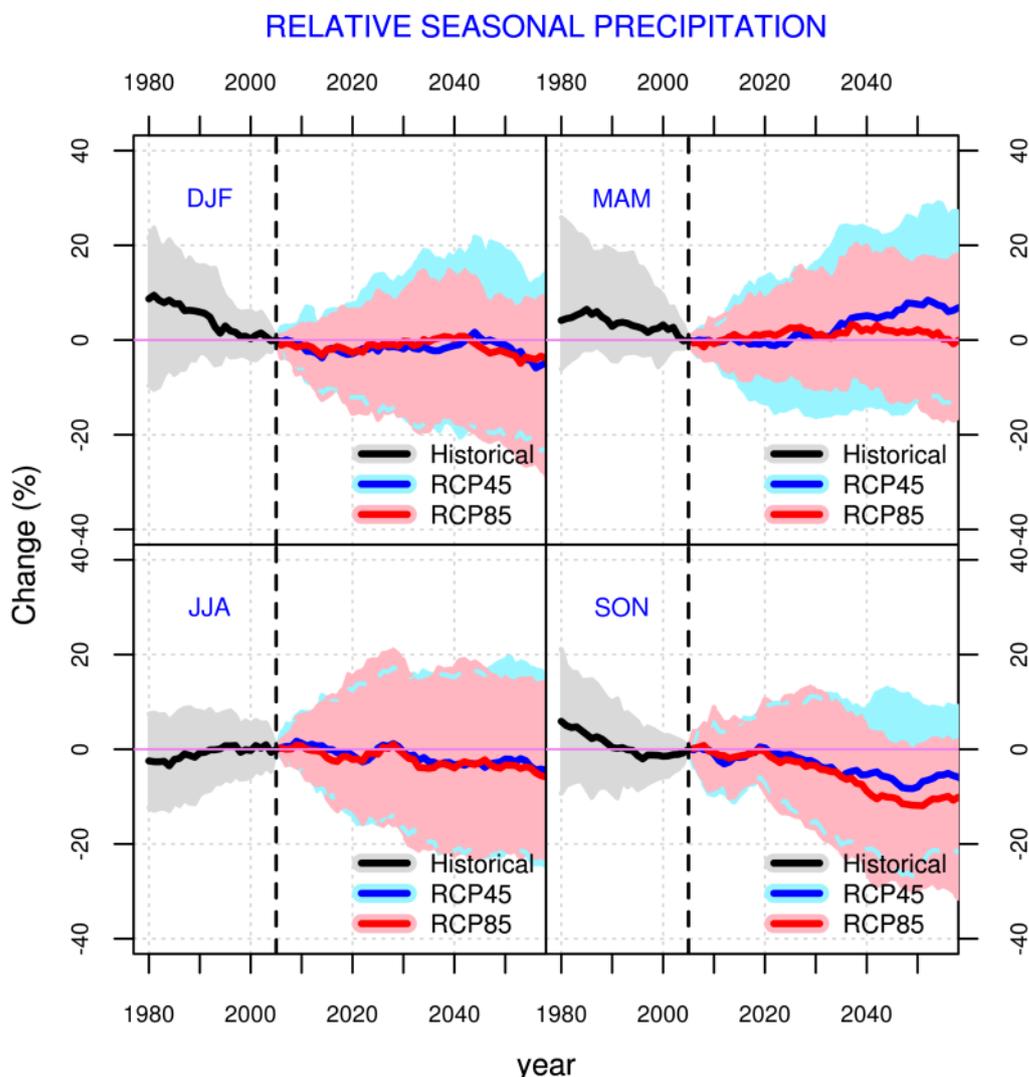


Figura 9: Incrementos estacionales relativos esperados de la Precipitación para el siglo XXI, representados como medias móviles de 30 años, según los RCPs representados (4.5, y 8.5) con respecto al promedio del periodo 1971 – 2000 (tomado como referencia). La línea discontinua marca el fin del experimento *Historical* y el comienzo de los RCPs. Simulaciones de todos los modelos sobre todos los observatorios. Las líneas muestran la mediana de todos los valores; las sombras cubren desde el percentil 10 hasta el 90.

Generación de proyecciones de temperatura del agua para los ríos seleccionados

El procedimiento es la aplicación en los modelos de cada río de los datos de temperatura generados en la actividad anterior para los escenarios locales.

Los escenarios futuros estudiados son RCP4.5 y RCP8.5. Los modelos climáticos a los que se han aplicado esos escenarios son: CanESM2, GFDL-ESM2M, MPI-ESM-MR, NorESM1, HADGEM2-CC, CNRM-CM5, MRI-CGCM3, BCC-CSM-1, MIROC-ESM-CHEM. Esto significa que se han generado 18

simulaciones por cada estación de muestreo, lo que lleva a un total de 342 proyecciones.

Las proyecciones realizadas en cada estación se agruparon por escenarios y se calcula la media de los valores obtenidos por cada simulación para crear la proyección finalmente adoptada para cada uno de los escenarios.

A continuación se muestran como ejemplo, los resultados para la estación de muestreo del río Júcar situada en Huélamo (Serranía de Cuenca) (Figuras 10 a 14).

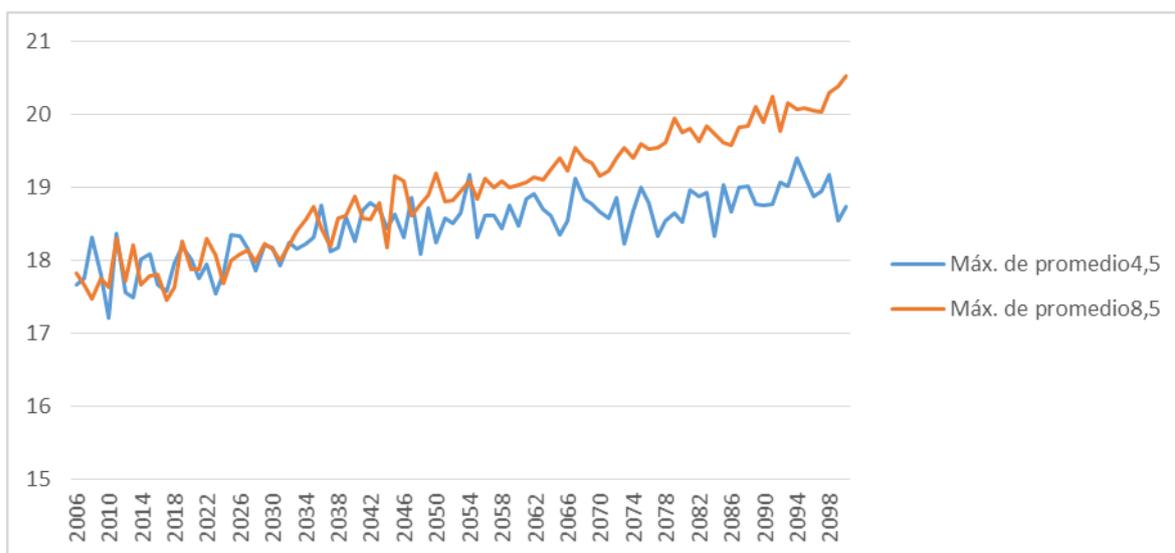


Figura 10. Evolución a lo largo del siglo de la temperatura máxima anual de las medias diarias en los escenarios RCP4.5 (azul) y RCP8.5 (rojo).

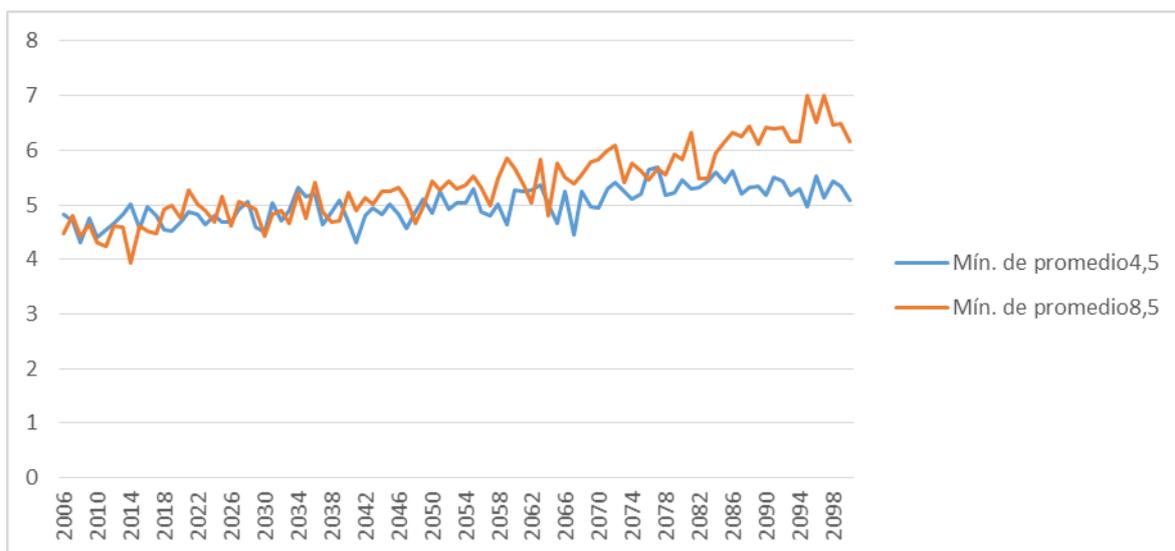


Figura 11. Evolución a lo largo del siglo de la temperatura mínima anual de las medias diarias en los escenarios RCP4.5 (azul) y RCP8.5 (rojo).

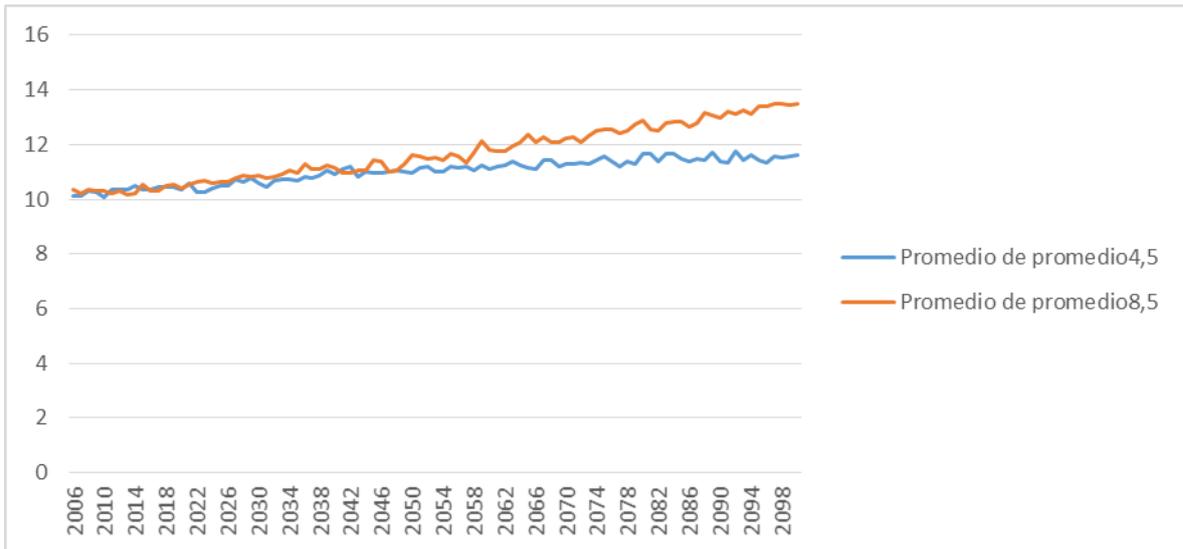


Figura12. Evolución a lo largo del siglo de la temperatura media en los escenarios RCP4.5 (azul) y RCP8.5 (rojo).

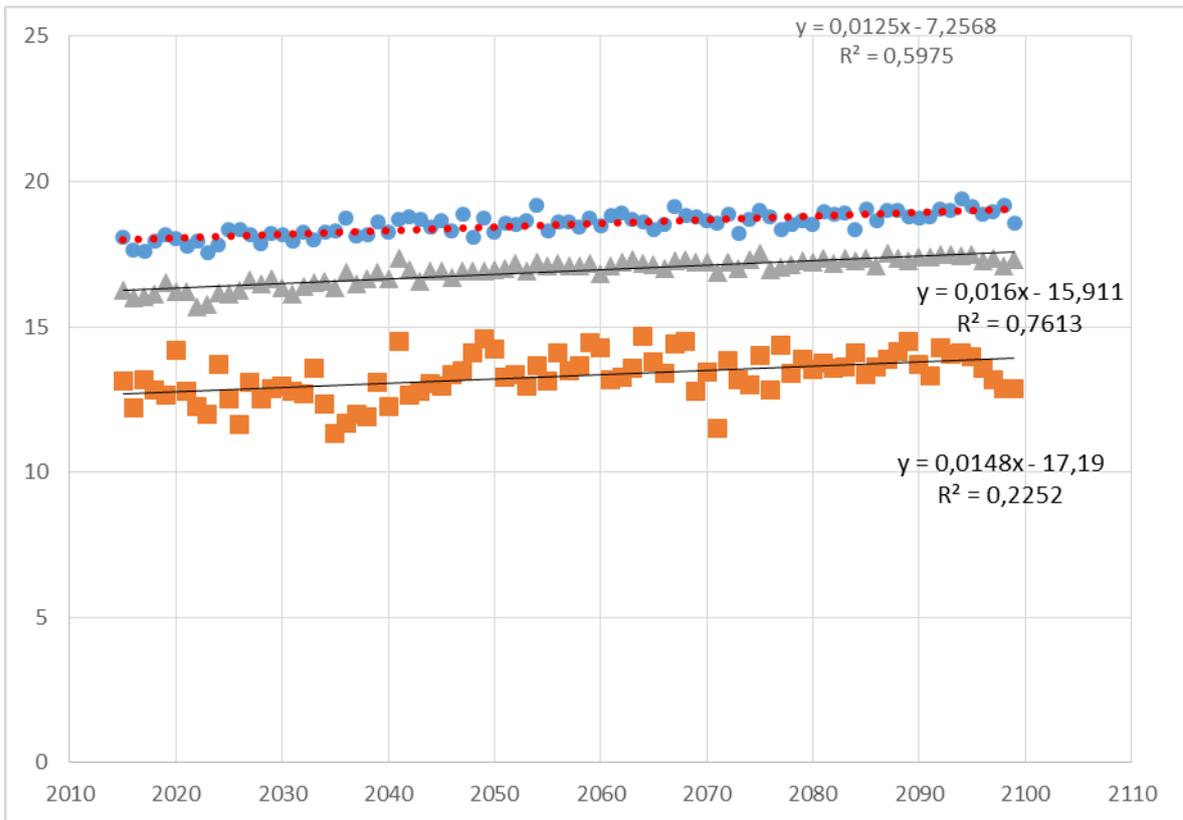


Figura 13. Evolución a lo largo del siglo de la temperatura media diaria de verano (junio-julio-agosto) en el escenario RCP4.5. En azul los valores máximos de las medias, en rojo los valores mínimos y en verde los valores medios.

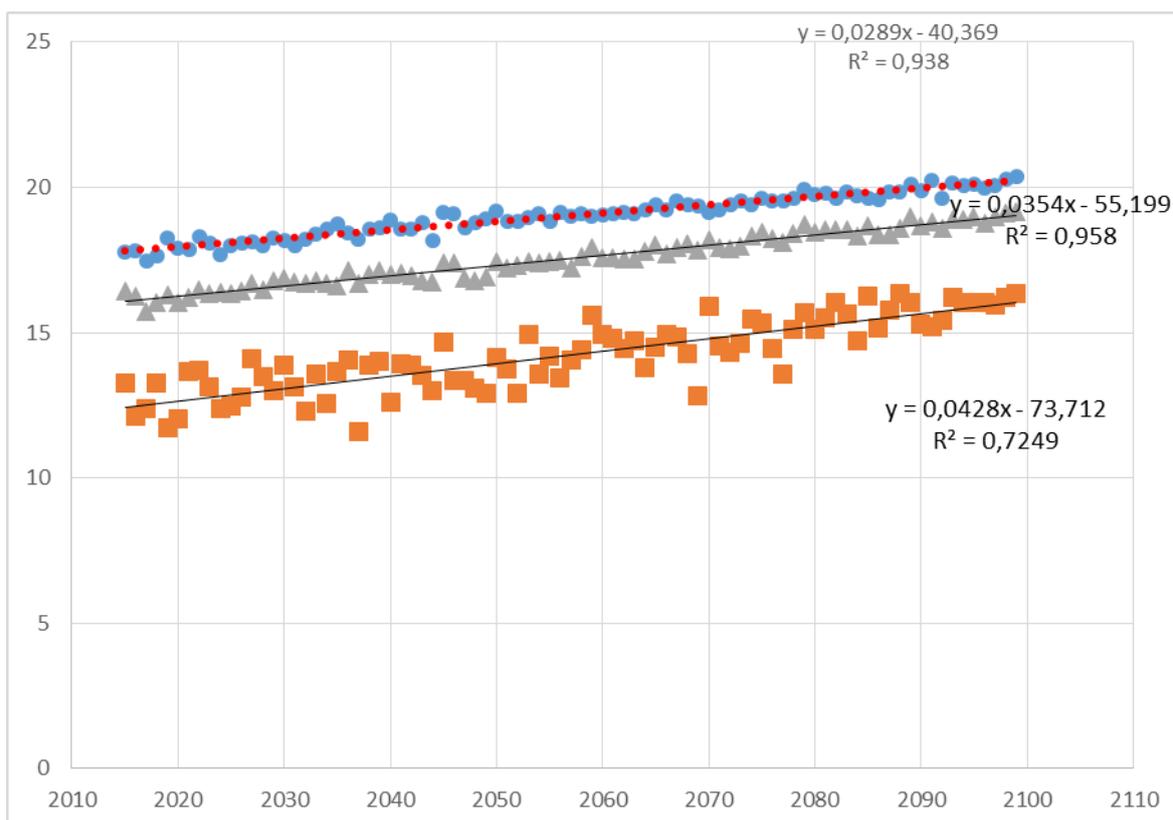


Figura 14. Evolución a lo largo del siglo de la temperatura media diaria de verano (junio-julio-agosto) en el escenario RCP8.5. En azul los valores máximos de las medias, en rojo los valores mínimos y en verde los valores medios.

Sintetizando resultados, cabe destacar que las simulaciones muestran una tendencia significativamente creciente de la temperatura media del río a lo largo del siglo (alrededor de 1,5°C en el escenario RCP4.5 y 3,0°C en el escenario RCP8.5).

3.4. Contraste de los resultados con los requerimientos térmicos de la especie indicadora elegida (trucha común) y evaluación de la evolución de su hábitat

La trucha común (*Salmo trutta*) es una especie íctica de agua dulce altamente sensible a los cambios térmicos y se revela como un indicador valioso para determinar los impactos del cambio climático sobre el hábitat y las comunidades fluviales. Los rangos de tolerancia térmica y los óptimos para las diferentes fases del ciclo vital de la misma están muy bien documentados en la literatura científica (Elliott y Elliott 2010), y son base para las evaluaciones de respuesta (Tablas 8 y 9).

Estudios previos realizados por el equipo de este proyecto, identificaron la temperatura del agua de 18,7°C de media diaria durante 7 días consecutivos como parte del umbral ecológico que marca la presencia/ausencia de truchas (Santiago et al. 2017).

| | | TEMPERATURA (°C) | |
|----------------|--------------|------------------|----------|
| | | INFERIOR | SUPERIOR |
| HUEVOS | | 0 | 13 |
| ALEVINOS | Inicio | 0-1 | 20-22 |
| | Final | 0 | 22-24 |
| JUVENIL Y AÑAL | Inicio | 0-0,7 | 22-25 |
| | Final | -0,8 | 26-30 |
| | Alimentación | 0,4-4 | 19-26 |

Tabla 8. Umbrales de tolerancia térmica (°C) de diferentes fases vitales de la trucha común (Elliott & Elliott 2010).

| | TEMPERATURA (°C) | | | |
|---------------|------------------|-----------|-----------|------------|
| | INFERIOR | SUPERIOR | ÓPTIMA | EFICIENCIA |
| Invertebrados | 2,9-3,6 | 18,2-19,5 | 13,1-14,1 | 8,9 (32%) |
| Peces | c. 2,0 | c 19,5 | 16,6-17,4 | 9,3 (42%) |
| Pellets | 1,2-6,1 | 19,4-26,8 | 11,6-19,1 | |

Tabla 9. Límites de temperatura para el crecimiento, temperatura óptima para el crecimiento a raciones máximas, y temperatura de máxima eficiencia para el crecimiento (°C). Las eficiencias máximas de conversión de la energía de crecimiento como porcentaje del consumo de energía se dan en paréntesis (Elliott y Elliott 2010).

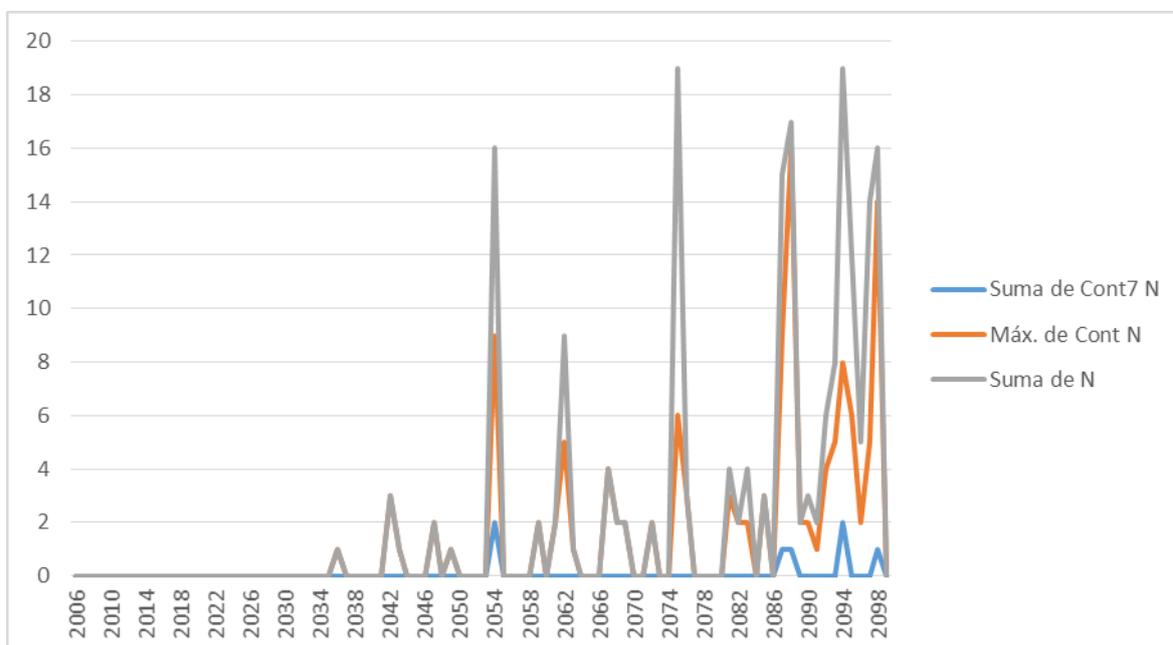


Figura 15. Evolución a lo largo del siglo de la frecuencia (días) con que se supera el umbral de temperatura media de 18,7°C en el escenario RCP4.5. En verde se representa el número total de días que se supera el umbral a lo largo del año, en rojo el número máximo de días consecutivos en que se supera el umbral por año, y en azul, el número de veces en que se supera el umbral durante 7 o más días consecutivos.

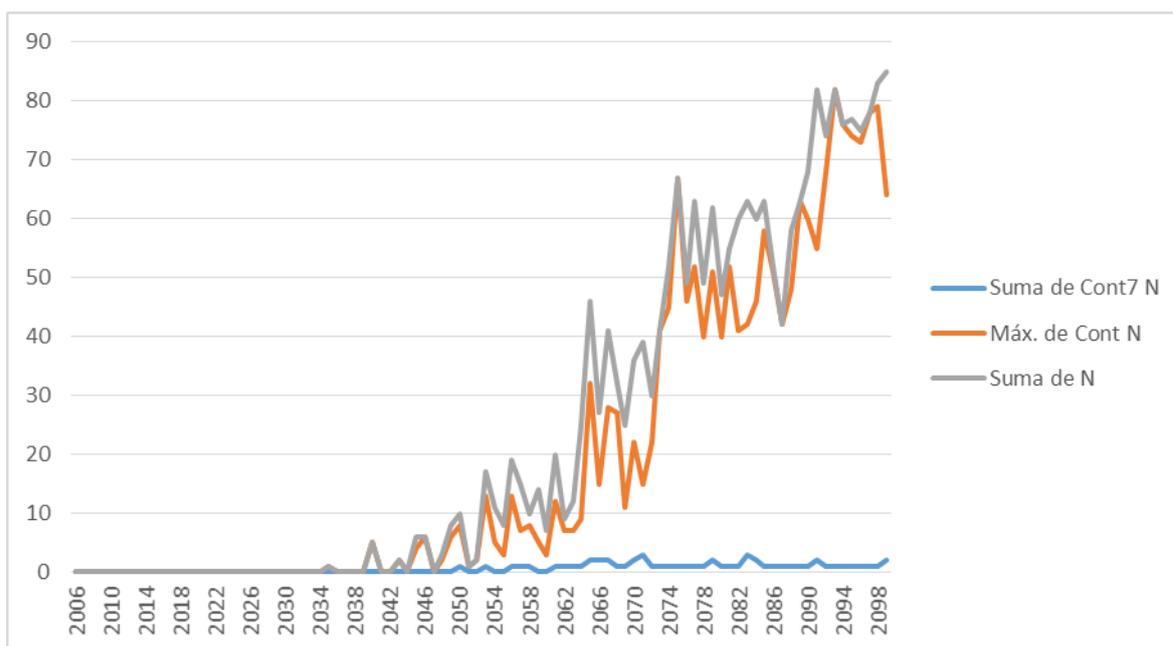


Figura 16. Evolución a lo largo del siglo de la frecuencia (días) con que se supera el umbral de temperatura media de 18,7°C en el escenario RCP8.5. En verde se representa el número total de días que se supera el umbral a lo largo del año, en rojo el número máximo de días consecutivos en que se supera el umbral por año, y en azul, el número de veces en que se supera el umbral durante 7 o más días consecutivos.

La frecuencia con que se supera el umbral fijado de 18,7°C cada año a lo largo del presente siglo va en aumento progresivo, poniendo en un serio compromiso la viabilidad de las poblaciones de trucha en el caso del ejemplo (río Júcar en Huélamo) para el escenario más desfavorable (Figuras 15 y 16). A final de siglo (periodo 2090-2099), para el escenario RCP4.5, se espera que la media de días por encima del umbral sea de 8,5 días/año, el número máximo de días consecutivos sobre el umbral sea de 4,7 días/año, y las veces que se supere el umbral durante 7 o más días consecutivos sea de 0,3 veces. Los valores de dichas variables para el escenario RCP8.5 se situarían en 78 días/año por encima del umbral, 70,9 días/año el número máximo de días consecutivos, y 1,2 el número de veces que se supere el umbral.

3.5. Valoración final de resultados de las proyecciones

Las conclusiones se conforman como el paso final de un trabajo de investigación, por lo que a modo de ejemplo se presentan en modo sucinto las conclusiones provisionales relativas al escenario y simulación que se ha presentado a lo largo de este informe.

- ✓ El cambio climático se prevé que actúe calentando el agua de los ríos a lo largo del tiempo.
- ✓ El calentamiento no será uniforme en todos los ríos y tramos debido a diferente comportamiento local del clima y a las características hidrológicas de los diferentes ríos.

- ✓ En los ríos con fuerte componente hidrogeológica en su alimentación, la estabilidad de la temperatura subterránea de descarga aporta una resistencia complementaria al cambio de temperatura del agua fluvial que puede atenuar el calentamiento.
- ✓ En relación con la trucha común, no parece que en las zonas de cabecera de los ríos que habita se vaya a reducir la habitabilidad térmica de los ríos, si bien se detectan tendencias importantes de aumento de temperatura en las zonas más bajas que pueden reducir sensiblemente la viabilidad de algunas poblaciones por la reducción de sus áreas de residencia y eventual aislamiento de poblaciones.

3.6. Identificación de otros factores intervinientes en la regulación térmica de los ríos

Entre los factores más importantes que actúan en los procesos de regulación de la temperatura del agua se encuentran las condiciones atmosféricas, destacando entre ellas la temperatura del aire, relación de la que partimos en esta investigación. Otros factores importantes se pueden agrupar en estas tres familias: la topografía, el caudal circulante y las características del lecho fluvial (Caissie 2006).

Los intercambios de energía térmica en un río se deben al intercambio de calor entre el aire y la superficie del agua, y entre el lecho fluvial y el agua (Caissie 2006).

El flujo de calor en la interfase aire/agua resulta del intercambio de energía debido principalmente a: (i) la radiación neta de onda corta (radiación solar) –el componente dominante-; (ii) radiación neta de onda larga; (iii) evaporación; y (iv) convección –frecuentemente inapreciable- (Caissie 2006).

El agua de los ríos pierde y gana calor en verano y en invierno, respectivamente, a través de los flujos con el hiporreos (Caissie y Giberson 2003). Los flujos de calor a través del lecho pueden ser especialmente importantes en otoño debido a un significativo gradiente térmico resultante del calor residual acumulado del verano en el terreno (Alexander et al. 2003).

En las zonas de cabecera, la temperatura del agua de un río guarda una estrecha relación con la temperatura del agua subterránea que lo alimenta (Caissie 2006; O'Driscoll & DeWalle 2006).

La temperatura del agua sufre variaciones a escala diaria y anual. Las fluctuaciones diarias suelen tener su mínimo alrededor del amanecer, y el máximo a media tarde. Las variaciones diarias son generalmente pequeñas en los tramos fríos de cabecera, incrementándose a medida que el río va haciéndose más grande y menos dominado por las descargas subterráneas y más por las condiciones meteorológicas (Caissie 2006). La masa de agua

también influye sobre la estabilidad térmica de sí misma, ya que ésta es función de la capacidad térmica, que es proporcional al calor específico y a la masa implicada (Stelczer 1987). Esto significa que una masa de agua mayor (un río, un lago mayor) es más termoestable que otra menor. Por debajo de 30°C (temperatura aproximada a la que el calor específico es mínimo), a menor temperatura, mayor calor específico y, consecuentemente, a igual masa, mayor capacidad térmica. Lógicamente, estos efectos están a su vez bajo la influencia de la relación de aumento de superficie expuesta a la atmósfera en relación al aumento de masa (Stefan & Preud'Homme 1993).

De todo lo anterior se deriva que la cantidad de agua y su origen, así como la acción directa de atemperadores del microclima y atenuadores de la radiación como la vegetación, son factores reguladores de la temperatura del agua de los ríos con efecto directo e inmediato sobre los mismos (St-Hilaire et al. 2000, Johnson 2004, Arismendi et al. 2012, Diem et al. 2013, Kristensen et al. 2013, Loinaz et al. 2013, Rolls et al. 2013, Van Vliet et al. 2013).

3.7. Análisis de la relevancia de los factores identificados en los ríos en estudio

En la fase de planificación de esta investigación ya se tuvieron en cuenta los factores que podían afectar a la temperatura del río y, en consecuencia, se eligieron las estaciones de muestreo y se diseñó el protocolo de recogida de datos.

Se ha tenido especial cuidado en evitar la radiación directa sobre los equipos de medición, pero también se ha tomado nota sobre las condiciones de sombreado ripario (especialmente grado de cobertura), vegetación y uso del suelo de la cuenca vertiente, caracterización de usos del agua (en concreto, para identificar extracciones de caudal superficiales y subterráneas), existencia o no de presas, y cualquier acción que pudiera alterar el régimen natural de caudales.

Así mismo, se está identificando la problemática asociada a la futura disponibilidad de caudales en las diferentes cuencas por el efecto que tienen por sí sobre la biota acuática y por la influencia sobre el régimen térmico.

El análisis de los efectos de los principales factores identificados sobre el funcionamiento térmico de los ríos y su biota se está realizando en este momento. En especial se están considerando los efectos del sombreado del cauce, la cubierta arbórea de la cuenca vertiente y la futura reducción del módulo anual de caudales, incluyendo su naturaleza (natural v. artificial, y dentro de ésta, detracciones en superficie o a partir de acuíferos subterráneos).

3.8. Análisis de las posibilidades de manipulación de dichos factores, y evaluación de la eventual eficacia del manejo de los mismos

Analizando la naturaleza de los diferentes factores, finalmente identificamos los siguientes grupos principales por susceptibilidad para ser manipulados:

- ❖ Vegetación riparia: la sombra directa reduce la temperatura del agua.
- ❖ Vegetación de la cuenca vertiente: favorece la infiltración y por tanto la escorrentía subterránea que origina un régimen más frío en verano. También permite un microclima más fresco.
- ❖ Caudal disponible en cada momento: procurando caudales más altos en estiajes es posible reducir el calentamiento.
- ❖ Funcionamiento de embalses: los desembalses por coronación, a diferencia de los hipolimnéticos de fondo, originan una alteración térmica por calentamiento que puede ser crítica en época estival.
- ❖ Morfología del cauce: los tramos dragados y canalizados favorecen con frecuencia una mayor insolación y reducen la conectividad con el subálveo y por tanto permiten el calentamiento de las aguas.

Se está analizando desde el punto de vista teórico el grado de adecuación de la intervención sobre dichos factores manipulables en los diferentes ríos con el objeto de individualizar los posibles tratamientos.

Conocido y cuantificado el efecto de los factores identificados en actividades anteriores sobre el régimen térmico de los ríos, se establecerá un orden de prioridad de posibles medidas de adaptación al cambio global. Los criterios de prioridad aplicables son:

- Grado de importancia/influencia sobre la temperatura.
- Posibilidad/facilidad de manipulación.
- Eficacia.

3.9. Diseño de un plan de medidas y guía para su selección e implementación

Las medidas generales emanadas de las actividades anteriores se pueden clasificar en tres tipos:

- ✚ Medidas de revegetación y conservación de doseles arbóreos en las bandas riparias (preservación y aumento del sombreado). Han de ser

adecuadas para no perjudicar la productividad del medio fluvial ni restarle diversidad.

- ✚ Medidas de conservación y/o recuperación de la vegetación de la cuenca vertiente. En su implementación, se considera la necesidad en cada cuenca de respetar los procesos geomorfológicos naturales y que caractericen a cada río.
- ✚ Control efectivo y racionalización de las extracciones de agua de cauce y de acuífero subterráneo. Medidas políticas que deberán recogerse en los Planes Hidrológicos de Cuenca.
- ✚ Gestión de las presas que eviten el vertido de las aguas superficiales recalentadas de los embalses.
- ✚ Restauración de alteraciones morfológicas de los cauces.

Es importante la coordinación de todas las clases de medidas, ya que el establecimiento de una cubierta vegetal arbórea en las riberas está sometido a los procesos hidromorfológicos resultantes de usos consuntivos del agua y de los terrenos de la cuenca vertiente.

Los resultados de esta actividad se materializarán en un documento-guía de uso más universal para la selección de medidas para paliar los efectos del cambio climático en los ríos en función de su idoneidad en los distintos casos, así como el modo de implementarlas.

4. Conclusiones

Con el objetivo de determinar la evolución durante las próximas décadas de los ecosistemas fluviales del sudeste peninsular se ha llevado a cabo el proyecto AICCEPEF.

Partiendo de 9 modelos climáticos globales y utilizando técnicas de regionalización estadística o *downscaling* se ha estimado una tendencia significativa al alza de la temperatura media de los ríos analizados del centro y sur peninsular, de entre 1.5º y 3ºC bajo las proyecciones RCP4.5 y 8.5 respectivamente. No obstante este calentamiento no será uniforme a lo largo de dichas cuencas, sino que afectará principalmente a los tramos medios y bajos con un menor aporte hidrogeológico, donde existe una menor atenuación del flujo energético entre el flujo del agua y el aire.

Esto puede provocar que se reduzca la habitabilidad de algunas especies en los tramos medio e inferior. Si bien las especies de aguas frías como la trucha común, empleada en este estudio como indicador del estado de estas cuencas hidrográficas no parece verse gravemente afectadas por el menor impacto de

estos calentamientos en sus áreas de residencia - esto es, en las zonas de cabecera - sí podrán verse afectadas especies cuyas zonas de habitabilidad se distribuyan a lo largo de la cuenca, pudiendo provocar una reducción de su viabilidad, y el aislamiento de poblaciones.

Como medidas paliativas cabe un control efectivo de extracciones de agua subterráneas, una gestión eficiente de los embalses, y la regeneración, conservación y protección de la vegetación de ribera propia de cada río.

5. Referencias bibliográficas

Alexander, M. D., MacQuarrie, K. T. B., Caissie, D., & Butler, K. E. (2003). The thermal regime of shallow groundwater and a small atlantic salmon stream bordering a clearcut with a forested streamside buffer. En Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering (pp. 343/1-10). Moncton, Nouveau-Brunswick, Canada.

Allan, J.D. (1995). Stream ecology: Structure and function of running waters. London: Chapman & Hall, UK.

Angilletta, M. J. (2009). Thermal adaptation: a theoretical and empirical synthesis. Oxford University Press. Recuperado de [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yrvqlaHdRZIC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Angilletta+Jr+MJ.+\(2009\)+Thermal+Adaptation:+A+Theoretical+and+Empirical+Synthesis.+Oxford+University+Press,+New+York&ots=55UDwdvlkn&sig=C_cx97VQIBvZKm3COP-Sn-OjNI4](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=yrvqlaHdRZIC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Angilletta+Jr+MJ.+(2009)+Thermal+Adaptation:+A+Theoretical+and+Empirical+Synthesis.+Oxford+University+Press,+New+York&ots=55UDwdvlkn&sig=C_cx97VQIBvZKm3COP-Sn-OjNI4)

Araujo, M.B., Guilhaumon F., Neto D. R., Pozo, I., & Calmaestra R., 2011: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático de la Biodiversidad Española. 2 Fauna de Vertebrados. Dirección general de medio Natural y Política Forestal. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Madrid, 640 páginas. (<http://www.ibiochange.mncn.csic.es/atlascc/>)

Arismendi, I., Safeeq, M., Johnson, S. L., Dunham, J. B., & Haggerty, R. (2012). Increasing synchrony of high temperature and low flow in western North American streams: double trouble for coldwater biota? *Hydrobiologia*, 712(1), 61-70. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1327-2>

Brunet, M., Casado, M. J., De Castro, M., Galán, P., López, J.A., Martín, J.M., Pastor, A., Petisco, E., Ramos, P., Ribalaygua, J., Rodríguez, E., Sanz, I. and Torres, L., 2008. Generación de escenarios regionalizados de cambio climático para España. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Spanish Meteorology Agency (AEMET)

Brunet, M., Jones, P. D., Sigró, J., Saladié, O., Aguilar, E., Moberg, A., ... López, D. (2007). Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during 1850–2005. *Journal of geophysical research*, 112(D12), D12117.

Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*, 51(8), 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>

Caissie, Daniel, & Giberson, D. J. (2003). Temporal variation of stream and intragravel water temperatures in an Atlantic salmon (*Salmo salar*) spawning area in Catamaran Brook (New Brunswick) (Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences No. 2464) (p. 26 p). Fisheries and Oceans. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Donna_Giberson/publication/251094097_Temporal_variation_in_stream_and_intragravel_water_temperatures_in_Atlantic_Salmon_\(Sal](https://www.researchgate.net/profile/Donna_Giberson/publication/251094097_Temporal_variation_in_stream_and_intragravel_water_temperatures_in_Atlantic_Salmon_(Sal)

mo_salar)_spawning_areas_Catamaran_Brook_(New_Brunswick)/links/00b49529ffe8132655000000.pdf

Carlson, A. K., Taylor, W. W., Schlee, K. M., Zorn, T. G., & Infante, D. M. (2015). Projected impacts of climate change on stream salmonids with implications for resilience-based management. *Ecology of Freshwater Fish*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1111/eff.12267>

Chen, G., Fang, X., & Fan, H. (2016). Estimating Hourly Water Temperatures in Rivers Using Modified Sine and Sinusoidal Wave Functions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 05016023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001414](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001414)

Chessman, B. C. (2009). Climatic changes and 13-year trends in stream macroinvertebrate assemblages in New South Wales, Australia. *Global Change Biology*, 15(11), 2791–2802.

Colchen, T., Teletchea, F., Fontaine, P., & Pasquet, A. (2016). Temperature modifies activity, inter-individual relationships and group structure in fish. *Current Zoology*, zow048. <https://doi.org/10.1093/cz/zow048>

Crisp, D. T., & Howson, G. (1982). Effect of air temperature upon mean water temperature in streams in the north Pennines and English Lake District. *Freshwater Biology*, 12(4), 359–367.

DeWeber, J. T., & Wagner, T. (2015). Predicting Brook Trout Occurrence in Stream Reaches throughout their Native Range in the Eastern United States. *Transactions of the American Fisheries Society*, 144(1), 11-24. <https://doi.org/10.1080/00028487.2014.963256>

Diem, S., von Rohr, M. R., Hering, J. G., Kohler, H.-P. E., Schirmer, M., & von Gunten, U. (2013). NOM degradation during river infiltration: Effects of the climate variables temperature and discharge. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.08.028>

Edinger, J. E., Duttweiler, D. W., & Geyer, J. C. (1968). The response of water temperatures to meteorological conditions. *Water Resources Research*, 4(5), 1137-1143.

Elliott, J., & Elliott, J. (2010). Temperature requirements of Atlantic salmon *Salmo salar*, brown trout *Salmo trutta* and Arctic charr *Salvelinus alpinus*: predicting the effects of climate change. *Journal of Fish Biology*, 77(8), 1793-1817. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02762.x>

Elliott, J. Malcolm, & Allonby, J. D. (2013). An experimental study of ontogenetic and seasonal changes in the temperature preferences of unfed and fed brown trout, *Salmo trutta*. *Freshwater Biology*, 58(9), 1840-1848. <https://doi.org/10.1111/fwb.12173>

Elliott, J.M., & Hurley, M. A. (1999). A new energetics model for brown trout, *Salmo trutta*. *Freshwater Biology*, 42(2), 235-246. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1999.444483.x>

Elliott, J.M., Hurley, M. A., & Fryer, J. (1995). A new, improved growth model for brown trout, *Salmo trutta*. *Functional Ecology*, 9(2), 290-298.

Evans, E. C., McGregor, G. R., & Petts, G. E. (1998). River energy budgets with special reference to river bed processes. *Hydrological processes*, 12(4), 575–595.

Felicísimo, Á.M.; Muñoz, J.; Villalba, C.J.; Mateo, R.G., 2010. Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la flora española. Universidad de Extremadura, Real Jardín Botánico (CSIC), Oficina Española de Cambio Climático. (<http://secad.unex.es/wiki/libroOECC/index.php>)

- Fey, S. B., & Herren, C. M. (2014). Temperature-mediated biotic interactions influence enemy release of non-native species in warming environments. *Ecology*, 95, 2246-2256. <https://doi.org/10.1890/13-1799.1>
- Finstad, A. G., Forseth, T., Jonsson, B., Bellier, E., Hesthagen, T., Jensen, A. J., ... Foldvik, A. (2011). Competitive exclusion along climate gradients: energy efficiency influences the distribution of two salmonid fishes. *Global Change Biology*, 17(4), 1703-1711. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02335.x>
- Forseth, T., & Jonsson, B. (1994). The growth and food ration of piscivorous brown trout (*Salmo trutta*). *Functional Ecology*, 8(2), 171-177.
- Forseth, T., Larsson, S., Jensen, A. J., Jonsson, B., Näslund, I., & Berglund, I. (2009). Thermal growth performance of juvenile brown trout *Salmo trutta*: no support for thermal adaptation hypotheses. *Journal of Fish Biology*, 74(1), 133-149. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2008.02119.x>
- Freedman, D. A., & Peters, S. C. (1984). Bootstrapping a Regression Equation: Some Empirical Results. *Journal of the American Statistical Association*, 79(385), 97-106. <https://doi.org/10.2307/2288341>
- Frost, A. J., Thomson, J. S., Smith, C., Burton, H. C., Davis, B., Watts, P. C., & Sneddon, L. U. (2013). Environmental change alters personality in the rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Animal Behaviour*, 85(6), 1199-1207. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2013.03.006>
- Hein, C. L., Ohlund, G., & Englund, G. (2013). Fish introductions reveal the temperature dependence of species interactions. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1775), 20132641-20132641. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2641>
- Hughes, L. (2000). Biological consequences of global warming: is the signal already. *Trends in Ecology & Evolution*, 15(2), 56-61. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(99\)01764-4](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(99)01764-4)
- Iglesias, A., Garrote, L., Flores, F., & Moneo, M. (2007). Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean. *Water Resources Management*, 21(5), 775-788. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9111-6>
- Iglesias, A., Mougou, R., Moneo, M., & Quiroga, S. (2011). Towards adaptation of agriculture to climate change in the Mediterranean. *Regional Environmental Change*, 11(S1), 159-166. <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0187-4>
- IPCC. (2007). *Climate change 2007: The physical science basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, ... H. L. Miller, Eds.). Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press.
- IPCC. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley, Eds.). Cambridge, UK, and New York: Cambridge University Press. Recuperado de <http://www.epa-pictaural.com/ctr/m/cc/transcript/stocker.pdf>
- Jeffries, K. M., Hinch, S. G., Martins, E. G., Clark, T. D., Lotto, A. G., Patterson, D. A., ... Miller, K. M. (2012). Sex and Proximity to Reproductive Maturity Influence the Survival, Final Maturation, and Blood Physiology of Pacific Salmon When Exposed to High Temperature during a Simulated Migration. *Physiological and Biochemical Zoology*, 85(1), 62-73. <https://doi.org/10.1086/663770>
- Jobling, M. (1995). *Environmental biology of fishes.* London: Chapman & Hall.

- Johnson, S. L. (2004). Factors influencing stream temperatures in small streams: substrate effects and a shading experiment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 61(6), 913-923. <https://doi.org/10.1139/f04-040>
- Kaushal, S. S., Likens, G. E., Jaworski, N. A., Pace, M. L., Sides, A. M., Seekell, D., ... Wingate, R. L. (2010). Rising stream and river temperatures in the United States. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(9), 461-466. <https://doi.org/10.1890/090037>
- Kristensen, P. B., Kristensen, E. A., Riis, T., Baisner, A. J., Larsen, S. E., Verdonshot, P. F. M., & Baattrup-Pedersen, A. (2013). Riparian forest as a management tool for moderating future thermal conditions of lowland temperate streams. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(5), 6081-6106. <https://doi.org/10.5194/hessd-10-6081-2013>
- Lahnsteiner, F., & Leitner, S. (2013). Effect of Temperature on Gametogenesis and Gamete Quality in Brown Trout, *Salmo trutta*. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology*, 319(3), 138-148. <https://doi.org/10.1002/jez.1779>
- Lapham, W. W. (1989). Use of Temperature Profiles Beneath Streams to Determine Rates of Vertical Ground-Water Flow and Vertical Hydraulic Conductivity (U.S. Geological Survey Water-Supply Paper No. 2337).
- Lewis, W. (2008). Physical and Chemical Features of Tropical Flowing Waters. *Tropical Stream Ecology*. DOI: 10.1016/B978-012088449-0.50003-0.
- Loinaz, M. C., Davidsen, H. K., Butts, M., & Bauer-Gottwein, P. (2013). Integrated flow and temperature modeling at the catchment scale. *Journal of Hydrology*, 495, 238-251. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.039>
- Magnuson, J.J., & Destasio, B. T. (1997). Thermal niche of fishes and global warming. En C. M. Wood & D. G. McDonald (Eds.), *Global Warming: Implications for Freshwater and Marine Fish* (pp. 377-408). Cambridge: Cambridge University Press.
- Magnuson, John J., Crowder, L. B., & Medvick, P. A. (1979). Temperature as an Ecological Resource. *American Zoologist*, 19(1), 331-343. <https://doi.org/10.1093/icb/19.1.331>
- Matthews, W. J., & Zimmerman, E. G. (1990). Potential effects of global Warming on native fishes of the Southern Great Plains and the Southwest. *Fisheries*, 15(6), 26-32.
- McCarthy, I. D., & Houlihan, D. F. (1997). The effect of temperature on protein metabolism in fish: the possible consequences for wild Atlantic salmon (*Salmo salar*) stocks in Europe as a result of global warming. En C. M. Wood & D. G. McDonald (Eds.), *Global Warming: Implications for Freshwater and Marine Fish* (pp. 51-77). Cambridge: Cambridge University Press.
- McCormick, S. D., Shrimpton, J. M., & Zydlewski, J. D. (1997). Temperature effects on osmoregulatory physiology of juvenile anadromous fish. En C. M. Wood & D. G. McDonald (Eds.), *Global Warming: Implications for Freshwater and Marine Fish* (pp. 279-301). Cambridge: Cambridge University Press.
- Meshcheryakova, O. V., Churova, M. V., Veselov, A. E., & Nemova, N. N. (2016). Activities of cytochrome c oxidase and mitochondrial lactate dehydrogenase isozymes and Cox1, Cox2, Cox4, and Cox6 gene subunit expression in cold adaptation of *Salmo trutta* L. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 42(2), 162-169. <https://doi.org/10.1134/S1068162016010106>
- Meybeck, M., Friedrich, G., Thomas, R. H., & Chapman, D. (1996). Rivers. En D. V. Chapman (Ed.), *Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments, and water in environmental monitoring* (2nd ed., pp. 243-318). London: UNESCO/WHO/UNEP, Chapman & Hall. Recuperado de

http://wwwlive.who.int/entity/water_sanitation_health/resourcesquality/watqualassess.pdf

Moatar, F., & Gailhard, J. (2006). Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1981. *Comptes Rendus Geosciences*, 338(5), 319–328.

Mohseni, O., & Stefan, H. (1999). Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. *Journal of Hydrology*, 218(3-4), 128–141.

Mohseni, O., Stefan, H. G., & Eriksson, T. R. (1998). A nonlinear regression model for weekly stream temperatures. *Water Resources Research*, 34(10), 2685-2692. <https://doi.org/10.1029/98WR01877>

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, H. J. M., Fenhann, J., Gaffin, S., ... Dadi, Z. (2000). *Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.

Nukazawa, K., Shiraiwa, J., & Kazama, S. (2011). Evaluations of seasonal habitat variations of freshwater fishes, fireflies, and frogs using a habitat suitability index model that includes river water temperature. *Ecological Modelling*, 222(20), 3718–3726. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.09.005>

O'Driscoll, M. A., & DeWalle, D. R. (2006). Stream-air temperature relations to classify stream-ground water interactions in a karst setting, central Pennsylvania, USA. *Journal of Hydrology*, 329(1-2), 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.010>

Orr, H. G., Simpson, G. L., des Clers, S., Watts, G., Hughes, M., Hannaford, J., ... Evans, R. (2015). Detecting changing river temperatures in England and Wales. *Hydrological Processes*, 29, 752–766. <https://doi.org/10.1002/hyp.10181>

Parmesan, C. (2006). Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37(1), 637-669. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>

Patz, JA., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., Foley, JA. (2005). Impact of regional climate change on human health, *Nature*.

Pekarova, P., Halmova, D., Miklanek, P., Onderka, M., Pekar, J., & Skoda, P. (2008). Is the Water Temperature of the Danube River at Bratislava, Slovakia, Rising? *Journal of Hydrometeorology*, 9(5), 1115–1122.

R Core Team (2016). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>

Reid, S. D., McDonald, D. G., & Wood, C. M. (1997). Interactive effects of temperature and pollutant stress. En C. M. Wood & D. G. McDonald (Eds.), *Global Warming: Implications for Freshwater and Marine Fish* (pp. 325-349). Cambridge: Cambridge University Press.

Ribalaygua, J.; Torres, L.; Pórtolos, J.; Monjo, R.; Gaitán, E.; Pino, M.R., 2013a. Description and validation of a two-step analogue/regression downscaling method. *Theoretical and Applied Climatology*, 111: DOI 10.1007/s00704-013-0836-x.

Ribalaygua, J.; Pino, M.R.; Pórtolos, J.; Roldán, E.; Gaitán, E.; Chinarro, D.; Torres, L., 2013b. Climate change scenarios for temperature and precipitation in Aragón (Spain), *Science of The Total Environment* 463–464: 1015-1030. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.06.089.

Rolls, R. J., Gowns, I. O., Khan, T. A., Wilson, G. G., Ellison, T. L., Prior, A., & Waring, C. C. (2013). Fish recruitment in rivers with modified discharge depends on the interacting effects of flow and thermal regimes. *Freshwater Biology*, 58(9), 1804-1819. <https://doi.org/10.1111/fwb.12169>

- Santiago, J. M. (2017). Thermal ecology of brown trout and the climate change challenge. En B. Richardson (Ed.), *Tilapia and Trout: Harvesting, Prevalence and Benefits* (pp. 79-119). New York: Nova Science Publishers.
- Santiago, J. M., García de Jalón, D., Alonso, C., Solana, J., Ribalaygua, J., Pórtoles, J., & Monjo, R. (2016). Brown trout thermal niche and climate change: expected changes in the distribution of cold-water fish in central Spain. *Ecohydrology*, 9(3), 514-528. <https://doi.org/10.1002/eco.1653>
- Stefan, H. G., & Preud'homme, E. B. (1993). Stream temperature estimation from air temperature. *Water Resources Bulletin*, 29(1), 27-45. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1993.tb01502.x>
- Stelczer, K. (1987). Physical, chemical and biological properties of water. En O. Starosolszky (Ed.), *Applied surface hydrology* (pp. 150-174). Littleton: Water Resources Publications.
- St-Hilaire, A., Morin, G., El-Jabi, N., & Caissie, D. (2000). Water temperature modelling in a small forested stream: implication of forest canopy and soil temperature. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(6), 1095–1108.
- Stoneman, C. L., & Jones, M. L. (1996). A Simple Method to Classify Stream Thermal Stability with Single Observations of Daily Maximum Water and Air Temperatures. *North American Journal of Fisheries Management*, 16(4), 728-737. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(1996\)016<0728:ASMTCS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(1996)016<0728:ASMTCS>2.3.CO;2)
- Stoneman, L., Jones C., Michael. (2000). The Influence of Habitat Features on the Biomass and Distribution of Three Species of Southern Ontario Stream Salmonines. *Transactions of the American Fisheries Society*. 129. 639-657. [10.1577/1548-8659\(2000\)129<0639:TIOHFO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(2000)129<0639:TIOHFO>2.3.CO;2).
- Van Vliet, M. T. H., Franssen, W. H. P., Yearsley, J. R., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D. P., & Kabat, P. (2013). Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change*, 23(2), 450-464. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.11.002>
- Vornanen, M., Haverinen, J., & Egginton, S. (2014). Acute heat tolerance of cardiac excitation in the brown trout (*Salmo trutta fario*). *The Journal of Experimental Biology*, 217, 299-309. <https://doi.org/10.1242/jeb.091272>
- Wade, A. J. (2006). Monitoring and modelling the impacts of global change on European freshwater ecosystems. *Science of The Total Environment*, 365(1-3), 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.02.054>
- Warren, D. R., Robinson, J. M., Josephson, D. C., Sheldon, D. R., & Kraft, C. E. (2012). Elevated summer temperatures delay spawning and reduce redd construction for resident brook trout (*Salvelinus fontinalis*). *Global Change Biology*, 18(6), 1804-1811. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02670.x>
- Webb, Bruce W., Hannah, D. M., Moore, R. D., Brown, L. E., & Nobilis, F. (2008). Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrological Processes*, 22(7), 902-918. <https://doi.org/10.1002/hyp.6994>
- Webb, Bruce W., & Nobilis, F. (2007). Long-term changes in river temperature and the influence of climatic and hydrological factors. *Hydrological Sciences Journal*, 52(1), 74-85. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.1.74>
- Webb, B.W. (1996). Trends in stream and river temperature. *Hydrological Processes*, 10, 205-226.
- Wehrly, K. E., Wiley, M. J., & Seelbach, P. W. (2003). Classifying regional variation in thermal regime based on stream fish community patterns. *Transactions of the American Fisheries Society*, 132(1), 18–38.

White, C. R., Alton, L. A., & Frappell, P. B. (2012). Metabolic cold adaptation in fishes occurs at the level of whole animal, mitochondria and enzyme. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1734), 1740-1747. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.2060>

Williams, J. E., Isaak, D. J., Imhof, J., Hendrickson, D. A., & McMillan, J. R. (2015). Cold-Water Fishes and Climate Change in North America. En *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. Recuperado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780124095489095051>

Woodward, G., Perkins, D. M., & Brown, L. E. (2010). Climate change and freshwater ecosystems: impacts across multiple levels of organization. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1549), 2093–2106. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0055>

Wootton, R. (1990). *Ecology of Teleost Fishes*. London: Chapman & Hall.