

METODOLOGÍA DE VERIFICACIÓN, CONTROL Y CORRECCIÓN DEL ERROR SISTEMÁTICO DE LOS ESCENARIOS DE CLIMA FUTURO A ESCALA LOCAL

PARA EL PROYECTO

**“ELABORACIÓN DE ESCENARIOS LOCALES
Y REGIONALES DE CAMBIO CLIMÁTICO
ADAPTADOS AL SEXTO INFORME DEL
GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE
EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO
(IPCC) Y SU DIFUSIÓN A TRAVÉS DE LAS
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA
COMUNICACIÓN”**



Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CLIMA FUTURO.....	4
2.1. Estado del arte en la modelización del clima.....	5
2.2. ¿Qué pone de manifiesto las primeras conclusiones del IPCC6?.....	7
2.3. La necesidad de regionalización o <i>downscaling</i>	9
2.4. Requisitos técnicos exigibles a las simulaciones.....	14
2.4.1. Necesidad de utilizar los Modelos Climáticos (MC) más recientes	14
2.4.2. Necesidad de trabajar con información a escala local.....	19
2.4.3. Necesidad de trabajar con información con resolución temporal diaria.....	21
2.4.4. Necesidad de manejar adecuadamente las incertidumbres.....	22
2.4.5. Necesidad de exhaustivos estudios de verificación y validación.	24
3. METODOLOGÍA DE REGIONALIZACIÓN FICLIMA.....	27
4. DATOS REQUERIDOS.....	32
4.1. Datos observados.....	32
4.2. Reanálisis europeo ERA5.....	35
4.3. Modelos Climáticos pertenecientes al CMIP6.....	36
5. LA CORRECCIÓN DEL ERROR SISTEMÁTICO.....	39
6. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS SUMINISTRADOS.....	41
6.1. Datos observados.....	41
6.2. Variables diarias entregadas.....	43
6.3. Variables climáticas entregadas.....	45
REFERENCIAS.....	50

1. INTRODUCCIÓN

Lo que sigue es una descripción de la metodología empleada para generar los escenarios de clima futuro a escala local suministrados en la Fase I del servicio “Elaboración de escenarios locales y regionales de cambio climático adaptados al sexto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y su difusión a través de las tecnologías de la información y la comunicación”, un servicio solicitado por la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía,

<https://www.juntadeandalucia.es/organismos/agriculturaganaderiapescaydesarrollostenible.html>

y realizado por la Fundación para la Investigación del Clima (FIC),

<https://www.ficlina.org/>

En el presente documento se explica la metodología empleada para generar tales escenarios de clima futuro a escala local de las variables básicas usando para ello una metodología de downscaling estadístico desarrollada por la Fundación para la Investigación del Clima.

El documento incluye una breve descripción sobre la importancia de disponer de información climática a escala local para poder definir medidas de adaptación que minimicen los impactos negativos causados por el Cambio Climático y potencien los positivos así como el estado actual del conocimiento respecto a este tema.

Se describen los requisitos que deben cumplir las proyecciones climáticas para que la información que proporcionen sea robusta y fiable y las bases de datos necesarias para poder generarlas.

La metodología empleada se explica con detalle a lo largo del documento así como los procesos que permiten verificar y validar la robustez de las proyecciones.

2. GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CLIMA FUTURO

El clima ha sido, es y será un factor condicionante para la vida. Las principales actividades humanas están relacionadas con el clima, como la determinación de qué zonas son las más adecuadas para los diferentes tipos de cultivo, de zonas de riesgo de inundaciones, sequías u olas de calor, de zonas adecuadas para distintos tipos de turismo (montaña, esquí, playa) e incluso determina las características arquitectónicas y logísticas de los núcleos urbanos. Pero no sólo las actividades humanas dependen del clima, la supervivencia de la flora y la fauna de cada región están en serio peligro ante los cambios climáticos. Muchas especies forestales pueden desaparecer bajo condiciones climáticas adversas (estrés hídrico, superación de umbrales térmicos, efectos sobre el ciclo vegetativo, etc.) y ser reemplazadas por otras. En el caso de los animales, pueden ver deteriorado su hábitat y tener así que desplazarse hacia regiones más adaptadas a sus necesidades o incluso llegar a desaparecer.

En un contexto de cambio climático, es necesario conocer la evolución del clima a escala local, para poder establecer políticas de adaptación que minimicen los impactos negativos del mismo, y aprovechen los positivos. Por ejemplo, para elegir las especies forestales a utilizar en una reforestación, dado que los árboles que se planten hoy tendrán que vivir en ese territorio y cumplir su misión (aprovechamientos forestales, mantenimiento de la biodiversidad, protección frente a la erosión...) durante bastantes décadas, es necesario conocer el clima que se espera para esas décadas en ese punto concreto del territorio. De nada sirve saber cuál será el calentamiento promedio del planeta, o el de la región en la que se ubica, ni siquiera el promedio de la celda del Modelo Climático en el que se ubica (de unos 200km x 200 km). Se necesita la información del clima futuro en ese punto concreto, con la máxima precisión local posible.

En definitiva, muchas de las acciones de adaptación se realizan a escala local: elegir especies para una reforestación, variedades para una explotación agrícola, planificar una infraestructura de regadío, un dique para un pantano, un desarrollo urbanístico para turismo, etc., que sean sostenibles en el clima futuro. Y para afrontar la adaptación, lo primero es saber a qué tenemos que adaptarnos, es decir, cuál será el clima en el punto en el que se realizará la actuación de adaptación.

Los estudios más recientes evidencian la existencia de un cambio climático global pero ¿afectan de la misma manera las alteraciones climáticas a todas las regiones del mundo? y dentro de una misma región ¿se observan cambios diferentes entre localidades cercanas? La respuesta a estas preguntas es SÍ.

En definitiva, si para evaluar impactos y afrontar la adaptación se necesita información del clima futuro esperado para ese punto del territorio, y el cambio en puntos relativamente próximos puede ser bastante diferente, se hace necesario generar simulaciones del clima a escala local para los puntos de interés.

2.1. Estado del arte en la modelización del clima

A día de hoy la herramienta más potente para simular el clima son los Modelos Climáticos (MC). Un MC es una representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de retroalimentación, y que incluye todas o algunas de sus propiedades conocidas. El sistema climático puede ser representado por modelos de distinto grado de complejidad; es decir, para cada componente o conjunto de componentes es posible identificar un espectro o jerarquía de modelos que difieren en aspectos como el número de dimensiones espaciales, el grado de representación explícita de los procesos físicos, químicos o biológicos, o el grado de utilización de ajustes empíricos.

Los modelos climáticos más modernos son los *Earth System Models* (ESM), 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. Los ESM incluyen la representación del ciclo del carbono, permitiendo el cálculo interactivo de las emisiones atmosféricas de CO₂ o similares. También pueden incluir otros componentes, como la química de la atmósfera, las capas de hielo, la vegetación dinámica, el ciclo del nitrógeno, modelos urbanos o de cultivos, etc. El principal avance frente a los Modelos de Circulación General (MCG) utilizados anteriormente es que permiten la interacción del sistema con el ciclo del carbono y tienen en cuenta la bioquímica y la biogeología marina.

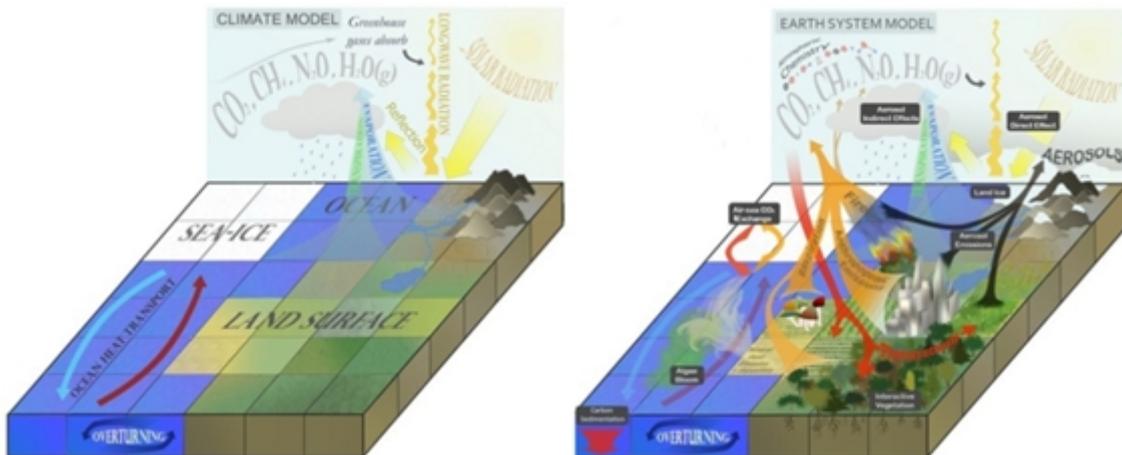


Figura 1. Características principales de los modelos climáticos y de los Earth System Models (ESM): los ESM ganan en complejidad al considerar los procesos biológicos y químicos que se retroalimentan con la física del clima. Fuente: ©2013 Nature Education.

Estos MC se corren bajo diferentes hipótesis de la concentración futura de Gases de Efecto Invernadero (GEI), como descripciones plausibles de cómo será la evolución futura de factores socioeconómicos, tecnológicos, energéticos, de uso del suelo, de emisiones de GEI y contaminantes, etc., basadas en un conjunto coherente de hipótesis sobre las fuerzas que las determinan (por ejemplo, el desarrollo demográfico y socioeconómico y la evolución tecnológica) y las principales relaciones entre ellas.

Los escenarios o proyecciones climáticas generados por los modelos son representaciones plausibles, más o menos simplificadas, del clima futuro, basadas en un conjunto internamente coherente de relaciones climáticas definidas explícitamente para investigar las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico, y que pueden introducirse como entrada en los modelos de impacto.

Los esfuerzos para coordinar todos los asuntos relacionados con el cambio climático son responsabilidad del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). El IPCC es el organismo intergubernamental de las Naciones Unidas que se encarga de elaborar informes que abarquen "información científica, técnica y socioeconómica pertinente para comprender la base científica del riesgo del cambio climático inducido por el hombre, sus posibles repercusiones y las opciones de adaptación y mitigación". Estos informes contribuyen al trabajo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el principal tratado internacional sobre el cambio climático. Su objetivo es "estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas (inducidas por el hombre) peligrosas en el sistema climático".

El IPCC es una autoridad internacionalmente aceptada en materia de cambio climático y elabora informes que cuentan con el acuerdo de los principales científicos del clima y el consenso de los gobiernos participantes.

El IPCC publica periódicamente informes que recogen todos los avances y estudios desarrollados por la comunidad científica y los expertos multisectoriales en materia de Cambio Climático. Actualmente se están evaluando los informes correspondientes al sexto informe del IPCC y se espera que se publiquen en breve. Anteriormente, las conclusiones del Quinto Informe de Evaluación del IPCC se presentaron a finales de 2014.

Paralelamente al IPCC, el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) es un marco de colaboración diseñado para mejorar el conocimiento del cambio climático. Fue creado en 1995 por el Grupo de Trabajo sobre Modelización Acoplada (WGCM) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC). El CMIP ha permitido comprender mejor el cambio y la variabilidad del clima en el pasado, el presente y el futuro en un marco multimodelo, y define también protocolos de experimentación, forzamientos y resultados comunes. Se desarrolla en fases para fomentar la mejora de los modelos climáticos, pero también para apoyar las evaluaciones nacionales e internacionales del cambio climático. A lo largo de las diferentes fases por las que ha pasado este proyecto, se han introducido mejoras en la calidad de los modelos climáticos hasta llegar a los actuales ESM. Asimismo, se han definido nuevos escenarios de emisión en cada una de las fases, ajustándose a las nuevas necesidades de adaptación y mitigación ante el cambio climático.

Las simulaciones de los modelos del CMIP también han sido evaluadas periódicamente como parte de los Informes de Evaluación del Clima del IPCC y de diversas evaluaciones nacionales. Actualmente está en marcha la sexta fase del CMIP (CMIP6), siendo los modelos pertenecientes a esta los más actualizados hasta la fecha.

2.2. ¿Qué pone de manifiesto las primeras conclusiones del IPCC6?

Actualmente el IPCC se organiza en tres grupos de trabajo y un grupo especial, encargados de elaborar los informes con las conclusiones finales extraídas de las distintas líneas de trabajo. De estos tres grupos de trabajo se esperan tres informes: Informe “Bases físicas del cambio climático” a cargo del Grupo de Trabajo 1 y ya publicado; Informe “Impacto del cambio climático, adaptación y vulnerabilidad” a cargo del Grupo de Trabajo 2 e Informe “Mitigación del cambio climático” a cargo del Grupo de Trabajo 3. Además de los informes de evaluación, el IPCC publica informes especiales sobre temas concretos, por ejemplo, fenómenos extremos y desastres, energía renovable, impactos del calentamiento global de 1,5 °C y trayectorias correspondientes

de las emisiones de gases de efecto invernadero, los océanos y la criosfera, y usos de la tierra, etc.

Las principales conclusiones que ha expuesto el Grupo de Trabajo I han sido denominadas “comprobación de la realidad”, es decir, ponen de manifiesto los efectos del Cambio Climático ya más que verificados. Entre ellas se pueden destacar:

1. Se reconoce de manera inequívoca la influencia humana en el calentamiento global. El CO₂ es el principal impulsor del cambio climático, aunque no el único. Solo una reducción fuerte y sostenida de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero como el metano (CH₄) y los óxidos de nitrógeno (NO) limitaría la temperatura y el cambio climático.
2. Estamos ante una crisis sin precedentes y se necesitarán miles de años para revertir los cambios que sufre el planeta. Los impactos climáticos están sucediendo antes de lo previsto y se están alcanzando puntos de no retorno. El calentamiento del océano, la subida de la temperatura, el derretimiento de la capa de hielo y del permafrost o la subida del nivel del océano son irreversibles. Solo se podrá limitar su magnitud.
3. La temperatura del planeta seguirá subiendo y cuanto más suba, más fenómenos extremos se producirán. El informe proyecta cinco escenarios futuros en función de las emisiones generadas por la humanidad y la consecuente subida de la temperatura. Los desastres como los que estamos viviendo (inundaciones, sequías, calor extremo, incendios, tormentas devastadoras...) afectarán a todos los rincones del planeta.
4. Los sumideros naturales de carbono están al límite. El IPCC estima que los bosques y los océanos capturan cada año el 56% de las emisiones de CO₂ pero en un escenario con emisiones disparadas este porcentaje bajaría hasta el 38%.

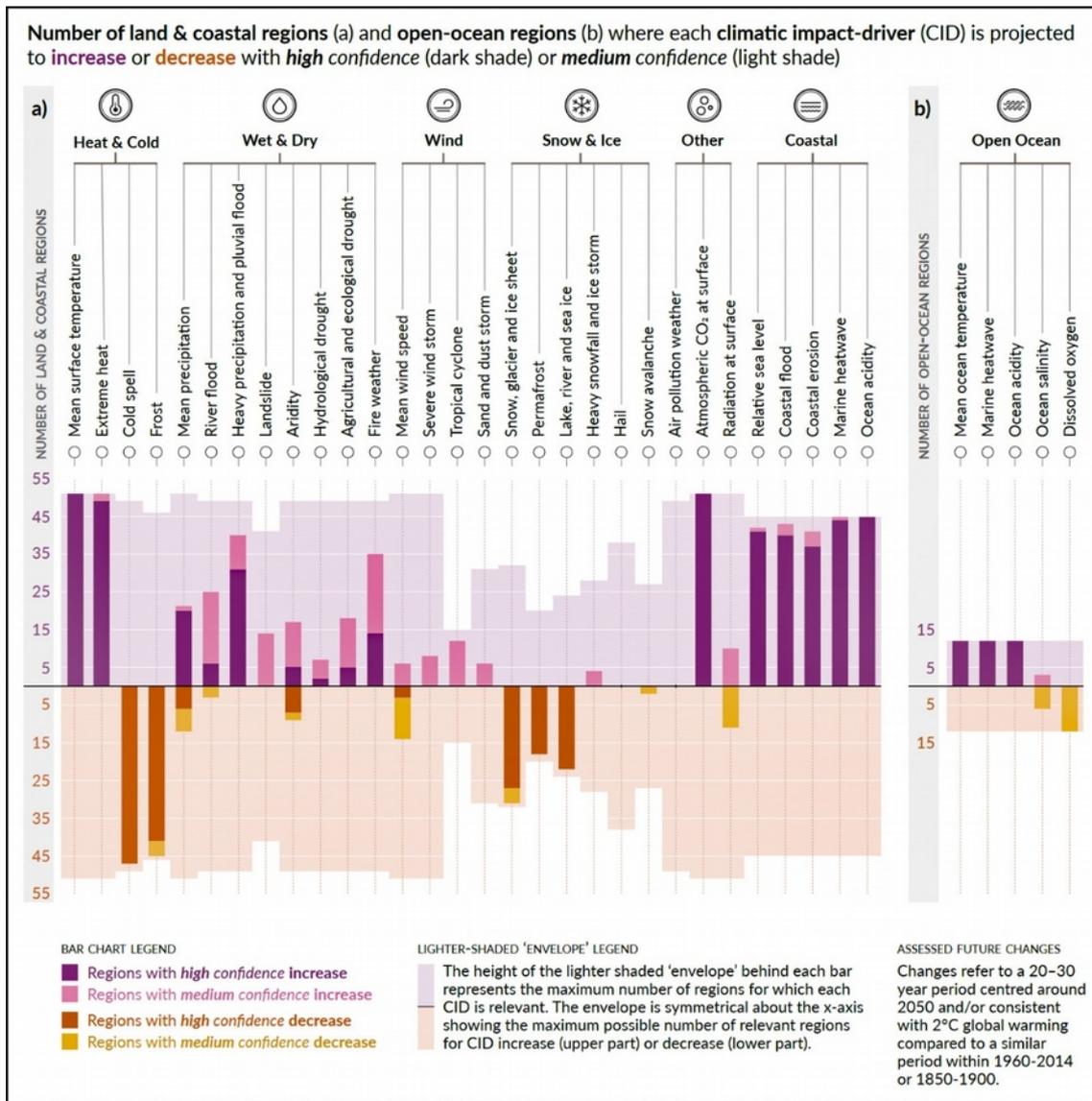


Figura 2. Cambios en los conductores de impacto climático por regiones. Fuente: IPCC6, 2021.

El informe es una llamada a la acción. La respuesta para reducir la emisión de gases de efecto invernadero debe de ser inmediata y contundente. Aún se puede conseguir limitar la subida de la temperatura a 1,5°C, objetivo marcado en el Acuerdo de París. Aun así, aunque se redujeran de una manera drástica de un día para otro, los efectos no serían inmediatos, el clima tardaría entre 20 y 30 años en estabilizarse.

2.3. La necesidad de regionalización o *downscaling*

Los MC son capaces de simular de forma muy satisfactoria la circulación atmosférica general, pero debido a su resolución (en torno a 100 km) no son capaces de simular

fenómenos atmosféricos de menor escala y que son de gran importancia en la climatología local.

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 1°-2° 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. Estas 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.

Con el objetivo de solventar estas y otras limitaciones de los MC se utilizan lo que se conoce como técnicas de *downscaling*. Estas técnicas consisten en adaptar a la escala local las salidas proporcionadas por los MC: se alimentan con los denominados predictores (la información que los MC ofrecen con mayor fiabilidad, es decir, las configuraciones atmosféricas de baja resolución, preferentemente a cierta altura de la atmósfera, ya que los MC simulan mal en las proximidades de la superficie porque su baja resolución impide una correcta representación de la topografía, usos del suelo, etc., factores determinantes de las condiciones meteorológicas cerca de la superficie); y “traducen” esa información atmosférica de baja resolución en los efectos en superficie (lluvia, temperatura, viento...) con detalle local, denominados predictandos.



Figura 3. Esquema conceptual del proceso de regionalización o downscaling

Existen dos aproximaciones principales para afrontar la regionalización: las estadísticas y las dinámicas, cada una de ellas con sus propias ventajas y limitaciones (tabla 1).

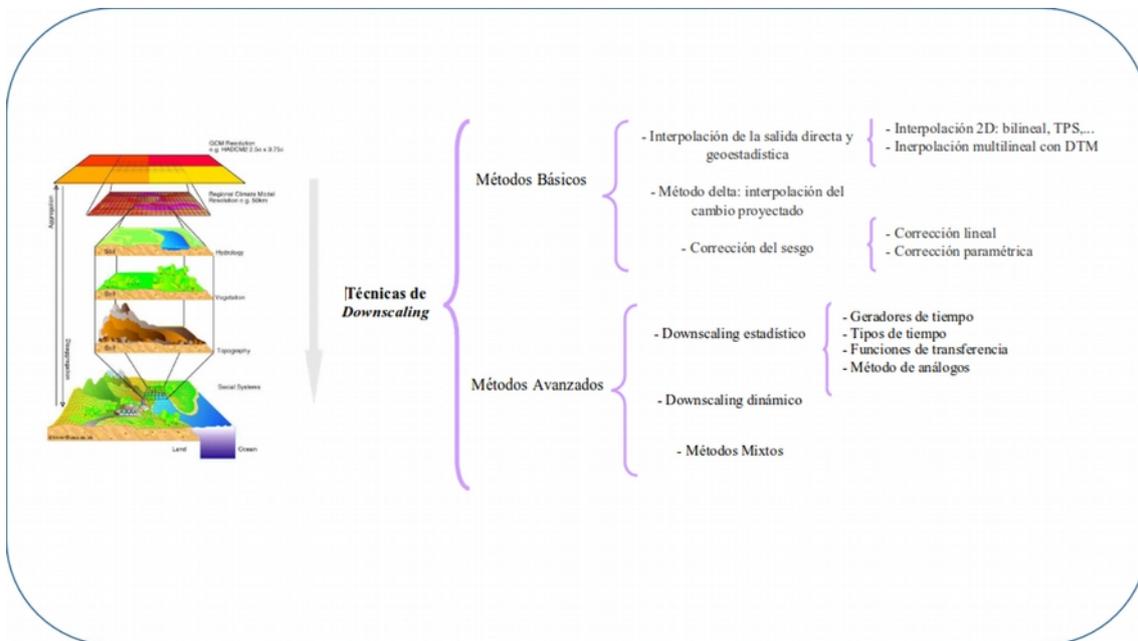


Figura 4. Esquema de las técnicas de regionalización o downscaling.

Las aproximaciones estadísticas (*downscaling* estadístico) obtienen relaciones empíricas entre variables a gran escala procedentes de los MC, y variables de alta resolución (en superficie). Tienen mucho menor coste computacional (lo que permite aplicarlas a multitud de MC y escenarios de emisiones), pero sufren de una incertidumbre implícita consecuencia de aceptar la hipótesis de que las relaciones entre predictores y predictandos detectadas en el pasado sean válidas en el futuro. En efecto, 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 (se trata del conocido como problema de la estacionariedad).

Las aproximaciones dinámicas (*downscaling* dinámico) incrementan su resolución de los modelos dinámicos sobre la región de interés. Puede realizarse de dos maneras, o bien con una técnica de “zoom” de la propia rejilla del MC o bien mediante el anidamiento de un Modelo de Área Limitada (LAM) en las condiciones de contorno suministradas por el MC. Son los denominados Modelos Regionales del Clima (RCM, del inglés *Regional Climate Model*). Cuentan con una base física más fuerte (aunque también utilizan relaciones estadísticas en las parametrizaciones). Actualmente, la resolución de los RCM resulta todavía 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, haciendo muy complicada su aplicación a un conjunto amplio de proyecciones (combinando MC y escenarios de concentración de GEI), lo que supone una importante limitación para la correcta consideración y cuantificación de las incertidumbres.

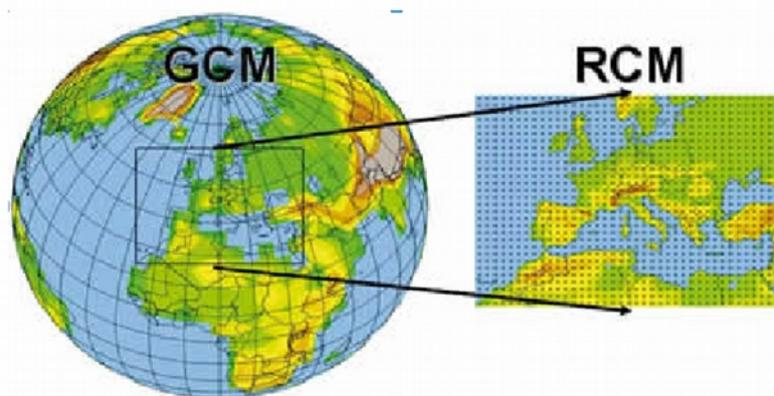


Figura 5. Esquema conceptual del downscaling dinámico.

	A favor	En contra	Aplicaciones
Downscaling dinámico	<p>Simula mecanismos climáticos.</p> <p>No realiza asunciones a priori sobre cómo están relacionados el clima presente y el futuro.</p> <p>Herramientas científicas permanentemente actualizadas.</p> <p>Los continuos avances en ordenadores hacen que cada vez se generen más rápidamente y sean más baratos de ejecutar.</p> <p>Estimula la colaboración entre científicos del clima y de otras disciplinas de estudio.</p>	<p>Muy costoso, tanto en términos de necesidades informáticas como de formación del personal.</p> <p>Los resultados son sensibles a las parametrizaciones iniciales.</p> <p>El posible sesgo existente en los MCG se puede propagar a la escala local.</p> <p>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.</p>	<p>Áreas geográficas con pocos datos iniciales de partida.</p> <p>Estudios asociados con extremos climáticos y variabilidad no-lineal, como los sanitarios.</p> <p>Relaciona los resultados con procesos climáticos.</p> <p>Permite incluir impactos sobre el uso del suelo en los resultados.</p>
Downscaling estadístico	<p>Muy barato (funciona con mucha velocidad en ordenadores personales con software libre).</p> <p>Aprovecha la experiencia estadística entre investigadores.</p> <p>Puede corregir los sesgos propios de los MCG.</p> <p>Permite evaluar los resultados climáticos sobre un grupo de MCG y sobre diversos escenarios.</p>	<p>Asume que las relaciones entre el clima local y el de gran escala permanecen constantes.</p> <p>No incorpora mecanismos climáticos.</p> <p>No está ajustado para capturar varianzas o eventos extremos.</p>	<p>Medias climáticas, y ciertos rangos de variabilidad.</p> <p>Regiones ricas en datos meteorológicos, como las latitudes medias del hemisferio norte.</p> <p>Permite comparar el clima presente y el futuro de forma consistente.</p> <p>Puede realizar tests sobre diversos predictores.</p> <p>Permite medir las escalas de variables hasta lugares concretos.</p>

Tabla 1. Diferencias entre *downscaling* estadístico y dinámico. (Fuente: Patz, et al., 2005)

La metodología que se plantea utilizar, conocida como FICLIMA y desarrollada por la Fundación para la Investigación del Clima (Ribalaygua et al., 2013), consiste en una técnica de regionalización estadística en dos pasos. FICLIMA genera simulaciones que cumplen con todos los requerimientos que deben exigirse a cualquier simulación climática para ser utilizada en estudios de adaptación, como se ha comprobado reiteradamente en distintos proyectos internacionales de investigación.

2.4. Requisitos técnicos exigibles a las simulaciones

A continuación se citan los requerimientos técnicos que debe cumplir cualquier simulación climática para ser utilizada en estudios de adaptación.

REQUISITOS DE UNA SIMULACIÓN CLIMÁTICA ROBUSTA

1. Utilizar los Modelos Climáticos (MC) más actualizados, pertenecientes al último Informe de Evaluación del IPCC
2. Trabajar a escala local: cambio climático como problemática con causas globales pero consecuencias locales
3. Trabajar con resolución diaria, necesaria para describir muchas características esenciales del clima y para alimentar a muchos modelos de impactos
4. Trabajar con muchas proyecciones, para considerar y cuantificar adecuadamente la incertidumbre asociada a toda simulación climática
5. Realizar exhaustivos procesos previos de verificación y validación: antes de simular el futuro, hay que comprobar cómo funcionan las herramientas a utilizar en el pasado

2.4.1. Necesidad de utilizar los Modelos Climáticos (MC) más recientes

Los MC están continuamente siendo renovados y mejorados, y habitualmente aparece una nueva versión cada 4-6 años, que es utilizada para el correspondiente Informe de Evaluación del IPCC. En la actualidad, los MC más recientes son los del CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*), a partir de los cuales se elabora el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6), que están actualmente sustituyendo a los MC del CMIP5 usados en el AR5.

La Fase 6 del CMIP comenzó en 2013 y en 2016 se publicó un resumen del diseño y la organización. En 2018, se aprobaron 23 proyectos de intercomparación de modelos (MIP) en los que participaban 33 grupos de modelización de 16 países y que supusieron el punto de partida para el desarrollo del CMIP6. La estructura del CMIP6 se ha ampliado con respecto a la CMIP5 con la creación del denominado CMIP *Diagnostic*,

Evaluation and Characterization of Klima (DECK), que junto con un conjunto de MIP pretenden mejorar la descripción de aspectos de los modelos climáticos más allá del conjunto básico de experimentos comunes incluidos en el DECK (<https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>).

Esta nueva generación de MC está ahora siendo puesta a disposición de la comunidad científica para su uso en las investigaciones climáticas: algunos ya están accesibles, y otros se están poniendo accesibles o completando actualmente.

Utilizar estos nuevos MC es importante, dado que en el CMIP6 se han introducido novedades relevantes, relacionadas con los *World Climate Research Programme (WCRP) Grand Science Challenges*: Nubes, Circulación y Sensibilidad Climática, Cambios en la Criosfera, Extremos Climáticos, Subida Regional del Nivel del Mar, Disponibilidad de Agua, Predicción Climática a Corto Plazo y Ciclos Biogeoquímicos y Cambio Climático.

Asimismo, también es novedosa en el CMIP6 la forma en la que se consideran los escenarios de concentración futura de GEI, ahora a través de los denominados SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*), en lugar de los RCP (*Representative Concentration Pathways*) usados en el CMIP5. Los nuevos escenarios SSP abarcan una gama similar a la de los RCP, pero llenan lagunas críticas como, el papel de ciertos forzamientos (el uso de la tierra y las especies de vida corta o calidad del aire), el efecto ocasionado por los picos máximos y mínimos de los forzamientos y las consecuencias de limitar el calentamiento por debajo de 2 °C (Eyring et al., 2016).

Los SSP, son escenarios de cambios socioeconómicos globales proyectados hasta 2100 que describen desarrollos socioeconómicos alternativos (Riahi et al., 2017). Cada uno de los SSPs, describen una línea de evolución (figura 6):

- *SSP1: Sustainability (Taking the Green Road)*
- *SSP2: Middle of the Road*
- *SSP3: Regional Rivalry (A Rocky Road)*
- *SSP4: Inequality (A Road divided)*
- *SSP5: Fossil-fueled Development (Taking the Highway)*



Figura 6. Esquema de los nuevos SSPs. Fuente: O'Neill et al., 2013

En comparación con los RCP, los cinco SSP principales (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) están más espaciados en cuanto a sus temperaturas medias globales esperadas, se extienden a temperaturas más bajas en 2100 y al aumento del nivel del mar que el conjunto de RCP (Meinshausen et al., 2019). La figura 7 representa los diferentes SSP del CMIP6.

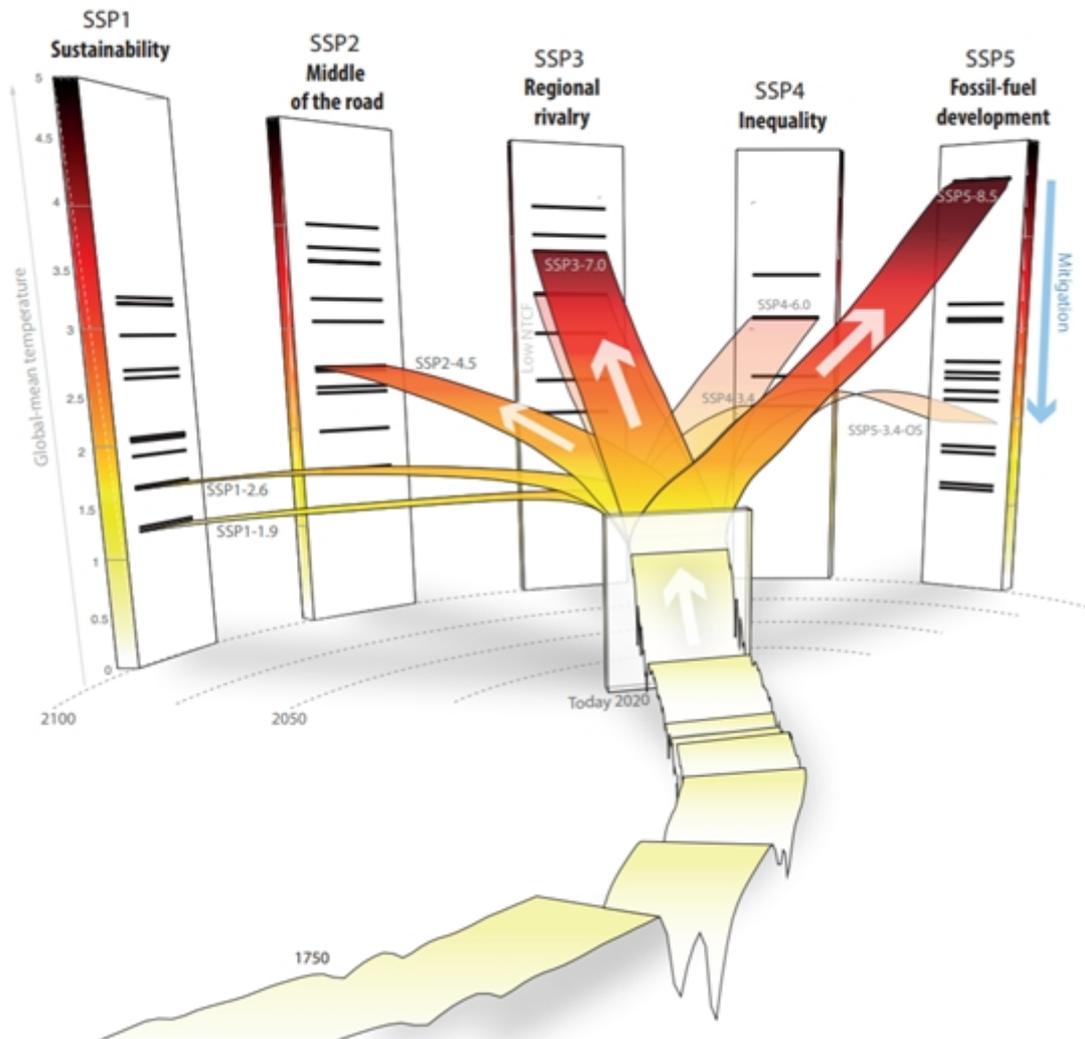


Figura 7. Los escenarios SSP y sus cinco familias socioeconómicas SSP. Se muestran los niveles ilustrativos de temperatura en relación con los niveles preindustriales con las temperaturas históricas (banda frontal), las temperaturas actuales (2020) (bloque pequeño en el centro) y la ramificación de los respectivos escenarios a lo largo del siglo XXI según las cinco familias socioeconómicas diferentes. Las pequeñas barras horizontales negras en los pilares de 2100 para cada SSP indican niveles de temperatura ilustrativos. Las bandas más opacas a lo largo del siglo XXI indican los cinco escenarios SSP1-1,9, SSP1-2,6, SSP2-4,5, SSP3-7,0 y SSP5-8,5 que se utilizan como escenarios prioritarios en el IPCC. Las bandas más transparentes indican los restantes escenarios SSP de "Nivel 2", a saber, SSP3-7,0-LowNTCF (utilizado en AerChemMIP), SSP4-3,4, SSP4-6,0 y SSP5-3,4-OS. También se muestra una barra azul indicativa en el lado derecho, que indica el efecto de la acción de mitigación, que reduce los niveles de temperatura en 2100 y a lo largo del siglo XXI, dependiendo del respectivo escenario de referencia y del nivel de mitigación. Fuente: Meinshausen et al., 2019.

La figura 8 ofrece una idea de los cambios en la temperatura para las diferentes SSP, y permite compararlos con los asociados a los RCP.

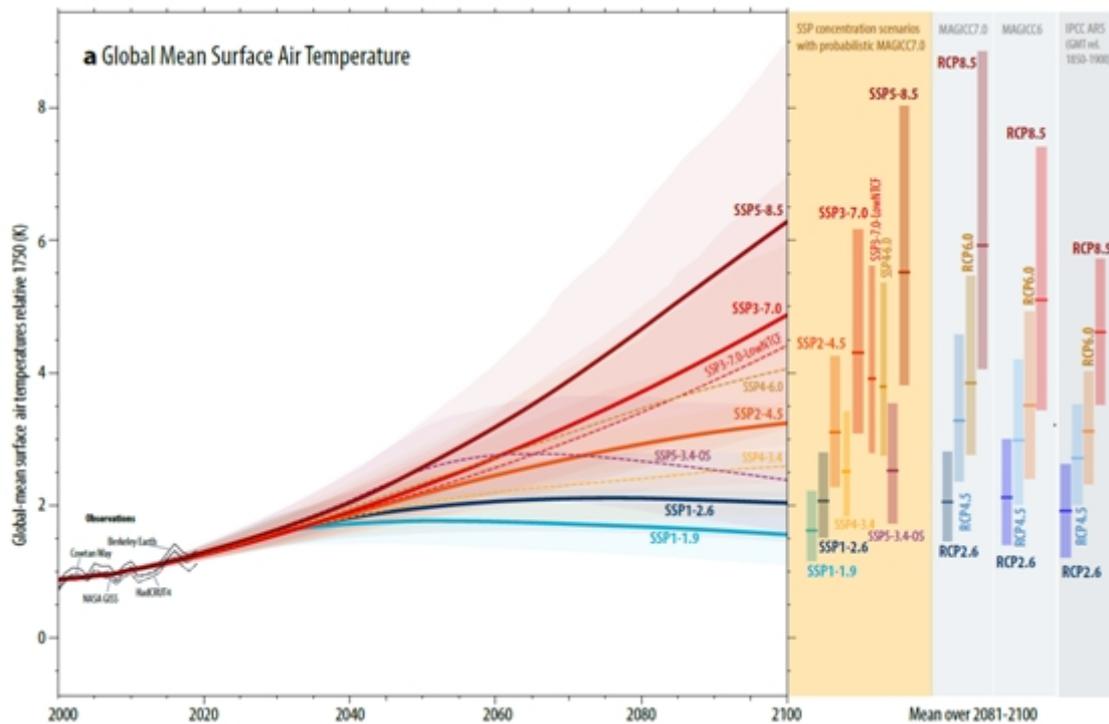


Figura 8. Comparación de las proyecciones ilustrativas de la temperatura media global en superficie en los escenarios SSP y RCP. Las temperaturas medias mundiales se indican en relación con los niveles preindustriales (1750), normalizados a 0,92°C durante el período 1995-2014. Las series temporales para el periodo 2000-2100 se muestran para los nueve SSP en relación con 1750, con líneas sólidas en negrita que indican los escenarios SSP de mayor prioridad y líneas discontinuas finas que indican otros escenarios denominados de "nivel 2". Las zonas sombreadas indican los intervalos de confianza del 5% al 95% para cada escenario. Los gráficos de barras ilustran la media de 2081-2100 en relación con 1750 para los nueve SSP (área sombreada en amarillo con gráficos de barras), y los escenarios RCP, utilizando la misma configuración de MAGICC7.0 (área sombreada de barras en gris claro a la izquierda) y una configuración anterior de MAGICC6 utilizada en el momento del AR5 del IPCC (área gris claro a la derecha). También se muestra el rango probable de los promedios de aumento de la temperatura según el AR5 del IPCC para ese período, basado en múltiples líneas de evidencia (conjunto de barras sombreadas en gris oscuro a la derecha). Los datos de observación de las temperaturas medias globales de la superficie, normalizados durante el mismo período 1986-2005, se muestran para Berkeley Earth (negro sólido), Cowtan & Way (guiones largos), HadCRUT4 (guiones pequeños) y NASA GISS (guiones). Fuente: Meinshausen et al., 2019.

El CMIP6 ha establecido como escenarios principales (denominados *Tier 1*) los SSP1(2.6), SSP2(4.5), SSP3(7.0) y SSP5(8.5). A diferencia del CMIP5, CMIP6 amplía el *Tier 1* de 2 a 4 escenarios (figura 9).

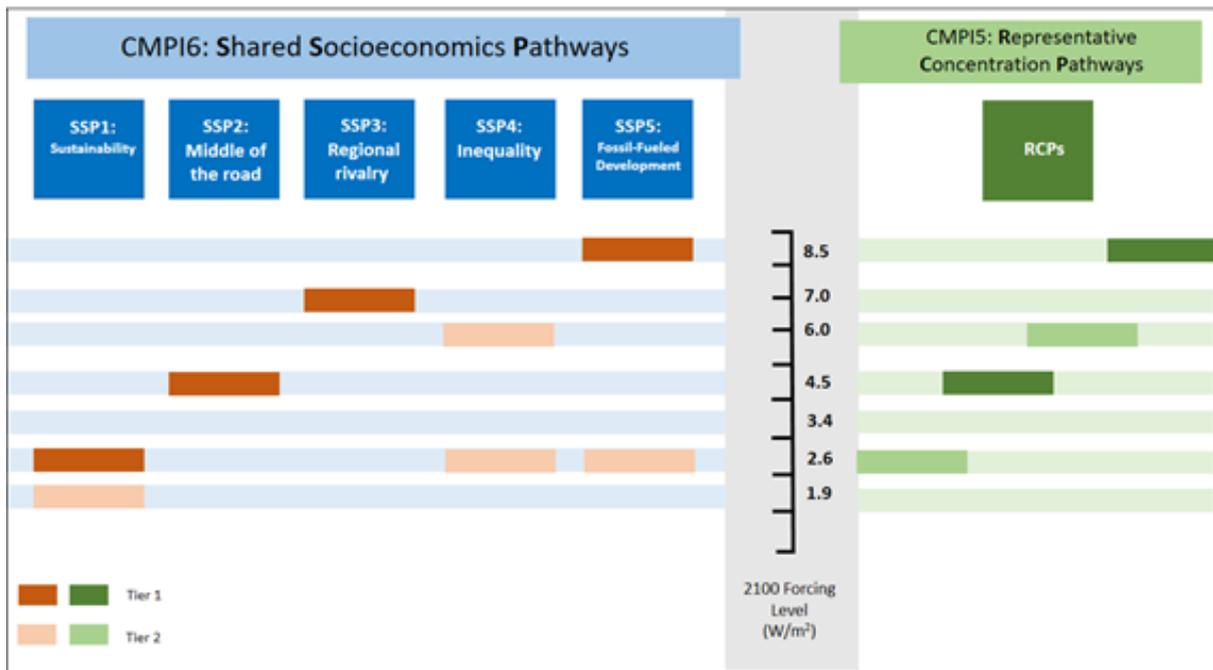


Figura 9. Comparación entre los escenarios definidos en la CMIP6 y los definidos en la CMIP5. El nivel 1 y el nivel 2 se definen como los escenarios que deben proporcionar de forma obligatoria y opcional, respectivamente, todos los modelos climáticos que forman parte de cada fase del CMIP. Elaboración propia basada en O'Neill et al, 2016.

El nuevo CMIP6 incorpora más MC (más de 70), con nuevos modelos, más complejos y de mayor resolución.

Tan importantes cambios hacen que los estudios realizados con MC anteriores probablemente serán considerados en poco tiempo obsoletos técnicamente, de forma que la comunidad científica recomendará el uso de las proyecciones generadas por este CMIP6, y dejar de utilizar MC anteriores.

2.4.2. Necesidad de trabajar con información a escala local

Muchas actuaciones de adaptación ante el cambio climático requieren detalle local. Además, diversos estudios han mostrado que puntos muy próximos entre sí (a pocos km de distancia) se espera que presenten en el futuro cambios con respecto a su clima actual bastante diferentes, incluso bajo la misma proyección de clima futuro (de cierto MC bajo cierto SSP o RCP). Ello es debido sobre todo a la topografía, que hace que bajo una misma configuración atmosférica se produzcan efectos en superficie (precipitación, temperatura...) bastante diferentes en puntos muy próximos entre sí, pero con diferentes influencias topográficas. Si, como muchos modelos sugieren, en el futuro cambia la frecuencia de aparición de las configuraciones que generan diferentes efectos en puntos

próximos, el cambio en esos efectos con respecto al clima actual en esos puntos próximos será diferente.

Algunos estudios realizados en diferentes zonas del planeta muestran estas diferencias en las simulaciones realizadas en dos puntos muy próximos: se han llegado a simular cambios previstos de 2-3°C en unos puntos, y de 4-5°C en otros muy próximos, para un mismo MC y escenario de emisiones. Se muestra un ejemplo, comparando las simulaciones en este caso para precipitación, obtenidas por *downscaling* del ESM alemán (*Max Planck Institute*) en La Ceiba y Tela, ambas en la costa Atlántica de Honduras y bastante cercanas entre sí, pero con influencias topográficas diferentes. La figura 10 ilustra las proyecciones para estas localidades.

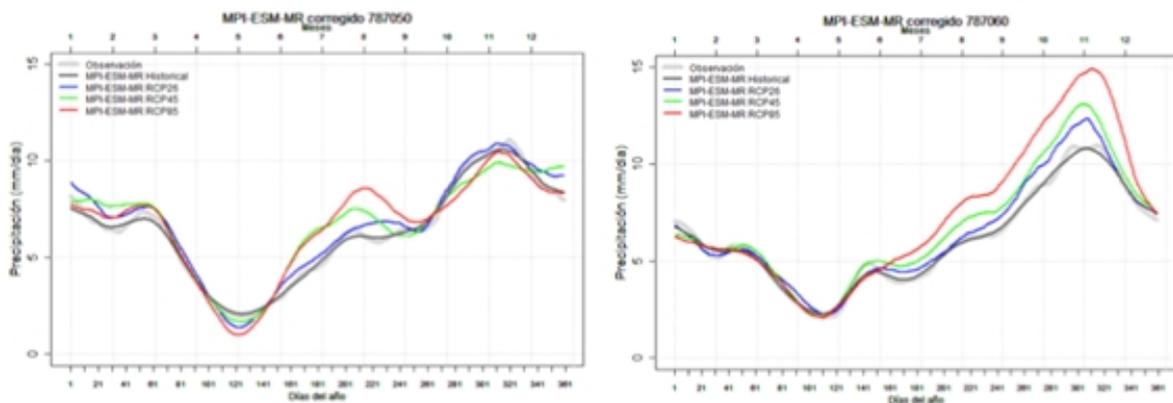


Figura 10. Distribución de la precipitación a lo largo del año (en mm/día) en La Ceiba (estación 787050, izquierda) y Tela (estación 787060, derecha), simuladas por *downscaling* con FICLIMA del *Earth System Model* (ESM) alemán MPI-ESM-MR. En gris oscuro se representa la regionalización de la salida de control (*historical*) del ESM, y en colores las proyecciones de ese mismo Modelo para mitad de siglo (promedio 2041-2070), para las RCP 2.6 (azul), 4.5 (verde) y 8.5 (rojo).

Se observa que en La Ceiba los incrementos de precipitación se esperan fundamentalmente en julio y agosto, y sin embargo en Tela los mayores incrementos se prevén en octubre y noviembre. Por ello, las medidas de adaptación deberán ser totalmente diferentes en uno y otro lugar. En este caso, mientras en La Ceiba se espera que aumente la precipitación en una época del año en la que la lluvia es intermedia (pasaría de unos 180 mm/mes a unos 250 mm/mes para la RCP 8.5), en Tela se espera que, además, aumente (y en mayor medida) en la época más lluviosa (pasaría de unos 320 mm/mes a unos 450 mm/mes para esa misma RCP 8.5), lo que tendría

implicaciones totalmente diferentes, por ejemplo en materia de hidrología e infraestructuras relacionadas.

Estas importantes diferencias esperadas en puntos cercanos permiten concluir que, si bien si el cambio climático es una problemática con causas globales (las emisiones de GEI en todo el planeta), sus consecuencias son y serán locales, especialmente en terrenos topográficamente complejos.

Por ello no es suficiente utilizar salidas directas de los MC, cuya insuficiente resolución espacial les impide reflejar estas diferencias entre puntos próximos. Resulta imprescindible aplicar a las salidas de estos MC herramientas de *downscaling*. Y sólo con metodologías de *downscaling* avanzadas, que trabajen a escala diaria (para captar esos cambios en las frecuencias de las diferentes configuraciones atmosféricas), y que consideren cómo afecta la situación concreta de ese día a cada uno de los puntos del territorio, se podrán detectar estos cambios diferenciales en puntos próximos, que son tan importantes, al requerirse ese detalle local en muchas actuaciones de adaptación.

2.4.3. Necesidad de trabajar con información con resolución temporal diaria

Algunas técnicas de *downscaling* menos sofisticadas ofrecen información con resolución mensual (medias mensuales de temperaturas y precipitación), pero esta resolución temporal es insuficiente para describir muchas características esenciales del clima. Por ejemplo, una misma precipitación mensual puede corresponder a muchos días del mes con una precipitación moderada, o a unos pocos con lluvias extremas. Algo similar podría decirse para la temperatura. El impacto de esas diferentes formas de distribuirse la precipitación (o la temperatura) dentro del mes puede ser muy distinto, por ejemplo en hidrología, riesgo de inundaciones e infraestructura relacionada. Se requieren escenarios de clima futuro con resolución diaria, a partir de los cuales se puedan caracterizar esos aspectos del clima que requieren tal resolución (duración e intensidad de olas de calor o frío, máxima precipitación acumulada en 24 horas, o en 5 días, número de días seguidos sin precipitación, etc.)

Además, la resolución diaria también es necesaria para que las simulaciones puedan alimentar muchos modelos de evaluación de impactos o de vulnerabilidad. Por ejemplo, muchos modelos hidrológicos requieren datos diarios, porque según la cantidad de agua en el suelo (que depende de las lluvias en días anteriores), la precipitación de un día puede ser absorbida por el suelo (si está seco), o convertirse directamente en escorrentía superficial (si está saturado), y obviamente el efecto hidrológico es totalmente diferente.

2.4.4. Necesidad de manejar adecuadamente las incertidumbres

La consideración y cuantificación de las incertidumbres inherentes a toda simulación climática es uno de los campos en los que la comunidad científica está volcando más esfuerzos.

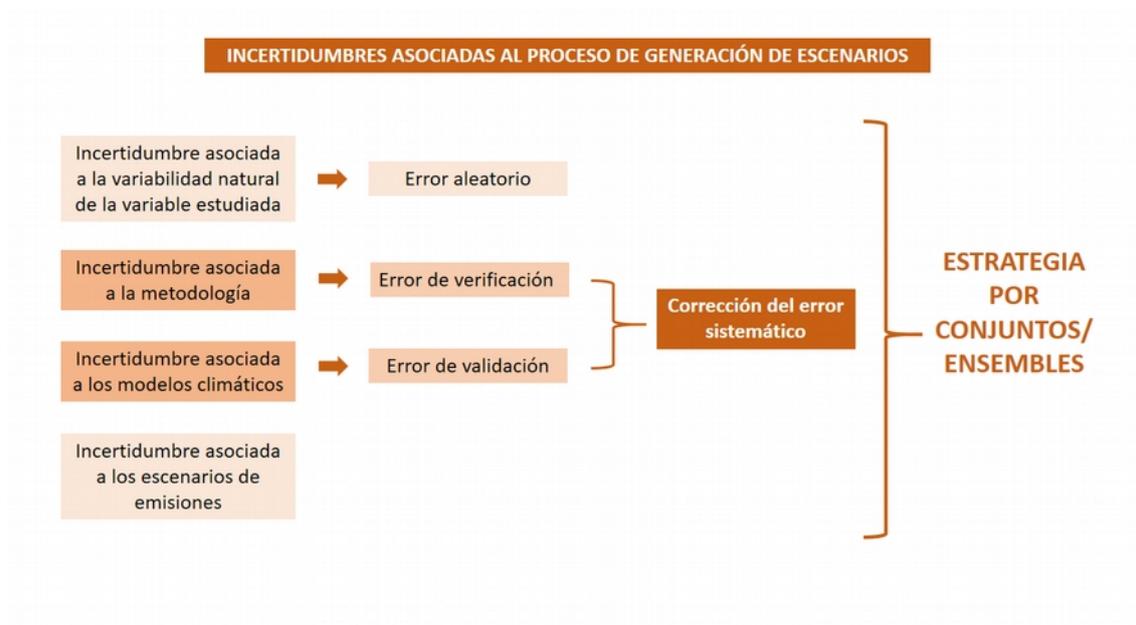


Figura 11. Esquema de las incertidumbres inherentes al proceso de generación de escenarios climáticos

Existen varias opciones técnicas para afrontar esta problemática, que no detallaremos en aras a la brevedad, pero todas ellas pasan por la utilización de tantas proyecciones como sea posible. Se debería trabajar con algunas decenas de proyecciones, obtenidas a partir de varios MC bajo diferentes SSP/RCP cada uno. Cuanto más similares sean las proyecciones obtenidas a partir de diferentes MC y SSP/RCP para una localidad concreta, obviamente menos incertidumbre habrá en el clima futuro esperado para ese lugar.

En ocasiones evaluar los efectos de todas y cada una de esas proyecciones puede ser demasiado laborioso. Por ejemplo, correr un modelo hidrológico complejo decenas de veces (una con cada proyección) puede ser inviable, por el coste computacional y por el esfuerzo que requeriría la interpretación de sus salidas. Por ello, para una correcta cuantificación de la incertidumbre es necesario aplicar metodologías específicas que permitan manejarla adecuadamente. Una de las opciones es ordenar las proyecciones y seleccionar un subconjunto de ellas que representen correctamente la variabilidad entre las mismas: por ejemplo, una de la parte central del abanico de posibilidades

correspondiente a un cambio medio, otra de la parte alta correspondiente a un cambio mayor, y otra de la parte baja correspondiente a un cambio menor. Hecha esa selección, se pueden evaluar los efectos (en el ejemplo anterior, ejecutando el modelo hidrológico complejo) de ese subconjunto, para obtener una idea del abanico de posibilidades de efectos.

Lo anterior es una mera simplificación, pero en realidad encierra ciertas complejidades teórico-técnicas. Por ejemplo, si los efectos a evaluar están relacionados con la disponibilidad hídrica, deberían ordenarse las proyecciones en función de ésta, no siendo suficiente ordenarlos en función del cambio en temperatura o en lluvia que pronostican, sino en una combinación de ambas.

Así, si es factible correr ese modelo 3 veces, se seleccionarían proyecciones correspondientes por ejemplo a los percentiles 25 (aproximadamente el 25% de las proyecciones simulan cambios menores, y el 75% mayores), 50 (la mitad menores y la mitad mayores, sería la “proyección mediana”) y 75 (supone cambios mayores en el balance hídrico, pero solo hay un 25% de probabilidades de que se supere ese cambio, solo el 25% de las proyecciones simulan cambios mayores). Resulta necesario escoger una cierta proyección (por ejemplo la asociada al percentil 50) y no una combinación de ellas (por ejemplo el promedio de todas las proyecciones), porque lo que se utilizará para alimentar al modelo hidrológico, como se ha comentado, será la serie diaria de lluvia y temperatura, con sus características propias (duración de olas de calor, máxima precipitación en 24 horas, lluvia acumulada en 5 días, número de días seguidos sin lluvia, etc.), y si esa serie se construye como promedio de todas las proyecciones se obtendrá una serie diaria inservible para una correcta simulación hidrológica (por ejemplo, apenas tendrá días sin lluvia, ya que al promediar los valores de todas las proyecciones para cierto día, con que una de las proyecciones dé lluvia ese día, el promedio ya no será 0).

En definitiva, para trabajar adecuadamente con las incertidumbres, se deben cuantificar lo más tarde posible en el proceso: en lugar de manejar éstas inicialmente para construir una sola proyección (por ejemplo, haciendo un promedio ponderado de todas), es más recomendable seleccionar varias proyecciones con una probabilidad de superación asociada, y correr los “modelos de efectos” a todas ellas, asociando esa probabilidad de superación a los resultados (impactos) de esos “modelos de efectos”. Si finalmente se requiere disponer de un escenario de efectos promedio para la toma de decisiones, entonces es recomendable realizar los promedios sobre los resultados finales (en los impactos calculados), en vez de sobre las proyecciones iniciales.

Lamentablemente no es muy frecuente incorporar adecuadamente estas incertidumbres en los estudios de adaptación al cambio climático, lo cual supone un grave problema, ya que dicha incorporación resulta imprescindible para que los resultados finales sean robustos científica y técnicamente.

2.4.5. Necesidad de exhaustivos estudios de verificación y validación

Antes de simular el clima futuro, es necesario comprobar que las herramientas utilizadas para ello funcionan adecuadamente en la zona de estudio, simulando correctamente el clima pasado observado.

Para ello, es necesario realizar completos y robustos análisis de verificación de las metodologías de *downscaling* utilizadas, y de validación de los MC a los que se hará *downscaling*. Deben conocerse, para las diferentes variables, los errores con los que la metodología y cada MC simulan el clima observado en cada punto, porque, por un lado, si esos errores fueran inasumibles, esa metodología o/y MC no debería utilizarse en ese punto concreto, y por otro, cuanto más pequeños sean estos errores, menores serán las incertidumbres de sus simulaciones para el futuro.

Verificación de la metodología de *downscaling*

En primer lugar es necesario realizar una completa verificación de la metodología de *downscaling* en la zona de trabajo, para comprobar si la herramienta funciona bien en esa zona. Para ello, se aplica la herramienta de *downscaling* a los denominados reanálisis atmosféricos, que son representaciones del estado de la atmósfera (los predictores) en cada uno de los días de cierto periodo de referencia (por ejemplo desde 1979 hasta la actualidad). Los reanálisis más actuales tienen resoluciones bastante detalladas, pero de nada serviría que una herramienta obtuviera buenos resultados cuando los predictores tienen esa resolución, si luego se va a aplicar a las salidas del MC, con baja resolución (en torno a 100 km), de manera que la resolución espacial y temporal del reanálisis debe relajarse a las que ofrecen los MC.

La verificación debe afrontarse en profundidad, atendiendo nos sólo a los valores medios sino también a los extremos (percentiles 90 o 95 de precipitación y temperaturas diarias, número de días seguidos sin lluvia...), y a todas las escalas temporales: climática (30 años), decadal, anual, mensual, e incluso diaria. Ésta última es muy importante, ya que si la herramienta simula bien los cambios entre un día y el siguiente, significa que se están captando los vínculos físicos entre predictores y predictandos, vínculos físicos que no cambiarán aún en un contexto de cambio climático (las relaciones meramente empíricas sí pueden cambiar), y por tanto, significa que se está combatiendo, al menos teóricamente, el principal problema del *downscaling* estadístico, el denominado problema de la no-estacionariedad, que cuestiona si las relaciones predictores / predictando establecidas en el pasado van a ser estacionarias (se van a mantener en el futuro).

Una de las comprobaciones más exigentes son los denominados análisis de “robustez” (Gutiérrez et al., 2013): se extraen del periodo de referencia (1960-2010, por ejemplo), los años más fríos (o los más lluviosos), y se aplica la herramienta de *downscaling*

entrenándola en esos años, para simular a partir de ellos el resto de años del periodo de referencia (que serán los años más cálidos -o los más secos-). De este modo se puede saber si la herramienta es capaz de conseguir lo que pretendemos, simular el futuro, seguramente más cálido, a partir del presente, más frío.

Tras este completo proceso de verificación se tiene una idea clara de la capacidad predictiva de la metodología en cada punto del territorio para cada variable, y de los diferentes aspectos relevantes (escalas temporales, valores medios, extremos, “robustez”, etc.). Además, si estos resultados de verificación son lo suficientemente buenos como para recomendar el uso de esa herramienta en la zona, toda esta información se usará también, como se ha mencionado, para cuantificar las incertidumbres a la hora de utilizar los escenarios que se generen.

Validación de los Modelos Climáticos

Una vez verificada con éxito la metodología de *downscaling*, se afronta la validación de cada MC a regionalizar, haciendo *downscaling* de sus salidas de control, denominadas *historical* (para el periodo 1960-2015, por ejemplo). Comparando las simulaciones así obtenidas con el clima observado, se evalúa en qué medida ese MC está representando adecuadamente dicho clima observado.

Esta validación también debe realizarse a escala local. De hecho, en estudios previos se ha comprobado que algunos MC funcionan adecuadamente en cierta zona de un territorio, pero no en otra. Se muestra como ejemplo la figura 12, que compara los resultados de validación del ESM americano GFDL (del CMIP5) en dos localidades hondureñas.

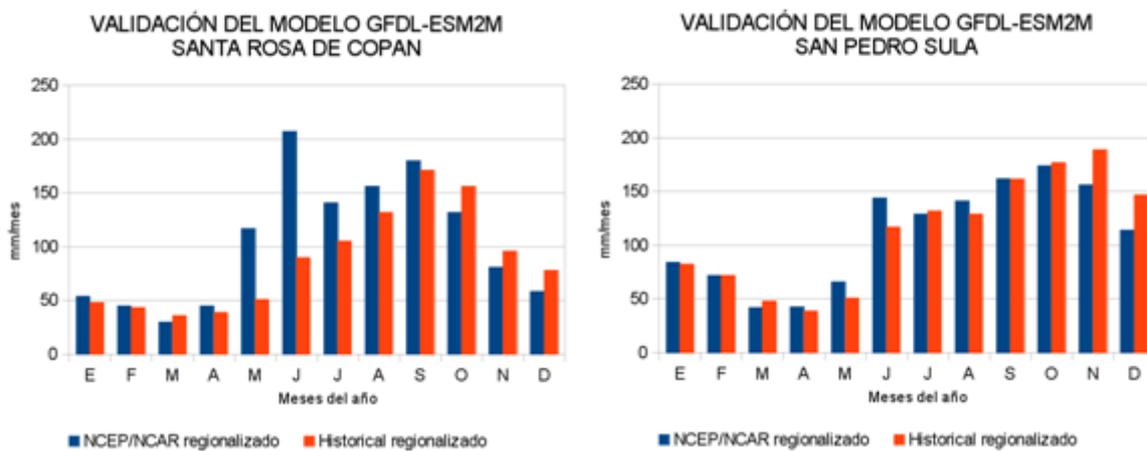


Figura 12. Valores medios mensuales de precipitación (en mm/mes) en Santa Rosa de Copán (izquierda) y San Pedro Sula (derecha), simulados por regionalización con FICLIMA del Reanálisis NCEP/NCAR (azul, asimilable al clima observado), y por regionalización de la salida de control (*historical*) del *Earth System Model* americano GFDL-ESM2M.

Se observa que el GFDL no es capaz de representar las lluvias de lo que se denomina “primera” (la primera cosecha del año, entre mayo y agosto), esenciales en el clima de la primera localidad, por lo que no podría ser utilizado en dicho lugar. Sin embargo, en la segunda, donde no existe la denominada canícula (periodo más seco en julio y agosto tras un máximo de precipitación hacia junio) propiamente dicha y sí se reproduce bastante bien el clima observado, sí se podrían generar escenarios con ese MC.

La causa de estas diferencias en los resultados de validación seguramente esté en que este ESM no sea capaz de reproducir adecuadamente las configuraciones atmosféricas que producen las precipitaciones de junio, y por tanto podría utilizarse en las zonas del territorio sin canícula marcada, pero no en otras que tienen un máximo relativo de precipitación en junio-julio.

Los resultados de esta validación de cada MC (igualmente para cada variable y cada punto del territorio), también se utilizan en la cuantificación de incertidumbres: cuanto mejores resultados de validación ofrezca cierto MC, menores incertidumbres habrá en las simulaciones de ese MC.

3. METODOLOGÍA DE REGIONALIZACIÓN FICLIMA

En este proyecto se ha utilizado una metodología de regionalización estadística en dos pasos desarrollada por la Fundación para la Investigación del Clima (Ribalaygua et al. 2013) ampliamente probada en multitud de proyectos nacionales e internacionales. En particular debe destacarse su utilización en Andalucía para la generación de escenarios a partir de modelos correspondientes al Tercer, Cuarto y Quinto Informe de Evaluación del IPCC.

La metodología necesita 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 se desea mayor detalle, puede acudir a Ribalaygua et al. (2013).

En términos generales, la metodología sigue el siguiente esquema, para un cierto 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 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:

El primer paso, denominado estratificación analógica, consiste en seleccionar, de un banco de datos de referencia, 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 predictoras 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 dichos ascensos de las masas de aire y por tanto en la distribución espacial de la nubosidad y de la precipitación.

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 hacia adelante y hacia atrás. La población de trabajo va a estar compuesta por

los n días (análogos) seleccionados en el paso previo. Como predictores potenciales se ofrecen, por un lado, los valores de variables atmosféricas relacionadas con los forzamientos de la temperatura (como el espesor de las capas de aire) en la vertical del punto para el que se quiere estimar la temperatura en superficie, y por otro, predictores relacionados con otros forzamientos de la temperatura, como un indicador de la duración del día en cuestión (relacionado con el potencial de calentamiento radiactivo) y un promedio ponderado de las temperaturas de los días anteriores (que 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), 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 se reduce notablemente con la estratificación análoga. 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 la temperatura. Obtenemos, de esta manera, relaciones lineales más robustas. Por ejemplo, la relación entre el espesor de la baja troposfera y la temperatura a 2 m, es de carácter no-lineal: cuando se trata de días con cielos cubiertos, la temperatura máxima va a depender fuertemente del espesor, y entre ambas variables se tendrá una relación bastante lineal; pero en días con cielos despejados, la dependencia de la temperatura máxima con el espesor es menor, por la gran influencia de la insolación, función a su vez de la época del año. Así, cuando el día problema sea nuboso, sus análogos también lo serán, y el proceso de selección de predictores por pasos para la regresión múltiple seleccionará (probablemente en exclusiva) el espesor, obteniendo una relación muy lineal y muy eficaz. Si no se hubiera realizado la estratificación previa, las relaciones se buscarían entre días tanto despejados como nubosos, y las relaciones lineales detectadas serían mucho menos eficaces. Este es, probablemente, el principal "secreto del éxito" de FICLIMA.

- 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.

La figura 13 ilustra la metodología descrita gráficamente.

Aunque algunas de las debilidades intrínsecas del método de *downscaling* estadístico son difícilmente salvables, 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 se minimiza 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 por sí solo, 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.
	Los resultados de verificación son considerablemente mejores que los de la inmensa mayoría de las metodologías, estadísticas y dinámicas, con las que se ha comparado en diversos proyectos nacionales e internacionales. Estos excelentes resultados de verificación se han comprobado en las diferentes zonas del planeta en las que se ha probado, y se justifican por los sólidos fundamentos teóricos en los que se basa FICLIMA.

Tabla 2. Ventajas de la metodología FICLIMA frente a otras metodologías de *downscaling* estadístico.

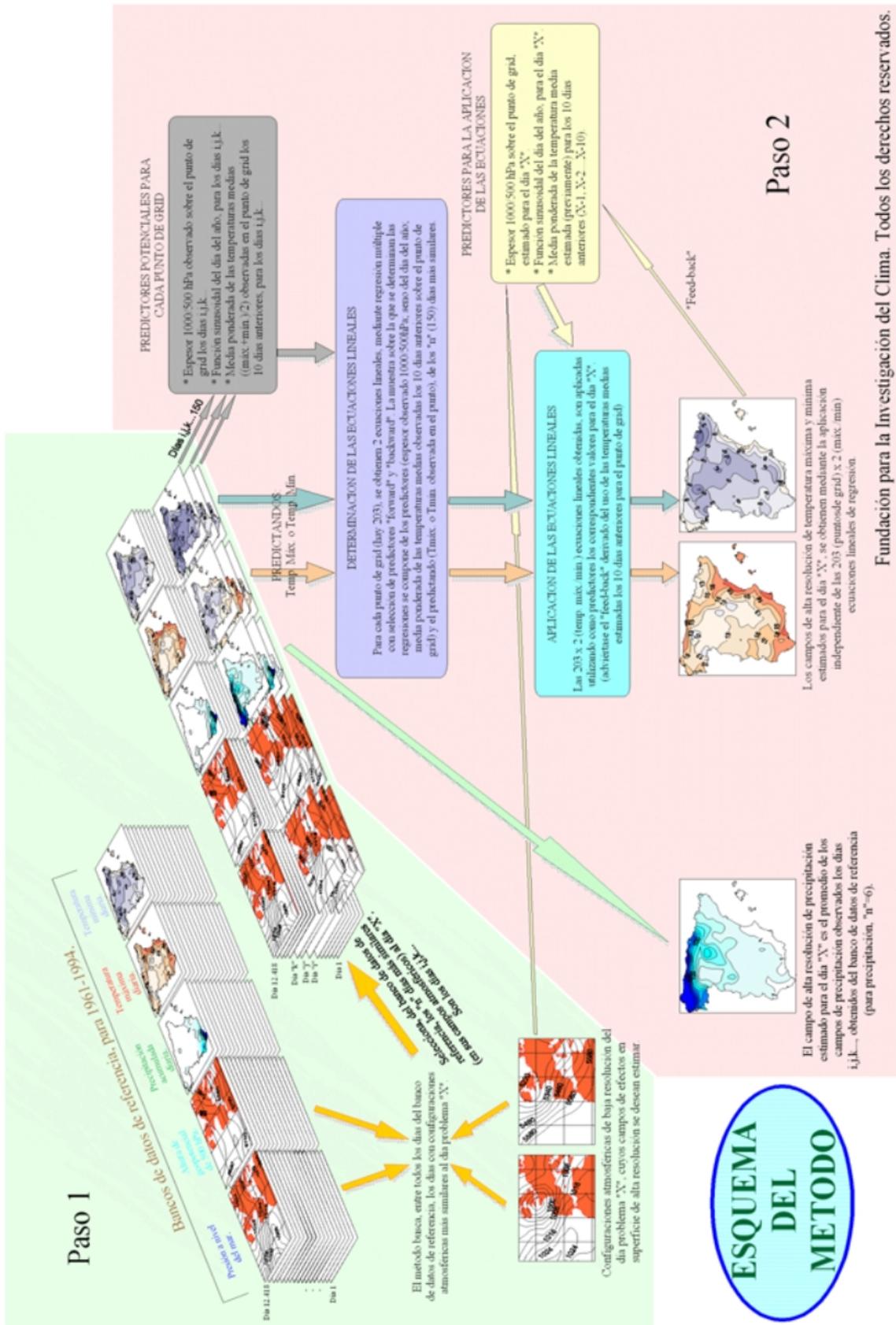


Figura 13. Esquema de la metodología FICLIMA.

Con el fin de asegurar que las proyecciones climáticas han sido generadas de la forma más rigurosa posible, se ha realizado un exhaustivo proceso de verificación de la metodología de *downscaling* y otro de la validación de los Modelos Climáticos.

4. DATOS REQUERIDOS

En el proceso de generación de escenarios de clima futuro se han utilizado tres grupos de datos: datos observados, reanálisis atmosférico y modelos climáticos.

4.1. Datos observados

Los datos empleados se someten a un estricto control de calidad y de homogeneización, así como de relleno de lagunas en aquellos observatorios que lo requieran.

Control de calidad de datos observados

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

- Coherencia básica. Rechazo directo de valores manifiestamente erróneos, como por ejemplo las precipitaciones negativas.
- 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, o por error. 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.

Homogeneización de los datos observados

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.

A modo de ejemplo, en la figura 14 podemos ver los datos reales de temperatura máxima diaria de un observatorio meteorológico. Como se puede apreciar con una primera inspección visual de la representación gráfica de los valores diarios de la temperatura máxima, 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 (o corregidos).

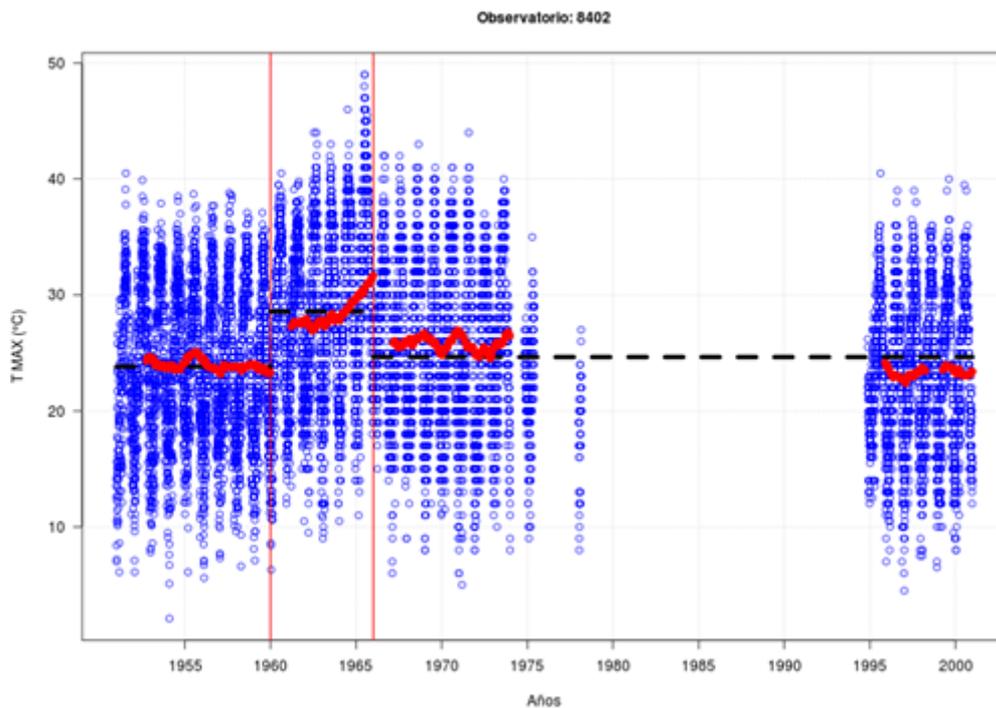


Figura 14. Serie observada diaria de temperatura máxima correspondiente a un observatorio.

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.

En estos procesos de control de calidad, además de analizar la serie de cada observatorio, se realiza un análisis conjunto con las series de observatorios circundantes, lo que ayuda a detectar errores o inhomogeneidades (cuando se producen en esa serie y no en las de alrededor).

Una vez realizados los análisis comentados, se marcarán los datos considerados errores y las inhomogeneidades, procediendo posteriormente a su corrección (si existen garantías del éxito de esa corrección), o a su eliminación (es decir, su no utilización en los pasos siguientes).

Relleno de lagunas de los datos observados

Para ser capaces de rellenar las lagunas (y/o de extender la serie) de un observatorio, primero debe establecerse un conjunto de observatorios que, al ser comparados con la serie original del observatorio problema, permitan establecer relaciones con las que rellenar (o extender) la serie problema. Es decir, se comparan aquellos datos que pertenezcan a períodos comunes entre la serie problema y las colindantes, buscando relaciones de parecido entre aquella y éstas. Posteriormente se aplicarán esas relaciones para estimar la serie del observatorio problema, a partir de los datos de los demás observatorios, combinándolos en función del parecido que hayamos encontrado (a mayor parecido, mayor peso en la posible combinación).

La cuestión esencial es la de definir el parecido entre dos conjuntos de datos (figura 15: la serie a rellenar original, y la serie estimada para ese observatorio a partir de los colindantes, como se explica arriba).

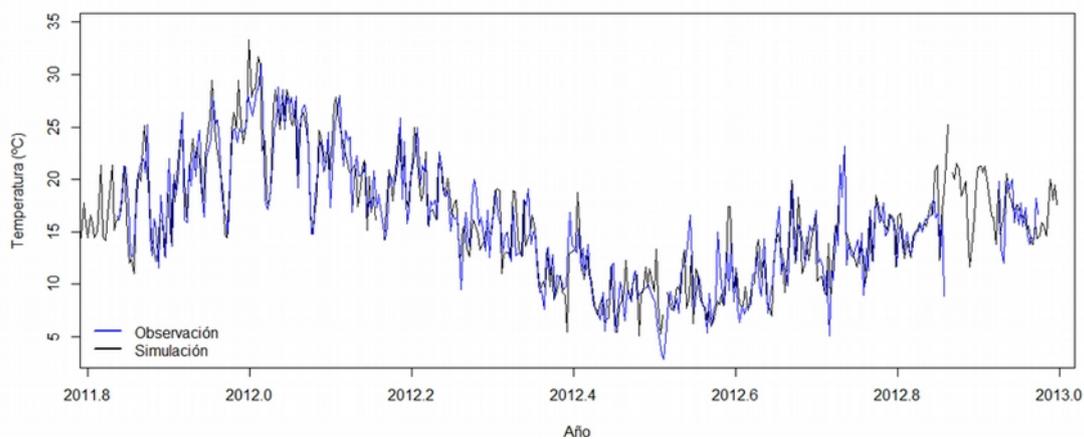


Figura 15. Ejemplo de relleno de lagunas. En azul los datos observados, en negro la serie rellena a partir de datos procedentes de observatorios cercanos al observatorio problema.

En este proyecto se ha aplicado una metodología de relleno de lagunas basada en regresiones lineales por mínimos cuadrados respecto al observatorio u observatorios mejor correlacionados del entorno.

4.2. Reanálisis europeo ERA5

Los reanálisis climáticos proporcionan descripciones numéricas del clima reciente, elaboradas mediante la combinación de modelos con observaciones asimiladas. Contienen estimaciones de variables atmosféricas como la temperatura del aire, la presión y el viento en diferentes niveles, y de otras variables de superficie como las precipitaciones, el contenido de humedad del suelo, la altura de las olas oceánicas y la temperatura de la superficie del mar. Utilizando una determinada resolución temporal y espacial, las estimaciones se producen para toda la Tierra, y abarcan un largo período de tiempo que puede remontarse a varias décadas (<https://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis>).

En este caso se ha utilizado el reanálisis europeo ERA5. La elección de este reanálisis se ha hecho por varias razones: 1) está desarrollado por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF), cuya principal área geográfica de trabajo es Europa y cuya información meteorológica ha demostrado estar entre las mejores disponibles; 2) es la versión más actual del reanálisis europeo lo que supone una mejora en la resolución espacial y temporal respecto a las anteriores; y 3) su descarga es gratuita a través del programa Copernicus (Servicio de Cambio Climático: DOI: 10.24381/cds.adbb2d47).

ERA5 cubre todo el territorio terrestre europeo con una resolución espacial regular de 0,25° (30 km aprox.) y una resolución temporal horaria. Está disponible para el periodo comprendido entre 1979 y el presente. La figura 16 representa uno de sus campos, a modo de ejemplo.

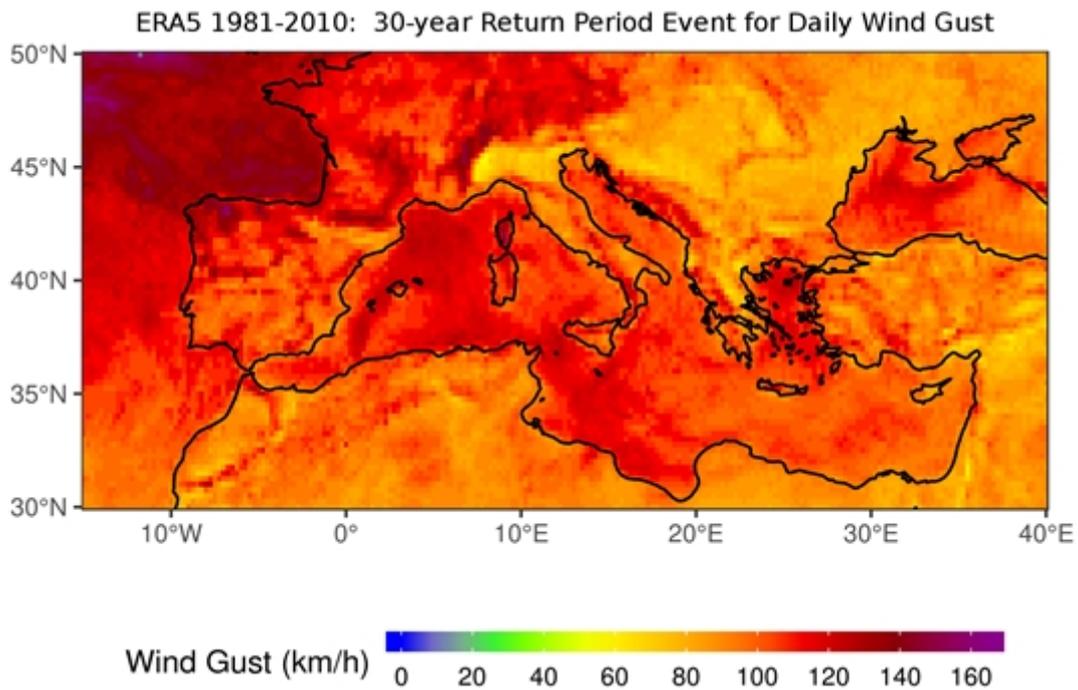


Figura 16. Ejemplo de un campo del ERA5.

4.3. Modelos Climáticos pertenecientes al CMIP6

Se ha trabajado con la salida de 10 Modelos Climáticos globales pertenecientes al CMIP6. Para todos los modelos se cuenta con un escenario de control (*Historical*) y, cuatro escenarios de emisiones (como recomienda el CMIP6 como *Tier 1*): SSP1 2.6, SSP2 4.5, SSP3 7.0 y SSP5 8.5. En total, se han generado 40 proyecciones de clima futuro.

La descarga de los modelos se realiza de forma gratuita a través de los archivos suministrados por el Programa de Diagnóstico e Intercomparación de Modelos Climáticos (PCMDI). En la tabla 3 se puede consultar una breve descripción de los 10 modelos seleccionados así como de los centros encargados de su desarrollo y las referencias donde se describen cada uno de ellos. La figura 17 muestra un ejemplo de campo de uno de esos Modelos, y en ella puede verse su resolución espacial, que es mucho menos detallada que la del ERA5 (figura 17).

Modelos CMIP6	Resolución	Centro responsable	Referencias
BCC-CSM2-MR	1,125 ^o x 1,121 ^o	Beijing Climate Center (BCC), China Meteorological Administration, China	Wu, T. et al. (2019)
CanESM5	2,812 ^o x 2,790 ^o	Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CC-CMA), Canadá	Swart, N.C. et al. (2019)
CNRM-ESM2-1	1,406 ^o x 1,401 ^o	CNRM (Centre National de Recherches Meteorologiques), Meteo-France, Francia	Seferian, R. (2019)
EC-EARTH3	0,703 ^o x 0,702 ^o	EC-EARTH Consortium	EC-Earth Consortium. (2019)
CMCC-ESM2	1,25 ^o x 0,942 ^o	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), Italia	Cherchi et al., 2019
MPI-ESM1-2-HR	0,938 ^o x 0,935 ^o	Max-Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Germany	Von Storch, J. et al. (2017)
MRI-ESM2-0	1,125 ^o x 1,121 ^o	Meteorological Research Institute (MRI), Japan	Yukimoto, S. et al. (2019)
UKESM1-0-LL	1,875 ^o x 1,250 ^o	Uk Met Office, Hadley Centre, United Kingdom	Good, P. et al. (2019)
NorESM2-MM	1,250 ^o x 0,942 ^o	Norwegian Climate Centre (NCC), Norway	Bentsen, M. et al. (2019)
ACCESS-CM2	1.258 ^o x1.8758 ^o	Australian Community Climate and Earth System Simulator (ACCESS), Australia	Bi Daohua et al., 2020

Tabla 3. Información sobre los diez Modelos Climáticos pertenecientes al 6 Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) correspondiente al Sexto Informe del IPCC. Los Modelos fueron suministrados por los archivos del Programa de Diagnóstico e Intercomparación de Modelos Climáticos (PCMDI).

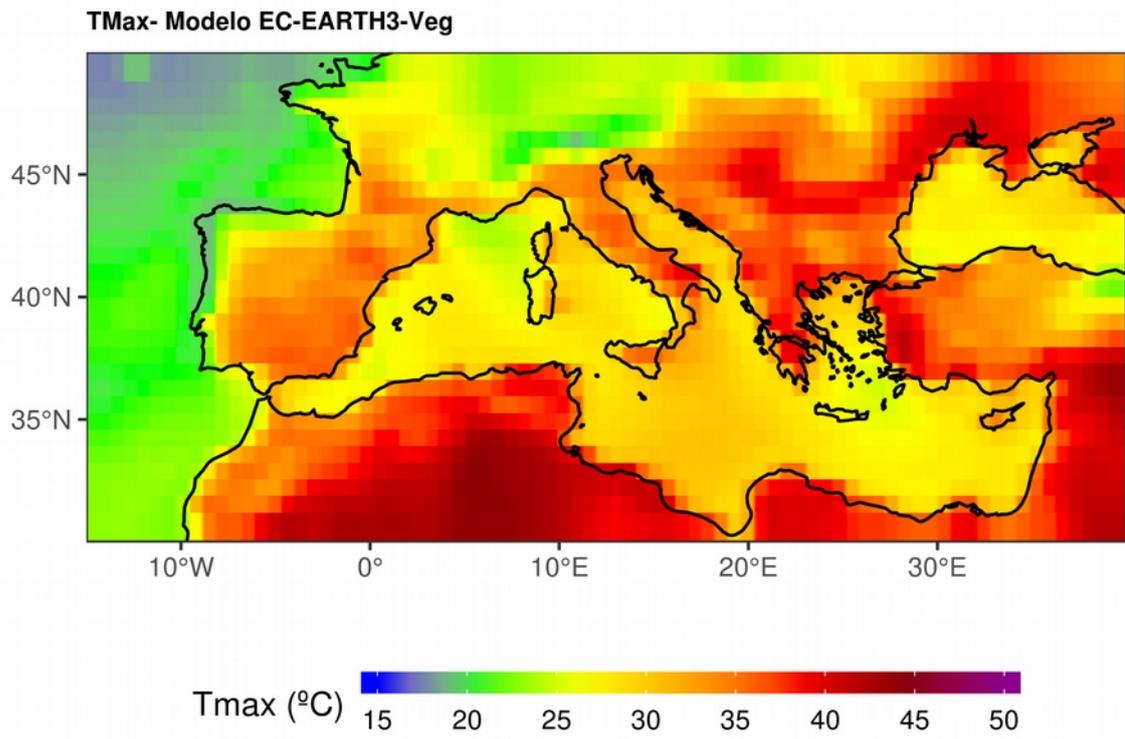


Figura 17. Ejemplo de la información proporcionada por el Modelo EC-EARTH3 perteneciente al CMIP6.

5. LA CORRECCIÓN DEL ERROR SISTEMÁTICO

Si se necesita que los datos regionalizados en un punto de un cierto modelo climático se puedan interpretar en su valor absoluto y no solo en términos de incrementos relativos, entonces deben corregirse los posibles errores derivados de introducir sesgos en la regionalización para así poder obtener valores que puedan estudiarse en su magnitud absoluta. Esta corrección es lo que denominamos Corrección del Error Sistemático.

Sea cual sea el método de corrección empleado, se busca no corregir todos los datos de la misma forma (no sumar o multiplicar por el mismo valor), sino de forma proporcional, de manera que a los valores que tengan mayor error se les apliquen mayores correcciones, y los que tengan menor error, menores. Para determinar qué valores tienen mayor o menor error se estudia la función de distribución de esos valores, comparando la función de distribución de los valores observados frente a la de los obtenidos por regionalización de ERA5, y ésta frente a la de los valores obtenidos por regionalización del periodo *historical* del Modelo. En concreto se ha usado 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 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.

Una vez determinados los errores (diferentes para cada cuantil) en el periodo *historical*, éstos se aplican a las proyecciones de futuro de ese mismo Modelo, para obtener finalmente las proyecciones corregidas, que ya sí podrán ser utilizadas en sus valores absolutos, tanto para su consulta directa como para alimentar a los modelos de evaluación de vulnerabilidad e impactos.

La forma de aplicar este método se ejemplifica en la figura 18. 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.

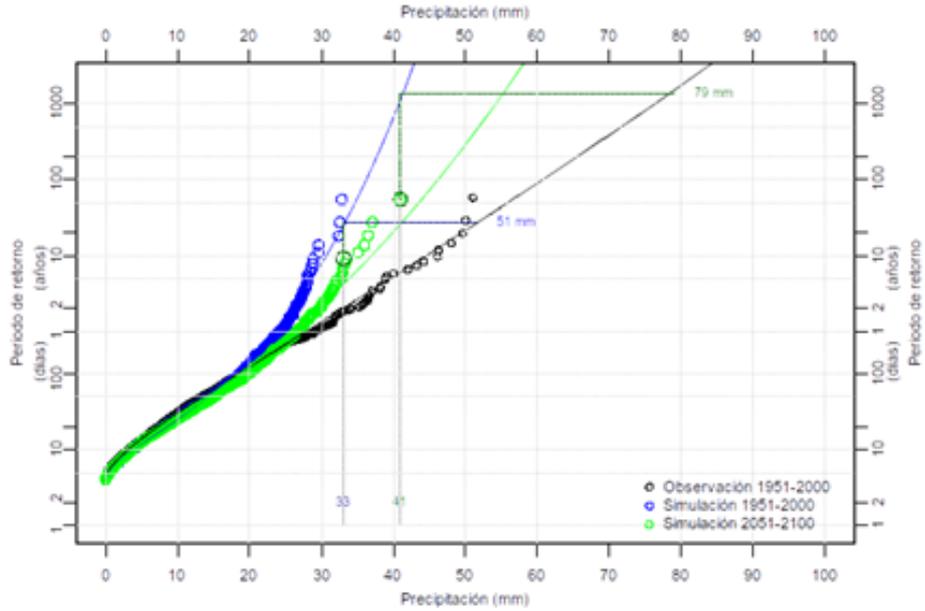


Figura 18. Ejemplo de la corrección del error sistemático. Los puntos negros se corresponden con valores observados, los azules con simulados para un periodo de control, y los verdes con simulaciones de periodos futuros. Las líneas continuas son las distribuciones teóricas de cada grupo. El uso del periodo de retorno (como inversa de la probabilidad) muestra las relaciones entre los grupos, ejemplificadas en los casos de 33 y 41 mm.

6. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS SUMINISTRADOS

Lo que sigue es una descripción del conjunto de datos (y de sus formatos asociados) suministrados en la Fase I del proyecto. Todos los resultados suministrados se pueden descargar a partir de una web habilitada a tal efecto,

https://www.ficlina.org/intercambio/indexed/Escenarios_Andalucia/Entrega_01/

dentro de la cual se encuentra una estructura de directorios en la que se organiza la información, información que pasamos a describir.

6.1. Datos observados

Para realizar el estudio determinado por este proyecto, el downscaling estadístico de un conjunto de modelos climáticos, se han utilizado un conjunto de datos observados de un conjunto de observatorios meteorológicos situados dentro la región de estudio. A través de

https://www.ficlina.org/intercambio/indexed/Escenarios_Andalucia/Entrega_01/00_Datos_observados/

podemos tener acceso a dos ficheros comprimidos diferentes, "Finales.zip" en la que están los datos observados suministrados una vez sometidos al proceso de control de calidad, y "Downscaling.zip", que tiene todos los observatorios empleados en el downscaling. La razón de que existan estos dos ficheros es que en el fichero comprimido "Downscaling" están no sólo los datos originales recibidos pero después del control de calidad (es decir, lo que está en "Finales") sino también un conjunto de puntos de una rejilla de valores diarios producida por AEMET a una resolución de 5 km (http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios?w=2) incluidos en el downscaling, es decir, el conjunto final empleado en el estudio. Esos puntos de la rejilla de AEMET se han incluido para completar áreas del territorio en los que la densidad de observatorios suministrados fuera baja.

Todos los ficheros suministrados son ficheros de texto plano con el tabulador como campo separador. Además de los ficheros propios con los datos de cada observatorio se suministran ficheros con el listado correspondiente de los observatorios de temperatura y de precipitación; los campos de esos listados son el Identificador, la Longitud, la Latitud, la Altura, el Nombre, el Municipio, la Provincia, el País y la Fuente de los datos. En el caso concreto de "Finales" se incluyen las coordenadas tanto en UTM30 como en longitud y latitud, en dos ficheros diferentes.

Veamos un ejemplo. En el fichero Finales.zip se encuentra el fichero Observatorios_PRECIP_Andalucia_finales.txt en el que se detalla el listado de los observatorios de Andalucía con datos de precipitación. Las primeras líneas de este fichero

```

4271 312548.67 4247765.68 661 Villanueva del Duque, C.P.C. -
Peñarroya VILLANUEVA DEL DUQUE CORDOBA ESP AEMET

4273 321357.02 4254863.34 559 Fuente la Lancha FUENTE LA
LANCHA CORDOBA ESP AEMET

```

muestran los datos propios de los observatorios. Nótese que en este caso las coordenadas están especificadas en UTM 30, mientras que el fichero equivalente Observatorios_PRECIP_Andalucia_finales_lonlat.txt muestra

```

4271 -5.1454149545416 38.3584514973843 661 Villanueva del
Duque, C.P.C. - Peñarroya VILLANUEVA DEL DUQUE CORDOBA ESP
AEMET

4273 -5.0464643176717 38.4241778404092 559 Fuente la Lancha
FUENTE LA LANCHA CORDOBA ESP AEMET

```

exactamente la misma información de los mismos observatorios pero ahora las coordenadas están especificadas en longitud y latitud.

En cuanto a los ficheros propios con los datos de cada observatorio, se ha generado uno para cada observatorio y variable suministrada, y la información suministrada muestra, para cada línea del fichero, el año, mes y día para el que se suministra la variable suministrada. En el caso de la precipitación, ésta se suministra en mm, y en el caso de la temperatura, se suministran la temperatura máxima diaria y la temperatura mínima diaria en grados centígrados.

Veamos un ejemplo. En el fichero Finales.zip, y dentro de la carpeta de Temperatura, se encuentra el fichero

4263X_temperatura.txt

en el que se encuentran los valores observados de temperatura del observatorio 4263X. Las primeras líneas del fichero nos muestran

```

2008 5 29 19.9 10.1
2008 5 30 18.1 11.9
2008 5 31 20.6 10.5

```

los datos de temperatura máxima diaria y temperatura mínima diaria observados para el periodo 29/05/2008 – 31/05/2008.

Veamos otro ejemplo. En el fichero Downscaling.zip, y dentro de la carpeta de Precipitacion, se encuentra el fichero

RIA4115_precipitacion.txt

en el que se encuentran los valores observados de precipitación del observatorio RIA4115. Las primeras líneas del fichero nos muestran

2000	11	18	0
2000	11	19	0
2000	11	20	0
2000	11	21	0
2000	11	22	0.2

los datos de precipitación diaria observados para el periodo 18/11/2000 – 22/11/2000.

6.2. Variables diarias entregadas

Mediante la metodología de downscaling estadístico por análogos en dos pasos se han generado simulaciones de periodicidad diaria para los escenarios futuros y el escenario de control del pasado (*Historical*) de dos variables, Precipitación y Temperatura.

TEMPERATURA

A través de

https://www.ficlima.org/intercambio/indexed/Escenarios_Andalucia/Entrega_01/03_Temperatura/

podemos acceder a los 11 ficheros comprimidos (10 para otros tantos modelos climáticos, y uno para el reanálisis ERA5) en los que se suministra la información generada. Dentro de cada uno de estos ficheros comprimidos se encuentran las cinco carpetas con los resultados generados para los escenarios simulados (*Historical*, *ssp126*, *ssp245*, *ssp370* y *ssp585*) y, además, una sexta carpeta (“00_Datos_corregidos”) dentro de la cual se reproduce el mismo esquema de cinco escenarios simulados pero con el error sistemático corregido.

Dentro de cada carpeta encontraremos un fichero con los resultados simulados para cada observatorio. Ese fichero tendrá el nombre

Temperatura_[modelo]_[escenario]_[identificador del observatorio].txt

en el caso de ser las simulaciones directas y

Temperatura-correcta_[modelo]_[escenario]_[identificador del observatorio].txt

para el caso de las simulaciones con el error sistemático corregido.

Dentro del fichero, los resultados se presentan en forma de texto plano (uno por cada observatorio + modelo + escenario de simulación), con el tabulador como separador de campos, donde se presentan cinco columnas de datos (año, mes, día, temperatura mínima y temperatura máxima, donde ambas temperaturas se expresan en grados centígrados).

Veamos un ejemplo. En el fichero comprimido “EC-EARTH3.zip”, correspondiente al modelo climático EC-EARTH3, y dentro de la carpeta *ssp245* (correspondiente a ese escenario) encontramos el fichero

Temperatura_EC-EARTH3_ssp245_4546I.txt

que nos indica, en su nombre, que es el fichero de temperatura simulada para el modelo EC-EARTH3 bajo el escenario *ssp245* y para el observatorio 4546I. Dentro del fichero encontraremos líneas tales como

2083	5	1	11.3	21.2
2083	5	2	11.2	21.5
2083	5	3	11.1	22.4
2083	5	4	11.6	22.7
2083	5	5	11.6	21.4

que nos indican las temperaturas mínima diaria y máxima diaria simuladas para el periodo 01/05/2083 – 05/05/2083.

PRECIPITACIÓN

A través de

https://www.ficlina.org/intercambio/indexed/Escenarios_Andalucia/Entrega_01/02_Precipitacion/

podemos acceder a los 11 ficheros comprimidos (10 para otros tantos modelos climáticos, y uno para el reanálisis ERA5) en los que se suministra la información generada. Dentro de cada uno de estos ficheros comprimidos se encuentran las cinco carpetas con los resultados generados para los escenarios simulados (*Historical*, *ssp126*, *ssp245*, *ssp370* y *ssp585*) y, además, una sexta carpeta (“00_Datos_corregidos”) dentro de la cual se reproduce el mismo esquema de cinco escenarios simulados pero con el error sistemático corregido.

Dentro de cada carpeta encontraremos un fichero con los resultados simulados para cada observatorio. Ese fichero tendrá el nombre

Precipitacion_[modelo]_[escenario]_[identificador del observatorio].txt

en el caso de ser las simulaciones directas y

Precipitacion-correcta_[modelo]_[escenario]_[identificador del observatorio].txt

para el caso de las simulaciones con el error sistemático corregido.

Dentro del fichero, los resultados se presentan en forma de texto plano (uno por cada observatorio + modelo + escenario de simulación), con el tabulador como separador de campos, donde se presentan cuatro columnas de datos (año, mes, día y precipitación, donde la precipitación se expresa en mm).

Veamos un ejemplo. En el fichero comprimido “CanESM5.zip”, correspondiente al modelo climático CanESM5, y dentro de la carpeta *00_Datos_corregidos/Historical* (correspondiente a ese escenario con los datos corregidos) encontramos el fichero

Precipitacion-correcta_CanESM5_Historical_H06.txt

que nos indica, en su nombre, que es el fichero de temperatura simulada para el modelo CanESM5 bajo el escenario Historical y para el observatorio H06. Dentro del fichero encontraremos líneas tales como

1990	5	20	0
1990	5	21	13.91
1990	5	22	0.27
1990	5	23	0
1990	5	24	0

que nos indican la precipitación diaria simulada para el periodo 20/05/1990 – 24/05/1990.

6.3. Variables climáticas entregadas

A partir de las simulaciones diarias realizadas para el proyecto (detalladas en el punto anterior), se entregan un conjunto de variables climáticas calculadas a partir de las anteriores. Esas variables se detallan en la tabla 4,

ID	Alias	Nombre	Unidades
1	prc	Precipitacion acumulada	mm
2	t_max	Temperatura máxima	°C
3	t_min	Temperatura mínima	°C
4	ndf0	Número de heladas ($T_{\min} \leq 0 \text{ °C}$)	n° días
5	ndc40	Olas de Calor ($T \geq 40 \text{ °C}$)	n° días
6	ndc45	Olas de Calor extremas ($T \geq 45 \text{ °C}$)	n° días
7	nnt22	Noches tropicales ($T_{\min} \geq 22 \text{ °C}$)	n° días

Tabla 4. Conjunto de variables climáticas entregadas.

Todas estas variables se han denominado *climáticas* porque han sido calculadas para periodos climáticos, es decir, para periodos lo suficientemente largos (siempre que sea posible, de al menos 30 años) que permitan reflejar el clima de un determinado lugar – en nuestro caso, y con respecto a los datos entregados, de un determinado observatorio objeto del estudio. La tabla 5 nos muestra los periodos empleados para los que se han calculado promedios.

Nótese que para el periodo *Historical* se han calculado dos periodos climáticos, uno más próximo a mediados del siglo XX (1961 – 1990) y otro justo al final de la definición del periodo (1985 – 2014), para poder comparar, si así se desea, contra los dos momentos. Los periodos climáticos futuros son todos periodos de 30 años que se muestran avanzando a lo largo del siglo XXI para así poder estimar la evolución de las variables a lo largo de todo el siglo. Además, todos estos periodos climáticos se muestran calculados para tres diferentes escalas temporales: anual, estacional y mensual.

Escenarios	Periodos climáticos
Historical	1961 -1990
	1985 - 2014
ssp	2011 - 2040
	2021 - 2050
	2031 - 2060
	2041 - 2070
	2051 - 2080
	2061 - 2090
	2071 - 2100

Tabla 5. Periodos climáticos considerados según los escenarios.

A través de

https://www.ficlina.org/intercambio/indexed/Escenarios_Andalucia/Entrega_01/04_Pro_medios_30-anuales/

podemos acceder a los 10 ficheros comprimidos (para otros tantos modelos climáticos) en los que se suministra la información generada. Dentro de cada uno de estos ficheros comprimidos se encuentran las cinco carpetas con los resultados generados para los escenarios simulados (*Historical*, *ssp126*, *ssp245*, *ssp370* y *ssp585*). Dentro de cada una de estas carpetas se encuentran los estadísticos tanto de los valores simulados directos como de los valores con el error sistemático corregido.

Dentro de cada carpeta encontraremos un fichero con los resultados simulados. Ese fichero tendrá el nombre

datos_[escala temporal]_[variable]_[correccion]_[modelo]_[escenario].txt

Nótese por lo tanto que tendremos un fichero por cada escala temporal (anual, mensual, estacional), variable climática estimada (7 posibles), posible corrección del error sistemático (sí o no), modelo (10) y escenario (4 futuros y uno pasado). Los ficheros serán ficheros de texto plano con el tabulador como separador de campos,

presentándose una línea por cada observatorio tratado (la primera línea será la cabecera del fichero), y tantos campos como los necesarios para mostrar la información. Esos campos serán siempre el identificador, la longitud, la latitud y la altura del observatorio, seguidos de tantos como periodos climáticos tengamos (referenciados por el año del fin del periodo) y con tantos periodos climáticos como unidades tenga nuestra escala temporal (1 si es anual, 4 si es estacional, 12 si es mensual).

Veamos un ejemplo. En el fichero comprimido “NorESM2-MM.zip”, correspondiente al modelo climático NorESM2-MM, y dentro de la carpeta *Historical* (correspondiente a ese escenario) encontramos el fichero

datos_anuales_olas_de_calor_sin_correccion_NorESM2-MM_Historical.txt

que nos indica, en su nombre, que es el fichero de olas de calor a escala anual simulado directamente (sin corrección) para el modelo NorESM2-MM bajo el escenario Historical. Dentro del fichero, las primeras líneas muestran la siguiente información:

```
id lon lat altu 1990 2014
4274 -4.98 38.46 579 2.3 3.57
4275 -4.85 38.38 649 0.43 0.53
```

que nos indican el promedio anual de olas de calor para dos observatorios (de identificadores 4274 y 4275 para este ejemplo – en el fichero hay tantas líneas como observatorios estudiados) de los que se muestran su longitud, latitud y altura para dos periodos climáticos, 1961 -1990 y 1985 – 2014, referidos por el año de finalización del periodo (“1990” y “2014”).

Veamos otro ejemplo. En el fichero comprimido “CNRM-ESM2-1.zip”, correspondiente al modelo climático CNRM-ESM2-1, y dentro de la carpeta *ssp585* (correspondiente a ese escenario) encontramos el fichero

datos_estacionales_tropical_corregida_CNRM-ESM2-1_ssp585.txt

que nos indica, en su nombre, que es el fichero de noches tropicales a escala estacional simulado con corrección del error sistemático para el modelo CNRM-ESM2-1 bajo el escenario *ssp585*. Dentro del fichero, las primeras líneas muestran la siguiente información:

```
id lon lat altu 2040_1 2040_2 2040_3 2040_4 2050_1 2050_2 2050_3
2050_4 2060_1 2060_2 2060_3 2060_4 2070_1 2070_2 2070_3 2070_4 2080_1
2080_2 2080_3 2080_4 2090_1 2090_2 2090_3 2090_4 2100_1 2100_2 2100_3
2100_4
4274 -4.98 38.46 579 0 0.08 18.65 2.31 0 0.07 24.87
3.77 0 0.37 34.17 5.43 0 0.9 39.43 7.47 0
2.07 50.53 8.93 0 2.27 61.4 11.93 0 2.63 72.4
17
```

4275	-4.85	38.38	649	0	0.42	33.96	3.96	0	0.53	41.07
	5.4	0	1.53	50.33	7.53	0	2.6	54.3	9.5	0
	4.23	62.6	11.67	0	4.33	70.57	15.87	0	5.23	78.9
	22.27									

que nos indican el promedio anual de olas de calor para dos observatorios (de identificadores 4274 y 4275 para este ejemplo – en el fichero hay tantas líneas como observatorios estudiados) de los que se muestran su longitud, latitud y altura, para los siete periodos climáticos de los escenarios futuros, referidos por el año de finalización del periodo (“2040” para 2011 – 2040, “2050” para 2021 – 2050, y así sucesivamente), y para cada una de las 4 estaciones del año (invierno (“_1”), primavera (“_2”), verano (“_3”) y otoño (“_4”)).

REFERENCIAS

- Bentsen, Mats; Oliviè, Dirk Jan Leo; Seland, Øyvind; Toniazzo, Thomas; Gjermundsen, Ada; Graff, Lise Seland; Debernard, Jens Boldingh; Gupta, Alok Kumar; He, Yanchun; Kirkevåg, Alf; Schwinger, Jörg; Tjiputra, Jerry; Aas, Kjetil Schanke; Bethke, Ingo; Fan, Yuanchao; Griesfeller, Jan; Grini, Alf; Guo, Chuncheng; Ilicak, Mehmet; Karset, Inger Helene Hafsaahl; Landgren, Oskar Andreas; Liakka, Johan; Moseid, Kine Onsum; Nummelin, Aleks; Spensberger, Clemens; Tang, Hui; Zhang, Zhongshi; Heinze, Christoph; Iversen, Trond; Schulz, Michael (2019). NCC NorESM2-MM model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP. Version YYYYMMDD[1]. Earth System Grid Federation. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.608.
- Bi Daohua, Dix Martin, Marsland Simon, O'Farrell Siobhan, Sullivan Arnold, Bodman Roger, Law Rachel, Harman Ian, Srbinovsky Jhan, Rashid Harun A., Dobrohotoff Peter, Mackallah Chloe, Yan Hailin, Hirst Anthony, Savita Abhishek, Dias Fabio Boeira, Woodhouse Matthew, Fiedler Russell, Heerdegen Aidan (2020) Configuration and spin-up of ACCESS-CM2, the new generation Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model. Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science 70, 225-251. <https://doi.org/10.1071/ES19040>
- Cherchi, A., Fogli, P. G., Lovato, T., Peano, D., Iovino, D., Gualdi, S., Masina, S., Scoccimarro, E., Materia, S., Bellucci, Navarra, A. (2019). Global Mean Climate and Main Patterns of Variability in the CMCC-CM2 Coupled Model. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11(1), 185-209.
- EC-Earth Consortium (EC-Earth), 2019: EC-Earth-Consortium EC-Earth3-Veg model output prepared for CMIP6 Scenario MIP. Earth System Grid Federation. DOI:10.22033/ESGF/CMIP6.727.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E., 2016: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, Geosci. Model Dev., 9, 1937-1958, DOI:10.5194/gmd-9-1937-2016.
- Good P., Sellar A., Tang Y., Rumbold S., Ellis R., Kelley D., Kuhlbrodt T. (2019). MOHC UKESM1.0-LL model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. 1].Earth System Grid Federation. DOI:10.22033/ESGF/CMIP6.6339.
- Gutiérrez, J. M., D. San-Martín, S. Brands, R. Manzanos, and S. Herrera, 2013: Reassessing statistical downscaling techniques for their robust application under climate change conditions. J. Climate, 26, 171-188, DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00687.1.

- Meinshausen, M., Nicholls, Z., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J. G., Daniel, J. S., John, A., Krummel, P., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S. A., Rayner, P., Reimann, S., Smith, S. J., van den Berg, M., Velders, G. J. M., Vollmer, M., and Wang, H. J., 2019: The SSP greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/gmd-2019-222>, in review, 2019.
- O'Neill, B.C.; Kriegler, E.; Riahi, K.; Ebi, K.L.; Hallegatte, S.; Carter, T.R.; Mathur, R.; van Vuuren, D. A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socio-economic pathways. *Clim. Chang.* 2013, DOI:10.1007/s10584-013-0905-2.
- Patz, J.A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., Foley, J.A., 2005. Impact of regional climate change on human health. *Nature* 438, 310-317.
- Riahi, K., Detlef P. van Vuuren, Elmar Kriegler, Jae Edmonds, Brian C. O'Neill, Shinichiro Fujimori, Nico Bauer, Katherine Calvin, Rob Dellink, Oliver Fricko, Wolfgang Lutz, Alexander Popp, Jesus Crespo Cuaresma, Samir KC, Marian Leimbach, Leiwen Jiang, Tom Kram, Shilpa Rao, Johannes Emmerling, Kristie Ebi, Tomoko Hasegawa, Petr Havlik, Florian Humpenöder, Lara Aleluia Da Silva, Steve Smith, Elke Stehfest, Valentina Bosetti, Jiyong Eom, David Gernaat, Toshihiko Masui, Joeri Rogelj, Jessica Strefler, Laurent Drouet, Volker Krey, Gunnar Luderer, Mathijs Harmsen, Kiyoshi Takahashi, Lavinia Baumstark, Jonathan C. Doelman, Mikiko Kainuma, Zbigniew Klimont, Giacomo Marangoni, Hermann Lotze-Campen, Michael Obersteiner, Andrzej Tabeau, Massimo Tavoni, 2017: The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change*, Volume 42, 2017, Pages 153-168, ISSN 0959-3780
- Ribalaya J, Torres L, Pórtoles J, Monjo R, Gaitán E, Pino MR, 2013: Description and validation of a two-step analogue/regression downscaling method. *Theoretical and Applied Climatology* 114: 253-269. DOI 10.1007/s00704-013-0836-x.
- Seferian R. (2019). CNRM-CERFACS CNRM-ESM2-1 model output prepared for CMIP6 AerChemMIP hist-1950HC. Version YYYYMMDD[1]. Earth System Grid Federation. DOI:10.22033/ESGF/CMIP6.4041.
- Swart N. C., Cole J. N. S., Kharin V. V., Lazare M., Scinocca J. F., Gillett N. P., Anstey J., Arora V., Christian J. R., Hanna S., Jiao Y., Lee W. G., Majaess F., Saenko O. A., Seiler C., Seinen C., Shao, A., Sigmond M., Solheim L., von Salzen K., Yang D. and Winter B. (2019). The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3), *Geosci. Model Dev.*, 12, 4823-4873, DOI:10.5194/gmd-12-4823-2019.

- Von Storch, Jin-Song; Putrasahan, Dian; Lohmann, Katja; Gutjahr, Oliver; Jungclaus, Johann; Bittner, Matthias; Haak, Helmuth; Wieners, Karl-Hermann; Giorgetta, Marco; Reick, Christian; Esch, Monika; Gayler, Veronika; de Vrese, Philipp; Raddatz, Thomas; Mauritsen, Thorsten; Behrens, Jörg; Brovkin, Victor; Claussen, Martin; Crueger, Traute; Fast, Irina; Fiedler, Stephanie; Hagemann, Stefan; Hohenegger, Cathy; Jahns, Thomas; Kloster, Silvia; Kinne, Stefan; Lasslop, Gitta; Kornblueh, Luis; Marotzke, Jochem; Matei, Daniela; Meraner, Katharina; Mikolajewicz, Uwe; Modali, Kameswarrao; Müller, Wolfgang; Nabel, Julia; Notz, Dirk; Peters, Karsten; Pincus, Robert; Pohlmann, Holger; Pongratz, Julia; Rast, Sebastian; Schmidt, Hauke; Schnur, Reiner; Schulzweida, Uwe; Six, Katharina; Stevens, Bjorn; Voigt, Aiko; Roeckner, Erich (2017). MPI-M MPIESM1.2-HR model output prepared for CMIP6 HighResMIP. Version YYYYMMDD[1]. Earth System Grid Federation. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.762.
- Wu T., Lu Y., Fang Y., Xin X., Li L., Li W., Jie W., Zhang J., Liu Y., Zhang L., Zhang F., Zhang Y., Wu F., Li J., Chu M., Wang Z., Shi X., Liu X., Wei M., Huang A., Zhang Y. and Liu, X. (2019). The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6 , *Geosci. Model Dev.* 12, 1573–1600. DOI:10.5194/gmd-12-1573-2019, 2019.
- Yukimoto S., Koshiro T., Kawai H., Oshima N., Yoshida, K., Urakawa S.; Tsujino H., Deushi M., Tanaka T., Hosaka M., Yoshimura H., Shindo E., Mizuta R., Ishii M., Obata A., Adachi, Y. (2019). MRI MRI-ESM2.0 model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. DOI:10.22033/ESGF/CMIP6.621.