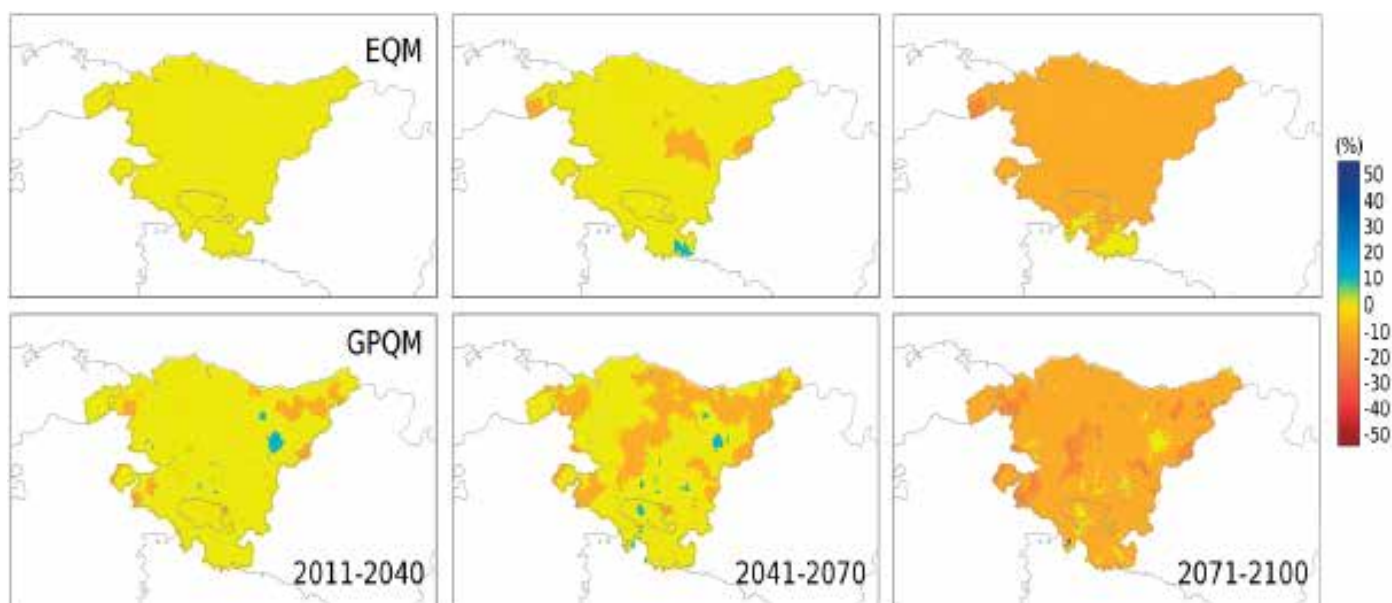


Escenarios de cambio climático de alta resolución para el País Vasco

Fase II: Datos diarios con metodologías de corrección de sesgo



Proyecto Klimatek 2017-2018

Escenarios de cambio climático de alta resolución para el País Vasco

Fase II: Datos diarios con metodologías de corrección de sesgo

©

Ihobe, Ingurumen Jarduketarako Sozietate Publikoa
Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental

EDITA:

Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental
Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda
Gobierno Vasco

Alda. de Urquijo n.º 36-6.^a (Plaza Bizkaia)
48011 Bilbao

info@ihobe.eus

www.ihobe.eus

www.ingurumena.eus

EDICIÓN:

Setiembre 2019

CONTENIDO:

Este documento ha sido elaborado para Ihobe por NEIKER-Tecnalia, Tecnalia y Grupo de Meteorología de Santander (IFCA-MACC, CSIC-UC).

índice

01. Introducción y antecedentes del estudio	05
02. Actualización del clima base de alta resolución (1km x 1km)	09
2.1. Selección de la base de datos de observaciones	
2.2. Modelo orográfico	
2.3. Modelos de regresión e interpolación	
2.4. Validación de la base de datos	
2.5. Resultados derivados del atlas climático: análisis de tendencias en el periodo presente	
2.6. Conclusiones respecto al atlas climático	
03. Desarrollo de escenarios climáticos con técnicas de corrección de sesgo	25
3.1. La iniciativa CORDEX (Euro-CORDEX)	
3.2. Proyecciones regionales de cambio climático	
3.3. Resultados	
3.4. Conclusiones	
04. Conclusiones globales	41
05. Referencias	42
Anexo. Descripción de indicadores climáticos	44
A. Indicadores que combinan varias variables básicas (“COMBO”)	
B. Evapotranspiración de referencia	
C. Indicadores calculados a partir de precipitaciones	
D. Indicadores calculados a partir de temperaturas medias	
E. Indicadores calculados a partir de temperaturas máximas	
F. Indicadores calculados a partir de temperaturas mínimas	

Índice figuras y tablas

Figuras

Figura 1. Rejilla de un modelo global (negro) y de un modelo regional (rojo) anidado sobre Europa; orografía de la Península Ibérica	06
Figura 2. Localización de la Comunidad Autónoma del País Vasco y Orografía en el dominio geográfico considerado	06
Figura 3. Red de estaciones de precipitación y temperatura consideradas para la interpolación en base a los criterios de selección establecidos.....	10
Figura 4. Promedio espacial de las series mensuales de los índices de precipitación	12
Figura 5. Promedio espacial de las series mensuales de los índices de temperatura media.....	12
Figura 6. Promedio espacial de las series mensuales de los índices de temperatura máxima.....	13
Figura 7. Promedio espacial de las series mensuales de los índices de temperatura mínima	13
Figura 8. Gráficos de dispersión de las climatologías de los índices de precipitación.....	14
Figura 9. Gráficos de dispersión de las climatologías de los índices de temperatura.....	14
Figura 10. Climatología de los índices de precipitación.....	15
Figura 11. Climatología de los índices de temperatura media	15
Figura 12. Climatología de los índices de temperatura máxima	16
Figura 13. Climatología de los índices de temperatura mínima	17
Figura 14. Evolución estadísticamente significativa (p -value < 0.05) de indicadores obtenidos a partir de varias variables básicas (indicadores “combinados”), para el conjunto de la CAPV y el periodo 1971-2016	18
Figura 15. Evolución estadísticamente significativa (p -value < 0.05) de indicadores obtenidos a partir de temperaturas medias, para el conjunto de la CAPV y el periodo 1971-2016.....	19
Figura 16. Evolución estadísticamente significativa (p -value < 0.05) de indicadores obtenidos a partir de temperaturas mínimas, para el conjunto de la CAPV y el periodo 1971-2016.....	19
Figura 17. Evolución estadísticamente significativa (p -value < 0.05) de indicadores obtenidos a partir de temperaturas máximas, para el conjunto de la CAPV y el periodo 1971-2016.....	20
Figura 18. Tendencias observadas para el periodo de referencia 1981-2010 de los indicadores de precipitación RR1, R10, R20, RX1DAY, SDII y PRCPTOT.....	20
Figura 19. Tendencias observadas para el periodo de referencia 1981-2010 de los indicadores de temperatura media tg05a, tg10a, tg05b, tg10b y GSL.....	21
Figura 20. Tendencias observadas para el periodo de referencia 1981-2010 de los indicadores de temperatura mínima tn05p, tn10p, fd, tr y tn.....	21
Figura 21. Tendencias observadas para el periodo de referencia 1981-2010 de los indicadores de temperatura máxima txn, tx, txx, wscd, hwa y tx90p	22
Figura 22. Tendencias observadas para el periodo de referencia 1981-2010 de los indicadores de temperatura máxima su33, su34, su35, su36, su37 y su40	22
Figura 23. Tendencias observadas para el periodo de referencia 1981-2010 de los indicadores de temperatura máxima su33ex, su34ex, su35ex, su36ex, su37ex y su40ex.....	22
Figura 24. Tendencias observadas de ETO (evapotranspiración de referencia) para el periodo de referencia 1981-2010	23
Figura 25. Tendencias observadas para el periodo de referencia 1981-2010 de los indicadores combinados dw y dc	23
Figura 26. Dominio de simulación de los RCMs enmarcados en Euro-CORDEX.....	25
Figura 27. Precipitación media (mm) para el periodo de referencia 1981-2010 considerando un rango típico de precipitación (0-8mm)	28
Figura 28. Valor de retorno de la precipitación (mm) para un periodo de 50 años considerando el periodo de referencia 1971-2000	29
Figura 29. Gráficos de diagnóstico para la técnica de corrección EQM en un punto ilustrativo de la CAPV.....	31
Figura 30. Climatología anual de referencia (observada) del País Vasco en el periodo 1971-2000	32
Figura 31. Sesgo anual de los GCM/RCMs enumerados en la Tabla 2 para el periodo histórico 1971-2000.....	32
Figura 32. Proyecciones de precipitación total anual y <i>signal-to-noise</i> ratio de la señal para los tres periodos futuros dada por la corrección EQM.....	33
Figura 33. Proyecciones de precipitación total anual (arriba) y <i>signal-to-noise</i> ratio de la señal (debajo) para los tres periodos futuros dada por la corrección GPQM	33
Figura 34. Cambio proyectado en la precipitación anual para los tres periodos futuros	34
Figura 35. Proyecciones de temperatura media anual y SNR de la señal para los tres periodos futuros dada por la corrección EQM.....	34
Figura 36. Proyecciones de temperatura media anual y SNR de la sena para los tres periodos futuros dada por la corrección GPQM.....	34
Figura 37. Cambio proyectado en la precipitación anual para los tres periodos futuros	35
Figura 38. Proyecciones de temperatura máxima media anual y SNR de la señal para los tres periodos futuros dada por la corrección EQM.....	35
Figura 39. Proyecciones de temperatura máxima media anual (arriba) y SNR de la señal (debajo) para los tres periodos futuros dada por la corrección GPQM	35
Figura 40. Cambio proyectado en la temperatura media máxima para los tres periodos futuros.....	36
Figura 41. Proyecciones de temperatura mínima media anual y SNR de la señal para los tres periodos futuros dada por la corrección EQM.....	36
Figura 42. Proyecciones de temperatura mínima media anual y SNR de la señal para los tres periodos futuros dada por la corrección GPQM.....	36
Figura 43. Cambio proyectado en la temperatura mínima media para los tres periodos futuros.....	37
Figura 44. Cambio proyectado para el RX5DAY para los tres periodos futuros	38
Figura 45. Cambio proyectado para el RR1 para los tres periodos futuros	38
Figura 46. Cambio proyectado para el CDD para los tres periodos futuros.....	38
Figura 47. Cambio proyectado para el HWF para los tres periodos futuros	39
Figura 48. Zona considerada costera en la CAPV a efectos de cálculo de la evapotranspiración de referencia, siguiendo las directrices de la metodología propuesta por la FA	46

Tablas

Tabla 1. Indicadores considerados para la validación. Para más detalle se puede consultar el Anexo.....	07
Tabla 2. Proyecciones regionales obtenidas con distintos acoplamientos de GCMs/RCMs de la iniciativa EURO-CORDEX considerados en el presente trabajo	27
Tabla 3. Indicadores sectoriales.....	37

01

Introducción y antecedentes del estudio

Los modelos de circulación global (GCM-*General Circulation Models*) son la herramienta principal para el análisis del cambio climático y su impacto en distintos sectores socioeconómicos. Por ello, durante las últimas décadas se han venido realizando periódicamente proyecciones de la tendencia futura del clima con estos modelos, los cuales simulan en un ordenador la dinámica del sistema climático y sus componentes (atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera) bajo distintos escenarios que tratan de caracterizar la evolución futura de los factores de forzamiento antropogénicos que afectan al sistema climático, como la emisión de gases de efecto invernadero.

Esta actividad es coordinada a nivel internacional por el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) cuyos informes, el último publicado en el año 2014 (*Fifth Assessment Report*, AR5, <http://www.ipcc.ch/>), constituyen la referencia obligada para los estudios de cambio climático ya que recopilan los resultados científicos (tanto publicaciones científicas como proyecciones globales y regionales de escenarios de cambio climático) más relevantes hasta la fecha.

La resolución típica de los GCMs es de cientos de kilómetros (Figura 1), por lo que no permiten analizar la magnitud de los posibles impactos del cambio climático a escala local en ecosistemas, agricultura, hidrología, etc., ya que dicha resolución no permite resolver las heterogeneidades regionales. Por tanto, para obtener escenarios regionales de cambio climático es necesario realizar un paso adicional, llamado regionalización (o *downscaling*), que permita proyectar a escala local los cambios simulados por el modelo a escala global. Este

problema ha cobrado un fuerte interés en los últimos años, siendo uno de los objetivos prioritarios de los proyectos e iniciativas actuales nacionales e internacionales (p.e. VALUE o CORDEX) de cambio climático, debido a los requerimientos de las comunidades de impacto o de los planes de adaptación, los cuales necesitan información climática de alta (o muy alta) resolución.

Una de las técnicas habitualmente utilizadas para aumentar la resolución de los modelos climáticos globales está basada en el uso de modelos regionales (regionalización dinámica) o de área limitada (RCM-*Regional Climate Model*), con resoluciones típicas de decenas de kilómetros, los cuales se “anidan” al modelo global en la zona de interés (ver Figura 2), tomando como condiciones de contorno los valores del modelo global a lo largo de toda la integración (ver Gaertner y colab. 2012, para una descripción breve de las metodologías de proyección regional de cambio climático) y resolviendo las ecuaciones de la atmósfera a una mayor resolución que el modelo global (GCM) incluyendo, por tanto, procesos de mesoscala que éste no puede resolver.

En el ámbito europeo, las proyecciones regionales de cambio climático han sido producidas y actualizadas en distintos proyectos Europeos de investigación: PRUDENCE (2001-2004), ENSEMBLES (2004-2009) (ver Christensen y colab. 2007a; 2007b, y van der Linden y Mitchell 2009 para más información sobre las proyecciones climáticas regionales). En dichos proyectos se ha ido incrementando paulatinamente la resolución de estos productos (de 50 km en PRUDENCE a 25 km en ENSEMBLES), se han ido introduciendo las distintas fuentes de incertidumbre asociadas a las proyecciones (GCM, escenario, RCM, etc.)

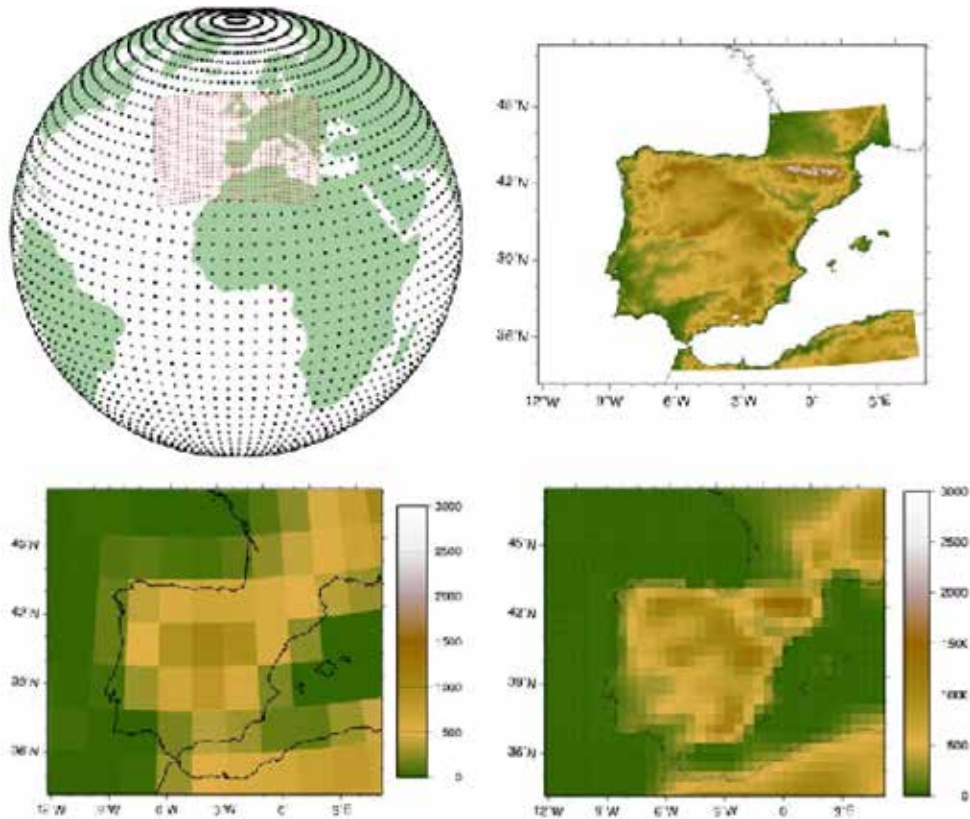


Figura 1. (Arriba, izquierda) Rejilla de un modelo global (negro) y de un modelo regional (rojo) anidado sobre Europa; (derecha) orografía de la Península Ibérica. La fila inferior muestra la orografía de la rejilla utilizada por un modelo global (250km), junto con la orografía de un modelo regional (25km).

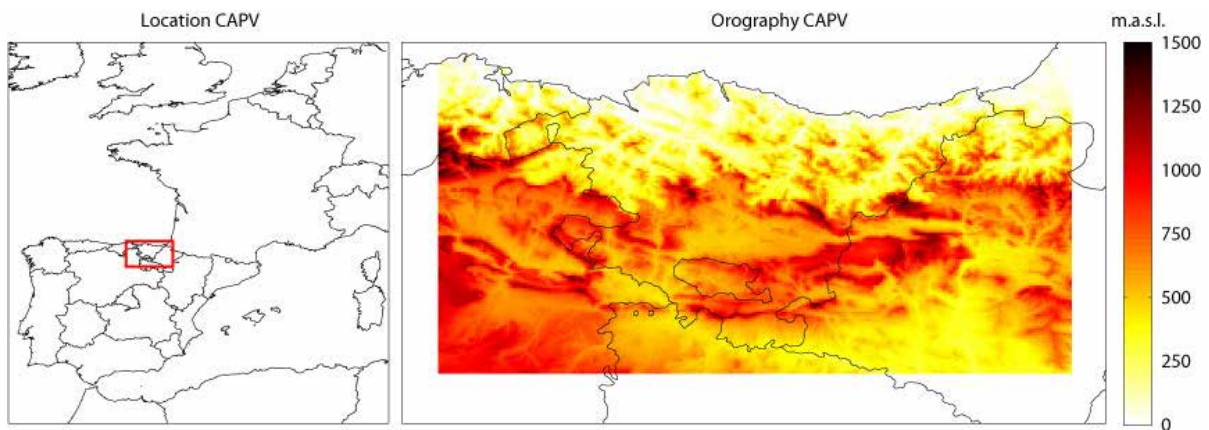


Figura 2. (Izquierda) Localización de la Comunidad Autónoma del País Vasco y (derecha) Orografía en el dominio geográfico considerado.

utilizando los resultados de los modelos globales de los sucesivos informes del IPCC (AR3 para PRUDENCE y AR4 para ENSEMBLES) y se han incluido experimentos que permiten la validación e intercomparación de los modelos regionales. Actualmente, estas actividades están amparadas en Europa bajo la iniciativa Euro-CORDEX, que es la rama europea de la iniciativa CORDEX (COordinated Regional Downscaling EXperiment), y está basada en los

modelos globales utilizados en el último informe AR5 del IPCC y considera dos resoluciones diferentes, 12 y 50 km, lo que permite evaluar el valor añadido del aumento de resolución.

A escala del estado español, el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) desarrolló, en el marco de los proyectos ESTCENA (<http://meteo.unican.es/en/>

projects/estcena) y ESCENA (<http://meteo.unican.es/en/projects/escena>), la última generación de Escenarios Regionales de Cambio Climático en España (Escenarios-PNACC 2012) aplicando técnicas estadísticas y dinámicas de regionalización para alcanzar una resolución final de 0.2°x0.2° a partir de los escenarios globales de cambio climático del 4º Informe del IPCC (IPCC-AR4). Por lo tanto, en base a los escenarios de emisiones considerados y la versión de los modelos globales y regionales del clima, dichos son comparables a los desarrollados en el marco del proyecto ENSEMBLES.

En el desarrollo de Escenarios-PNACC 2012 participaron los principales grupos del ámbito estatal realizando, por un lado, una validación e intercomparación de las técnicas de

regionalización estadísticas y dinámicas aplicadas, y, por otro, aplicando dichas técnicas a los diferentes escenarios del IPCC-AR4 dando lugar a un “ensemble” de proyecciones que refleja las principales fuentes de incertidumbre relevantes en los estudios de cambio climático: escenario de emisiones futuras, modelo global del clima y técnica de regionalización aplicada.

Las proyecciones obtenidas en Escenarios-PNACC 2012 se distribuyen públicamente a través de los Servicios Climáticos de la Agencia Estatal de Meteorología (<http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/>). Dentro de dicho portal de Servicios Climáticos, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) incluye un nuevo conjunto de proyecciones considerando la última generación de modelos globales

Acrónimo	Descripción	Unidades
Precipitación		
RR.5	Precipitación acumulada	mm
RX1day	Máximo diario de precipitación	mm
RR1	Días de lluvia Pr>=1mm	días
R10	Días de precipitación intensa Pr>=10mm	días
R20	Días de precipitación muy intensa Pr>=20mm	días
Temperatura		
TG	Temperatura Media	°C
TGx	Valor máximo de la temperatura media	°C
TGn	Valor mínimo de la temperatura media	°C
TX	Temperatura Máxima	°C
TXx	Valor máximo de la temperatura máxima	°C
TXn	Valor mínimo de la temperatura máxima	°C
ID	Días de hielo Tx<0°C	días
SU	Días de verano Tx>25°C	días
HW	Días de ola de calor Tx>35°C	días
TN	Temperatura Mínima	°C
TNx	Valor máximo de la temperatura mínima	°C
TNn	Valor mínimo de la temperatura mínima	°C
TR	Noches tropicales Tn>20°C	días
FD	Días de helada Tn<0°C	días

Tabla 1. Indicadores considerados para la validación. Para más detalle se puede consultar el Anexo.

y escenarios de emisión, si bien dichas proyecciones se corresponden con las obtenidas aplicando únicamente la técnica de regionalización de AEMET, lo cual puede dar lugar a resultados sesgados por las particularidades o los errores de la técnica utilizada.

En este contexto, la generación de escenarios climáticos regionales supone el paso inicial obligado para incrementar el conocimiento sobre el cambio climático a escala regional, permitiendo así la identificación y evaluación de los impactos, debilidades y posibles vías de adaptación. En el presente proyecto el objetivo es la elaboración de un atlas climático de alta resolución (~1km) de precipitación y temperaturas para la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV) (Figura 2) y la producción de los escenarios regionales de cambio climático para el siglo XXI a partir de las simulaciones realizadas en el proyecto Euro-CORDEX (~12km) aplicando técnicas de corrección de sesgos que permitan la obtención de series diarias de alta resolución de las variables de interés.

Para comenzar con ello, se plantea la actualización de los mapas climáticos de alta resolución realizados en el marco de la Fase I del proyecto (*“Elaboración de escenarios regionales de cambio climático de alta resolución sobre el País Vasco”*¹ acrónimo ESCENARIOS de la convocatoria KLIMATEK 2016), así como su validación frente a las observaciones y a la versión anterior. La obtención de esta nueva base de datos permitirá la aplicación de técnicas de corrección de sesgos a las proyecciones de alta resolución desarrolladas en CORDEX para obtener series diarias de precipitación y temperaturas en la rejilla de alta resolución de las observaciones (1 km), cuya necesidad fue reflejada en el Foro KLIMATEK de abril de 2017 tras el desarrollo de la Fase I del proyecto (ESCENARIOS I).

El presente informe complementa la información obtenida en el proyecto “Escenarios I” disponible en <https://www.euskadi.eus/documentacion/2017/klimatek-elaboracion-de-escenarios-de-cambio-climatico-de-alta-resolucion-para-el-pais-vasco/web01-a2ingkli/es/>

¹ En adelante en el presente documento será denominado como “ESCENARIOS I” al proyecto *“Elaboración de escenarios regionales de cambio climático de alta resolución sobre el País Vasco”*, acrónimo ESCENARIOS de la convocatoria KLIMATEK 2016.

02

Actualización del clima base de alta resolución (1 km x 1 km)

El primer objetivo del presente proyecto consiste en la actualización de la base de datos termopluviométricos de alta resolución hasta el año 2016 incluyendo la información de las estaciones disponibles tanto en la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) como en EuskalMet. En el presente informe se compara la base de datos obtenida, tanto con las observaciones como con la versión anterior, desarrollada en el marco de ESCENARIOS I en función de los índices climáticos definidos en la Tabla 12².

2.1. Selección de la base de datos de observaciones

Como primer paso, en el proyecto se actualizaron los datos correspondientes a la AEMET cubriendo el periodo 1971-2016, incorporando nuevas estaciones en la CAPV y regiones vecinas, y se actualizó la base de datos de EuskalMet con las observaciones registradas en el año 2016. Dentro de las estaciones incorporadas se incluyeron observatorios con series muy cortas que no se correspondían con la “continuación” de una serie histórica, de modo que a los criterios de selección aplicados en ESCENARIOS I hubo que incorporar criterios más restrictivos para la existencia de lagunas en las series utilizadas en la interpolación

final (Gutiérrez y col. 2010 (Gobierno de Cantabria), Herrera y col. 2011 y 2012):

- **Detección de valores anómalos:** Inicialmente se detectaron valores anormalmente altos o bajos, según superasen tres veces el rango intercuartílico (percentil 25 y percentil 75). En el caso de la precipitación, al ser una variable acotada inferiormente, se definieron, como cota superior, 4 veces el percentil 90 de los días de lluvia y, como cota inferior, el 0.
- **Lagunas:** Se identificaron aquellas series con periodos de al menos 20 años consecutivos con al menos el 80 % de los datos. Dada la menor longitud de las series de EuskalMet, en su caso se consideraron series con al menos 10 años con al menos el 80 % de los datos. En esta segunda fase, ESCENARIOS II, en ambos casos, se eliminaron aquellas estaciones con menos del 50% de la serie mensual con al menos el 80% de los datos en cada mes.
- **Homogeneidad:** Finalmente, se analizaron la homogeneidad absoluta y relativa de las series anuales a través de tests de hipótesis, eliminando aquellas series no homogéneas con una confianza del 95 %.

En base a los criterios anteriores, se obtuvieron las redes de observaciones mostradas en la Figura 3, con las cuales realizar la interpolación.

² Ver más información en <http://www.ecad.eu/indicesextremes/indicesdictionary.php>

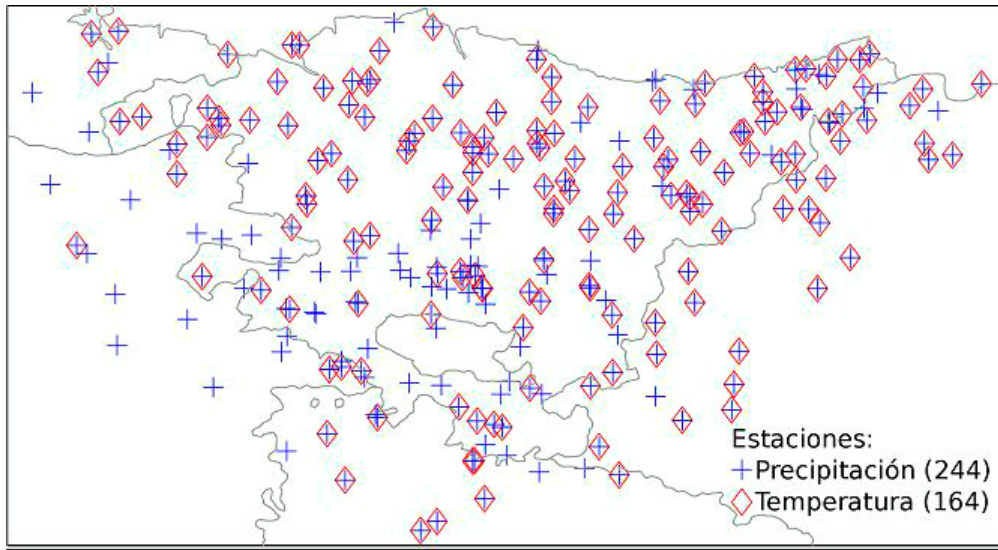


Figura 3. Red de estaciones de precipitación y temperatura consideradas para la interpolación en base a los criterios de selección establecidos.

2.2. Modelo orográfico

Para alcanzar la resolución objetivo (1km) con la red de observaciones seleccionada es necesaria la inclusión de variables orográficas para la elaboración de la base de datos climática de alta resolución. En este estudio se han considerado las siguientes variables derivadas del modelo orográfico GTOPO30³ (<https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>) de 30" de resolución espacial (1 x 1 km² aproximadamente):

- **Orografía:** Se considera un modelo de regresión polinomial de tercer grado:

$$P_{orog}(orog) = a_3 * orog^3 + a_2 * orog^2 + a_1 * orog + a_0$$

- **Continentalidad (distancia a costa):** Se considera la distancia de cada punto a la costa mediante un modelo de regresión polinomial de tercer grado:

$$P_{cont}(cont) = b_3 * cont^3 + b_2 * cont^2 + b_1 * cont + b_0$$

- **Curvatura:** Se considera la curvatura global de cada punto como resultado de las curvaturas longitudinal y latitudinal.
- **Bloqueos y Exposiciones:** Se consideran los bloqueos orográficos, definidos como la existencia de una zona más alta en una dirección o sector, y las exposiciones de cada punto de grid, así como la distancia a dichos bloqueos. Para la definición de los bloqueos

se considera una rosa de vientos de ocho sectores (N, NW, W, SW, S, SE, E y NE).

De este modo, se obtiene un conjunto de 24 variables con el cual se define el modelo de regresión mediante un proceso tipo "stepwise", en el que en cada paso se introduce la covariable que minimiza el residuo del modelo resultante.

Para mantener la coherencia entre las tres variables consideradas (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima), se realizó un análisis previo para determinar qué covariables son las más relevantes en cada uno de los casos, en base al porcentaje de ocasiones en las que el modelo ha seleccionado cada covariable considerando la serie mensual de cada una de las variables. Dicho porcentaje revela información sobre la capacidad explicativa de la variabilidad espacial de cada variable de cada una de las covariables. Hay que remarcar que el modelo de regresión debe aplicarse a escala mensual, ya que a escala diaria la dependencia entre las variables regresoras y la variable objetivo se reduce frente a la variabilidad espacial.

En el marco del análisis anterior se identificaron las variables orográficas y de continentalidad como las que más aparecen en los modelos de regresión. También surgieron en el modelo los bloqueos en las direcciones norte y noroeste, así como la distancia a los bloqueos del oeste. Por lo tanto, se seleccionó como modelo básico uno basado en las variables: orografía, distancia a costa, bloqueos en

³ GTOPO30 es un modelo digital de elevaciones mundial realizado por el U. S. Geological Survey (USGS) y disponible desde su centro EROS (*Earth Resources Observation and Science*) (<https://lta.cr.usgs.gov/GTOPO30>). Su resolución ha determinado la resolución espacial final de la cartografía climática obtenida en el presente trabajo: 30 segundos (~ 0.00833°, ~ 1 x 1 km²).

las direcciones N y NW, y la distancia a los bloqueos en las direcciones NW y SW. Al modelo base anterior, dentro del proceso de interpolación, se le fueron añadiendo el resto de las variables mediante el proceso de “stepwise” antes descrito.

2.3. Modelos de regresión e interpolación

Una vez realizada la selección de la base de datos y definidas las covariables a utilizar en el modelo de regresión, hay que seleccionar un método de interpolación que se adecúe a los problemas que presentan las variables a interpolar, la resolución de la rejilla y la introducción de covariables.

Tras revisar el estado del arte en este campo, se concluyó que la familia de métodos que mejor se adaptaban a los problemas planteados era la familia de métodos geoestadísticos de *Kriging* (Krige, 1951). Estos métodos han sido aplicados para variables climáticas en un gran número de estudios (Herrera et al. 2012, 2016; Haylock et al., 2008; Biau et al., 1999; Atkinson and Lloyd, 1998; etc.) e incluyen un gran abanico de variantes para adaptar la metodología a la interpolación de variables indicador, la introducción de covariables, etc. En el presente estudio se consideró el método de *Kriging Ordinario* ya que la dependencia con el modelo digital de elevación se obtuvo a partir del modelo de regresión antes descrito. Dicho método, se fundamenta en la modelización de la dependencia espacial de la variable a través de los semi-variogramas empírico y modelo

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 N(h)} \sum_{\|x_i - x_j\|=h}^{N(h)} (y(x_i) - y(x_j))^2$$

tras lo cual, los pesos w_i del método $y_{ok}(x) = \sum_{(i=1)}^k w_i y(x_i)$ del método se obtienen resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$-\sum_{i=1}^k w_i \gamma(\|x_i - x_j\|) + \mu = -\gamma(\|x - x_j\|) \sum_{i=1}^k w_i = 1$$

Para alcanzar la resolución final, la interpolación se dividió en las siguientes etapas:

- En primer lugar, se aproximó el valor mensual de la variable (precipitación, temperatura máxima o temperatura mínima) con el modelo de regresión, introduciendo en éste las covariables seleccionadas anteriormente.

- En segundo lugar, se calcularon el valor mensual asociado a cada punto de rejilla ($MonthlyValue_{reg}$) y el residuo o error cometido por el modelo (Err), utilizando los coeficientes obtenidos con el modelo de regresión.
- A continuación, se interpoló con el método de Kriging el residuo mensual del modelo de regresión (Err) a los puntos del grid, corrigiendo de ese modo, el valor mensual asignado por el modelo ($MonthlyValue_{ok} = MonthlyValue_{reg} + Err_{ok}$).
- Por último, se interpoló el valor de la anomalía diaria ($DailyAnomaly_{ok}$) y se añadió al valor mensual obtenido en los pasos anteriores ($MonthlyValue_{ok}$). En el caso de la precipitación, la anomalía diaria se definió como el cociente entre la precipitación diaria y el valor acumulado mensual ($dailyValue_{ok} = MonthlyValue_{ok} * DailyAnomaly_{ok}$), mientras que para la temperatura se definió como la diferencia entre la temperatura diaria y la media mensual ($dailyValue_{ok} = MonthlyValue_{ok} + DailyAnomaly_{ok}$).

En el caso de la precipitación, dado su carácter mixto, por un lado la ocurrencia y por otro la cantidad, se introdujo un proceso más en el último paso que consistió en interpolar la variable binaria asociada a la ocurrencia de lluvia mediante el método de Kriging asociado a variables indicador (*IK-Indicator Kriging*). De este modo, no solo se interpoló la cantidad de precipitación sino que también se ajustó su frecuencia.

El proceso anterior dio lugar a una base de datos diarios de precipitación y temperatura representativos del promedio areal de la celda de 1km x 1km, y con la misma resolución temporal de la base de datos subyacente, descrita anteriormente.

2.4. Validación de la base de datos

La validación se realizó en base a diferentes dimensiones e indicadores. En primer lugar, se analizó la evolución temporal del promedio espacial de la serie mensual para las cuatro variables generadas (precipitación, temperatura media, máxima y mínima) y las tres bases de datos consideradas: las observaciones y las climatologías generadas en las dos fases (ESCENARIOS I y ESCENARIOS II).

La Figura 4 muestra los resultados para los indicadores de precipitación mostrando una gran correspondencia entre las observaciones y los indicadores RR y RX1day, más significativa en la nueva base de datos (ESCENARIOS II) que en la versión anterior (ESCENARIOS I). En lo que respecta a la ocurrencia de eventos de precipitación (RR1, RR10

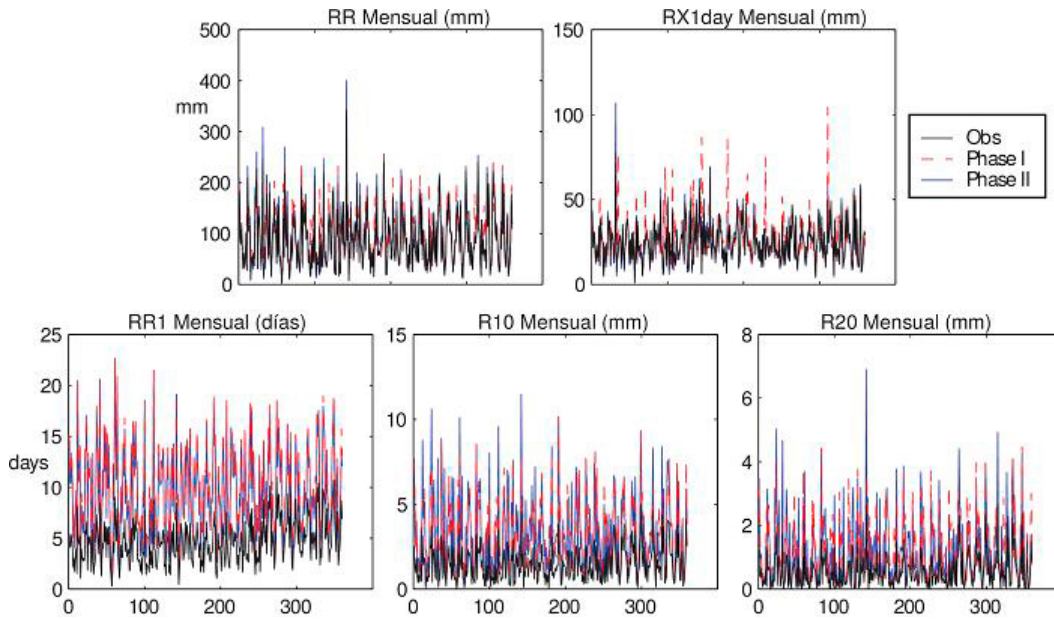


Figura 4. Promedio espacial de las series mensuales de los índices de precipitación.

y RR20) se aprecia una buena correspondencia temporal pero una clara sobreestimación de los indicadores asociada a la mayor representatividad en la rejilla de alta resolución de las regiones de la Comunidad Autónoma del País Vasco (CAPV) con mayor frecuencia de precipitación.

En el caso de la temperatura media (Figura 5), existe una gran correspondencia entre las series mensuales de las diferentes bases de datos consideradas (ESCENARIOS I y ESCENARIOS II).

Este resultado también se da para los índices correspondientes a las temperaturas máximas (Figura 6) y mínimas (Figura 7).

En el caso de los índices de ocurrencia de eventos extremos de temperatura mínimas y máximas (fila inferior de las figuras 6 y 7), si bien las bases de datos

generadas reflejan los máximos observados, se observa una sobreestimación generalizada de estos indicadores, asociada al mayor número de puntos de grid con valores altos de dichos índices.

La Figura 8 y la Figura 9 reflejan los valores climatológicos obtenidos para el periodo 1981-2010 de los diferentes índices definidos en la Tabla 1, considerando los grid box más cercanos a las estaciones utilizadas en el proceso de interpolación. A modo de referencia, se incluye el diagrama de dispersión asociado a las observaciones (puntos negros).

En líneas generales, la Figura 8 muestra cómo la base de datos desarrollada en ESCENARIOS II corrige la sobreestimación de algunos índices de precipitación observada en la base de datos de ESCENARIOS I.

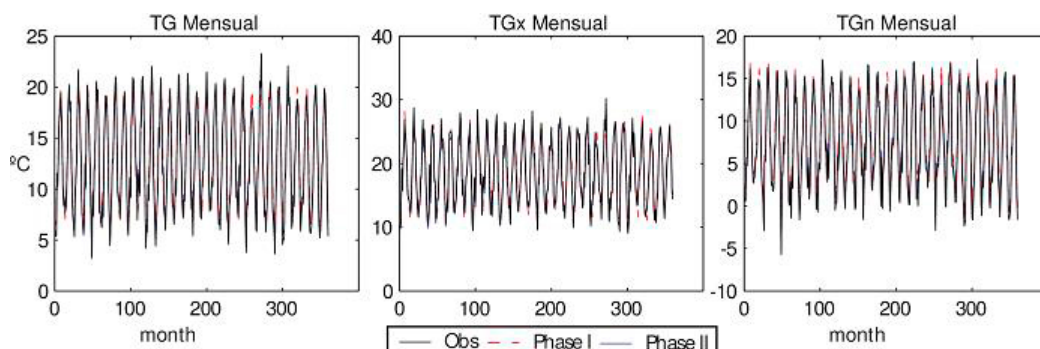


Figura 5. Promedio espacial de las series mensuales de los índices de temperatura media.

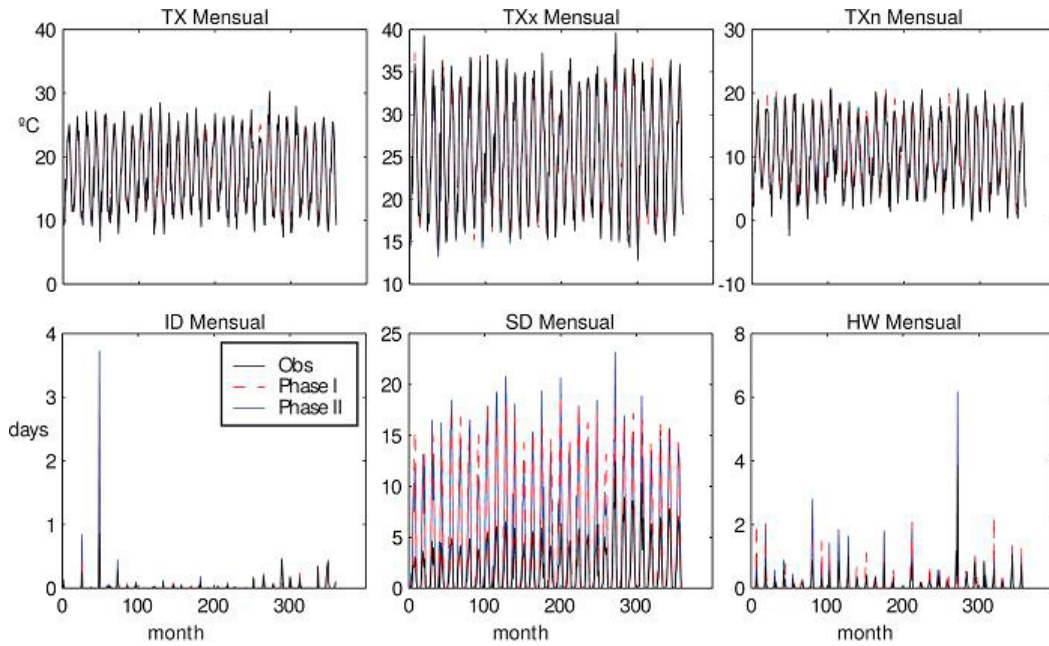


Figura 6. Promedio espacial de las series mensuales de los índices de temperatura máxima.

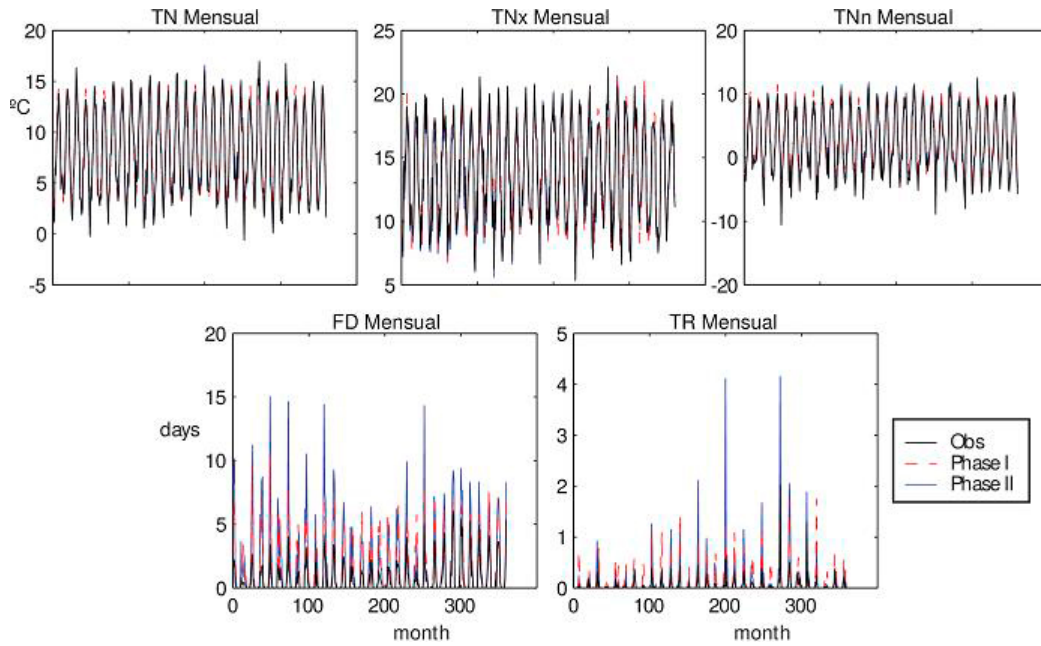


Figura 7. Promedio espacial de las series mensuales de los índices de temperatura mínima.

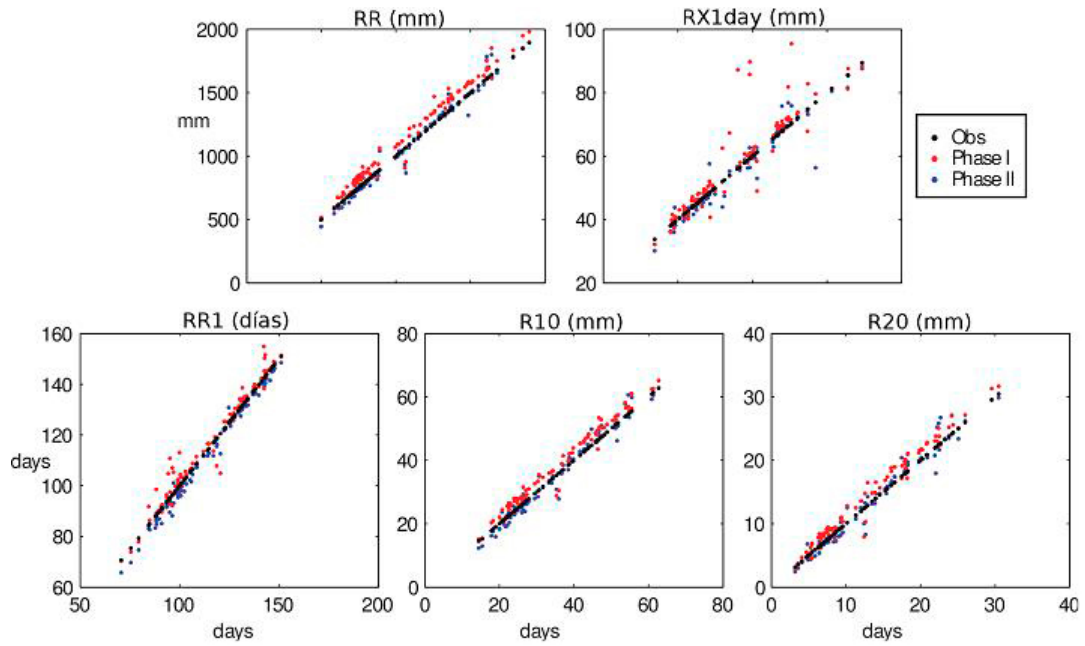


Figura 8. Gráficos de dispersión de las climatologías de los índices de precipitación.

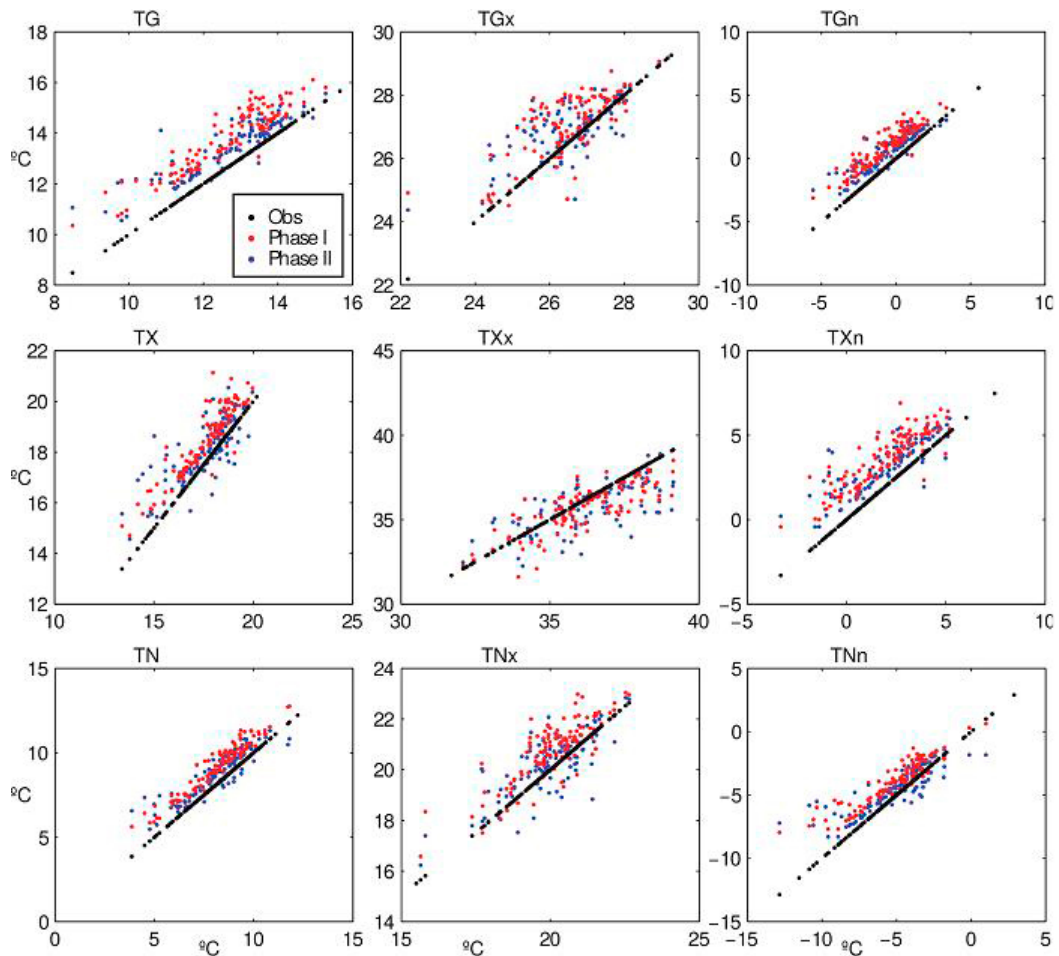


Figura 9. Gráficos de dispersión de las climatologías de los índices de temperatura.

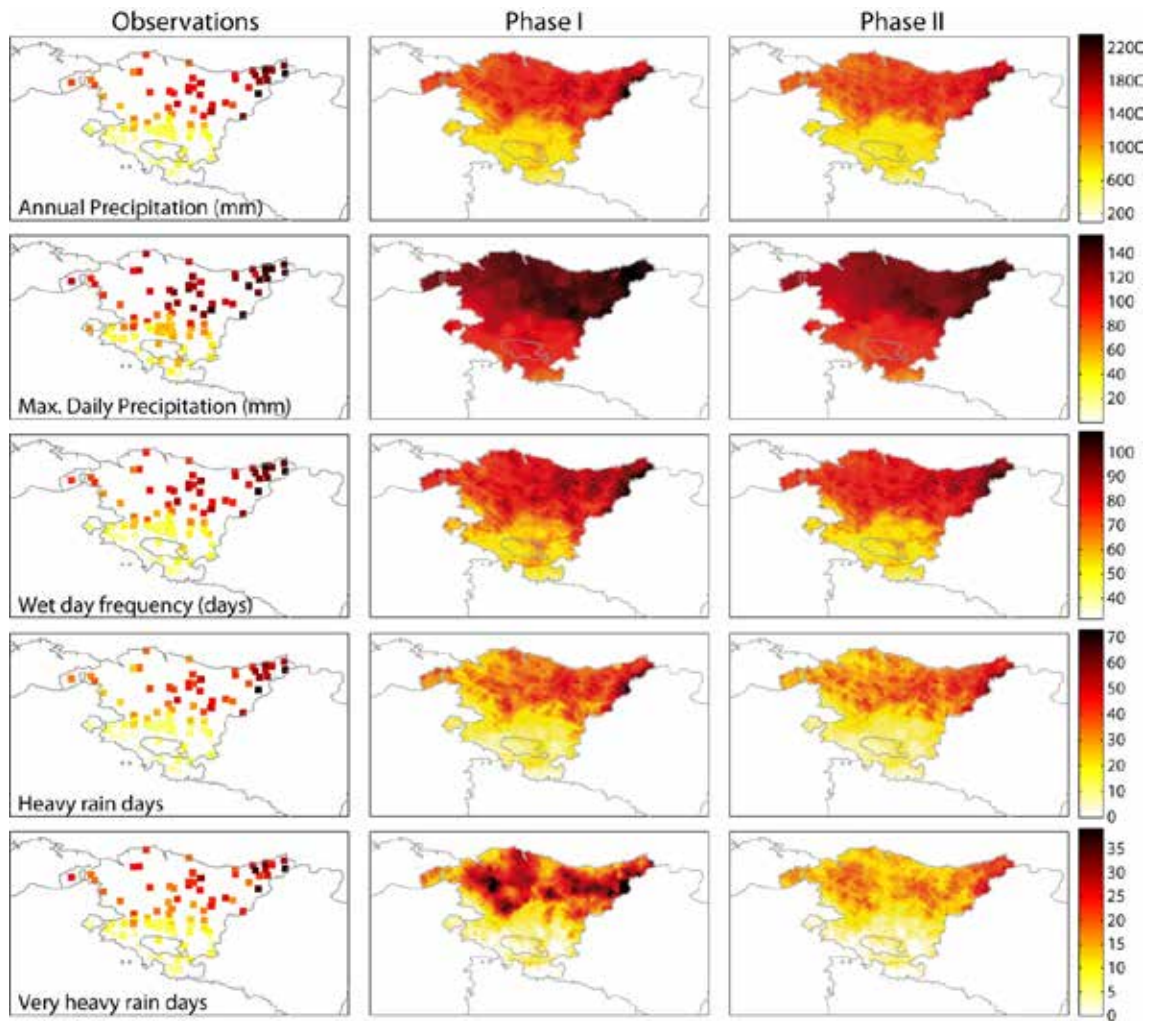


Figura 10. Climatología de los índices de precipitación.

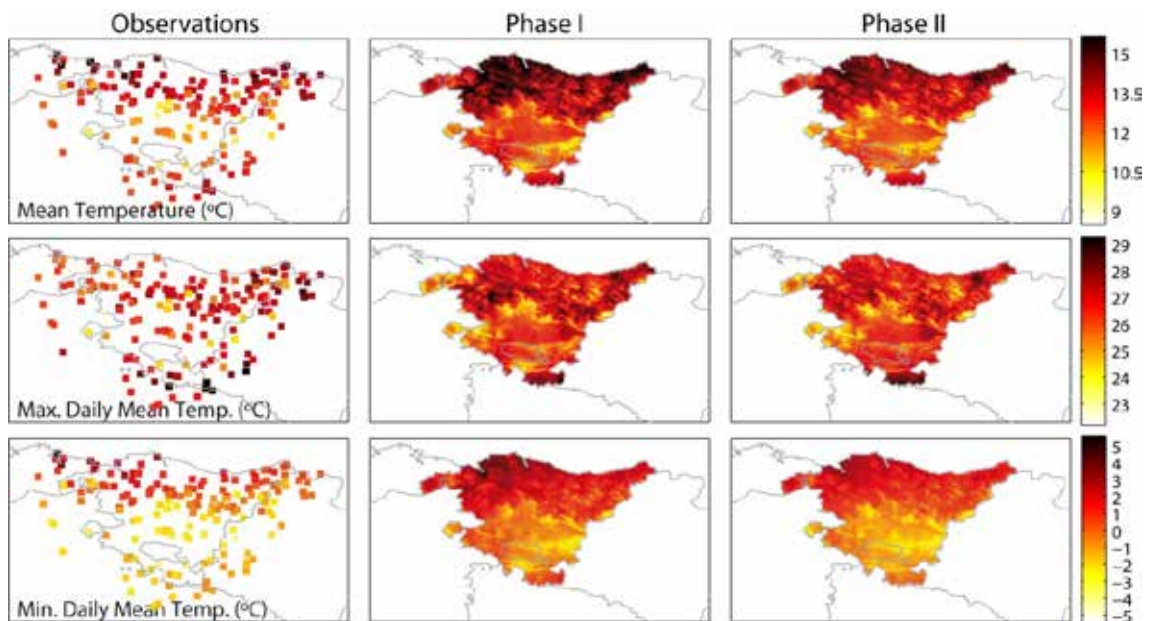


Figura 11. Climatología de los índices de temperatura media.

En el caso de las temperaturas (Figura 9), sigue observándose una sobreestimación de los índices si bien en esta segunda fase se ha corregido, parcialmente en el caso de la temperatura media y más significativamente para los índices de temperatura máxima y mínima. En el caso del índice TNx se corrige la sobreestimación, obteniendo una distribución más centrada respecto a las observaciones.

A nivel espacial, la Figura 10, Figura 11, Figura 12 y Figura 13 muestran las climatologías observada e interpoladas en ambas fases del proyecto, para los indicadores definidos en la Tabla 1 de precipitación, temperatura media, máxima y mínima, respectivamente.

En el caso de la precipitación, los resultados reflejados en la Figura 10 coinciden con los mostrados en las figuras anteriores, mostrando un patrón con valores más suavizados que los obtenidos en ESCENARIOS I. Del mismo modo, en ESCENARIOS II, la versión actual, se eliminan los patrones locales que parecen corresponderse con artefactos metodológicos (ojos de buey, etc...) dando un patrón espacial más homogéneo.

En el caso de las temperaturas medias (Figura 11), la nueva base de datos de ESCENARIOS II suaviza los extremos reflejados en la versión anterior (ESCENARIOS I) y recoge más adecuadamente las temperaturas observadas en el centro sur de la CAPV.

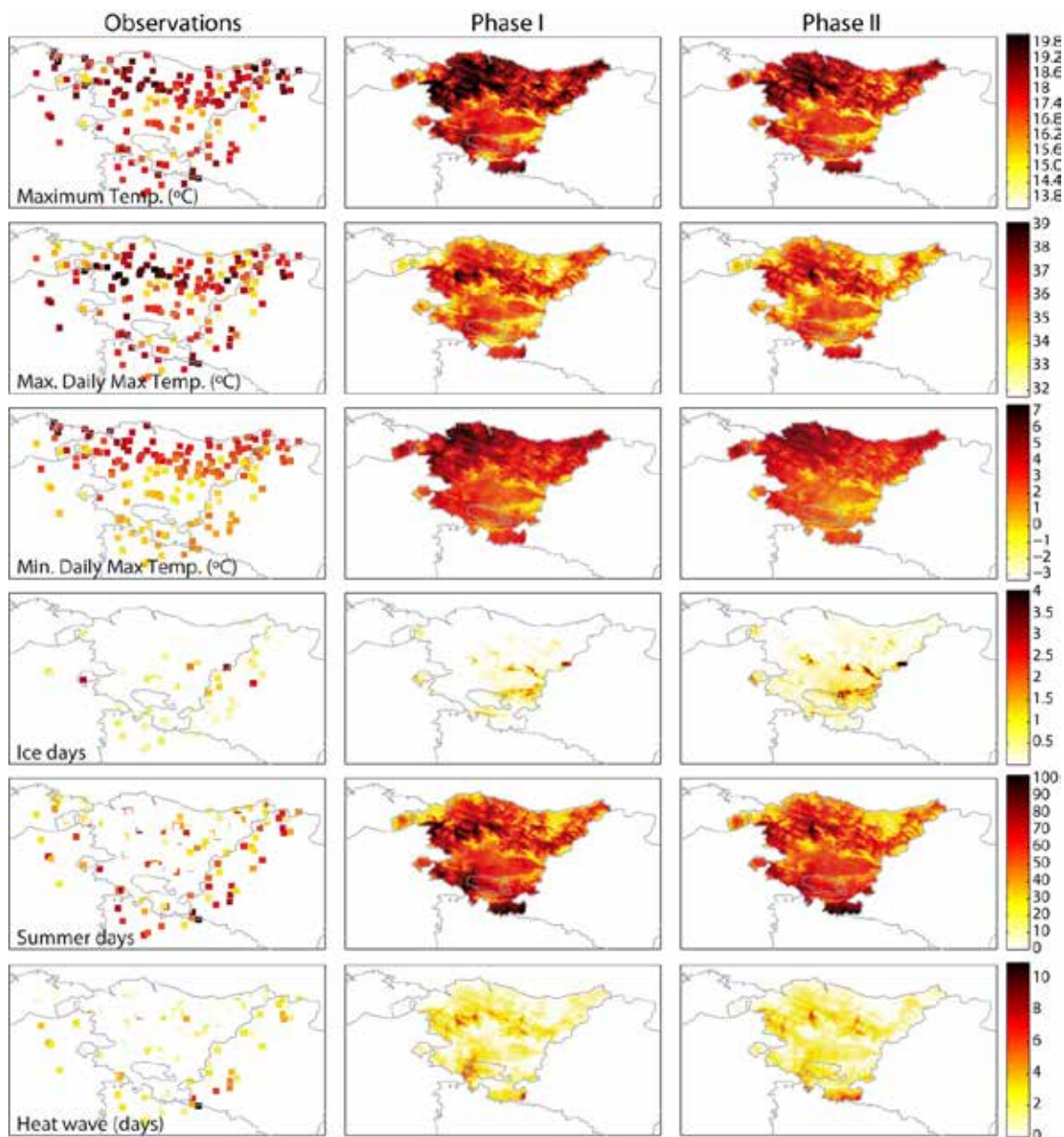


Figura 12. Climatología de los índices de temperatura máxima.

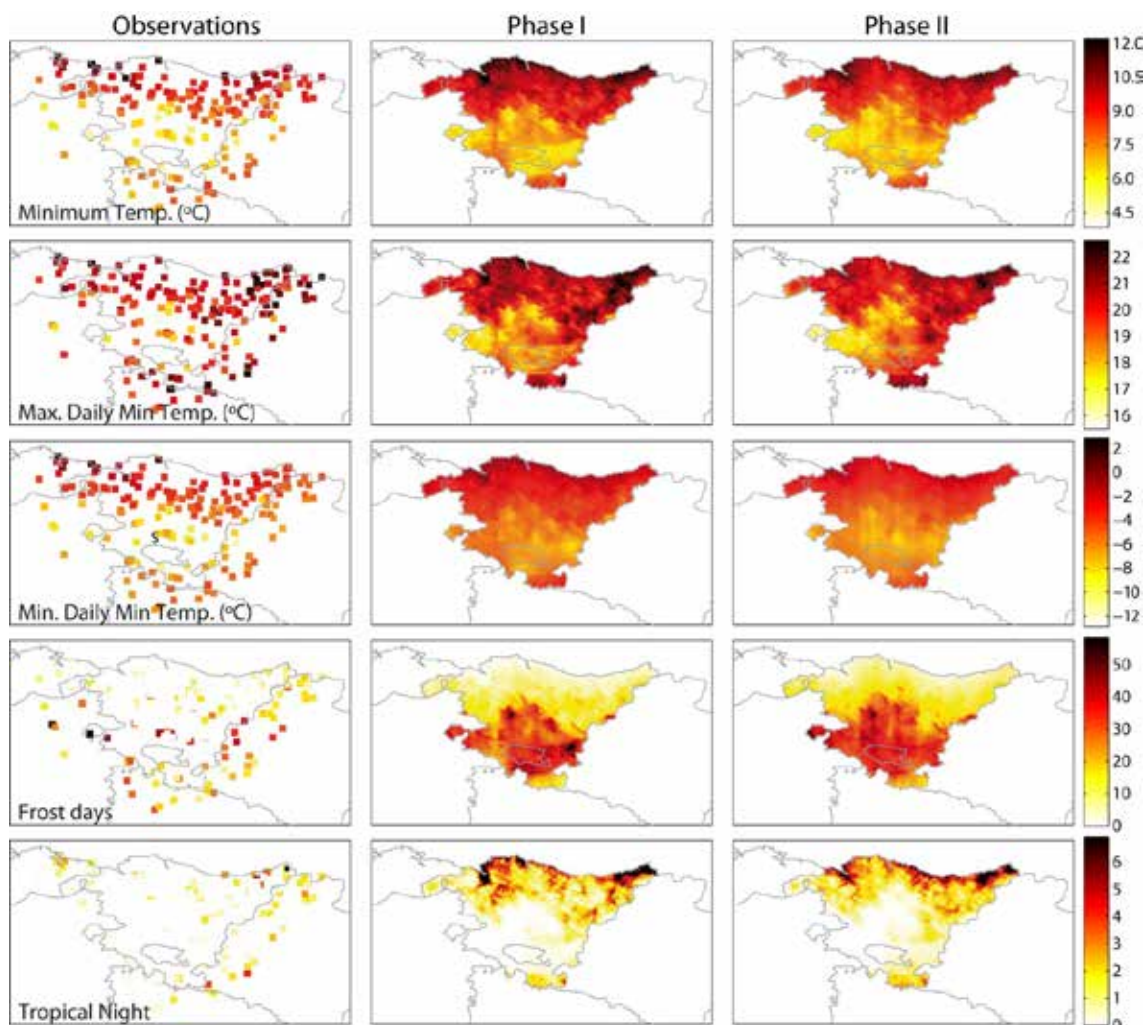


Figura 13. Climatología de los índices de temperatura mínima.

Los índices de temperatura máxima (Figura 12) también reflejan un suavizado de los valores altos en la mitad norte de la CAPV, si bien reproduce valores mayores en la mitad sur de los reflejados en la versión anterior.

Finalmente, las temperaturas mínimas (Figura 13) reproducidas por la nueva versión del atlas climático (ESCENARIOS II) tienden a ser más bajas que las reproducidas por la versión anterior (ESCENARIOS I), reproduciendo mejor el gradiente de temperaturas observado en la CAPV. En la nueva versión se corrigen ciertos valores anómalamente altos, como el máximo reflejado para el número de días de helada en el centro-este de la CAPV.

En base a los resultados mostrados en la presente sección, en ESCENARIOS II se ha obtenido un atlas climático de precipitación y temperaturas diarias de alta resolución (1 km) que corrige la sobreestimación de diversos índices climáticos, sobre todo en el caso de las temperaturas, dando lugar a una clasificación climática más próxima a la reflejada en las observaciones.

2.5. Resultados derivados del atlas climático: análisis de tendencias en el periodo presente

El desarrollo del atlas climático o de la base de datos climática de referencia permite realizar tanto la corrección de sesgos y obtención del dato diario en clima futuro que se explican en apartados posteriores, como un análisis detallado de la evolución del clima en el periodo observado (1971-2016). Para este análisis se pueden utilizar los mismos indicadores empleados en el proyecto precedente (ESCENARIOS, KLIMATEK-2016) (ver Anexo), para la caracterización de la evolución futura del clima, como los desarrollados por el Panel de Expertos en la Detección del Cambio Climático y en Indicadores (ETCCDI: <http://etccdi.pacificclimate.org/>).

En este apartado se analiza, aunque no de forma exhaustiva, la evolución del clima observado mediante sus tendencias. La tendencia es simplemente la pendiente de la recta de regresión ajustada a la serie temporal, de manera que una pendiente igual a cero quiere decir que, al margen de la variabilidad interanual, la recta es “plana” no mostrando un crecimiento o decrecimiento significativo en el indicador. Cuando la pendiente de la recta es muy pequeña, generalmente, se deriva directamente que las tendencias positivas o negativas no son significativas, si bien no es necesariamente así.

2.5.1 Análisis de tendencias en el ámbito geográfico global de la CAPV: periodo 1971-2016

En relación a los datos climáticos históricos, se han analizado las tendencias del periodo completo que se dispone (1971-2016) para el conjunto de la CAPV. A continuación se describen algunas de las tendencias que han resultado estadísticamente significativas, es decir, con un p-valor inferior a 0.05 para obtener un 95% de significación.

En primer lugar, hay que destacar que la precipitación (PRCPTOT) y los indicadores calculados a partir de las precipitaciones (como RR1, R10, R20, RX1 day, SDII, etc.), no presentaron una tendencia significativa para el periodo histórico, por lo cual no se han incorporado sus gráficos correspondientes.

Sin embargo, otros indicadores sí presentaron una tendencia estadísticamente significativa en el conjunto de la CAPV, si bien es cierto que las magnitudes de las tendencias fueron próximas a cero, aun siendo significativas. Es decir, que desde 1971 hasta 2016 hubo tendencias climáticas significativas pero, en general, muy leves o graduales.

Desde 1971 ha habido una tendencia hacia la reducción de los días fríos-secos (DC), los días fríos-húmedos (WC), los días que cruzan los 0°C (FTD), así como del rango diario de temperatura (DTR); mientras que han tendido a aumentar los días cálidos-secos (DW) y cálidos-húmedos (WW) (Figura 14). Destacar que las mayores tendencias (o pendientes en las rectas de regresión) corresponden a DW (incremento de días secos-cálidos).

En cuanto a indicadores relacionados con temperaturas medias (Figura 15), se observa una tendencia al incremento de las temperaturas medias (TG) y de los días que se superan 10°C (TG10a), por lo que se esperaría una mayor utilización del aire acondicionado (COLDDD). En consecuencia o de forma complementaria, han descendido los días con medias inferiores a 10°C (TG10b) y también los días que se asociarían al uso de calefacción (HEATDD).

Las temperaturas mínimas diarias han tendido a ascender (TN), así como los máximos de estas temperaturas mínimas (TNx). Asociado a ello, han incrementado las noches cálidas (TN90p) y las tropicales (TR). Complementariamente, han descendido las noches frías (TN10p). Merece la pena subrayar la magnitud de la pendiente o tendencia positiva de las noches cálidas (TN90p) (Figura 16).

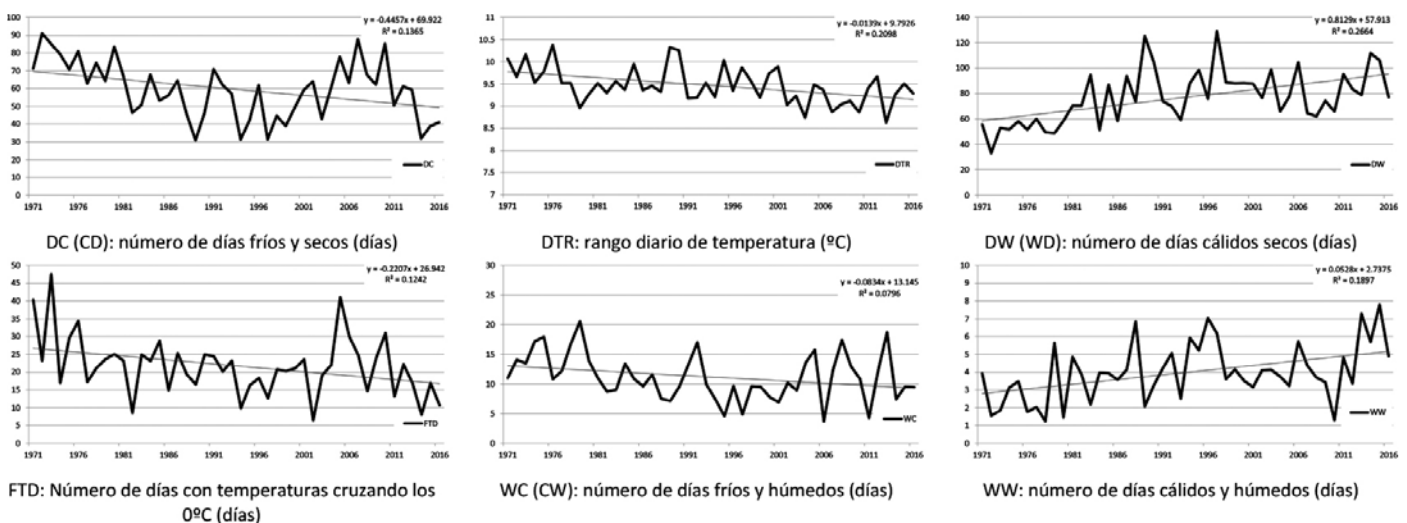


Figura 14. Evolución estadísticamente significativa (p-value < 0.05) de indicadores obtenidos a partir de varias variables básicas (indicadores “combinados”), para el conjunto de la CAPV y el periodo 1971-2016.

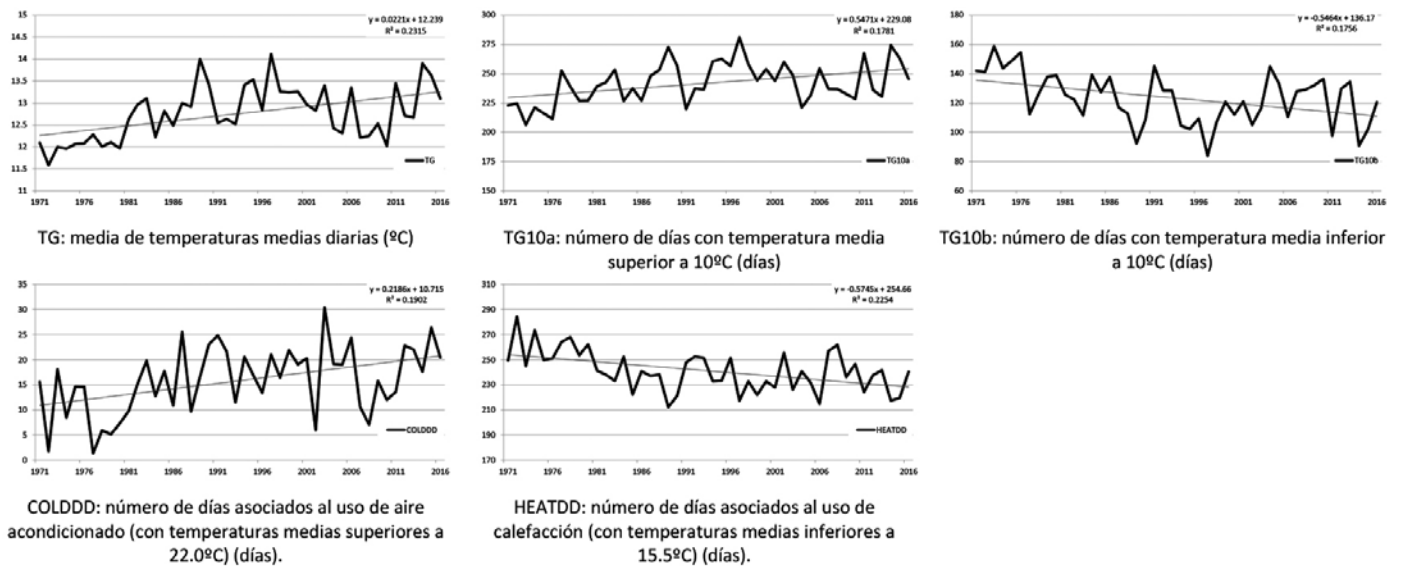


Figura 15. Evolución estadísticamente significativa ($p\text{-value} < 0.05$) de indicadores obtenidos a partir de temperaturas medias, para el conjunto de la CAPV y el periodo 1971-2016.

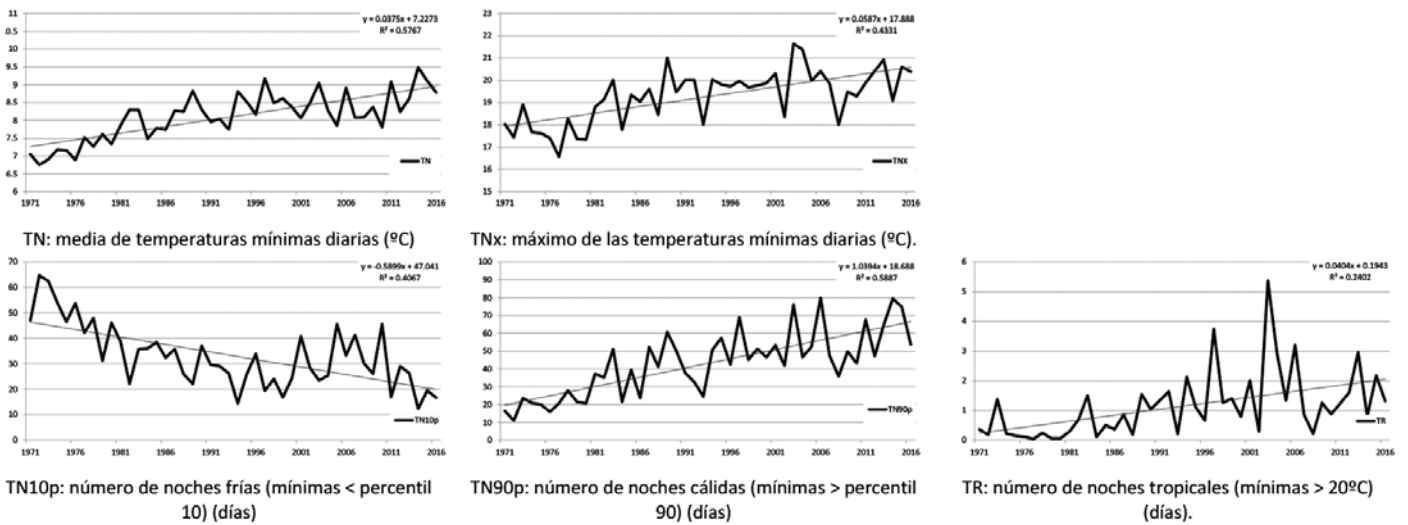


Figura 16. Evolución estadísticamente significativa ($p\text{-value} < 0.05$) de indicadores obtenidos a partir de temperaturas mínimas, para el conjunto de la CAPV y el periodo 1971-2016.

Todos los indicadores calculados a partir de las temperaturas máximas con significación, presentan una tendencia positiva (Figura 17), es decir, han tendido a aumentar: las medias de temperaturas máximas diarias (TX), los días cálidos (TX90p) -que además destacan por la magnitud de su tendencia-, los días que se superan 25°C y 35°C (SU y

SU35, respectivamente), la magnitud de las temperaturas por encima de 35°C y los eventos de olas de calor (WSDI). Hay otros indicadores cuyas tendencias ascendentes también son significativas, pero no se representan gráficamente porque no aportarían más información.

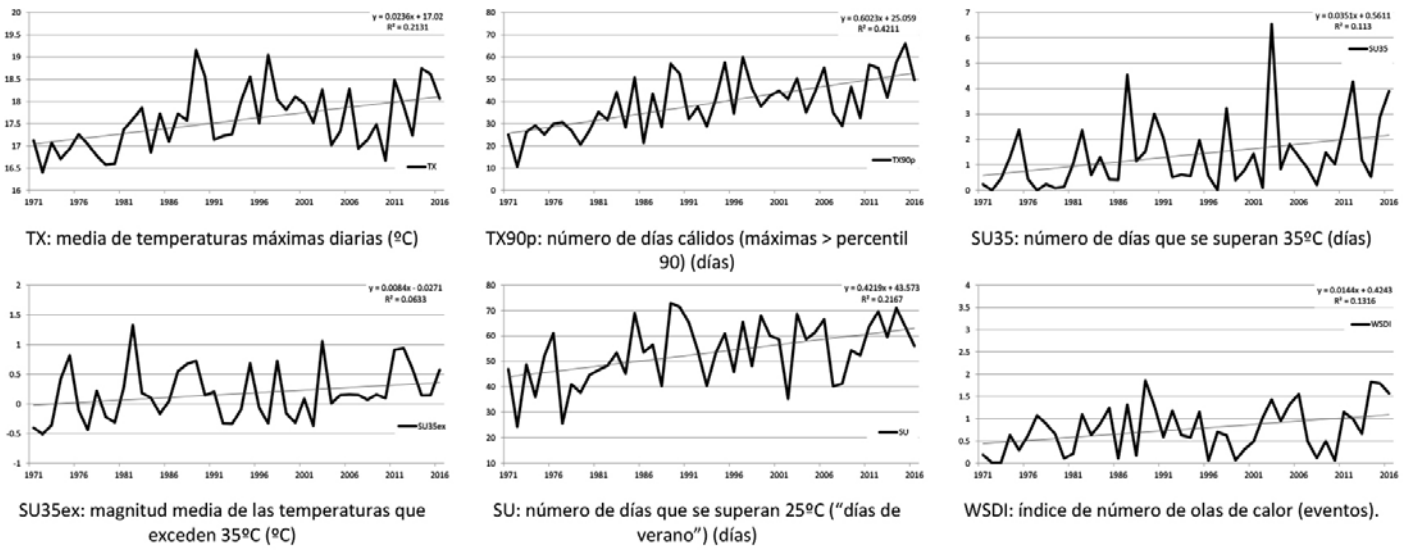


Figura 17. Evolución estadísticamente significativa (p -value < 0.05) de indicadores obtenidos a partir de temperaturas máximas, para el conjunto de la CAPV y el periodo 1971-2016.

2.5.2. Análisis de tendencias por zonas geográficas: periodo 1981-2010

En este apartado se describen las tendencias de un periodo histórico de 30 años más reciente, 1981-2010, no solo para observar estas tendencias sino también para ilustrar el hecho de que las tendencias (pendientes de la recta de regresión ajustada a esta serie de 30 años) no son geográficamente homogéneas dentro de la CAPV.

2.5.2.1. Precipitación

En el último periodo de referencia estándar 1981-2010 no se observan tendencias claras de cambio en el régimen de precipitación en la CAPV al oscilar los valores de tendencia entorno al valor nulo (Figura 18). Las tendencias muestran una leve tendencia al incremento de los días con precipitaciones suaves pero sin un claro efecto en el total anual o la intensidad diaria de precipitación. En contraste, en la región costera del centro de la CAPV parece que se

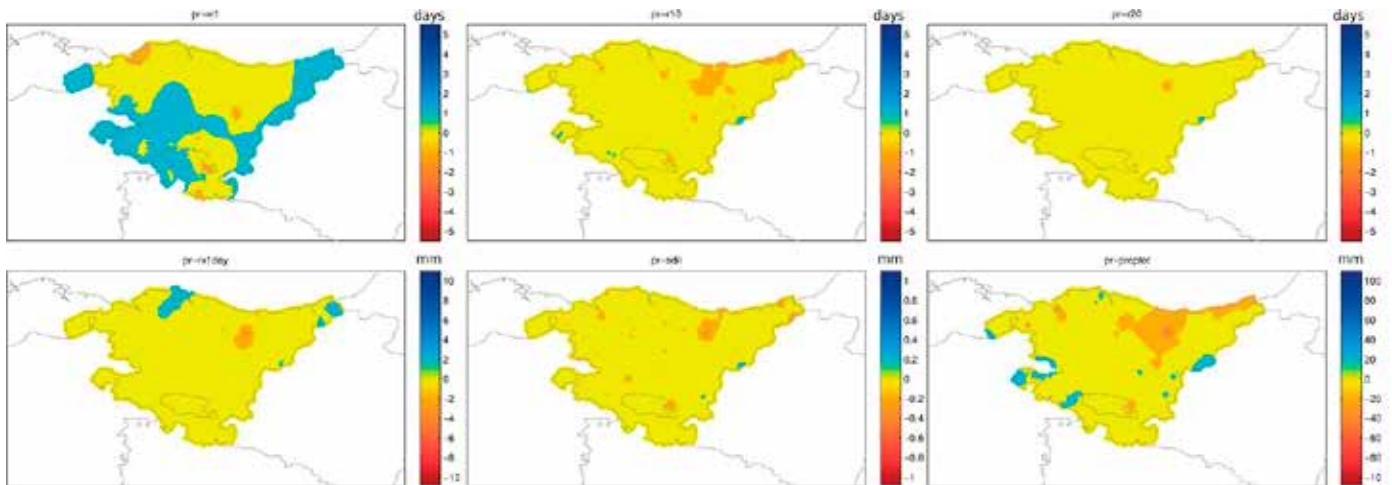


Figura 18. Tendencias observadas para el periodo de referencia 1981-2010 de los indicadores de precipitación RR1, R10, R20, RX1DAY, SDII y PRCPTOT.

observa un leve decrecimiento de la precipitación en todos los indicadores analizados. Si bien el análisis mostrado se centra en el último periodo climático estándar, los resultados son coherentes con los obtenidos considerando todo el periodo, 1971-2016, o el periodo climatológico estándar anterior, 1971-2000.

2.5.2.2. Temperatura

Al igual que ocurriese para la precipitación no se aprecian tendencias claras en ninguno de los indicadores considerados en el análisis de la temperatura media, salvo en regiones aisladas (Figura 19).

En lo que respecta a las temperaturas mínimas (Figura 20) se refleja una tendencia leve al incremento de eventos de temperaturas mínimas altas (tn90p) en el centro y oeste de la CAPV que se extiende a la costa de la CAPV. En contraste, en la mitad sur y este de la CAPV se refleja cierta tendencia al incremento de eventos fríos (tn10p y fd). Sin embargo, a nivel promedio (tn) no se observa una tendencia clara en uno u otro sentido a lo largo de la CAPV.

En el caso de las temperaturas máximas, dado su gran interés en los estudios de impacto (p.e. salud y olas de calor), se extendió el listado de indicadores definidos por el ETCCDI incorporando diferentes umbrales asociados a eventos de interés a lo largo de la CAPV. Las figuras siguientes (Figura 21, Figura 22, Figura 23) reflejan los resultados para un subconjunto de estos índices.

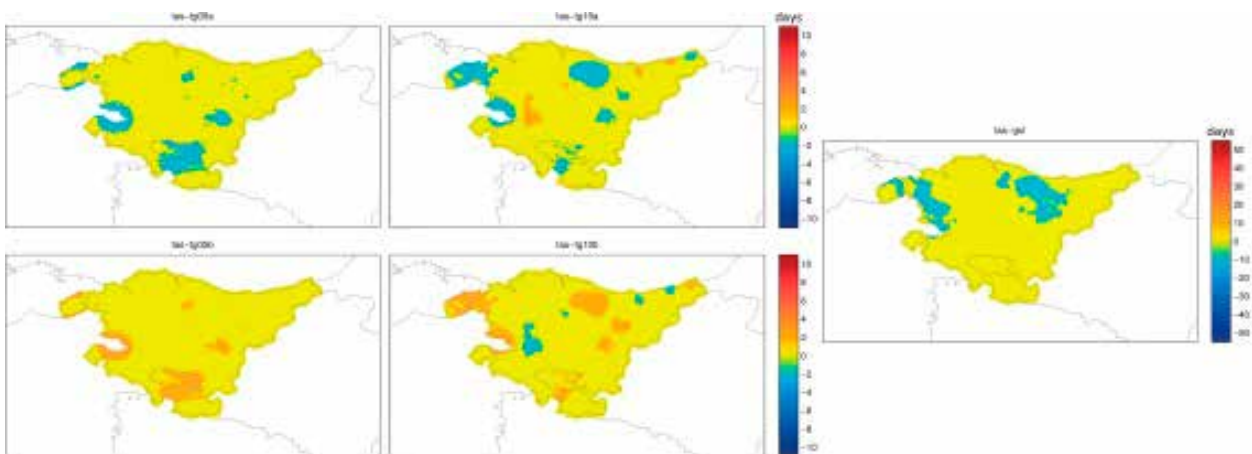


Figura 19. Tendencias observadas para el periodo de referencia 1981-2010 de los indicadores de temperatura media tg05a, tg10a, tg05b, tg10b y GSL.

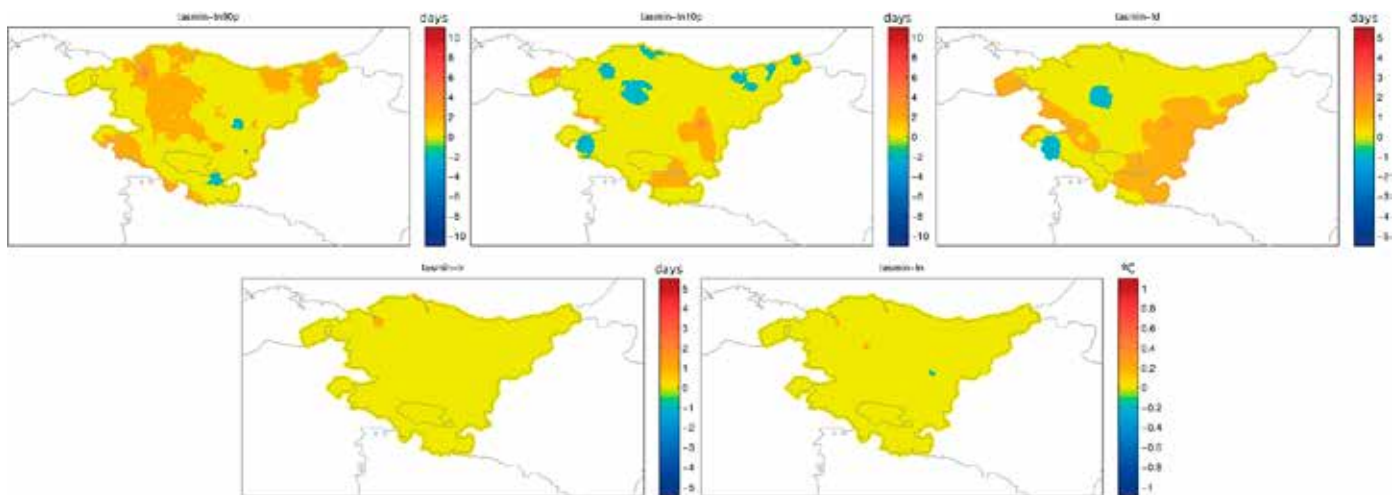


Figura 20. Tendencias observadas para el periodo de referencia 1981-2010 de los indicadores de temperatura mínima tn05p, tn10p, fd, tr y tn.

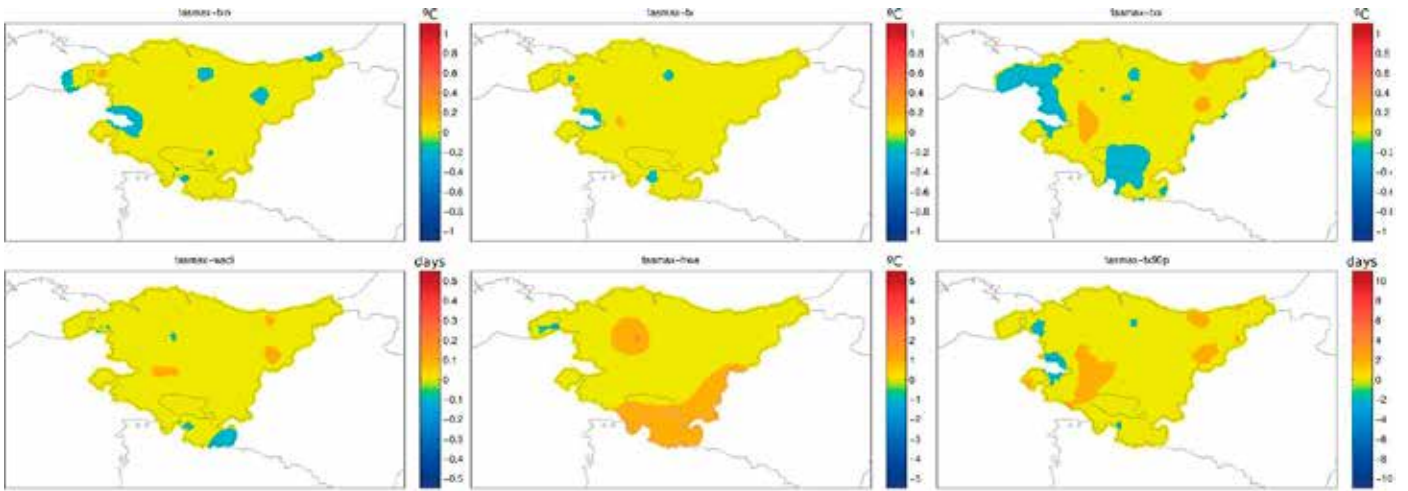


Figura 21. Tendencias observadas para el periodo de referencia 1981-2010 de los indicadores de temperatura máxima txn, tx, txx, wsdi, hwa y tx90p.

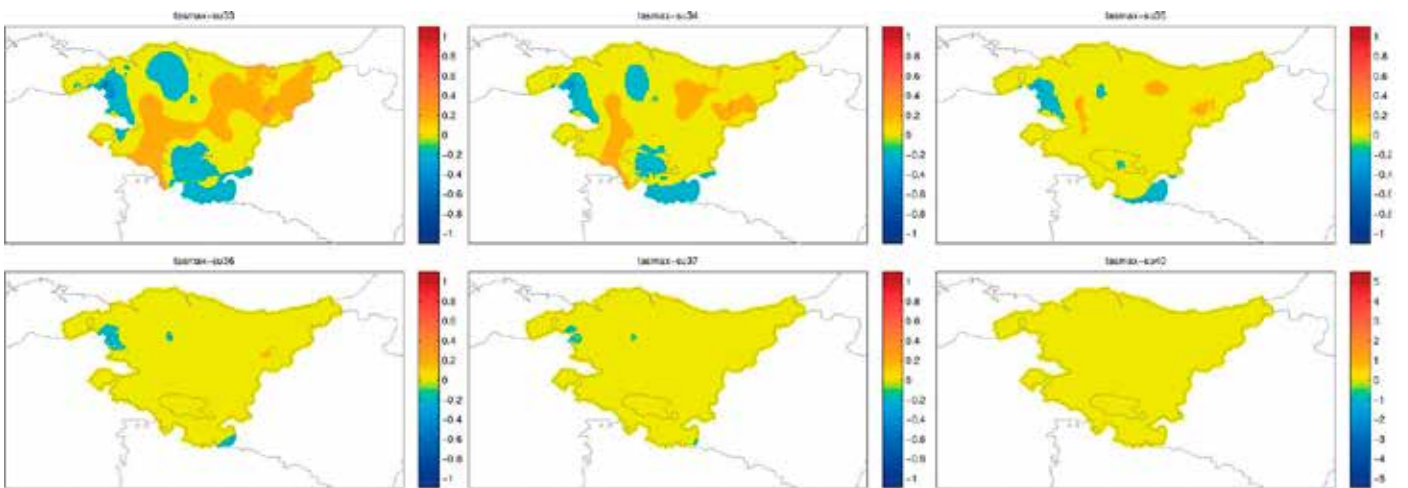


Figura 22. Tendencias observadas para el periodo de referencia 1981-2010 de los indicadores de temperatura máxima su33, su34, su35, su36, su37 y su40.

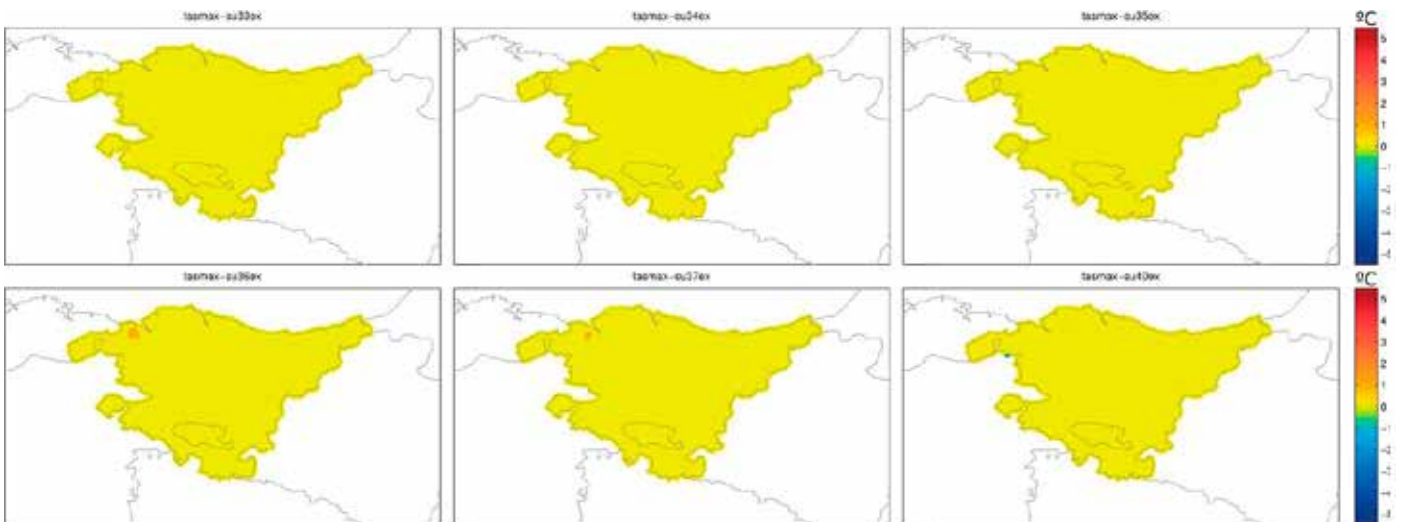


Figura 23. Tendencias observadas para el periodo de referencia 1981-2010 de los indicadores de temperatura máxima su33ex, su34ex, su35ex, su36ex, su37ex y su40ex.

En la Figura 21 únicamente se refleja un incremento en el extremo sur de la CAPV en la intensidad de los eventos de olas de calor, si bien éste no se extiende a la longitud o frecuencia de estos eventos.

En lo que se refiere a la frecuencia de eventos superando los diferentes umbrales propuestos en el marco del proyecto, únicamente en algunos casos (su33 y su34) se reflejan tendencias leves a un incremento de dichos eventos en el centro de la CAPV y un decremento en diferentes zonas al norte y sur de la CAPV (Figura 22).

Finalmente, en lo que respecta a la intensidad de los eventos con temperaturas máximas por encima de un umbral dado no se observan tendencias significativas a lo largo de la CAPV (Figura 23).

2.5.2.3. Evapotranspiración

Hay que recordar que la evapotranspiración se obtuvo de las temperaturas utilizando las formulaciones propuestas por URA (Agencia Vasca del Agua).

Las tendencias reflejadas para la temperatura y precipitación se extienden a la evapotranspiración, como se refleja

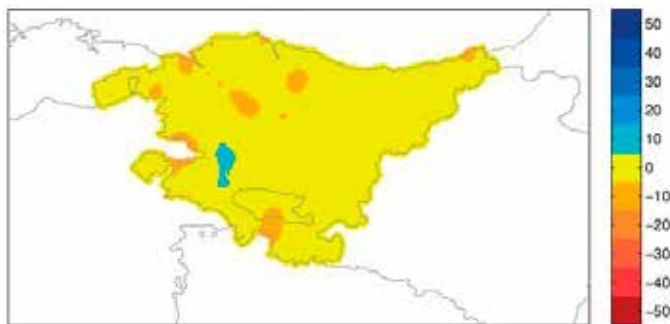


Figura 24. Tendencias observadas de ET0 (evapotranspiración de referencia) para el periodo de referencia 1981-2010.

en la Figura 24, en la cual únicamente se aprecian regiones aisladas con una tendencia al descenso de la evapotranspiración anual en la CAPV.

2.5.2.4. Indicadores combinados

Los índices que combinan diferentes variables permiten identificar situaciones o eventos extremos que las variables aisladas pueden ignorar u obviar. Por ello, en el marco del proyecto se consideraron diferentes indicadores combinando precipitación y temperaturas. La Figura 25 refleja los resultados para los días secos (d) y cálidos/fríos (w/c) en la CAPV. Como puede verse, en gran parte de la CAPV no se observan tendencias significativas para ambos indicadores o se observan tendencias opuestas, lo cual concuerda con lo reflejado para el resto de variables.

2.6. Conclusiones respecto al atlas climático

A continuación trataremos de resumir las principales conclusiones obtenidas en esta Sección:

1. Se ha actualizado la base de datos observacional a partir de las observaciones recogidas por AEMET, EUSKALMET y URA, para la elaboración de una climatología de alta resolución de precipitación y temperatura sobre la CAPV.
2. Se han comparado las dos versiones realizadas en ESCENARIOS I (convocatoria Klimatek 2016) y ESCENARIOS II (convocatoria Klimatek 2017) del proyecto con los datos observacionales, reflejando una mejor correspondencia para el periodo de referencia 1981-2010 entre la versión actual y las observaciones que para la versión anterior.

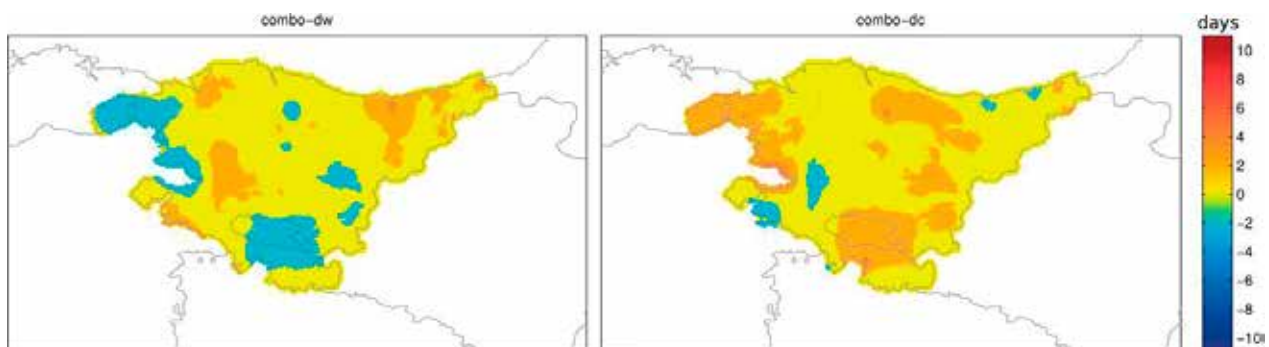


Figura 25. Tendencias observadas para el periodo de referencia 1981-2010 de los indicadores combinados dw y dc.

3. Se ha considerado un subconjunto de los índices definidos por el ETCDDI para precipitación y temperatura como indicadores de efecto del cambio climático en los regímenes medio y extremo de las variables de interés.
4. En base a lo anterior, se ha obtenido una versión actualizada del atlas climático de alta resolución de la CAPV que permitirá la aplicación, en el marco de este proyecto (ESCENARIOS II), de técnicas de corrección de sesgos para obtener series diarias de proyecciones de precipitación y temperatura de alta resolución, tal y como se explica en los siguientes apartados de este documento.
5. Toda la información y datos generados durante el desarrollo del presente proyecto serán procesados para su publicación en los servidores establecidos en el marco del proyecto ESCENARIOS II (e.g. <http://www.geo.euskadi.eus> y <http://escenariosklima.ihobe.eus>).

Aunque no era el objeto del proyecto el estudio detallado de las tendencias climáticas, se ha observado que ya se vislumbran tendencias significativas en el conjunto de la CAPV, para el periodo histórico 1971-2016. No obstante, las magnitudes de las tendencias, aun siendo significativas, fueron próximas a cero, es decir, se trata de tendencias leves, en general. Algunas de estas tendencias son:

- Incremento de: las medias de temperaturas máximas diarias (TX), los días cálidos (TX90p), los días que se superan ciertos umbrales de temperatura (25°C y 35°C, por ejemplo), los eventos de olas de calor (WSDI).
- Incremento de: las temperaturas mínimas diarias (TN), los máximos de estas temperaturas mínimas (TNx), las noches cálidas (TN90p) y las tropicales (TR).
- Incremento de: las temperaturas medias (TG) y los días que se superan 10°C de media (TG10a).

- Incremento de: los días cálidos-secos (DW), los días cálidos-húmedos (WW).
- Reducción de: los días fríos-secos (DC), los días fríos-húmedos (WC), los días que cruzan los 0°C (FTD) y del rango diario de temperatura (DTR).

Sin embargo, los indicadores asociados a la precipitación (PRCPTOT, RR1, R10, R20, RX1day, SDII, etc.), no presentan una tendencia significativa en el periodo histórico 1971-2016 para el conjunto de la CAPV.

En el periodo 1981-2000, en líneas generales no se han encontrado tendencias significativas a escala global en la CAPV y únicamente para algunas regiones e indicadores se refleja una tendencia homogénea. En particular, se observa una leve tendencia al incremento de los días con precipitaciones suaves pero sin un claro efecto en el total anual con excepción de la región costera de la CAPV en la que se refleja un pequeño decrecimiento de la precipitación en todos los indicadores analizados. En el caso de las temperaturas se diferencian dos regiones con tendencias ligeramente diferentes, si bien, como ocurriese para la precipitación, en líneas generales no se observan tendencias claras en la CAPV. Por un lado, en las temperaturas mínimas se refleja una tendencia leve al incremento de eventos de temperaturas mínimas altas (tn90p) en el centro y oeste de la CAPV que se extiende a la costa de la CAPV, mientras que en la mitad sur y este de la CAPV se refleja cierta tendencia al incremento de eventos fríos (tn10p y fd). Para las temperaturas máximas únicamente se refleja un incremento en el extremo sur de la CAPV en la intensidad de los eventos de olas de calor, si bien éste no se extiende a la longitud o frecuencia de estos eventos.

03

Desarrollo de escenarios climáticos con técnicas de corrección de sesgo

La disponibilidad de la climatología base de precipitación y temperaturas de la CAPV a una resolución de 1km para el periodo 1971-2016 desarrollada tal y como se describe en la sección anterior, permite la aplicación de diferentes técnicas de corrección de sesgos a las simulaciones desarrolladas en la iniciativa Euro-CORDEX, obteniendo escenarios climáticos de alta resolución, espacial (1 km) y temporal (diaria), calibrados para la CAPV. En esta sección describiremos los datos y métodos utilizados, así como los

resultados obtenidos para el escenario RCP8.5 en los periodos inicial (2011-2040), medio (2041-2070) y final (2071-2100) del siglo XXI.

En el ámbito Europeo, las proyecciones regionales de cambio climático han sido producidas y actualizadas en distintos proyectos Europeos de investigación: PRUDENCE (2001-2004; 50km, *Christensen et al.*, 2007), ENSEMBLES (2004-2009; 25km, *Déqué et al.*, 2012), y actualmente Eu-

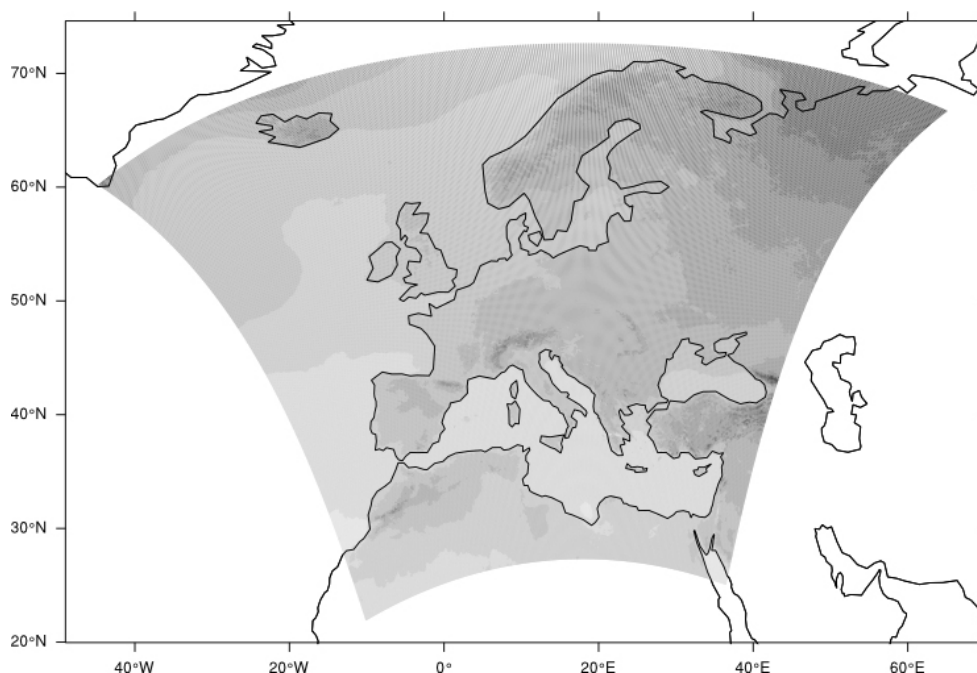


Figura 26. Dominio de simulación de los RCMs enmarcados en Euro-CORDEX.

ro-CORDEX (*Jacob et al.*, 2014), que se basa en los modelos globales utilizados en el último informe AR5 del IPCC y ofrece simulaciones para un dominio que cubre Europa a 11 km de resolución. Sin embargo, las proyecciones regionales realizadas con modelos (incluso las de más alta resolución, como Euro-CORDEX), presentan sesgos sistemáticos (por ejemplo, en la media o en la varianza), cuando se comparan con datos de observaciones en superficie para un periodo histórico de referencia (ver, por ejemplo, *Casanueva et al.* 2015, para un análisis de los sesgos de los datos de Euro-CORDEX sobre España). Estos sesgos son debidos a diferencias sistemáticas entre el modelo y la realidad (debidas a factores como la orografía, la parametrización de procesos subrejilla, etc.). Por tanto, las proyecciones regionales de cambio climático han de ser convenientemente calibradas con datos observacionales representativos de la zona de estudio para ajustar los sesgos sistemáticos de estos modelos, de forma que los valores resultantes puedan ser utilizarlos en estudios de impacto; estas técnicas se denominan técnicas de corrección de sesgos (ver, por ejemplo, *Gutiérrez et al.* 2017).

Los métodos de corrección de sesgos que se utilizan en este proyecto son los que han mostrado un mejor comportamiento en un reciente estudio de inter-comparación llevado a cabo sobre Europa en el proyecto VALUE y que ha analizado más de 20 técnicas diferentes (ver *Gutiérrez et al.* 2017; <http://www.value-cost.eu>). En particular se utilizarán las familias de métodos: empíricos y paramétricos para valores extremos. Estos métodos se aplicarán a las proyecciones disponibles del proyecto Euro-CORDEX, tomando como referencia la climatología de 1km sobre la CAPV, produciendo proyecciones regionales de cambio climático para el periodo 2011-2100 a 1km de resolución, junto con la incertidumbre asociada (obtenida a partir de la variabilidad del ensemble Euro-CORDEX).

3.1. La iniciativa CORDEX (Euro-CORDEX)

El Experimento Coordinado de Regionalización o CORDEX (*Coordinated Regional Downscaling Experiment*) (*Giorgi et al.*, 2009; *Jones et al.*, 2011) persigue generar y hacer disponibles proyecciones regionales a nivel mundial, así como fomentar el intercambio de conocimiento con la comunidad que utiliza información climática regional. Es un proyecto del World Climate Research Programme (WRCP) donde se han definido dominios específicos basados en el criterio de expertos y que comparten la misma malla geográfica y condiciones de contorno para todos los modelos. La mayoría de experimentos se llevaron a cabo en una malla

de 0.44°; sin embargo, en algunos experimentos como el realizado para Europa (Euro-CORDEX, Figura 26), la resolución estándar es de 0.11° (*Casanueva et al.*, 2015).

Se resumen a continuación las principales mejoras que implica esta iniciativa con respecto a proyectos anteriores (PRUDENCE y ENSEMBLES):

1. Se ha definido un dominio común de simulación para las diferentes zonas consideradas (África, Europa, Mediterráneo, etc.). De este modo, todos los modelos comparten en un mismo sistema coordinado, incluyendo la malla sobre la que se definen.
2. Se han definido dominios cubriendo todo el mundo, con el objetivo de obtener un conjunto de escenarios globales.
3. Se han actualizado los escenarios siguiendo una aproximación diferente basada en la concentración de gases (RCP4.5 y RCP8.5, principalmente), que corresponde al AR5 del IPCC.
4. Aunque siga habiendo serias lagunas en la matriz de acoplamientos GCM x RCM, se ha resuelto parcialmente el problema observado en ENSEMBLES, permitiendo un análisis más robusto de la distribución de la varianza entre ambas componentes (GCM y RCM).
5. Se han definido dos resoluciones, una más gruesa a 0.44° que no incrementa la resolución existente y otra a 0.11° que aumenta la resolución de los escenarios desarrollados anteriormente, y permite el análisis del valor añadido del incremento en la resolución del RCM.

Algunos de los modelos participantes en esta iniciativa han comenzado recientemente a publicar los resultados (ver *Casanueva et al.*, 2015 para una evaluación preliminar sobre España) por lo que Euro-CORDEX proporciona actualmente una nueva generación de proyecciones climáticas regionalizadas de alta resolución (aproximadamente 11 km) en Europa.

3.2. Proyecciones regionales de cambio climático

3.2.1. Datos utilizados

En la elaboración de las proyecciones climáticas futuras y de las coberturas geográficas (mapas) para las diferentes zonas de estudio, se han utilizado datos de temperatura y precipitación generados por los RCMs englobados en

ID	Earth System Model (ESM)	Regional Climate Model (RCM)	Institución ⁴
1	CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
2	CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	RCA4_v1	SMHI
3	MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
4	ICHEC-EC-EARTH_r1i1p1	RACMO22E_v1	KNMI
5	ICHEC-EC-EARTH_r3i1p1	HIRHAM5_v1	DMI
6	ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
7	ICHEC-EC-EARTH_r12i1p1	RCA4_v1	SMHI
8	IPSL-CM5A-MR_r1i1p1	RCA4_v1	SMHI
9	MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	RACMO22E_v1	KNMI
10	MOHC-HadGEM2-ES_r1i1p1	RCA4_v1	SMHI
11	MPI-ESM-LR_r1i1p1	CCLM4-8-17_v1	CLMcom
12	MPI-ESM-LR_r1i1p1	RCA4_v1	SMHI
-	IPSL-CM5A-MR_r1i1p1	WRF331F_v1	IPSL-INERIS
-	CERFACS-CNRM-CM5_r1i1p1	ALADIN53_v1	CNRM

Tabla 2. Proyecciones regionales obtenidas con distintos acoplamientos de GCMs/RCMs de la iniciativa EURO-CORDEX considerados en el presente trabajo. En rojo se muestran los RCMs descartados por problemas con el formato de los datos.

EURO-CORDEX a una resolución de 11° (~12km). En concreto, para una evaluación preliminar de las proyecciones, en el presente trabajo se consideran los experimentos históricos (histórico) y los escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5, para los 12 RCMs disponibles (Tabla 1). La tarea de corrección de sesgos se llevará a cabo considerando únicamente el escenario RCP8.5. En el proceso de selección se descartaron 2 RCMs por tener una proyección espacial diferente al resto (marcados en rojo en la Tabla 1).

Por otra parte, los datos observacionales representativos del clima regional en la CAPV se han tomado de la rejilla de 1 km desarrollada en el marco de ESCENARIOS II (descrita en la sección previa), que proporciona información diaria de precipitación y temperatura entre 1971-2016.

Los periodos climáticos considerados son 1971-2000 para el clima observado y el histórico simulado por los RCMs, y 2041-2070 y 2071-2100 para los periodos futuros correspondientes a las proyecciones de los RCMs según los

escenarios de emisiones RCP4.5 y RCP8.5. En algunos casos, se han calculado los valores climáticos para cada mes, con el fin de poder evaluar los efectos del cambio climático a una escala estacional. En otros casos, los resultados se presentan a escala anual.

3.2.2. Evaluación de modelos a escala peninsular

Dado que la variable más difícil de simular es la precipitación, en primer lugar se ha realizado un análisis de la capacidad de los distintos modelos de EURO-CORDEX para reproducir adecuadamente tanto la media como los extremos de precipitación en España considerando el período de control 1971-2000 (escenario histórico). Para ello, se han analizado los resultados mensuales de los modelos mostrados en la Tabla 2. Proyecciones regionales obtenidas con distintos acoplamientos de GCMs/RCMs de

⁴ Más detalles sobre las instituciones en el documento:

<http://www.euro-cordex.net/imperia/md/content/csc/cordex/20160204a-eurocordex-simulations.pdf>

la iniciativa EURO-CORDEX considerados en el presente trabajo. En rojo se muestran los RCMs descartados por problemas con el formato de los datos. relativos a la precipitación media y extrema (valor de retorno para un período de 50 años, obtenido a partir de una GEV con máximos mensuales) y se comparan con los datos observacionales proporcionados por la rejilla de datos Spain02_v5 (esta rejilla tiene la misma resolución que los datos de EURO-CORDEX y fue desarrollada para evaluar estos modelos; Herrera y otros 2016, <http://www.meteo.unican.es/datasets/spain02>). Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 27 y Figura 28, respectivamente. Nótese que la primera fila muestra las climatologías mensuales correspondientes al valor observado, mientras que el resto de filas muestran las climatologías obtenidas con los distintos

modelos (según la numeración de la Tabla 2. Proyecciones regionales obtenidas con distintos acoplamientos de GCMs/RCMs de la iniciativa EURO-CORDEX considerados en el presente trabajo. En rojo se muestran los RCMs descartados por problemas con el formato de los datos).

La Figura 27 muestra que, en general, las distintas combinaciones de GCMs/RCMs producen resultados similares a los observados, aunque tienden a sobre-estimar la precipitación media y los extremos debido a los sesgos sistemáticos inherentes a estos modelos (y que se calibran con métodos de corrección de sesgo en este proyecto). El aspecto más reseñable lo constituye el modelo RCA4 (que ha sido aplicado en 5 de las 12 proyecciones: números 2, 7, 8, 10, 12 en la Tabla 2. Proyecciones regionales obtenidas

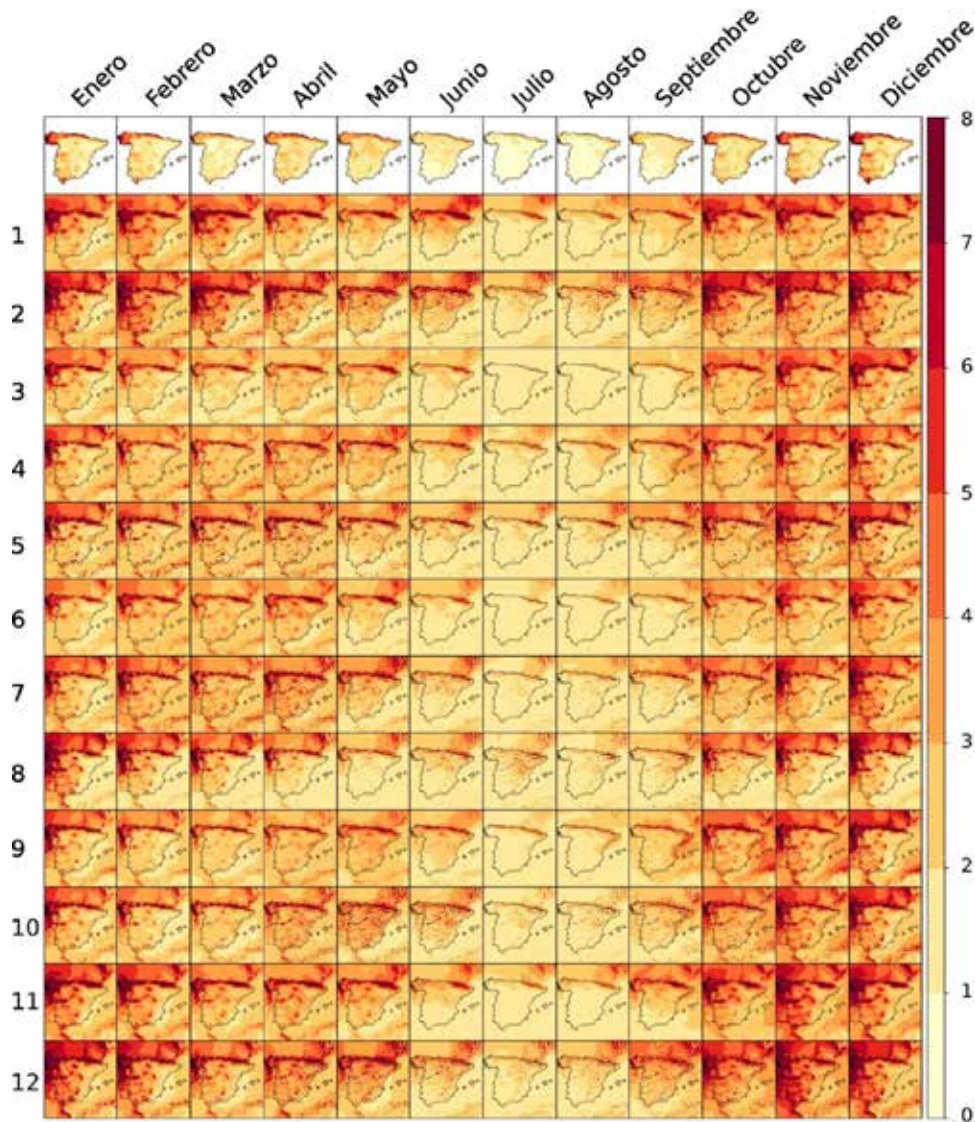


Figura 27. Precipitación media (mm) para el periodo de referencia 1981-2010 considerando un rango típico de precipitación (0-8mm). La primera fila corresponde a las observaciones de Spain02 v5, el resto corresponden a los distintos modelos enumerados en la Tabla 2.

con distintos acoplamientos de GCMs/RCMs de la iniciativa EURO-CORDEX considerados en el presente trabajo. En rojo se muestran los RCMs descartados por problemas con el formato de los datos.), que da lugar a un patrón de precipitación irregular (sobre todo en los meses de verano) que no reproduce adecuadamente el patrón observado de precipitación (primera fila). Sin embargo, esto es debido a las parametrizaciones específicas que utiliza el modelo y es parte de su sesgo sistemático. Un comportamiento similar también se observa en el modelo HIRHAM5 (número 5 en la Tabla 2. Proyecciones regionales obtenidas con distintos acoplamientos de GCMs/RCMs de la iniciativa EURO-CORDEX considerados en el presente trabajo. En rojo se muestran los RCMs descartados por problemas con el formato de los datos).

Por tanto, en principio, ninguna de estos modelos es descartable por deficiencias aparentes que pueda presentar.

3.2.3. Corrección de sesgos: Aplicación de métodos de ajuste de cuantil

Las salidas de los RCMs no pueden ser utilizadas de forma directa para estudios de impacto, ya que contienen sesgos importantes cuando se comparan con las observaciones. En consecuencia, se hace necesario un proceso de calibración antes de utilizar estos datos en aplicaciones reales. Un reciente estudio en el marco de la iniciativa VALUE (ver Gutiérrez *et al.* 2017; <http://www.value-cost.eu>) ha llevado

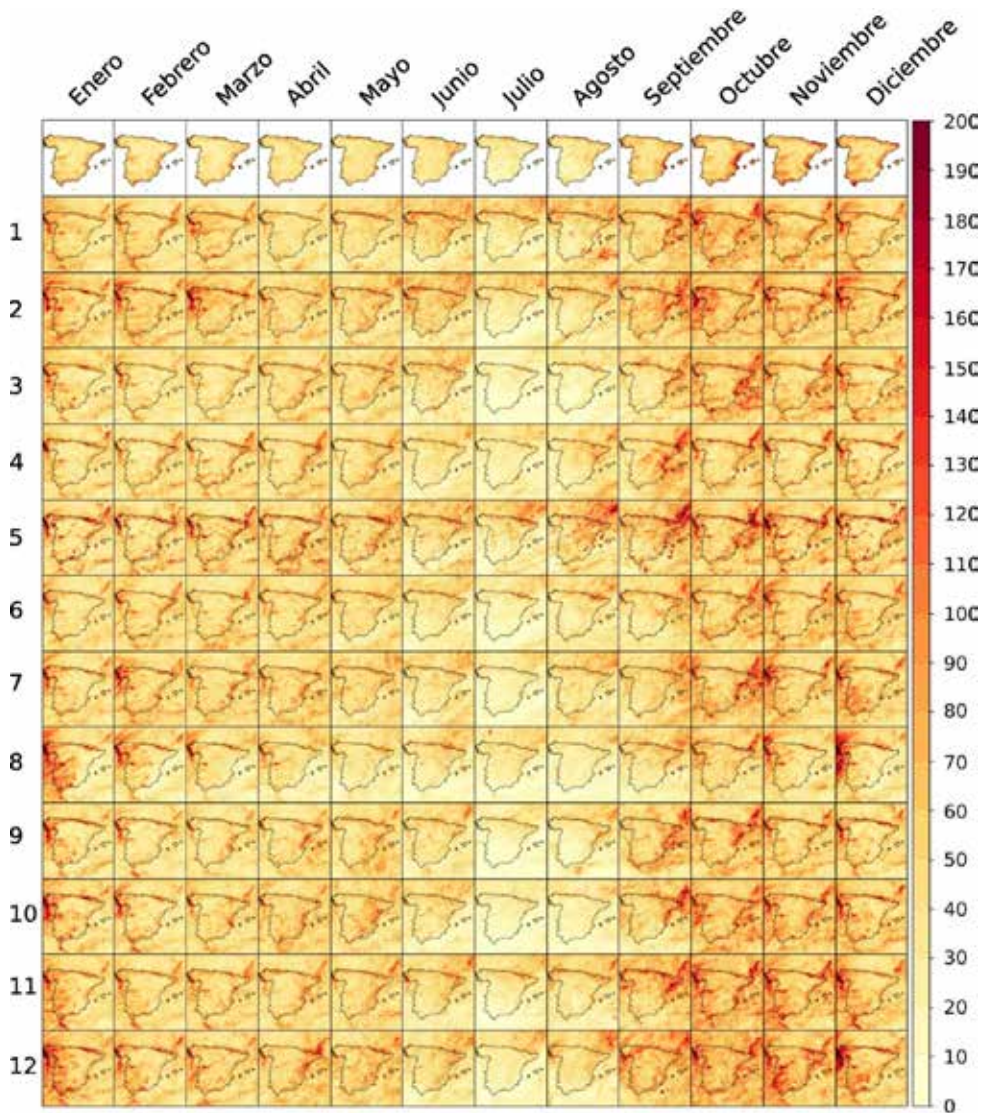


Figura 28. Valor de retorno de la precipitación (mm) para un periodo de 50 años considerando el periodo de referencia 1971-2000. La primera fila corresponde a las observaciones de Spain02 v5, el resto corresponden a los distintos modelos enumerados en la Tabla 2.

a cabo una inter-comparación de técnicas de corrección de sesgos sobre Europa considerando las distintas metodologías que han sido propuestas hasta la fecha. En total, se han comparado las ventajas y limitaciones de más de 20 técnicas, que incluyen desde técnicas simples basadas en el método delta (*pattern scaling*), hasta técnicas más sofisticadas basadas en ajustes de cuantil (*quantile-quantile mapping*).

Las técnicas de ajuste de cuantiles operan directamente calibrando la salida diaria de los modelos en base a un ajuste de cuantiles de las distribuciones del modelo y la correspondiente a las observaciones para un período de control. En la intercomparación llevada a cabo en VALUE (ver Gutiérrez *et al.* 2017) se puso de manifiesto que los dos grandes grupo de técnicas (en base a su validación) eran las empíricas (que ajustan un número arbitrario de cuantiles, por ejemplo, los percentiles) y las paramétricas (que usan una distribución teórica para estimar los ajustes en los cuantiles).

En líneas generales, dichos métodos pueden definirse a través de la ecuación:

$$\tilde{y} = CDF_{obs}^{-1}(CDF_{mod}(y))$$

Donde “ \tilde{y} ” e “ y ” son los valores corregido y proyectado por el modelo respectivamente, y “ CDF_{obs} ” y “ CDF_{mod} ” son las funciones de distribución acumuladas, empírica o teórica, de las observaciones y el modelo respectivamente.

Por ello, en este proyecto se han analizado dos técnicas de ajuste de cuantiles para la corrección de sesgo, una empírica (EQM, *Empirical Quantile Mapping*, Wilke *et al.*, 2013; Gutiérrez *et al.*, 2017) y una paramétrica que considera un ajuste específico para los extremos (GPQM, *Generalized Parametric Quantile Mapping*). Esta última utiliza una distribución gaussiana para temperatura (y binomial/gamma para precipitación) y una distribución generalizada de extremos (GEV) para ajustar las colas de las distribuciones (más información en Gutjahr y Heinemann, 2013 y Gutiérrez *et al.*, 2017).

Además, analizamos el efecto de aplicar una ventana estacional (30 días) en el proceso de calibración de los modelos de corrección de sesgos. Esta es la implementación utilizada en el proyecto VALUE con código EQMs. En el presente informe mostramos los resultados preliminares obtenidos con la técnica EQM y correspondientes a la no aplicación de la ventana de calibración descrita anteriormente. Estos resultados proporcionan la información necesaria para configurar adecuadamente las metodologías de corrección de sesgos.

El método empírico de corrección EQM es ampliamente utilizado y consiste en calibrar la función de distribución acumulativa (CDF, según sus siglas en Inglés) mediante la adición de las diferencias (deltas individuales y medias) a los cuantiles correspondientes de una distribución “ideal” (observada). Una ventaja de este método a tener en cuenta es que es aplicable a cualquier variable (en este caso precipitación y temperatura). En este caso particular, se han ajustado los percentiles 1 al 99, extrapolando la corrección de los cuantiles extremos a los valores que quedan fuera del rango de calibración.

En el caso de la precipitación se ha fijado un umbral de 0.1 mm que determina los días de no precipitación (días con precipitación menor a 0.1 mm) frente a los de precipitación. Esto permite evitar los problemas derivados de diferencias en las frecuencias de precipitación entre los datos de los modelos y las observaciones (Wilcke *et al.*, 2013).

Como resultado, se han generado los productos reflejados en la “Guía de Uso” para cada variable, donde se recogen las proyecciones diarias (para el conjunto de coordenadas de la CAPV) de los distintos modelos climáticos de la Tabla 2. Proyecciones regionales obtenidas con distintos acoplamientos de GCMs/RCMs de la iniciativa EURO-CORDEX considerados en el presente trabajo. En rojo se muestran los RCMs descartados por problemas con el formato de los datos., calibrados con los datos de la climatología de alta resolución del País Vasco para los periodos futuros 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 y el escenario RCP8.5.

3.2.4. Evaluación del método de corrección

Los datos obtenidos de la aplicación de cada técnica se analizan mediante un diagnóstico sencillo dado por una serie de gráficas que muestran las series temporales y los diagramas de cuantiles donde se comparan los datos observados y la salida directa (brutos) y corregida. Este diagnóstico se ha realizado para 19 localidades mediante un muestreo estratificado, donde se ha escogido una localidad al azar en cada franja latitudinal (o estrato) de la CAPV.

La Figura 29 muestra el diagnóstico de la precipitación corregida con EQM para un punto ilustrativo del estrato más meridional de la CAPV, donde podemos ver que la corrección es exitosa (puntos azules cercanos a la diagonal en b1 y b2).

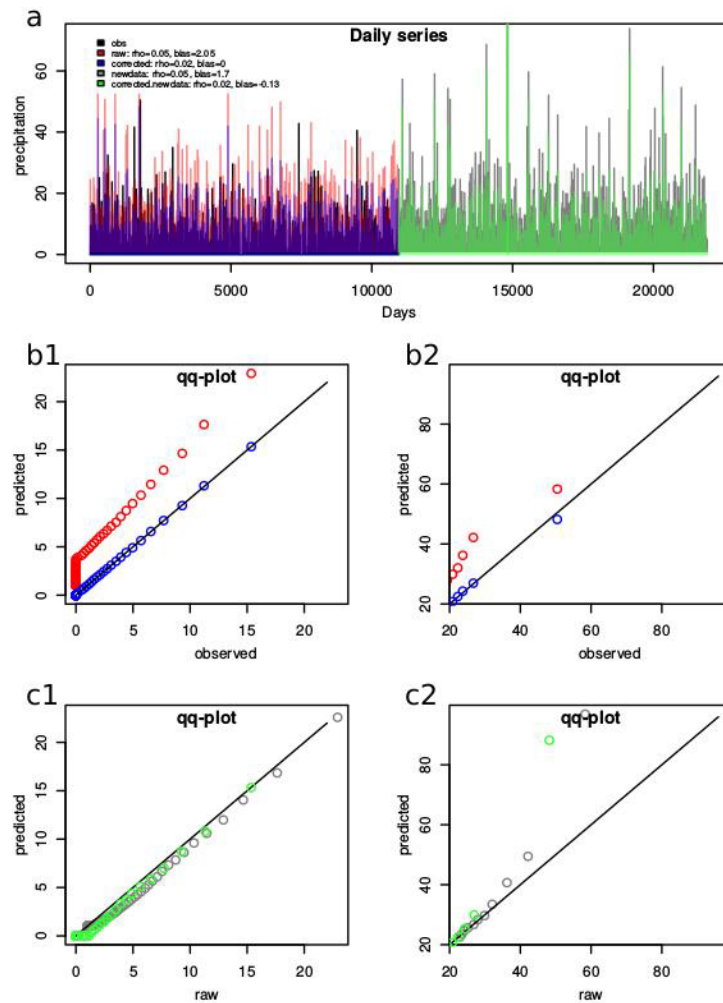


Figura 29. Gráficos de diagnóstico para la técnica de corrección EQM en un punto ilustrativo de la CAPV, que muestran (a) las series temporales y (b1, b2) los diagramas de cuantiles (qq-plot), donde se comparan los datos observados (negro), brutos históricos (rojo), brutos históricos corregidos (azul), brutos (gris) y corregidos (verde). Los diagramas b1 y b2 corresponden a los datos del periodo histórico y enfrentan los valores de los cuantiles de la observación con los históricos (bruto:rojo y corregidos:azul).

3.3. Resultados

En este apartado se realiza un estudio detallado considerando tanto la precipitación como la temperatura los periodos futuros: 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100 para el escenario RCP8.5.

3.3.1. Sesgo de las proyecciones de Euro-CORDEX

La Figura 30 muestra la climatología para el periodo de referencia (1971-2000), calculada a partir de los datos de observación diarios, y la Figura 31, el sesgo de cada

RCM en el periodo de referencia relativo a la climatología observada. En general, se observa un sesgo negativo de todos los modelos climáticos en cuanto a las variables de temperatura, es decir, el conjunto de RCMs englobados en CORDEX subestiman tanto la temperatura mínima como la máxima. En el caso de la precipitación, el sesgo es variable entre los diferentes modelos (e.g. segundo y tercer modelo) con un patrón latitudinal claro en la mayoría, donde la precipitación se subestima en el norte y sobrestima en el sur.

Estos resultados muestran la necesidad de corregir el sesgo de los modelos de Euro-CORDEX para que puedan ser utilizados en estudios de impactos.

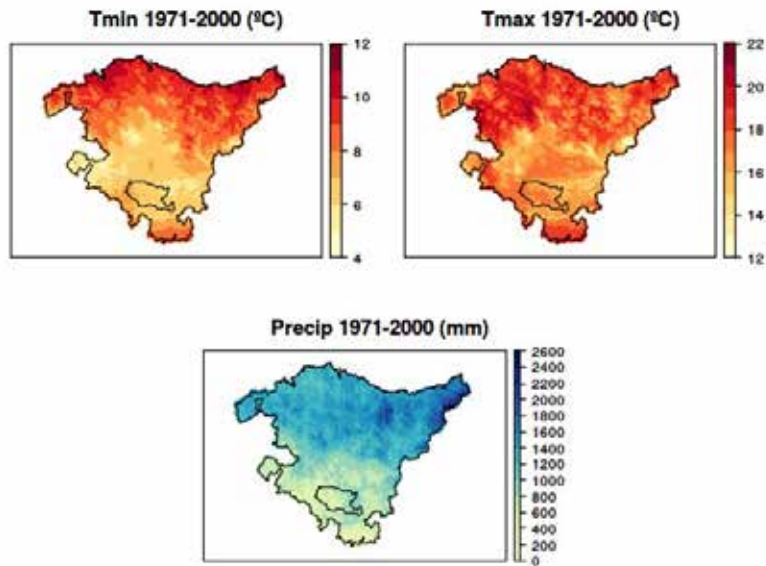


Figura 30. Climatología anual de referencia (observada) del País Vasco en el período 1971-2000.

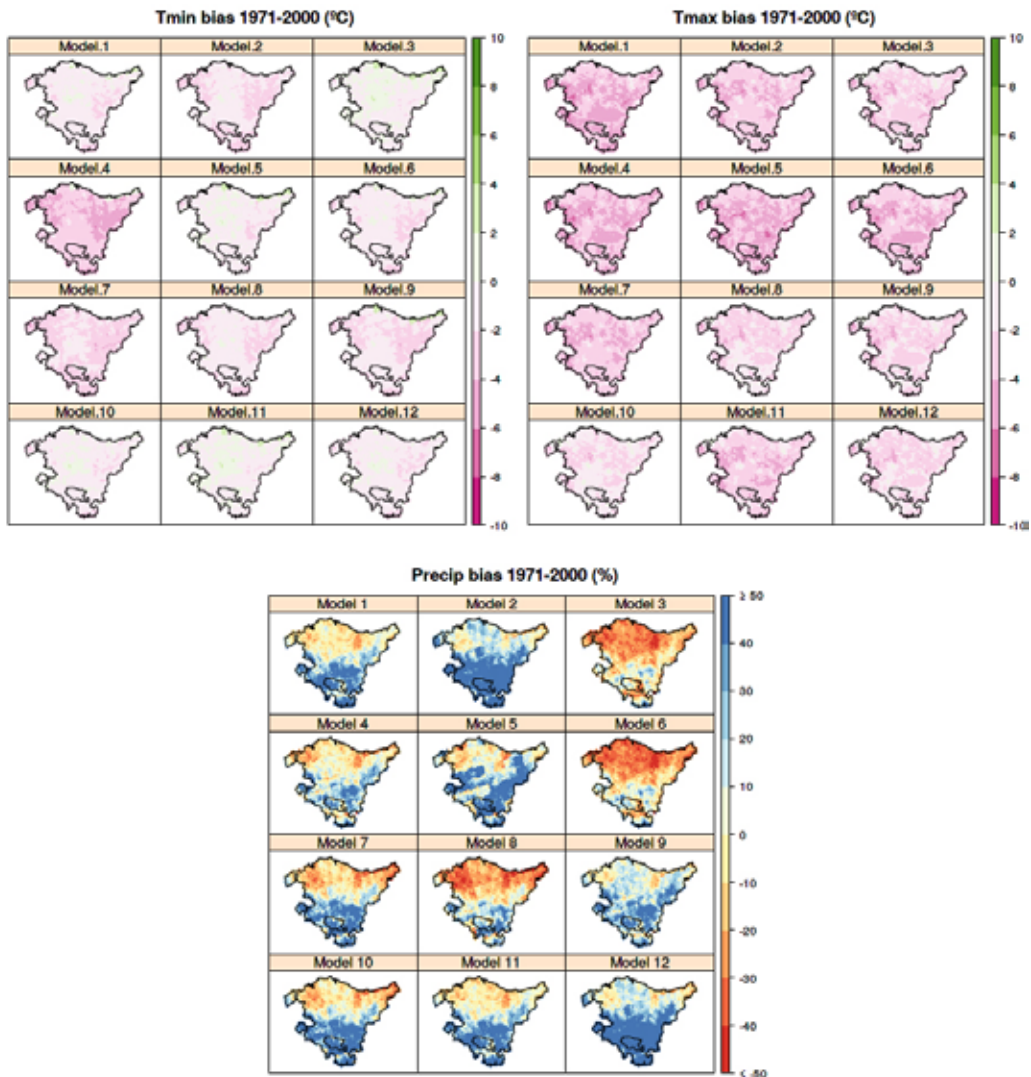


Figura 31. Sesgo anual de los GCM/RCMs enumerados en la Tabla 2 para el periodo histórico 1971-2000.

3.3.2. Escenarios de cambio climático (precipitación)

A continuación se presentan las proyecciones de precipitación total anual para los tres periodos futuros, así como el "signal-to-noise ratio" (SNR) como medida de incertidumbre de dichas proyecciones. Dicha medida de incertidumbre se obtiene como el cociente entre la media y la desviación estándar de las señales de cambio dadas por los modelos regionales corregidos, y puede ser interpretada como la coherencia del signo de las señales de cambio dadas por los modelos. Asumiendo una distribución Gaussiana del conjunto de proyecciones, el SNR puede ser interpretado en términos de coherencia como (Collins et al. 2013):

- SNR < 0.5 → menos de un 70% de modelos con el mismo signo de cambio.
- SNR = 1.0 → un 85% de modelos con el mismo signo de cambio.
- SNR = 2.0 → un 97.5% de modelos con el mismo signo de cambio.

- SNR > 3.0 → más de un 99.5% de modelos con el mismo signo de cambio.

La Figura 32 y la Figura 33 muestran las climatologías futuras proyectadas por los modelos regionales corregidos con los métodos EQM y GPQM, respectivamente, así como su incertidumbre dada por el SNR. En ambos casos se proyecta un descenso progresivo de la precipitación total anual en la CAPV, más acusado en el norte de la CAPV y para el caso de la corrección GPQM. Dicho cambio adquiere certidumbre a lo largo del siglo, superando el 97.5% de los modelos corregidos proyectando un cambio negativo para el último periodo de siglo.

La Figura 34 refleja el cambio promedio proyectado por los modelos para ambas correcciones, el cual oscila entre el -10% y -20% de lo observado en el periodo de referencia. Si bien el cambio proyectado es, más o menos, homogéneo en toda la CAPV, como indica el SNR es en la mitad norte donde los modelos presentan coherencia en el signo de este cambio, existiendo en la mitad sur mayor incertidumbre.

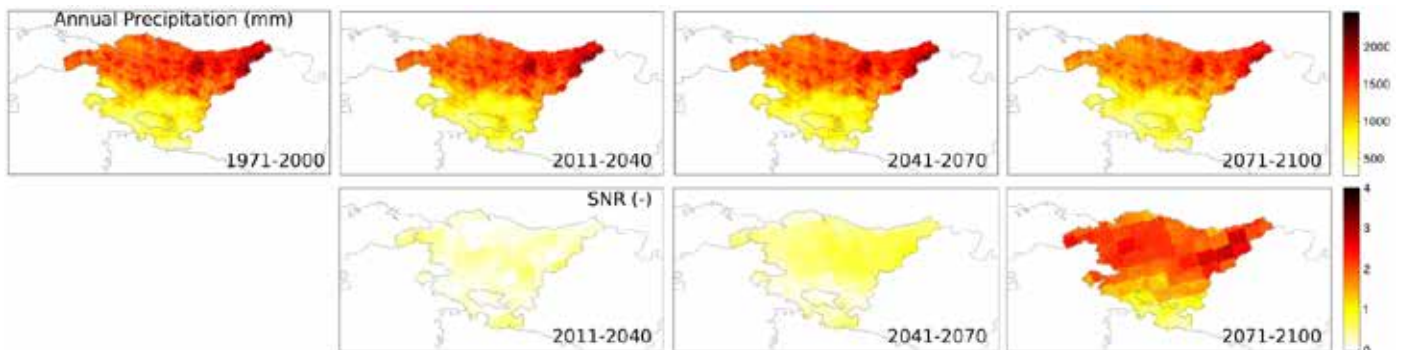


Figura 32. Proyecciones de precipitación total anual (arriba) y signal-to-noise ratio de la señal (debajo) para los tres periodos futuros dada por la corrección EQM.

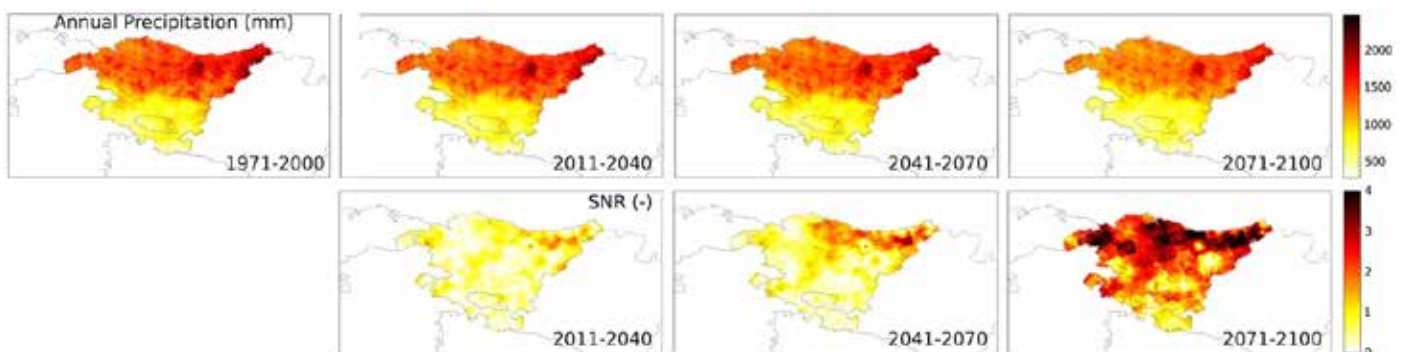


Figura 33. Proyecciones de precipitación total anual (arriba) y signal-to-noise ratio de la señal (debajo) para los tres periodos futuros dada por la corrección GPQM.

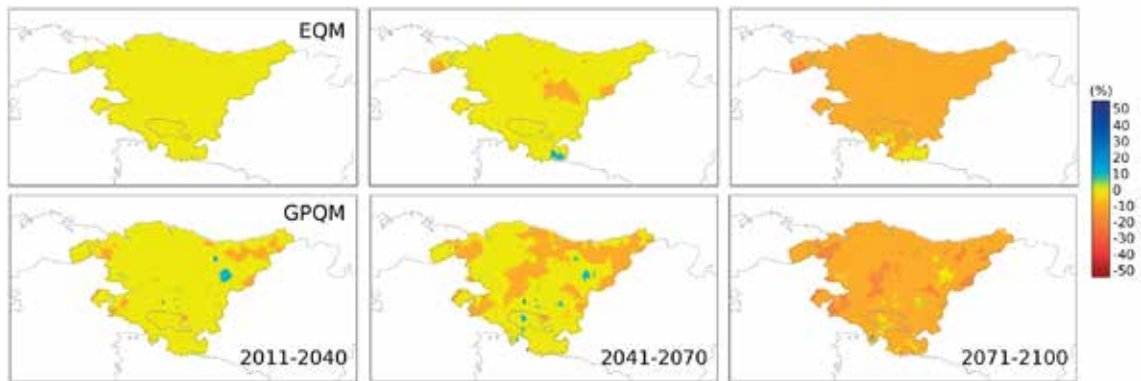


Figura 34. Cambio proyectado en la precipitación anual para los tres periodos futuros.

3.3.3. Escenarios de cambio climático (temperatura media)

En el caso de la temperatura media (Figura 35, Figura 36 y Figura 37) los resultados indican, para ambos métodos de corrección y todos los periodos un incremento generalizado de la temperatura media en toda la CAPV que puede alcanzar los 4°C a finales de siglo (Figura 37).

A diferencia de la precipitación, la señal de cambio presenta una gran coherencia entre los modelos desde el primer

periodo para ambos métodos de corrección, “saturando” (>99.5%) ya a partir del segundo periodo en toda la CAPV, lo que indica que todos los modelos, independientemente del método de calibración de sesgos utilizado, proyectan un aumento significativo de las temperaturas medias en la CAPV.

Dicho aumento, aunque generalizado, parece que se suaviza en el último periodo (2071-2100) en la línea de costa. Hay que destacar que el método GPQM “sufr” en el último periodo al tratar de reproducir el gradiente de la señal entre el interior de la CAPV y la línea de costa.

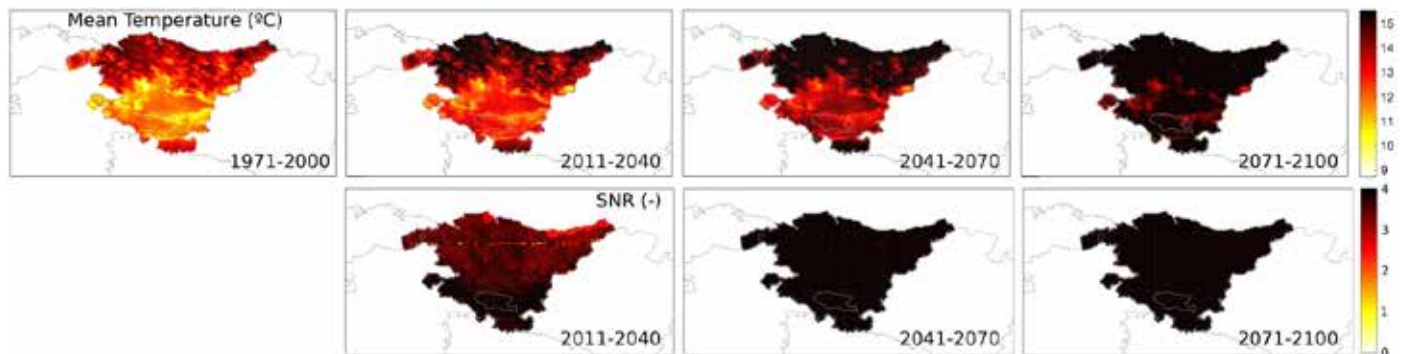


Figura 35. Proyecciones de temperatura media anual (arriba) y SNR de la señal (debajo) para los tres periodos futuros dada por la corrección EQM.

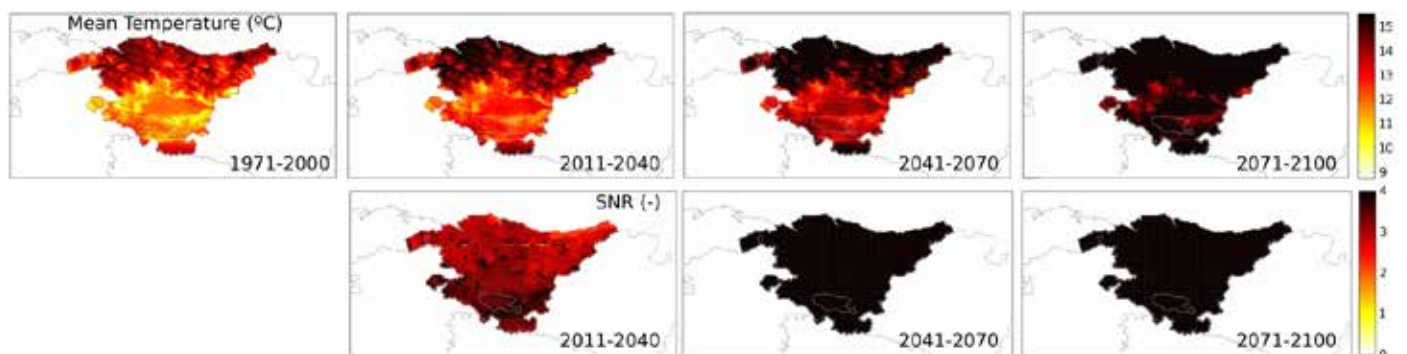


Figura 36. Proyecciones de temperatura media anual (arriba) y SNR de la señal (debajo) para los tres periodos futuros dada por la corrección GPQM.

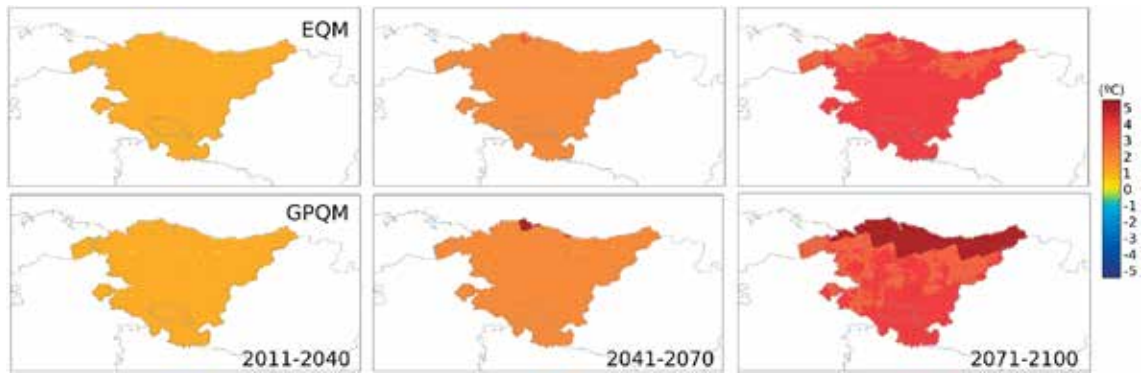


Figura 37. Cambio proyectado en la precipitación anual para los tres periodos futuros.

3.3.4. Escenarios de cambio climático (temperatura máxima)

En lo que se refiere a la temperatura máxima anual (Figura 38, Figura 39 y Figura 40), al igual que para la media, todas las proyecciones a partir del segundo periodo (2041-2070)

coinciden en el crecimiento de las temperaturas máximas en la CAPV.

Dicho incremento de la temperatura alcanzaría a finales de siglo los 4°C en el interior de la CAPV y entre 3°C y 4°C en la zona costera, mostrando un patrón espacial al similar reflejado por la temperatura media.

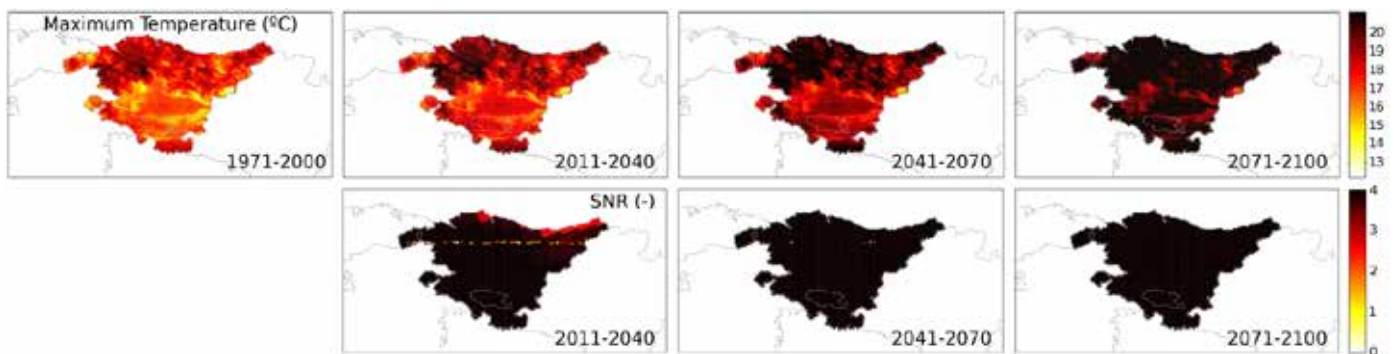


Figura 38. Proyecciones de temperatura máxima media anual (arriba) y SNR de la señal (debajo) para los tres periodos futuros dada por la corrección EQM.

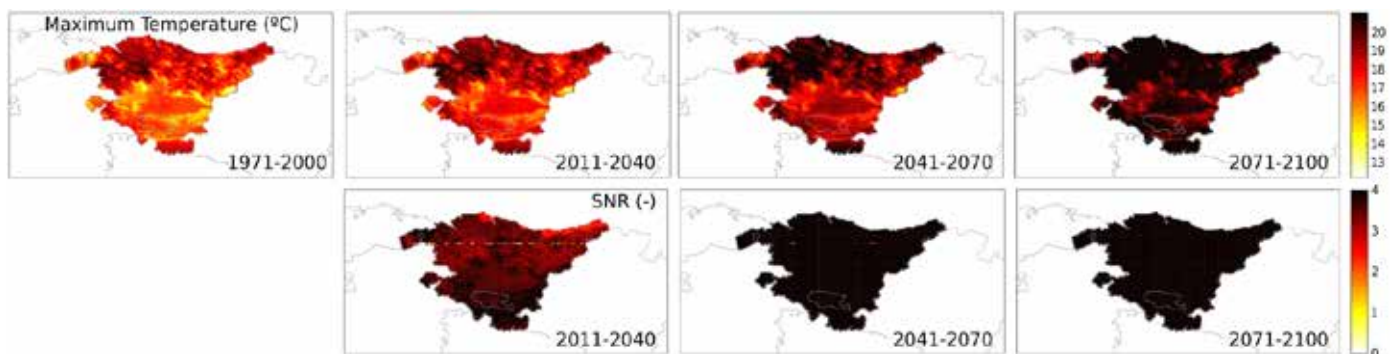


Figura 39. Proyecciones de temperatura máxima media anual (arriba) y SNR de la señal (debajo) para los tres periodos futuros dada por la corrección GPQM.

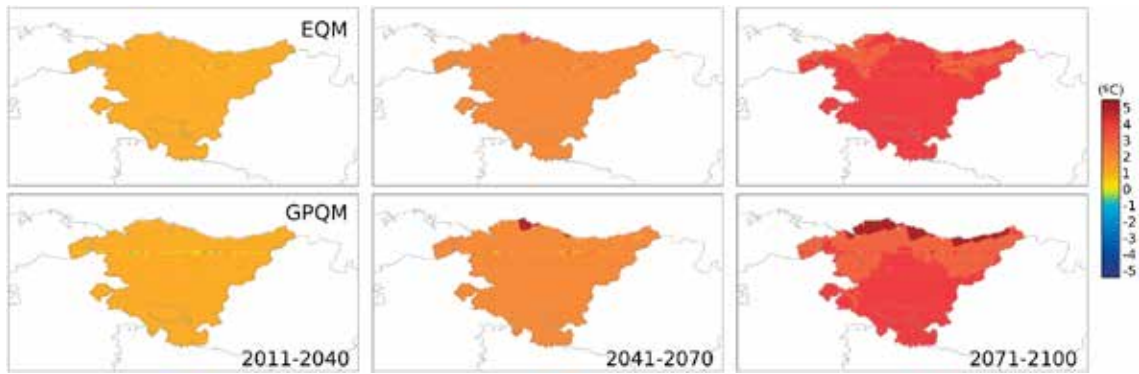


Figura 40. Cambio proyectado en la temperatura media máxima para los tres periodos futuros.

3.3.5. Escenarios de cambio climático (temperatura mínima)

Finalmente, los cambios proyectados para la temperatura mínima anual (Figura 41, Figura 42 y Figura 43) para los primeros dos periodos presentan el mismo patrón espacial que las temperaturas máxima y media, con un crecimiento generalizado en toda la CAPV, si bien la magnitud de este cambio es ligeramente inferior al proyectado para aqué-

llas. En el caso del tercer periodo (2071-2100) también se proyecta un incremento generalizado de la temperatura mínima pero de menor magnitud y con ciertas diferencias regionales en lo que respecta a la intensidad del cambio.

En relación a la coherencia en el signo del cambio por parte de los modelos, al igual que para la temperatura media y máxima, se registran valores por encima del 98.5% en toda la CAPV desde el primer periodo.

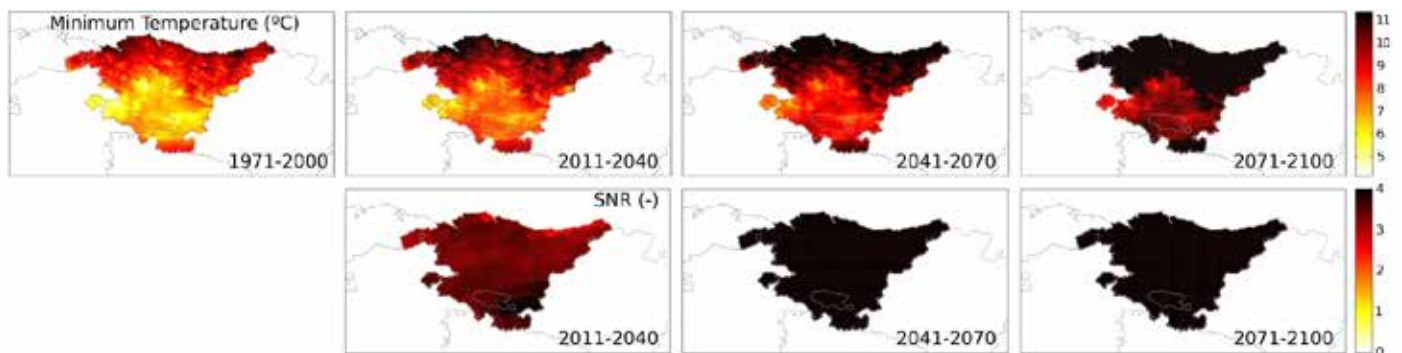


Figura 41. Proyecciones de temperatura mínima media anual (arriba) y SNR de la señal (debajo) para los tres periodos futuros dada por la corrección EQM.

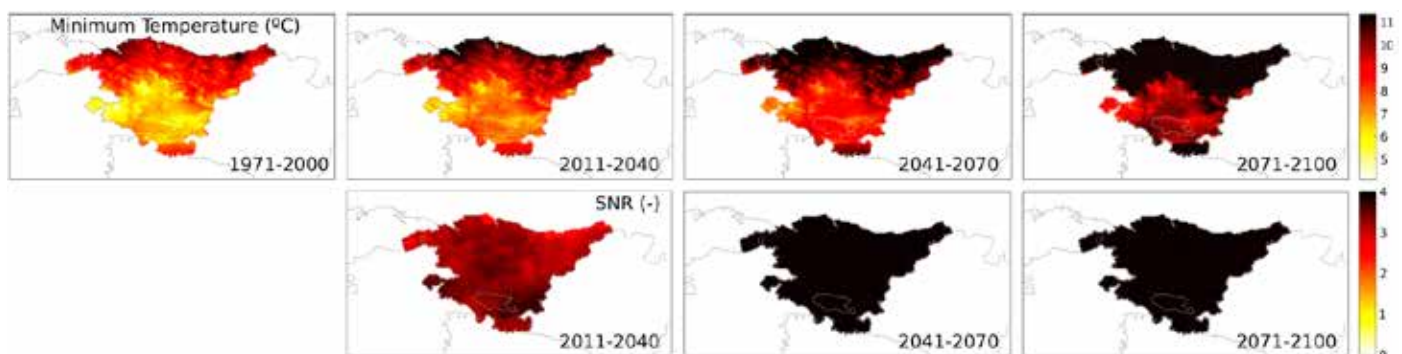


Figura 42. Proyecciones de temperatura mínima media anual (arriba) y SNR de la señal (debajo) para los tres periodos futuros dada por la corrección GPQM.

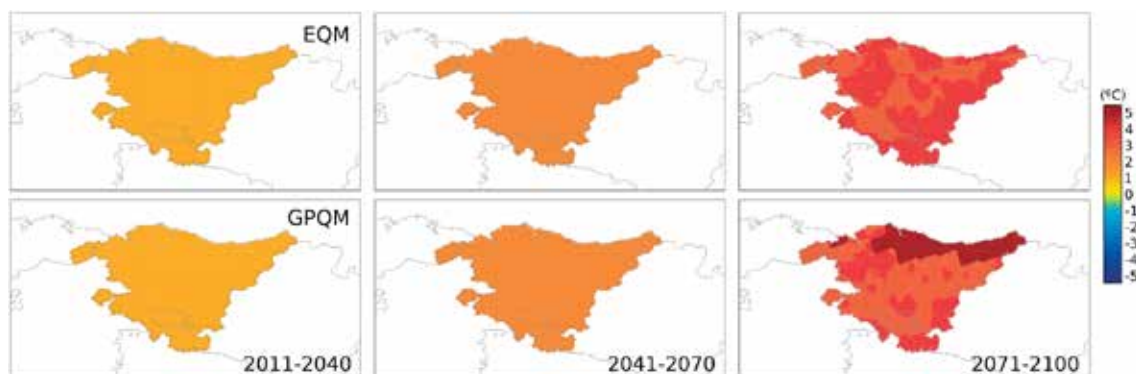


Figura 43. Cambio proyectado en la temperatura mínima media para los tres periodos futuros.

La conjunción de los cambios proyectados para las temperaturas máximas y mínimas, con un crecimiento de menor magnitud en este último caso, da lugar a un incremento en el rango medio de temperaturas en la CAPV, aumentando en promedio la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas diarias.

3.3.6. Escenarios de cambio climático (indicadores)

En el marco del proyecto, y en coordinación con lhobe, se definió un conjunto exhaustivo de indicadores con aplicaciones en sectores de impacto muy diversos (por ejemplo, salud, hidrología, agricultura, etc.) de modo que sirvan de soporte para otros proyectos de evaluación, mitigación, adaptación e impacto del cambio climático en la CAPV. En este apartado se analizan las proyecciones de algunos de los índices definidos en el marco del proyecto (Tabla 3).

En lo que respecta a los indicadores de precipitación, una mayor frecuencia de días sin precipitación y una mayor duración de las rachas de sequía es proyectada por los

modelos regionales con independencia del método de corrección de sesgos aplicado (Figura 44, Figura 45 y Figura 46).

Se observa la mayor incertidumbre para la precipitación máxima acumulada en 5 días (RX5DAY), en la cual hay regiones con crecimiento o decrecimiento dependiendo del método de corrección aplicado (Figura 44). Dicha incertidumbre se asocia a una menor coherencia entre los modelos respecto al signo de la señal de cambio, de modo que para este indicador no se obtiene un resultado concluyente.

En lo que respecta a los indicadores de temperatura, el interés se centró en la frecuencia anual de olas de calor (HWF) (Figura 47), entendiendo por olas de calor aquellas secuencias de al menos 5 días seguidos con temperaturas máximas por encima de un umbral dado (por ejemplo, 35°C o el percentil 95 de un periodo de referencia). En concordancia con lo observado en las proyecciones de temperatura, la frecuencia de olas de calor incrementa progresivamente a lo largo del siglo con una gran concordancia por parte de los modelos y métodos de corrección de sesgos de esta tendencia ascendente.

Acrónimo	Descripción	Unidades
Precipitación		
RX1day	Máximo acumulado en 5 días de precipitación	mm
RR1	Días de lluvia Pr>=1mm	días
CDD	Rachas de días con Pr < 1mm	días
Temperatura		
HWF	Número de olas de calor al año	1

Tabla 3. Indicadores sectoriales.

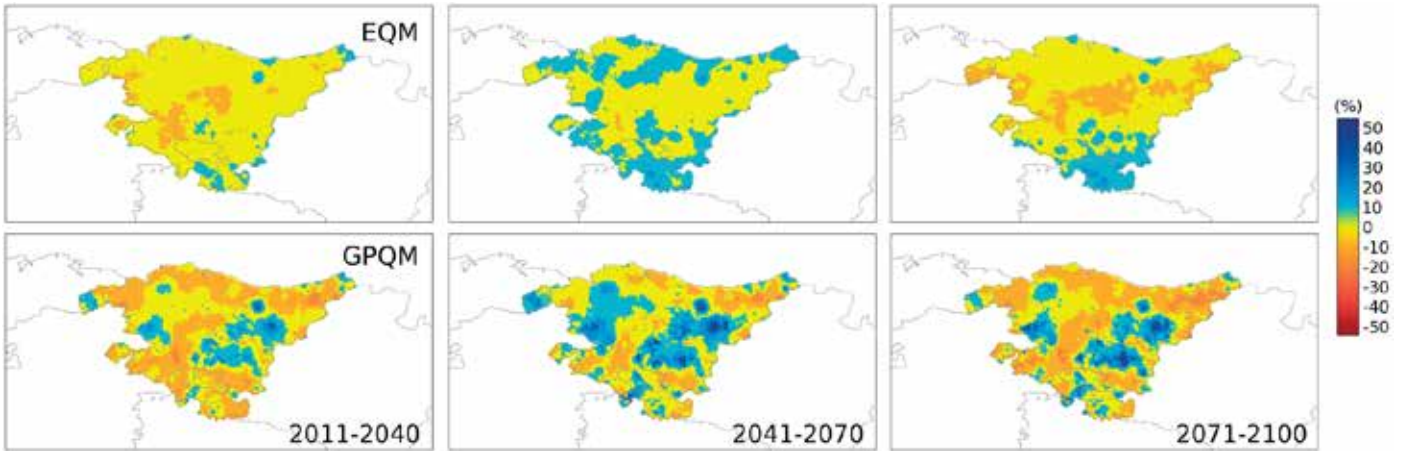


Figura 44. Cambio proyectado para el RX5DAY para los tres periodos futuros.

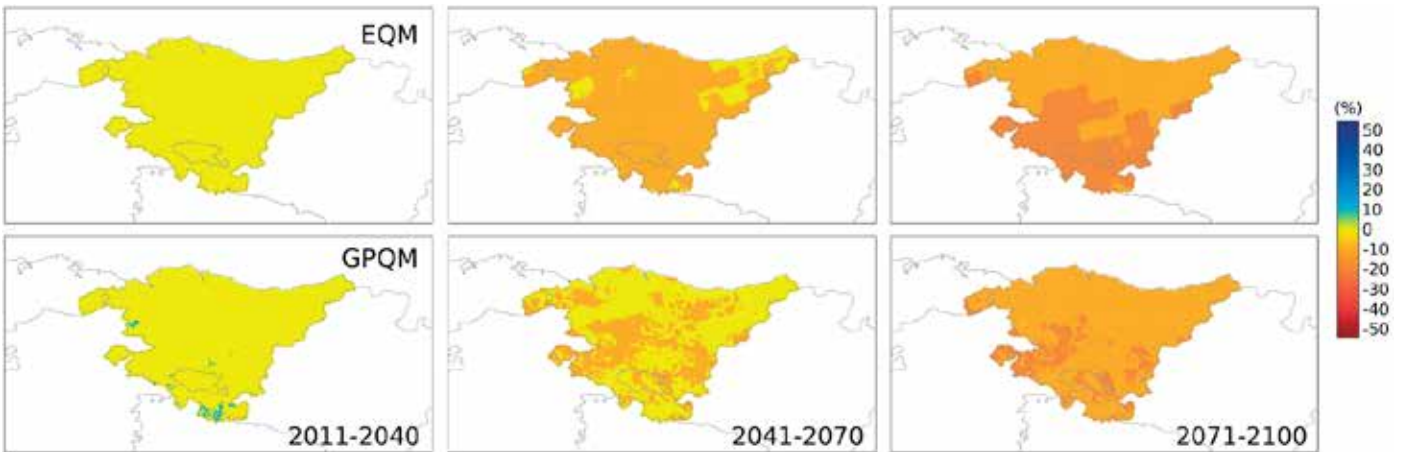


Figura 45. Cambio proyectado para el RR1 para los tres periodos futuros.

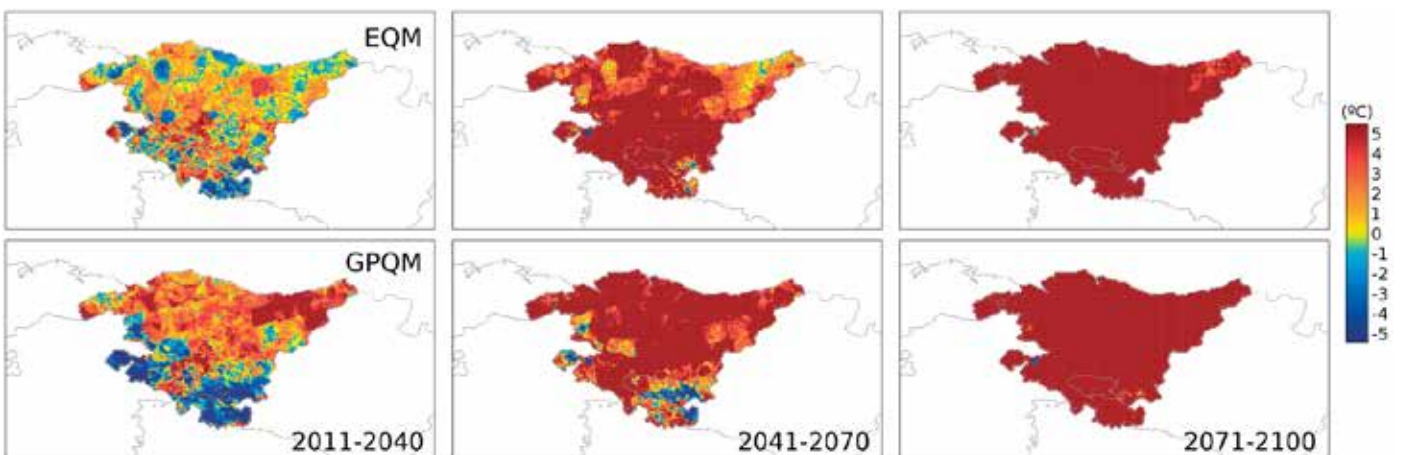


Figura 46. Cambio proyectado para el CDD para los tres periodos futuros.

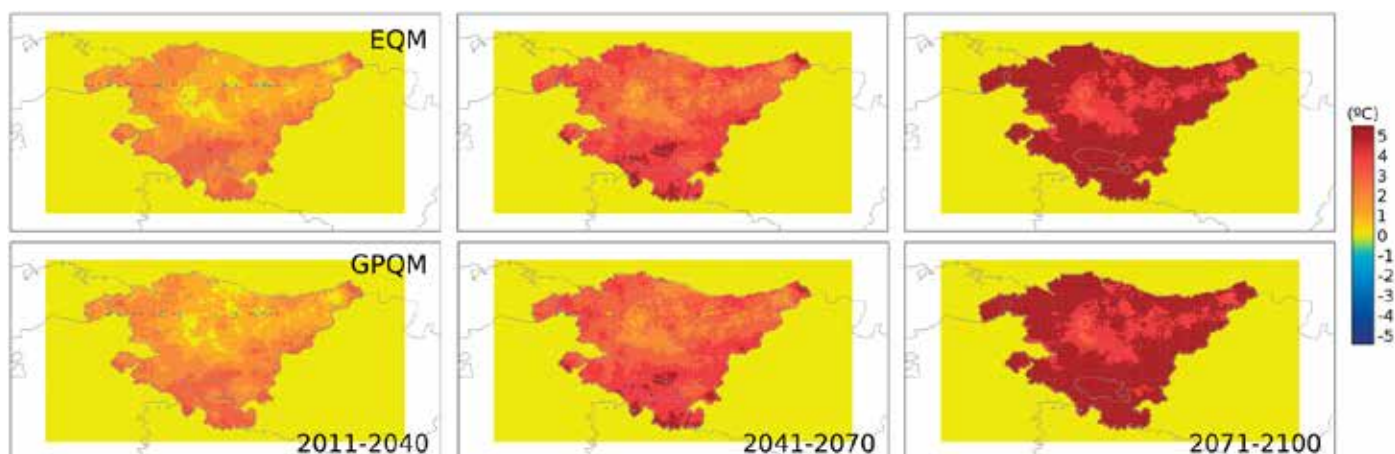


Figura 47. Cambio proyectado para el HWF para los tres periodos futuros.

3.4. Conclusiones

Esta Sección presenta la metodología propuesta para obtener proyecciones regionalizadas de cambio climático con corrección de sesgos en la CAPV, adecuadas para llevar a cabo estudios para la evaluación de los efectos del cambio climático. Los datos producidos como resultado de esta tarea serán las series diarias observadas de precipitación y temperatura para un periodo futuro (2011-2100), obtenidas a partir de simulaciones regionales del clima, adecuadamente calibradas en base a las observaciones históricas (rejilla de la CAPV a 1 km) para evitar los problemas introducidos por los sesgos de los modelos. El proceso de calibración se realiza ajustando estadísticamente la distribución de valores diarios simulados por los modelos en un periodo histórico (1971-2000) con la correspondiente distribución observada (rejilla de la CAPV a 1 km). Esta calibración se aplica posteriormente a los datos del escenario futuro. De esta manera, todos los modelos se calibran con la misma referencia y los cambios futuros se pueden obtener directamente como la diferencia entre la proyección calibrada y la observación.

Los datos utilizados para este trabajo proceden de la última generación de proyecciones regionales sobre Europa, dadas por el proyecto Euro-CORDEX, que proporciona un conjunto de 12 simulaciones alternativas producidas con diversas combinaciones de 5 modelos globales y 4 modelos regionales del clima sobre una misma rejilla (con 0.11° de resolución horizontal, equivalente a unos 11 km) para un escenario (RCP8.5 en este trabajo). El conjunto resultante caracteriza la incertidumbre existente debida al proceso de modelización global y regional (nótese que se considera un único escenario). Para calibrar las proyecciones

se ha considerado el conjunto de datos de observaciones interpoladas en una rejilla de 1km sobre la CAPV desarrollada de acuerdo a lo explicado en la Sección 3.2. La razón de elegir estos datos observaciones es doble: en primer lugar, estos datos se han obtenido interpolando espacialmente los datos puntuales de los observatorios disponibles en la CAPV, eliminando series cortas que pudiesen introducir tendencias espúreas, proporcionando así un producto homogéneo; por otro lado, los métodos de corrección de sesgos presentan distintos problemas cuando se utilizan datos puntuales para calibrar las proyecciones (ya que estas son representativas de promedios areales). De esta forma, aunque para algunas aplicaciones podría resultar más adecuado utilizar observaciones puntuales, se podrían generar artefactos estadísticos al calibrar las proyecciones climáticas con estos datos y, por tanto, resulta desaconsejable. Por tanto, la metodología y datos utilizados suponen un compromiso entre buenas prácticas y usabilidad y representatividad de los resultados, tratando de mantener un balance entre ambas.

Los resultados obtenidos muestran que los métodos de corrección de sesgos preservan, en líneas generales, adecuadamente la señal de cambio climático dada por los modelos y su aplicación a todos los modelos, variables y periodos, ha tenido como resultado la generación de los datos diarios proyectados, los cuales podrán ponerse a disposición de los usuarios para su utilización en otros análisis de impacto.

Una vez aplicadas las técnicas de corrección de sesgo a las proyecciones dadas por los modelos se ha obtenido, para todo el siglo XXI, un conjunto de proyecciones de alta resolución temporal (diaria) y espacial (1 km) calibradas para el escenario RCP8.5. A partir de dichas proyecciones se han estimado diferentes indicadores de interés, tanto para el presente proyecto como para otras iniciativas, y se

ha analizado su evolución a lo largo de tres periodos de referencia (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100).

En líneas generales, las proyecciones reflejan tendencias que, en parte, ya se aprecian en el periodo 1971-2016, aunque de forma más acusada. Así se esperaría un incremento significativo en los indicadores asociados a altas temperaturas (p.e. HWF) y/o periodos de sequía (p.e. RR1 y CDD), mientras que existe una mayor incertidumbre sobre la evolución de indicadores asociados a la torrencialidad de las precipitaciones (p.e. RX5DAY). A pesar del in-

cremento general en las temperaturas, éste es mayor para las temperaturas máximas que para las mínimas, dando lugar a un incremento en el rango de temperaturas promedio a medida que avanza el siglo XXI.

Tanto las proyecciones diarias como los diferentes indicadores se pondrán a disposición del público en diferentes portales de acceso, permitiendo la reproducción de los resultados mostrados en el presente informe y extender el análisis a otros indicadores de utilidad en otros ámbitos no analizados.

04

Conclusiones globales

En el marco del proyecto ESCENARIOS II (*“Escenarios regionales de cambio climático de alta resolución sobre el País Vasco. Fase II: datos diarios con metodologías de corrección de sesgo”*), se han abordado las carencias reflejadas por diferentes comunidades de impacto respecto a los escenarios generados en la Fase I (ESCENARIOS I). En particular, se propuso la obtención de escenarios de alta resolución, tanto temporal (diaria) como espacial (1km), para el escenario futuro RCP8.5 considerando las simulaciones desarrolladas en la iniciativa Euro-CORDEX.

Como resultado de esta segunda Fase (ESCENARIOS II), se han calibrado con diferentes métodos de corrección de sesgos, los cuales dan cuenta de la dispersión asociada a esta fuente de incertidumbre, las proyecciones desarrolladas en Euro-CORDEX para el escenario RCP8.5 utilizando como referencia la actualización del atlas climático de alta resolución de la CAPV realizada también en el marco de ESCENARIOS II. De este modo, se han obtenido proyecciones diarias calibradas para cada uno de los modelos regionales y método de corrección de sesgos considerados, las cuales permiten la estimación de un gran número de indicadores sectoriales para el análisis del impacto del cambio climático en la CAPV en ámbitos diferentes.

Tanto las proyecciones diarias como los diferentes indicadores definidos han sido estimados, almacenados en diferentes formatos y serán puestos a disposición de la comunidad para su utilización en estudios de impacto. En particular, se han considerado dos agregaciones estándares para la CAPV, municipios y cuencas hidrográficas, para las cuales han sido generados los datos en formato CSV, de uso más extendido entre las personas usuarias.

Del mismo modo, se han generado las proyecciones para los indicadores y periodos futuros definidos en formato ESRI-ASCII, el cual es accesible desde cualquier entorno SIG (Sistemas de Información Geográfica). Para un usuario experto los datos se han almacenado en formato NetCDF, el cual es el formato estándar en la comunidad climática ya que permite un óptimo almacenamiento y la inclusión de información relevante para la interpretación de los datos distribuidos.

En virtud de los puntos anteriores, esta Fase II de *“Escenarios regionales de cambio climático de alta resolución sobre el País Vasco”* resuelve, por un lado, las necesidades identificadas en la Fase I (ESCENARIOS I) por la comunidad de impactos y establece las bases tanto metodológicas como climáticas para el desarrollo de proyectos de evaluación, mitigación y adaptación al cambio climático de la CAPV.

Referencias

-
- AEMET (2011). *Atlas Climático Ibérico*, Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino – Instituto de Meteorología de Portugal, ISBN: 978-84-7837-079-5.
 - Atkinson P.M. y Lloyd C.D. (1998). *Mapping precipitation in Switzerland with ordinary and indicator kriging*, J. Geogr. Inf. Decis. Anal., 2, 65–76.
 - Biau G., Zorita E., von Storch H. y Wackernagel H. (1999). *Estimation of precipitation by kriging in the EOF space of the sea level pressure field*. J. Climate, 12, 1070–1085.
 - Casanueva, A., Kotlarski, S., Herrera, S., Fernandez, J., Gutierrez, J.M., Boberg, F., Colette, A., Christensen, O.B., Goergen, K., Jacob, D., Keuler, K., Nikulin, G., Teichmann, C. y Vautard, R. (2015): *Daily precipitation statistics in a EUROCORDEX RCM ensemble: added value of raw and bias-corrected high-resolution simulations*. Climate Dynamics, 47 (3), 719-737.
 - Christensen, J. H., T. R. Carter, M. Rummukainen, and G. Amanatidis (2007). *Evaluating the performance and utility of regional climate models: The PRUDENCE project*, *Clim. Change*, 81, 1–6, doi:10.1007/s10584-006-9211-6.
 - Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton (2007). *Regional Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 - Collins M, Knutti R, Arblaster J, Dufresne JL, Fichet T, Friedling-stein P, Gao X, Gutowski W, Johns T, Krinner G, Shongwe M, Tebaldi C, Weaver A and Wehner M (2013) *Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility*, book section 12, page 1029–1136. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 - Déqué, M., Somot, S., Sanchez-Gomez, E., Goodess, C.M., Jacob, D., Lenderink, G. and Christensen, O.B. (2012): *The spread amongst ENSEMBLES regional scenarios: regional climate models, driving general circulation models and interannual variability*. Climate Dynamics, 38(5-6):951–964.
 - Gaertner, M.A., Gutierrez, J.M., Castro, M. (2012): *Escenarios regionales de cambio climático*. Revista Española de Física, 26 , pp. 34-42.
 - Giorgi F., Jones C. y Asrar G. (2009). *Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework*. WMO Bulletin 58(3), 175-183.
 - Gutiérrez, J. M., et al. (2010). *Escenarios Regionales Probabilísticos de cambio climático en Cantabria: Termoplumiometría*. Gobierno de Cantabria-Consejería de Medio Ambiente y Universidad de Cantabria, Santander, Spain, URL <http://www.meteo.unican.es/projects/escenariosCantabria>.
 - Gutiérrez, J.M. et al. (2017). *An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment*. International Journal of Climatology, in press (see also <http://www.value-cost.eu>).
 - Gutjahr, O. and Heinemann, G. (2013): *Comparing precipitation bias correction methods for high-resolution regional climate simulations using COSMO-CLM*, *Theoretical and Applied Climatology*, 114, 511-529.

- Haylock M, Hofstra N, Klein-Tank A, Klok EJ, Jones P y New M. (2008). *A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006*. J. Geophys. Res., 113, D20119, doi: 10.1029/2008JD010201.
- Herrera, S. (2011). *Desarrollo, validación y aplicaciones de Spain02: Una rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitación y temperatura en España*. PhD thesis, Universidad de Cantabria, Cantabria, España. <http://www.meteo.unican.es/tesis/herrera>.
- Herrera S., Gutiérrez J.M., Ancell R., Pons M.R., Frías M.D. y Fernández, J. (2012). *Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02)*. Int. J. Climatology, 32, 74-85, doi: 10.1002/joc.2256.
- Herrera S., Fernández, J. y Gutiérrez J.M. (2016). *Update of the Spain02 Gridded Observational Dataset for Euro-CORDEX evaluation: Assessing the Effect of the Interpolation Methodology*. Int. J. Climatology, 36, 900-908, doi: 10.1002/joc.4391.
- Jacob, D., et al. (2014): *EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research*. Regional Environmental Change, 14(2):563-578.
- Krige D.G. (1951). *A statistical approach to some basic mine valuation problems on the witwatersrand*. J. Chem. Metallurg. Mining Soc. S. Afr., 52 (6), 119-139.
- Panofsky, H.A. and Wilson, B.G. (1968): *Some applications of statistics to meteorology*. University Park : Penn. State University, College of Earth and Mineral Sciences.
- Ruane, A.C., and McDermid, S.P. (2017): *Selection of a Representative Subset of Global Climate Models That Captures the Profile of Regional Changes for Integrated Climate Impacts Assessment*. Earth Perspectives 4 (1):1. <https://doi.org/10.1186/s40322-017-0036-4>.
- van der Linden, P. and Mitchell, J.F.B. (2009). *ENSEMBLES: Climate change and its impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp.
- Weigel, A.P., Knutti, R., Liniger, M.A., and Appenzeller, C. (2010): *Risks of Model Weighting in Multimodel Climate Projections*. Journal of Climate 23 (15):4175–4191. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3594.1>.
- Wilcke, R.A.I., Mendlik, T., and Gobiet, A. (2013): *Multi-variable error correction of regional climate models*. Climatic Change, 120, 871-887.
- Zahn, M. and von Storch, H. (2010): *Decreased frequency of North Atlantic polar lows associated with future climate warming*. Nature, 467, 309–312.

Anexo

Descripción de indicadores climáticos

A continuación se describen someramente todos los indicadores calculados en el marco del proyecto titulado “Elaboración de escenarios regionales de cambio climático de alta resolución sobre el País Vasco” (proyecto con el acrónimo ESCENARIOS en la convocatoria Klimatek 2016).

Muchos de los indicadores calculados corresponden a las definiciones del ETCCDI (*Expert Team on Climate Change Detection and Indices*) y su descripción detallada se puede encontrar en la web <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>. No obstante, algunos de los índices se han calculado por requerimiento expreso de grupos de investigación de la CAPV.

A. Indicadores que combinan varias variables básicas (“COMBO”)

CD

Descripción: número de días fríos/secos (TG < percentil 25 y RR < percentil 25) (días).

Número de días en los que se cumplen las dos condiciones siguientes simultáneamente:

- Temperatura media diaria (TG) < percentil 25 de la temperatura media diaria, y
- Cantidad de precipitación diaria (RR) < percentil 25 de las cantidades diarias.

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

CW

Descripción: Número de días fríos y húmedos (TG < percentil 25 y RR > percentil 75) (días).

Número de días en los que se dan simultáneamente las dos condiciones siguientes:

- La temperatura media diaria (TG) < percentil 25 de las TG, y
- La precipitación diaria (RR) > percentil 75 de las RR.

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

DTR

Descripción: rango diario de temperatura (°C).

Es el valor promedio, para un periodo j , de la diferencia entre la temperatura máxima diaria (TX_j) y la temperatura mínima diaria (TN_j).

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

ETR

Descripción: Rango de temperatura extrema intra-periodo (°C).

Siendo TX_{ij} y TN_{ij} las temperaturas diarias máxima y mínima en el día i del periodo j , entonces, el rango de temperatura extrema del periodo j es:

$$ETR_j = \max(TX_{ij}) - \min(TN_{ij})$$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

FRD

Descripción: Número de días con lluvia helada ($TX < 0^\circ\text{C}$ y $RR > 0.5$ mm).

Número de días en los que se cumplen las dos condiciones siguientes simultáneamente:

- Temperatura máxima diaria (TX) $< 0^\circ\text{C}$, y
- Cantidad de precipitación diaria (RR) > 0.5 mm.

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

FTD

Descripción: Número de días con temperaturas cruzando los 0°C ($TN < 0^\circ\text{C}$ y $TX > 0^\circ\text{C}$) (días).

Son los días en los que se traspasa el umbral de 0°C a lo largo del día, porque:

- La temperatura mínima diaria (TN) es menor que 0°C y
- La temperatura máxima diaria (TX) es mayor que 0°C .

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

WD

Descripción: Número de días cálidos/secos.

Número de días en los que se cumplen las dos condiciones siguientes simultáneamente:

- Temperatura media diaria (TG) $>$ percentil 75 de la temperatura media diaria, y
- Cantidad de precipitación diaria (RR) $<$ percentil 25 de las cantidades diarias.

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

WW

Descripción: número de días cálidos y húmedos ($TG >$ percentil 75 y $RR >$ percentil 75) (días).

Número de días en los que se dan simultáneamente las dos condiciones siguientes:

- La temperatura media diaria (TG) $>$ percentil 75 de las TG , y
- La precipitación diaria (RR) $>$ percentil 75 de las RR .

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

B. Evapotranspiración de referencia

ET0

Descripción: evapotranspiración de referencia (mm).

Es la evapotranspiración de referencia calculada mediante la formulación propuesta por Ur Agentzia, que está basada en el método *FAO Penman-Monteith* (Allen⁵ et al., 1998) y resumida en la ecuación siguiente (Ecuación 6, de Allen et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

Donde:

- ET_0 = evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).
- Δ = pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹) (Ecuación 13 de Allen et al., 1998).
- T = temperatura media del aire a 2 m de altura (°C).
- u_2 = velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹), que se asumió igual a 2 m s⁻¹.
- e_s = presión de vapor de saturación (kPa) (Ecuación 11 de Allen et al., 1998).
- e_a = presión real de vapor (kPa). Al aplicar la ecuación 14 de Allen et al. (1998), se asumió que la temperatura de rocío es igual a la temperatura mínima.
- $e_s - e_a$ = déficit de presión de vapor (kPa).
- γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹) (Ecuación 16 de Allen et al., 1998).
- G = flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹). Se asumió que era despreciable en comparación con la R_n .
- R_n = radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹). Es la diferencia entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{nl}) (Ecuación 40 de Allen et al., 1998).

A la hora de calcular la radiación neta (R_n), se aplicó:

- La Ecuación 38 de Allen et al. (1998), para estimar la R_{ns} (asumiendo un albedo = 0.25).
- La ecuación 39 de Allen et al. (1998), para estimar la R_{nl} (asumiendo que la constante de Stefan-Boltzmann = $4.903 \cdot 10^{-9}$ MJ K⁻⁴ m⁻² día⁻¹).

En ambos casos es necesario estimar la radiación solar incidente (R_s), que fue calculada mediante la ecuación desarrollada por Hargreaves y Samani (Ecuación 50 de Allen et al., 1998):

$$R_s = k_{RS} \times R_a \times \sqrt{TX - TN}$$

⁵ Allen R.G., Pereira L. S., Raes D. and Smith M. 1998. FAO, *Irrigation and Drainage Paper 56. Crop evapotranspiration (Guidelines for computing crop water requirements)*. Rome, Italy, 300 pp.

Donde:

- R_s = radiación solar diaria ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).
- R_a = radiación extraterrestre diaria ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) (Ecuación 21 de *Allen et al.*, 1998).
- TX = temperatura máxima del aire ($^{\circ}\text{C}$).
- TN = temperatura mínima del aire ($^{\circ}\text{C}$).
- k_{RS} = coeficiente de ajuste ($^{\circ}\text{C}^{-0.5}$). Es un coeficiente empírico que oscila entre 0.162 y 0.19. En zonas de interior se utilizó un valor de $k_{RS} = 0.16$, mientras que en las zonas costeras se utilizó un valor de $k_{RS} = 0.19$. Se introdujo una modificación, respecto a la formulación propuesta por Ur Agentzia, en cuanto a la consideración de localizaciones de interior y de costa. Estas localizaciones se definieron en base a la distancia a costa y la existencia de bloqueos orográficos hacia el norte que limitaban la influencia de las masas de aire provenientes del Mar Cantábrico. En la Figura 48 se muestran los puntos de rejilla resultantes definidos como “costa” según los criterios anteriores.

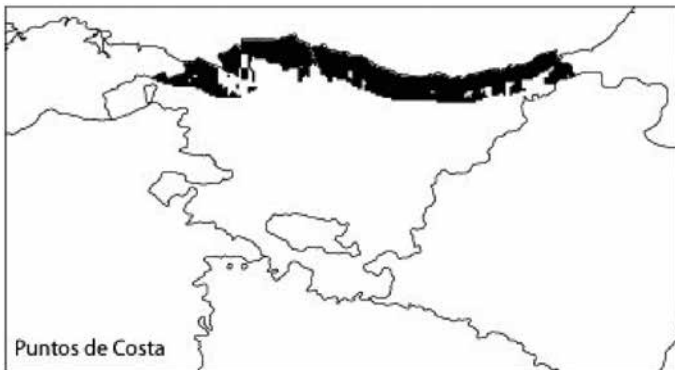


Figura 48. Zona considerada costera en la CAPV a efectos de cálculo de la evapotranspiración de referencia, siguiendo las directrices de la metodología propuesta por la FAO (Cuaderno nº 56, *Allen et al.*, 1998).

C. Indicadores calculados a partir de precipitaciones

CDD

Descripción: Máximo del número de días secos consecutivos ($\text{RR} < 1 \text{ mm}$) (días).

Es la longitud máxima de rachas secas. Es el mayor número de días consecutivos en los cuales:

($\text{RR}_i < 1 \text{ mm}$ (siendo RR_i es la cantidad de precipitación diaria para el día i del periodo j)).

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

CWD

Descripción: Número máximo de días húmedos consecutivos (días).

El indicador contabiliza, para el periodo j , el mayor número de días consecutivos con:

- $\text{RR}_i \geq 1 \text{ mm}$ (siendo RR_i es la cantidad de precipitación diaria para el día i del periodo j).

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

PRCPR95

Descripción: Percentil 95 de la precipitación ($\text{RR} > 1.0 \text{ mm}$) (mm).

Se entiende por precipitación aquella precipitación diaria que supera 1 mm ($\text{RR} > 1.0 \text{ mm}$), es decir, la de días húmedos.

PRCPR99

Descripción: Percentil 99 de la precipitación ($\text{RR} > 1.0 \text{ mm}$) (mm).

Se entiende por precipitación aquella precipitación diaria que supera 1 mm ($\text{RR} > 1.0 \text{ mm}$), es decir, la de días húmedos.

PRCPTOT

Descripción: Precipitación total de días húmedos ($\text{RR} \geq 1 \text{ mm}$) (mm).

Es la suma de las precipitaciones ocurridas en los días húmedos de un periodo j .

Se entiende por día húmedo aquél en el que la precipitación es igual o superior a 1 mm ($\text{RR} \geq 1.0 \text{ mm}$).

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

R10mm

Descripción: Número de días con precipitaciones fuertes (precipitación $\geq 10 \text{ mm}$) (días).

Es el número de días con:

$\text{RR}_i \geq 10 \text{ mm}$ (donde RR_i es la precipitación diaria para el día i del periodo j).

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

R20mm

Descripción: Número de días con precipitaciones muy fuertes (precipitación $\geq 20 \text{ mm}$) (días).

Es el número de días con:

$\text{RR}_i \geq 20 \text{ mm}$ (donde RR_i es la precipitación diaria para el día i del periodo j).

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

R95p

Descripción: Número de días muy húmedos (días).

Número de días con precipitación (RR) > percentil 95 de las cantidades diarias.

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

R95pTOT

Descripción: Proporción de la precipitación debida a días muy húmedos (> percentil 95) (%).

Porcentaje de la precipitación total asociada a los días con precipitaciones superiores al percentil 95 (%).

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

R99pTOT

Descripción: Proporción de la precipitación debida a días extremadamente húmedos (> percentil 99) (%).

Porcentaje de la precipitación total asociada a los días con precipitaciones superiores al percentil 99 (%).

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

RR1

Descripción: Número de días húmedos ($RR \geq 1$ mm) (días).

Número de días con precipitación igual o superior a 1 mm:

$RR_{ij} \geq 1$ mm (donde RR_{ij} es la precipitación diaria para el día i del periodo j).

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

RV10year

Descripción: precipitación media máxima asociada a un periodo de retorno de 10 años (mm).

Se calcula ajustando una distribución Generalizada de Valores Extremos (GEV) a los valores de precipitación máxima anuales. Dicho ajuste asume que los valores máximos anuales de precipitación son independientes e igualmente distribuidos. Para cada punto (observación, punto de grid o punto de la malla de Euro-CORDEX) se calcula la serie de máximos anuales de precipitación y se obtienen los tres parámetros de la GEV: localización, escala y forma. En función del parámetro de forma se distinguen tres tipos de distribución, *Gumbel* (forma=0), *Frèchet* (forma>0) y *Weibull* (forma<0), en función de que la probabilidad de valores altos decaiga de forma exponencial, polinomial o exista una cota a partir de la cual la probabilidad de ocurrencia es 0, respectivamente.

Los parámetros se ajustan para maximizar la verosimilitud. En el caso de que el intervalo de confianza al 95% del parámetro de forma contenga el valor 0, éste parámetro se define como 0 y se re-estiman el resto con esta restricción.

Finalmente, una vez estimados los parámetros de la función de distribución GEV (F), ésta puede ser utilizada para calcular los valores de retorno a cualquier periodo dado (T), sin más que obtener el cuartil (q) el cual se sobrepasa con probabilidad $1/T$, es decir $F(q)=1-1/T$. En este caso, el valor de T viene dado en años y se corresponderá con $T=10$.

RV25year

Descripción: precipitación media máxima asociada a un periodo de retorno de 25 años (mm).

(Ver “RV10year” para más información)

RV50year

Descripción: precipitación media máxima asociada a un periodo de retorno de 50 años (mm).

(Ver “RV10year” para más información)

RV100year

Descripción: precipitación media máxima asociada a un periodo de retorno de 100 años (mm).

(Ver “RV10year” para más información)

Rx1day

Descripción: Máximo de la precipitación acumulada en 1 día (mm).

Es la precipitación máxima acumulada en un día para el periodo j :

$$RX1day_j = \max(RR_{ij})$$

Donde, RR_{ij} es la precipitación diaria para el día i del periodo j .

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

Rx5day

Descripción: Máximo de la precipitación acumulada en 5 días (mm).

Es la precipitación máxima acumulada de cinco días para el periodo j :

$$RX5day_j = \max(RR_{kj})$$

Donde, RR_{kj} es la cantidad de precipitación para un intervalo k de cinco días del periodo j , donde k viene definido por el último día.

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

SDII

Descripción: Índice de intensidad diaria simple (mm/día húmedo).

Es el valor promedio de la cantidad de precipitación ocurrida en los días húmedos ($RR \geq 1.0$ mm) de un periodo j .

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

D. Indicadores calculados a partir de temperaturas medias

COLDDD (Cooling degree days)

Descripción: Número de días asociados al uso de aire acondicionado considerando el umbral estándar 22.0°C, es decir, con temperaturas medias superiores a 22.0°C.

GSL

Descripción: duración o longitud de la estación de crecimiento (días).

Es el número de días que transcurren entre:

- El primer episodio con al menos 6 días consecutivos con:
 $TG_{ij} > 5 \text{ °C}$ (donde, TG_{ij} es la temperatura media para el día i del periodo j)
- El primer episodio después del 1 de julio con al menos 6 días consecutivos con:
 $TG_{ij} < 5 \text{ °C}$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

HEATDD (Heating degree days)

Descripción: Número de días asociados al uso de calefacción considerando el umbral estándar 15.5°C, es decir, con temperaturas medias inferiores a 15.5°C.

TG

Descripción: media de temperaturas medias diarias (°C).

Es el valor promedio de las temperaturas medias diarias (TG_{ij}) de un periodo j .

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

TG05A

Descripción: Número de días con temperatura media superior a 5°C ($TG_{ij} > 5$) (días).

TG05B

Descripción: Número de días con temperatura media inferior a 5°C ($TG_{ij} < 5$) (días).

TG10A

Descripción: Número de días con temperatura media superior a 10°C ($TG_{ij} > 10$) (días).

TG10B

Descripción: Número de días con temperatura media inferior a 10°C ($TG_{ij} < 10$) (días).

E. Indicadores calculados a partir de temperaturas máximas

HWA

Descripción: Temperatura máxima media durante la ola de calor (°C).

Es el promedio de las temperaturas máximas diarias durante un evento de ola de calor.

La ola de calor se define como WSDI, es decir, rachas de al menos 6 días consecutivos con $TX >$ percentil 90 (donde, TX es la temperatura máxima diaria).

HWF

Descripción: Duración de olas de calor (días/ola).

Es la longitud de los eventos de ola de calor, concretamente, el promedio del número de días que componen una ola de calor.

La ola de calor se define como WSDI, es decir, rachas de al menos 6 días consecutivos con $TX >$ percentil 90 (donde, TX es la temperatura máxima diaria).

ID

Descripción: Número de días con helada ($TX < 0^\circ\text{C}$) (días).

Es, para el período j , el número de días con una temperatura máxima diaria (TX_{ij}) inferior a 0°C:

$TX_{ij} < 0^\circ\text{C}$.

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

PRCTX10

Descripción: Percentil 10 de las temperaturas máximas diarias (TX) (°C).

Se entiende por TX_{ij} la temperatura máxima diaria del día i en el periodo j .

PRCTX90

Descripción: Percentil 90 de las temperaturas máximas diarias (TX) (°C).

Se entiende por TX_{ij} la temperatura máxima diaria del día i en del periodo j .

PRCTX95

Descripción: Percentil 95 de las temperaturas máximas diarias (TX) (°C).

Se entiende por TX_{ij} la temperatura máxima diaria del día i en del periodo j .

SU

Descripción: número de días de verano (TX > 25°C) (días).

Es el número de días en los cuales se superan los 25°C:
 $TX_{ij} > 25^\circ\text{C}$ (donde, TX_{ij} es la temperatura máxima diaria el día i del periodo j).
(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

SU30

Descripción: número de días con TX > 30°C (días).

Es el número de días en los cuales se superan los 30°C:
 $TX_{ij} > 30^\circ\text{C}$ (donde, TX_{ij} es la temperatura máxima diaria el día i del periodo j).

SU30EX

Descripción: magnitud media de las temperaturas que exceden de una TX = 30°C.

Sea TX la temperatura máxima diaria. Este indicador es el valor promedio de la diferencia entre la TX en los días en que se supera el umbral de 30°C y dicho umbral (30°C).

SU33

Descripción: número de días con TX > 33°C (días).

Es el número de días en los cuales se superan los 33°C:
 $TX_{ij} > 33^\circ\text{C}$ (donde, TX_{ij} es la temperatura máxima diaria el día i del periodo j).

SU33EX

Descripción: magnitud media de las temperaturas que exceden de una TX = 33°C.

Sea TX la temperatura máxima diaria. Este indicador es el valor promedio de la diferencia entre la TX en los días en que se supera el umbral de 33°C y dicho umbral (33°C).

SU34

Descripción: número de días con TX > 34°C (días).

Es el número de días en los cuales se superan los 34°C:
 $TX_{ij} > 34^\circ\text{C}$ (donde, TX_{ij} es la temperatura máxima diaria el día i del periodo j).

SU34EX

Descripción: magnitud media de las temperaturas que exceden de una TX = 34°C.

Sea TX la temperatura máxima diaria. Este indicador es el valor promedio de la diferencia entre la TX en los días en que se supera el umbral de 34°C y dicho umbral (34°C).

SU35

Descripción: número de días con TX > 35°C (días).

Es el número de días en los cuales se superan los 35°C:
 $TX_{ij} > 35^\circ\text{C}$ (donde, TX_{ij} es la temperatura máxima diaria el día i del periodo j).

SU35EX

Descripción: magnitud media de las temperaturas que exceden de una TX = 35°C.

Sea TX la temperatura máxima diaria. Este indicador es el valor promedio de la diferencia entre la TX en los días en que se supera el umbral de 35°C y dicho umbral (35°C).

SU36

Descripción: número de días con TX > 36°C (días).

Es el número de días en los cuales se superan los 36°C:
 $TX_{ij} > 36^\circ\text{C}$ (donde, TX_{ij} es la temperatura máxima diaria el día i del periodo j).

SU36EX

Descripción: magnitud media de las temperaturas que exceden de una TX = 36°C.

Sea TX la temperatura máxima diaria. Este indicador es el valor promedio de la diferencia entre la TX en los días en que se supera el umbral de 36°C y dicho umbral (36°C).

SU37

Descripción: número de días con TX > 37°C (días).

Es el número de días en los cuales se superan los 37°C:
 $TX_{ij} > 37^\circ\text{C}$ (donde, TX_{ij} es la temperatura máxima diaria el día i del periodo j).

SU37EX

Descripción: magnitud media de las temperaturas que exceden de una TX = 37°C.

Sea TX la temperatura máxima diaria. Este indicador es el valor promedio de la diferencia entre la TX en los días en que se supera el umbral de 37°C y dicho umbral (37°C).

SU38

Descripción: número de días con TX > 38°C (días).

Es el número de días en los cuales se superan los 38°C: $TX_{ij} > 38^\circ\text{C}$ (donde, TX_{ij} es la temperatura máxima diaria el día i del periodo j).

SU38EX

Descripción: magnitud media de las temperaturas que exceden de una TX = 38°C.

Sea TX la temperatura máxima diaria. Este indicador es el valor promedio de la diferencia entre la TX en los días en que se supera el umbral de 38°C y dicho umbral (38°C).

SU39

Descripción: número de días con TX > 39°C (días).

Es el número de días en los cuales se superan los 39°C: $TX_{ij} > 39^\circ\text{C}$ (donde, TX_{ij} es la temperatura máxima diaria el día i del periodo j).

SU39EX

Descripción: magnitud media de las temperaturas que exceden de una TX = 39°C.

Sea TX la temperatura máxima diaria. Este indicador es el valor promedio de la diferencia entre la TX en los días en que se supera el umbral de 39°C y dicho umbral (39°C).

SU40

Descripción: número de días con TX > 40°C (días).

Es el número de días en los cuales se superan los 40°C: $TX_{ij} > 40^\circ\text{C}$ (donde, TX_{ij} es la temperatura máxima diaria el día i del periodo j).

SU40EX

Descripción: magnitud media de las temperaturas que exceden de una TX = 40°C.

Sea TX la temperatura máxima diaria. Este indicador es el valor promedio de la diferencia entre la TX en los días en que se supera el umbral de 40°C y dicho umbral (40°C).

TX

Descripción: media de temperaturas máximas diarias (°C).

Es el valor promedio de las temperaturas máximas diarias (TX_{ij}) de un periodo j .

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

TX10p

Descripción: Número de días fríos (TX < percentil 10 de las TX).

Es el número de días en los que la temperatura máxima diaria de un periodo j (TX_{ij}) es inferior al percentil 10 ($TX_{in,10}$):

$$TX_{ij} < TX_{in,10}$$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

TX90P

Descripción: Número de días cálidos (TX > percentil 90 de las TX).

Es el número de días en los que la temperatura máxima diaria de un periodo j (TX_{ij}) es superior al percentil 90 ($TX_{in,90}$):

$$TX_{ij} > TX_{in,90}$$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

TXn

Descripción: Mínimo de las temperaturas máximas diarias (°C).

Es el valor mínimo, para el periodo j , de las temperaturas máximas diarias (TX_{ij}):

$$TX_{jn} = \min(TX_{ij})$$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

TXx

Descripción: Máximo de las temperaturas máximas diarias (°C).

Es el valor máximo, para el periodo j , de las temperaturas máximas diarias (TX_{ij}):

$$TX_{jx} = \max(TX_{ij})$$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

WSDI

Descripción: Índice de número de rachas cálidas u “olas de calor” (eventos).

Este indicador define la ola de calor como una racha de al menos 6 días consecutivos con temperaturas máximas diarias (TX_{ij}) superiores al percentil 90 ($TX_{in,90}$):

$$TX_{ij} > TX_{in,90}$$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

Además de WSDI (el número de olas de calor que ocurren a lo largo del año), se han definido otros indicadores relacionados con las olas de calor: HWF (la duración media de cada ola de calor) o HWA (la media de las temperaturas máximas diarias alcanzadas en los días de ola de calor).

F. Indicadores calculados a partir de temperaturas mínimas

CFD

Descripción: número máximo de días de helada consecutivos ($TN < 0^{\circ}C$) (días).

Es, en un periodo j , el mayor número de días consecutivos en los cuales la temperatura mínima diaria (TN_{ij}) es inferior a $0^{\circ}C$:

$$TN_{ij} < 0^{\circ}C$$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

CSDI

Descripción: Índice de duración de rachas frías u “olas de frío” (días).

Es el número de días para un periodo j donde, en intervalos de al menos 6 días consecutivos, la temperatura mínima diaria (TN_{ij}) es inferior al percentil 10 (TN_{in10}):

$$TN_{ij} < TN_{in10}$$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

FD

Descripción: Número de días de helada ($TN < 0^{\circ}C$) (días).

Es, para el periodo j , el número de días con temperaturas mínimas diarias (TN_{ij}) inferiores a $0^{\circ}C$:

$$TN_{ij} < 0^{\circ}C$$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

PRCTN10

Descripción: Percentil 10 de las temperaturas mínimas diarias (TN) ($^{\circ}C$).

Se entiende por TN_{ij} la temperatura mínima diaria del día i en del periodo j .

TN

Descripción: media de temperaturas mínimas diarias ($^{\circ}C$).

Es el valor promedio de las temperaturas mínimas diarias (TN_{ij}) de un periodo j .

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

TN10p

Descripción: Número de noches frías (días con $TN <$ percentil 10 de las TN) (días).

Es, para un periodo j , el número de días en los que la temperatura mínima diaria (TN_{ij}) es inferior al percentil 10 (TN_{in10}):

$$TN_{ij} < TN_{in10}$$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

TN90p

Descripción: Número de noches cálidas (días con $TN >$ percentil 90 de las TN) (días).

Es, para un periodo j , el número de días en los que la temperatura mínima diaria (TN_{ij}) es superior al percentil 90 (TN_{in90}):

$$TN_{ij} > TN_{in90}$$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

TNn

Descripción: Mínimo de las temperaturas mínimas diarias ($^{\circ}C$).

Es, para el periodo j , el valor mínimo de las temperaturas mínimas diarias (TN_{ij}):

$$TNn_j = \min(TN_{ij})$$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

TNx

Descripción: Máximo de las temperaturas mínimas diarias ($^{\circ}C$).

Es, para el periodo j , el valor máximo de las temperaturas mínimas diarias (TN_{ij}):

$$TNx_j = \max(TN_{ij})$$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

TR

Descripción: Número de noches tropicales ($TN > 20^{\circ}C$) (días).

Es, para el periodo j , el número de días en los cuales la temperatura mínima diaria (TN_{ij}) supera los $20^{\circ}C$:

$$TN_{ij} > 20^{\circ}C$$

(ver: <http://eca.knmi.nl/indicesextremes/indicesdictionary.php>)

EUSKO JAURLARITZA



GOBIERNO VASCO

INGURUMEN, LURRALDE PLANGINTZA
ETA ETXEBIZITZA SAILA

DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE,
PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y VIVIENDA

www.ihobe.eus
www.ingurumena.eus