

Public Disclosure Authorized  
Public Disclosure Authorized

# Análisis climático del estudio Evaluación del impacto del cambio climático en la cuenca del Río de la Plata en la generación eléctrica

## Reporte Final



Public Disclosure Authorized

Abril 2023

## Nota introductoria

---

El presente informe es parte del Estudio realizado por el Banco Mundial y OLADE, para evaluar el impacto del cambio climático sobre la generación eléctrica en países del Cono Sur.

El mismo se constituyó en dos etapas: una primera etapa donde se realizó el **análisis climático** (CA), evaluando los cambios en las variables climáticas relevantes bajo dos escenarios futuros de concentración de gases de efecto invernadero (RCP 4.5 y 8.5, por sus siglas en inglés) que podrían afectar la generación eléctrica en el futuro. Posteriormente, se realiza un **análisis técnico económico** (TEA), donde se observa el efecto de dichos cambios sobre la generación y demanda eléctrica en Uruguay, Paraguay, Argentina y Brasil, tomando como punto de partida la matriz de generación de los países planificada a 2030.

El reporte a continuación se integra como Anexo del Estudio de impacto del cambio climático, mostrando en detalle el trabajo realizado por el equipo consultor a cargo del análisis climático.

## Índice

---

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN.....  | 4  |
| 2. | ETAPA 1: EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO FUTURO SOBRE EL RECURSO HÍDRICO .....            | 8  |
| 3. | RESULTADOS DEL ANÁLISIS CLIMÁTICO SOBRE LA HIDROLOGÍA .....                            | 32 |
| 4. | RESUMEN Y CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS HIDROLÓGICO .....                                  | 38 |
| 5. | ETAPA 2: ANÁLISIS DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS EN LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA Y EÓLICA..... | 41 |
| 6. | RESULTADOS DEL ANÁLISIS CLIMÁTICO SOBRE LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA Y EÓLICA.....       | 48 |
| 7. | BIBLIOGRAFÍA .....   | 55 |
| 8. | ANEXO 1: DESCRIPCIÓN DE LA INFORMACIÓN APORTADA POR LOS MODELOS CLIMÁTICOS.....        | 58 |
| 9. | ANEXO 2: DESCRIPCIÓN DE LOS ARCHIVOS DE DATOS GENERADOS.....                           | 65 |

## 1. Introducción

---

Como consecuencia del cambio climático y del calentamiento global se prevé que los regímenes de precipitación y temperatura se vean modificados en muchas zonas del planeta, lo que a su vez podría ocasionar impactos sobre la hidrología y la disponibilidad de recursos hídricos, que se traducen en alteraciones de la escorrentía superficial y de la recarga de los acuíferos. A su vez, el cambio climático tendrá un efecto sobre los patrones de vientos y la nubosidad, afectando a los recursos renovables que condicionan la generación de energía renovable.

La metodología más extendida a la hora de analizar los efectos que podría provocar el cambio climático se basa en utilizar los resultados de los modelos climáticos globales que reciben el nombre de modelos de circulación general (GCM por sus siglas en inglés). Los GCM son modelos que simulan numéricamente las interacciones de la atmósfera, los océanos, los hielos y el relieve terrestre. Son frecuentemente utilizados para el estudio de las dinámicas del sistema meteorológico y climático con el propósito de obtener proyecciones del clima futuro. El principal forzamiento de los GCM es la radiación solar, aunque todos los modelos son también forzados con concentraciones de gases atmosféricos, tanto de origen antropogénico como natural (gases de efecto invernadero, aerosoles provenientes de erupciones volcánicas, quema de biomasa, o contaminación). Debido al desconocimiento acerca de la posible evolución futura de la situación socioeconómica global, que afecta al sistema climático de diversas maneras, en los GCM los cambios en dicha situación se modelan mediante escenarios sintéticos de emisiones de gases de efecto invernadero (principalmente desarrollo industrial) y cambios en el uso de suelo (desarrollo agrícola) que proporcionan situaciones de referencia para la simulación, de acuerdo con distintos escenarios plausibles de desarrollo socioeconómico.

La principal medida para evitar los peores extremos del cambio climático es limitar el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero mediante la reducción de las emisiones. Como la producción de electricidad es responsable de una parte no despreciable de las emisiones, el sector energético ha evolucionado para reducir las tasas de emisiones a través de la descarbonización. Entre las medidas utilizadas durante el proceso de descarbonización se encuentran, por ejemplo, la transferencia a combustibles con menor contenido de carbono como el gas natural, junto con un mayor uso de fuentes de energía renovables, incluida las energías hidroeléctrica, eólica y solar. Sin embargo, la energía hidroeléctrica y el resto de las fuentes renovables pueden verse altamente alteradas por el cambio climático. Los cambios en la cantidad y el tiempo de la escorrentía de los ríos debidos al incremento o disminución de la precipitación, junto con el aumento de la evaporación debido al incremento de la temperatura, tendrán varios efectos en el recurso hídrico disponible y por tanto en los diferentes usos del recurso como la producción de energía hidroeléctrica, regadíos, uso consuntivo....Igualmente, el recurso eólico y solar se puede ver alterado por el cambio climático, por lo que son necesarios los estudios que analicen como va a evolucionar los recursos renovables disponibles en escenarios de cambio climático para poder definir las estrategias a seguir y mitigar los efectos que pueden producirse.

El presente informe ha sido generado en el marco del estudio “Evaluación del impacto del cambio climático en la generación eléctrica en los países del Cono Sur”, que tiene estos objetivos. A continuación, se describen las actividades desarrolladas en el marco de las siguientes tareas:

- Actividad 1: Recolectar, analizar y sistematizar la información de línea de base para el estudio.
- Actividad 2: Analizar los impactos del cambio climático sobre las principales variables climáticas que podrían afectar a las instalaciones hidroeléctricas estudiadas y la velocidad del viento y la radiación solar:

El trabajo del análisis climático (CA) desarrollado por el consorcio de Tecnalía y IH Cantabria se divide en 2 etapas: (i) abordaje de las variables relevantes para la producción hidroeléctrica y (ii) análisis de los impactos relativos a cambios en los patrones de viento y radiación sobre la generación eólica y fotovoltaica.

## 1.1. Objetivos

---

El objetivo global del presente proyecto es evaluar la influencia que el cambio climático tendrá sobre el sistema energético de los países del Cono Sur en el horizonte del año 2050. Más concretamente, en el este estudio se busca evaluar los cambios previsibles en el recurso hídrico, eólico y solar y su afección a la generación hidroeléctrica, eólica y fotovoltaica.

El análisis de la precipitación y de la temperatura actuales junto con los caudales aportantes a las centrales de estudio y su variación en el tiempo por efecto del cambio climático, constituyen aspectos clave a la hora de valorar como se va a comportar el caudal fluyente.

Para llevar a cabo dicho estudio se cuenta con la información recogida en estaciones meteorológicas de la base de datos *Global Historical Climatology Network Daily* (Menne et al. 2012) y la base de datos de reanálisis ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 2017), así como de las y con las previsiones de cambio climático facilitadas en los informes del *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). En estos últimos se recogen los resultados del modelado del clima futuro mediante diferentes modelos climáticos (hasta un total de 21), en distintos escenarios de concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera (los denominados RCPs o *Representative Concentration Pathways*)(van Vuuren et al. 2011).

En el momento de abordar este estudio, existen dos fuentes de información de interés en cuanto a simulaciones climáticas. Por un lado, el último informe del IPCC acerca de los impactos del cambio climático (IPCC 2022) ha sido desarrollado en base a los modelos climáticos globales ejecutados en el marco de la sexta fase del proyecto de Proyecto de inter-comparación de modelos de clima acoplados o CMIP6 (Eyring et al. 2016) . Estos modelos globales son adecuados para evaluar la previsible evolución global del clima, pero por su baja resolución, en los estudios de impacto es más conveniente emplear modelos regionales o RCM. En el momento

actual, el conjunto de simulaciones de modelos regionales más importante para la zona del planeta estudiada es el aportado por el Experimento Coordinado de Reducción de Escala Regional o CORDEX. Concretamente, en el estudio se ha empleado las simulaciones disponibles para la región 1 de este experimento (“Sur América”). A estos datos se ha accedido a través del Servicio de Cambio Climático de Copernicus (Copernicus Climate Change Service n.d.)

Los modelos climáticos empleados en este estudio consideran la evolución del clima desde el año 2006 hasta el horizonte de 2100 bajo diferentes escenarios de cambio climático (principalmente cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero), y fueron también ejecutados entre los años 1950 y 2005 sin considerar cambio en los forzamientos climáticos. Este es denominado como periodo “histórico”. Por tanto, el primer objetivo es evaluar en base a los resultados de estos modelos regionales, la evolución del clima en la zona de estudio en el período histórico y en el periodo 2036-2055, es decir, 30 años en torno al año 2050.

Dicha proyección de cambio climático se realiza para dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero o trayectorias representativas de concentración, cuyas siglas en inglés son RCP: RCP 4.5 y RCP 8.5. El primero representa un escenario en el que se prevé que las emisiones de carbono continuarán creciendo hasta el año 2040, fecha a partir de la cual se habrán establecido las medidas adecuadas para reducirlas, estabilizándose la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. El escenario RCP 8.5 corresponde a una situación de emisiones poco optimista, en la que la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera seguirá creciendo por efecto de la actividad humana incluso más allá del año 2100.

Una parte considerable de los análisis realizados acerca de los impactos climáticos se refieren a RCP8.5 como el escenario continuista o de ausencia de medidas globales de mitigación. (Hausfather and Peters 2020). Para facilitar la comparación de los resultados generados con otros análisis y estudios se ha optado por emplear el escenario RCP8.5, aunque considerando el mismo como un escenario tendencial o continuista, sino un escenario de “peor caso posible”(Hausfather 2019). El escenario RCP4.5 busca reflejar plausibles evoluciones del clima antes escenario medios de emisiones. También existen escenarios más optimistas en cuanto a la reducción global de las emisiones de gases de efecto invernadero (RCP2.6, etc.), pero dado que los cambios de los patrones climáticos son menos marcados no han sido analizados al ser menos informativos.

Para la consecución de los objetivos generales del análisis se establecen, a su vez, los siguientes objetivos específicos:

- La recopilación y análisis de la información meteorológica e hidrológica disponible en la zona de estudio, en concreto los datos de precipitación, temperaturas y caudales mensuales.
- La caracterización de la variabilidad temporal de las variables de precipitación, nivel y temperatura en la situación actual.
- La caracterización de los patrones de viento y radiación en la situación actual.

- La distribución en el tiempo de las variables climáticas objetivo, en los diferentes escenarios de cambio climático en el horizonte considerado.
- Obtención de las series de caudales actualizadas a futuro para los diferentes escenarios de cambio climático.

## 2. Etapa 1: Efectos del cambio climático futuro sobre el recurso hídrico

---

### 2.1. Planteamiento metodológico

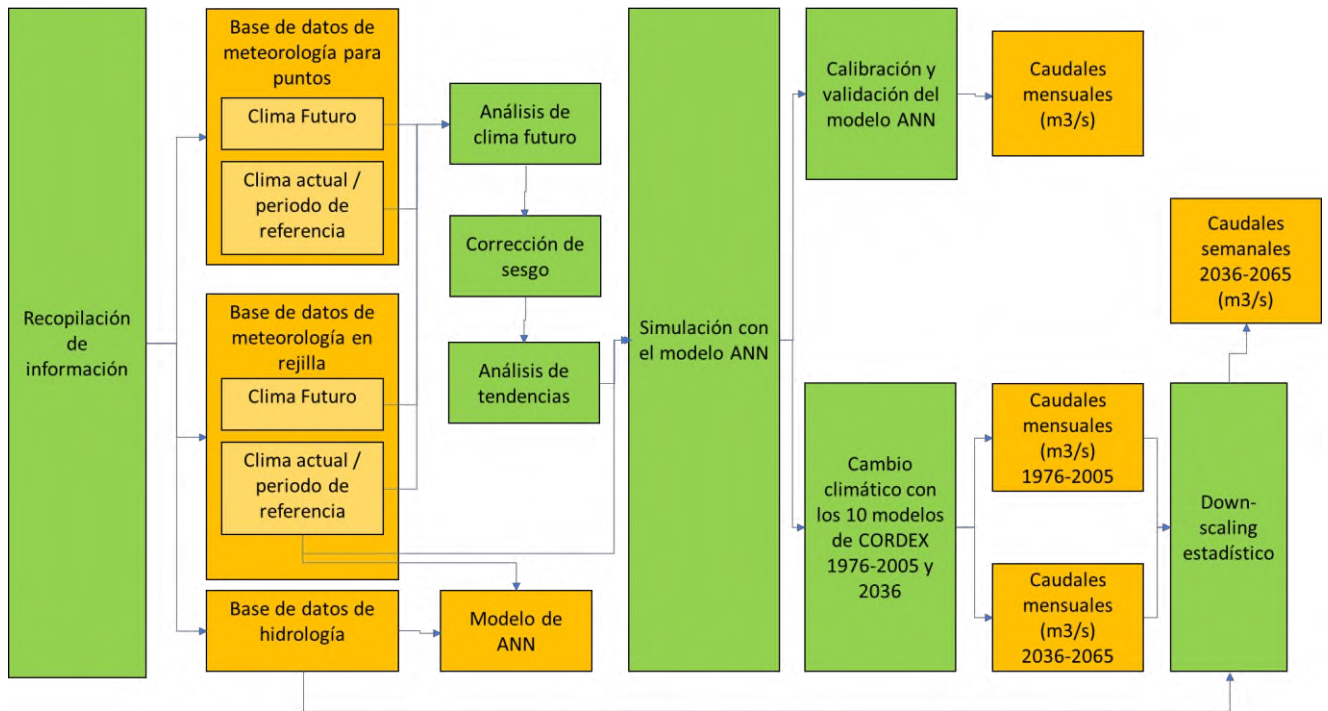
---

La metodología que se sigue para analizar cómo va a afectar el cambio climático en el recurso hídrico consta de 5 tareas:

- Recopilación de información: Para la realización del estudio ha sido preciso recopilar información climática para el periodo histórico (1976-2005) (principalmente precipitación y temperatura) y caudal aportante a cada una de las centrales de estudio. El análisis se realiza de manera diferenciada para:
  - Una malla que cubre el área objeto de análisis hidrológico, y que se aprecia en la Figura 2.
  - 21 puntos representativos de la operación del sistema energético regional, descritos en la Tabla 2.
- Elaboración del modelo de redes neuronales (ANN): Para el presente estudio se propone la utilización de un modelo de redes neuronales que a partir de las variables climáticas reproduzca la serie de caudales a escala mensual en la cuenca aportante a cada una de las centrales hidroeléctricas propuestas.
- Evaluación de las predicciones atmosféricas: se recopilará la información de 10 modelos climáticos CORDEX de la malla SAM-44 para dos escenarios de concentración de gases de efectos invernadero (RCP4.5 y RCP8.5) y se analizarán las predicciones de las variables atmosféricas de interés de dichos modelos, precipitación y temperatura, para el periodo futuro. La información proporcionada por los modelos presenta sesgos, o errores sistemáticos, con respecto a la información de las observaciones, por eso, antes de poder analizar la información de los modelos se llevará a cabo un procedimiento de corrección del sesgo.
- Generación de las proyecciones de caudal: a partir de la elaboración de modelos de redes neuronales para cada punto de estudio y mediante la evaluación de las proyecciones de cambios atmosféricos generados en la tarea anterior, se procederá a generar las proyecciones de flujos hidrológicos para la zona estudio para los 10 modelos escogidos y sus dos escenarios.



**Figura 1: Aproximación metodológica**



## 2.2. Localización de la zona de estudio

El estudio se centra en la mitad sur de Sudamérica localizándose las centrales hidroeléctricas y punto de estudio en Brasil, Uruguay, Paraguay y Argentina.

En la zona de estudio se localizan más de 100 centrales en las que se ha estudiado la influencia del cambio climático en el caudal (ver Figura 2.). También 21 puntos representativos del sistema energético regional, que se muestran en la Tabla 2.



Además de la información del periodo histórico, se ha recopilado información de modelos de cambio climático para los escenarios de concentración de gases de efecto invernadero considerados en el estudio. Se utilizará esta información para construir las proyecciones atmosféricas de cambio climático con las que informar al modelo hidrológico y derivar las proyecciones de cambio climático sobre los caudales.

En la Tabla 1 se muestran las bases de datos que han sido consultadas para obtener información relativa a datos climáticos, relieve, usos del suelo y litología que serán utilizados para construir el modelo hidrológico.

**Tabla 1: Bases de datos utilizadas para el modelado hidrológico.**

| Dato   | Base de datos                               | Resolución espacial | Resolución temporal | Período                          |
|--|---|---------------------|---------------------|----------------------------------|
| Precipitación  | ERA5  | 0,33°<br>(30km)     | Diario              | 1951 a<br>2018                   |
|  | Global Historical Climatology Network Daily | -                   | Diario              | 1900-<br>2022                    |
| Temperatura  | ERA5  | -                   | Diario              | 1951 a<br>2018                   |
| Datos de cambio climático (Precipitación, temperatura, radiación y velocidad del viento) | CORDEX                                      | 0,44°<br>(40 km)    | Diario              | 1976 a<br>2005<br>2036 a<br>2065 |
| Modelo Digital del Terreno   | ASTER                                       | 200km               | -                   | -                                |
| Caudales en régimen natural  | TEA   | -                   | Semanal             | 1909 -<br>2021                   |

Adicionalmente, para abordar las simulaciones energéticas se precisan de datos de en 21 puntos representativos de la región. Estos datos han sido adquiridos a la empresa Meteoblue<sup>1</sup> para las coordenadas indicada en la tabla siguiente. Esta información no ha sido incorporada en el análisis hidrológico, ya que precisa de datos “en rejilla”.

Para esos puntos se han analizado las variables de viento (velocidad máxima, mínima y media diaria) y radiación solar incidente. En ambos casos (datos para la rejilla que cubre la zona donde se aborda el análisis hidrológico y puntos individuales) se ha aplicado la metodología de corrección de sesgo indicada en el apartado 2.5.

**Tabla 2: Coordenadas de los puntos analizados**

| Número de punto | Latitud    | Longitud  |
|-----------------|------------|-----------|
| 1               | -34.666725 | -56.25    |
| 2               | -25.666733 | -52.5     |
| 3               | -24.666733 | -56.25    |
| 4               | -25.333405 | -59.53125 |
| 5               | -28.000065 | -62.34375 |
| 6               | -32.333393 | -60       |
| 7               | -26.666733 | -55.3125  |
| 8               | -23.333405 | -59.53125 |
| 9               | -31.666729 | -54.375   |
| 10              | -33.00006  | -56.25    |
| 11              | -30.666729 | -63.75    |
| 12              | -29.000065 | -52.03125 |
| 13              | -30.666729 | -58.125   |

---

<sup>1</sup> En el siguiente enlace es posible obtener una descripción de toda la información de base que emplea la empresa Meteoblue para generar los datos empleados: <https://content.meteoblue.com/es/especificaciones/origen-de-los-datos>

| Número de punto | Latitud    | Longitud  |
|-----------------|------------|-----------|
| 14              | -34.333393 | -62.34375 |
| 15              | -32.666725 | -65.625   |
| 16              | -37.000053 | -67.96875 |
| 17              | -37.66672  | -59.53125 |
| 18              | -45.33338  | -68.90625 |
| 19              | -47.333378 | -69.84375 |
| 20              | -39.000053 | -62.8125  |
| 21              | -40.666718 | -67.5     |

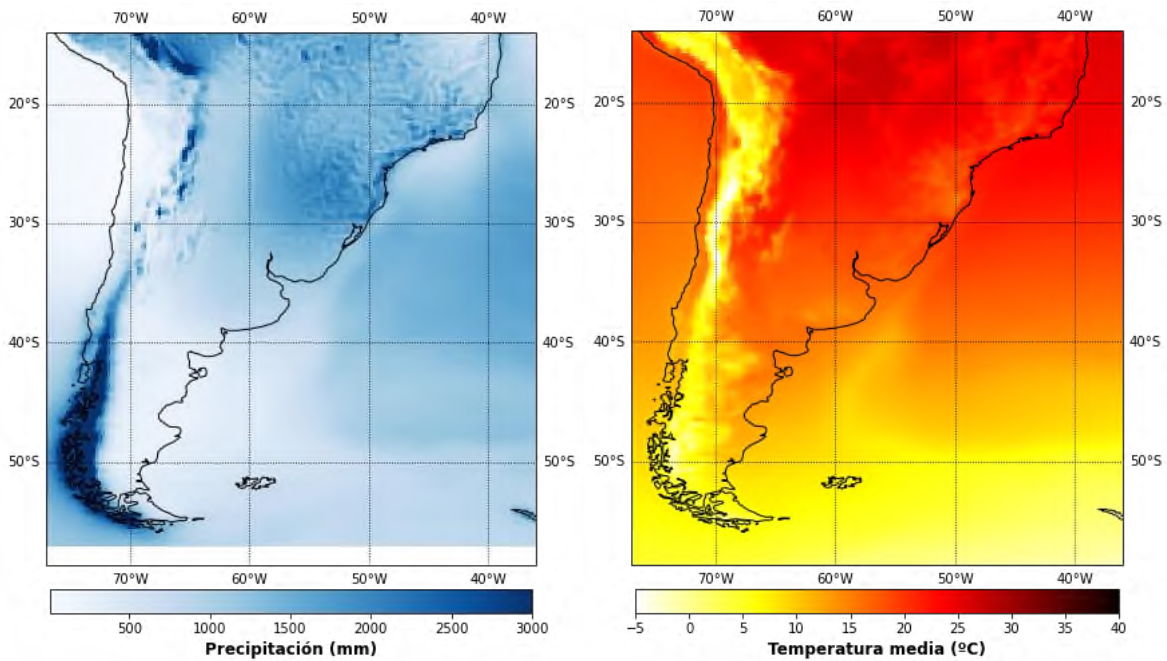
## 2.5. Reconstrucción hidroclimática

En esta sección se analiza el proceso seguido para la reconstrucción espacio temporal de las variables climáticas, así como la elaboración del modelo de redes neuronales para cada una de las centrales de estudio.

### 2.5.1. Análisis climático

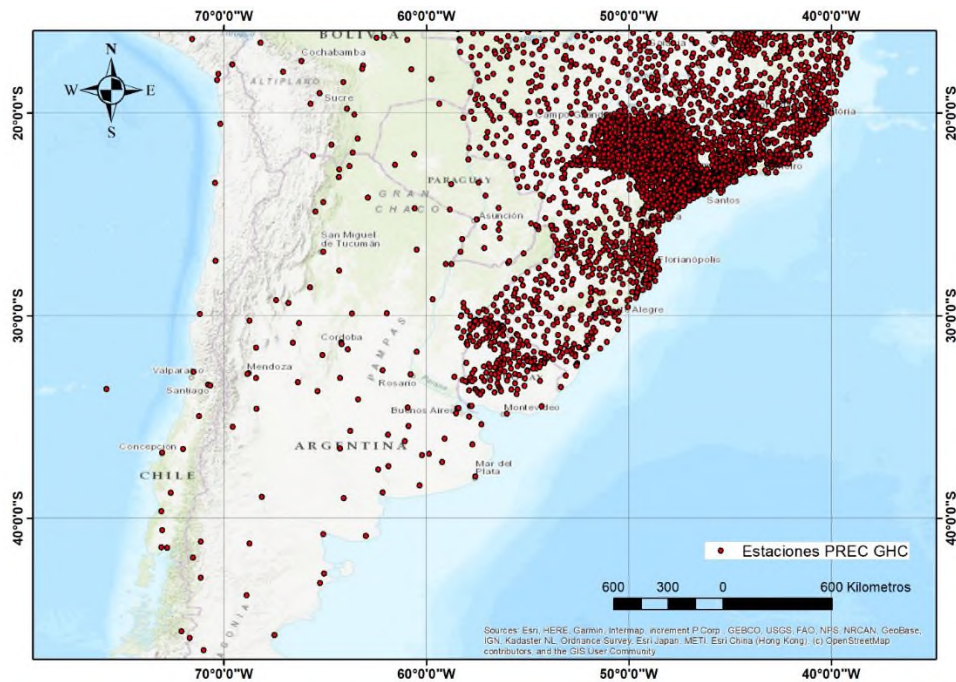
Como se ha comentado anteriormente en este estudio se utilizan dos fuentes de datos climáticos, por un lado, datos instrumentales procedentes de la base de datos *Global Historical Climatology Network Daily (GHC)* (Menne et al. 2012) y por otro lado datos espaciales de reanálisis de la base de datos de reanálisis ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 2017). La utilización de estas dos bases de datos permite hacer una reconstrucción espacial y temporal de la forma más fidedigna posible ya que la utilización directa de datos de reanálisis para la variable precipitación no es aconsejable debido a los grandes sesgos existentes entre el dato real y el dato de ERA5. Sin embargo, la predicción que ERA5 realiza para la variable temperatura tiene un porcentaje muy bajo de error y están altamente correlacionados los resultados con los datos reales (del Jesus et al. 2020).

**Figura 3: Datos del reanálisis ERA5**



Por tanto, el uso de estas dos bases de datos permite hacer una corrección de sesgo de los datos de ERA5 correspondiente a la celda más cercana a cada uno de los pluviómetros de la base de datos *GHC*.

**Figura 4: Estaciones pluviométricas Global Historical Climatology Network Daily (GHC).**



El método de corrección de sesgo utilizado es el mapeo de cuantiles. El método consiste en calibrar la función de distribución acumulativa (CDF) de las series ERA5, a partir de la CDF de las series observadas que proporciona GHC, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$q_m^* = F_o^{-1}(F_m(q_m)),$$

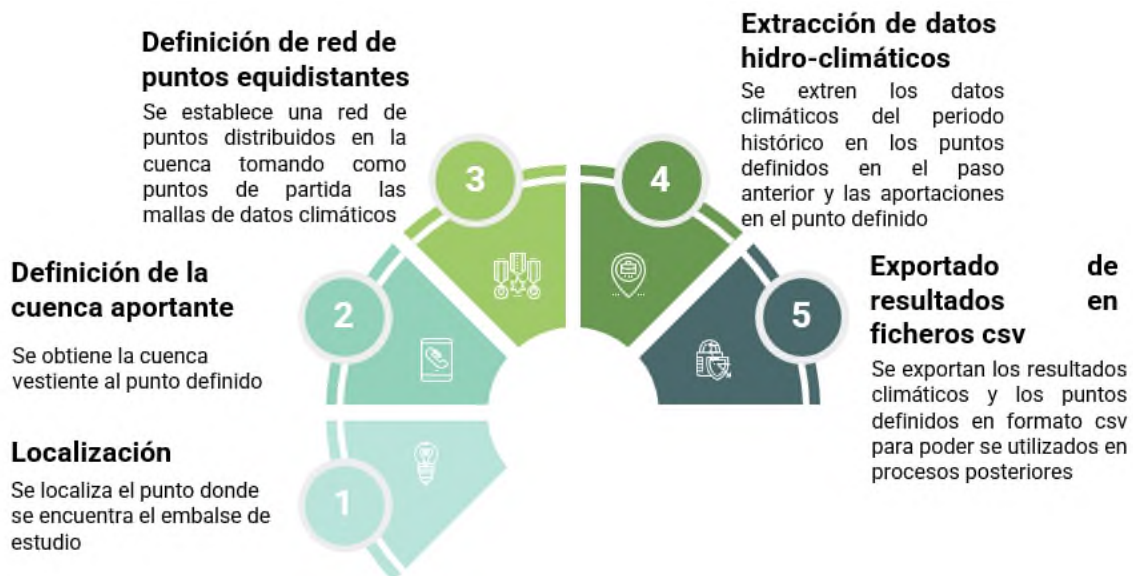
donde  $q_m$  y  $q_m^*$  corresponden a los cuantiles simulados y corregidos de ERA 5 y  $F_m$  y  $F_o$  a las CDFs empíricas simuladas y observadas, respectivamente.

El resultado es la misma malla de ERA5 per corregida a través de las observaciones.

## 2.6. Extracción de información hidroclimática en la cuenca de estudio

Una vez se ha corregido la precipitación de la base de datos de ERA5 se procede a realizar la extracción de los datos de precipitación y temperatura para cada una de las cuencas aportantes a cada una de las centrales de estudio. Para ello se siguen una serie de pasos definidos en la Figura 5.

**Figura 5: Proceso de extracción hidroclimática en la cuenca de estudio.**



### 2.6.1. Localización

El primer paso que es necesario realizar es localizar el punto donde se encuentra la central que se desea estudiar. La localización se realiza a través de las coordenadas del punto en

metros. Debido a la diversidad de sistemas de coordenadas, se toma como sistema de referencia el **EPSG: 32721 (ETRS89 / UTM zona 21S)**<sup>2</sup>.

### **2.6.2. Definición de la cuenca aportante**

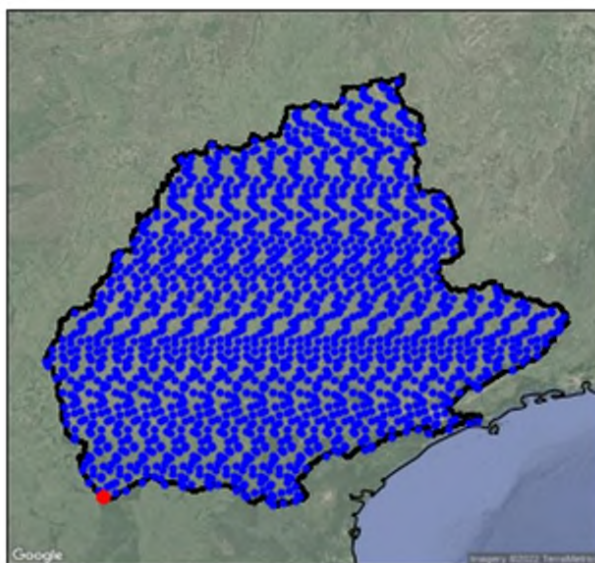
Una vez definidas las coordenadas del punto donde se localiza la presa de estudio, se delimita la cuenca aportante a través de las propiedades geomorfológicas que se pueden obtener de un modelo digital del terreno como son las direcciones de flujo y la acumulación de flujo. Estas propiedades pueden ser obtenidas a través de herramientas que poseen los sistemas de información geográfica.

Como resultado se obtiene en formato shapefile (.shp) el contorno de la cuenca vertiente como se puede observar en la Figura 6.

### **2.6.3. Definición de la malla de puntos distribuidos en la cuenca**

Una vez que se ha definido la cuenca vertiente, es necesario establecer una malla de puntos geolocalizados donde posteriormente se extraerán los datos climáticos. Estos puntos se extraen de las mallas de propiedades geomorfológicas, es decir, al ser capas en formato ráster, es posible extraer los centros de las celdas que se encuentran en el interior de la cuenca definida. Como puede observarse en el ejemplo de la Figura 6, los puntos en azul son en los que extrae la información climática que permita definir las propiedades climáticas de la cuenca de estudio.

**Figura 6:** Cuenca aportante a la central de Itaipu y datos climáticos.



---

<sup>2</sup> <https://spatialreference.org/ref/epsg/32721/>



#### **2.6.4. Extracción de los datos hidroclimáticos**

Los datos climáticos de ERA5 se encuentran en formato matricial geolocalizados a través de ficheros NetCDF<sup>3</sup>, esto permite extraer de forma directa los datos del punto más cercano al punto de la malla definida en la cuenca. Por tanto, para obtener los datos climáticos, se procede de forma iterativa a recorrer cada uno de los puntos de la malla y a extraer la información de la celda más cercana de los datos climáticos para cada año y mes. En este proceso iterativo se va construyendo una serie temporal mensual de forma tabulada, en la que en las columnas se encuentra cada uno de los puntos y en las filas cada mes del año desde 1979 hasta 2021.

En el caso de los caudales proporcionados por el equipo de análisis técnico económico (TEA) a escala temporal semanal, se procede a realizar el re-muestreado o resampleado de los datos a escala mensual a través de la media semanal.

#### **2.6.5. Exportado de resultados en ficheros csv**

El formato de fichero de resultados más útil es el formato csv (delimitado por comas). Este tipo de fichero puede abrirse con cualquier lector de texto plano y es fácilmente utilizable con cualquier lenguaje de programación.

Una vez que se configuran las tablas que contienen las series temporales de las variables hidroclimáticas en cada uno de los puntos, se procede a exportar esta información en forma de ficheros csv.

### **2.7. Construcción, calibración y validación del modelo de regresión**

En la metodología que se utiliza en este trabajo, se propone la sustitución de modelos hidrológicos por algoritmos de regresión. Esto es posible debido a la resolución temporal mensual que se establece en esta metodología. El uso de algoritmos de regresión facilita el proceso iterativo de calibración, ya que dicho proceso es realizado de forma automática y precisa (Parisouj, Mohebzadeh, and Lee 2020). Entre los algoritmos que mejor funcionan en hidrología se encuentran las redes neuronales artificiales (ANN - *Artificial Neural Network*). A continuación, explica en que consiste esta técnica.

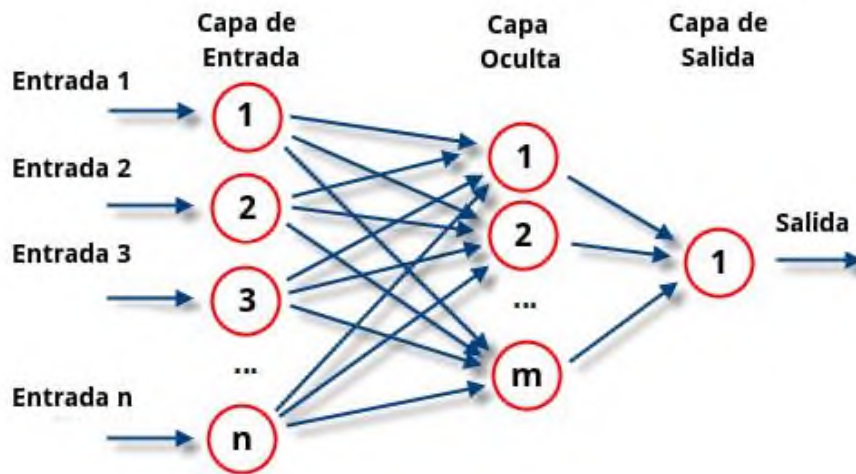
Una red neuronal es un modelo simplificado que emula el modo en que el cerebro humano procesa la información: Funciona simultaneando un número elevado de unidades de procesamiento interconectadas que parecen versiones abstractas de neuronas. Es una red de

---

<sup>3</sup> El netCDF (formulario de datos comunes en red) es un formato de archivo destinado a almacenar datos científicos multidimensionales (variables) como la temperatura, la humedad, la presión, la velocidad del viento y la dirección. Cada una de estas variables se puede mostrar mediante una dimensión (por ejemplo, tiempo).

muchos procesadores simples (“nodos”), cada uno con una pequeña memoria local. Los nodos están conectados por canales de comunicación (“conexiones”) que generalmente contienen datos numéricos codificados de varias maneras. Los nodos operan sobre sus propios datos y entradas que reciben de las conexiones.

**Figura 7: ejemplo de red neuronal.**



Fuente: <https://www.atriainnovation.com/que-son-las-redes-neuronales-y-sus-funciones/>

A continuación, se describen los pasos a seguir para la construcción del modelo de regresión.

### 2.7.1. Construcción y entrenamiento del modelo

En primer lugar, es necesario estructurar tanto los predictores como el predictando en forma de matriz para que el modelo pueda ejecutarse correctamente. La configuración matricial consiste en unir todos los datos climáticos de los puntos de la cuenca extraídos en el apartado anterior.

En la expresión (1) se muestra la configuración matricial necesaria en la que en las filas se encuentran los valores de precipitación y temperatura de cada mes del año ( $t$ ) y caudal del mes anterior ( $t - 1$ ) y en las columnas los puntos distribuidos en la cuenca ( $n$ ). En la columna final se encuentra la serie temporal de las aportaciones del punto de estudio.

$$\begin{matrix}
 P_{2,1} & T_{max_{2,1}} & T_{min_{2,1}} & \dots & P_{2,n} & T_{max_{2,n}} & T_{min_{2,n}} & \dots & Q_1 \rightarrow & Q_2 \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 P_{t,1} & T_{max_{t,1}} & T_{min_{t,1}} & \dots & P_{t,n} & T_{max_{t,n}} & T_{min_{t,n}} & \dots & Q_{t-1} \rightarrow & Q_t
 \end{matrix} \quad (1)$$

La utilización de puntos distribuidos en las cuencas para introducir la información climática que permitan reproducir las aportaciones da lugar a sobreajustes cuando el tamaño de la cuenca tiene un tamaño considerable. Por esta razón es necesario redimensionar la matriz que se

muestra en la expresión (1) a través de componentes principales (PCA). *Principal Component Analysis* (PCA) es un método estadístico que permite simplificar la complejidad de espacios muestrales con muchas dimensiones a la vez que conserva su información. En esta metodología se utiliza el método PCA que explique el 95% de la varianza del conjunto de los datos por lo que la matriz de la expresión (1) quedaría reducida a un número de columnas inferior que representan el conjunto de los datos considerados inicialmente. La aplicación de PCA se realiza a través de librerías de Scikit-Learn<sup>4</sup> en la que es necesario introducir la matriz que representa la expresión (1) y definir la varianza que se desea explicar.

Configurados los datos de la forma descrita anteriormente y reducida la dimensión, se proceden a introducir en las funciones de Python utilizadas basadas en las librerías de Scikit-Learn<sup>5</sup>.

Esta librería permite optimizar los modelos en base a una métrica, buscando la mejor configuración de parámetros para minimizar o maximizar la métrica deseada. En las herramientas desarrolladas en esta guía se trata de maximizar el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) medida estadística que define lo cerca cerca están los datos de la línea de regresión ajustada. Este proceso de optimización consta de dos fases, una fase propiamente de entrenamiento a partir del 80% de los datos de aportaciones y una fase de *prueba* que utiliza el 20% de los datos para verificar el ajuste realizado. Con este proceso se consigue generar modelos que reproduzcan de forma fidedigna las series de aportaciones en el punto de estudio considerado.

### **2.7.2. Validación de los modelos**

Al ser una variable hidrológica lo que se obtiene como resultado de los modelos, es necesario realizar un análisis para validar que el modelo reproduce el comportamiento hidrológico de forma adecuada. Para ello se utilizan dos criterios basados en métricas como son:

- Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe a nivel mensual (NSE) (D. N. Moriasi et al. 2007)
- Porcentaje de sesgo (PBIAS)

Una vez que el modelo está configurado se simula un periodo de tiempo entre 5 y 10 años para poder ser comparada la serie resultante con la serie adoptada como real.

El coeficiente de eficiencia NSE es uno de los más usados en hidrología para la comprobación de que los ajustes simulados son aceptables. El rango de variación del citado coeficiente de

---

<sup>5</sup> [https://scikit-learn.org/stable/modules/neural\\_networks\\_supervised.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/neural_networks_supervised.html)

eficiencia se sitúa entre -∞ y 1, correspondiendo este último valor a un ajuste perfecto. Con respecto a la medida de la desviación del volumen, expresa cuantitativamente la relación entre el volumen del hidrograma observado y el simulado. El ajuste perfecto corresponde a un valor de PBIAS = 0, por lo que en se debe obtener el valor más bajo del mismo. Esta media de bondad de ajuste es adecuada para análisis mensuales y anuales de aportaciones.

Valores positivos del coeficiente PBIAS, indican infraestimación de los valores de aportaciones simulados por el modelo. Por el contrario, valores negativos del mismo indican sobreestimación de las aportaciones simuladas por el modelo con respecto a los observados o tomados como referencia (D. N. Moriasi et al. 2007).

Los mencionados coeficientes se determinan a partir de las siguientes expresiones:

$$NSE = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (Aport_{0i} - Aport_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Aport_{0i} - Aport_{0m})^2} \quad (2)$$

$$NPBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Aport_{0i} - Aport_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Aport_{0i})} * 100 \quad (3)$$

*NSE*: Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe.

*PBIAS*: Desviación del volumen.

*N*: Número de parejas de caudales consideradas en el proceso de calibración.

*Aport<sub>0i</sub>*: Aportaciones observadas en el instante *i*.

*Aport<sub>si</sub>*: Aportaciones simuladas en el instante *i*.

*Aport<sub>0m</sub>*: Valor medio de los caudales observados a lo largo del período de calibración.

En función de la combinación del valor de dichos coeficientes (*NSE* y *PBIAS*) conjuntamente, se pueden distinguir distintos niveles de calidad del ajuste, según se indica en la tabla siguiente:

**Tabla 3: Niveles de calidad del ajuste del nivel diario, en función del valor del coeficiente *NSE* y *PBIAS*.**

| Calidad del ajuste | <i>NSE</i>               | <i>PBIAS</i> (%)         |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| Excelente          | 0,75 < <i>NSE</i> ≤ 1,00 | <i>PBIAS</i> < ±10       |
| Bueno              | 0,65 < <i>NSE</i> ≤ 0,75 | ±10 ≤ <i>PBIAS</i> < ±15 |

|   |                        |                              |
|---|------------------------|------------------------------|
| Aceptable   | $0,50 < NSE \leq 0,65$ | $\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$ |
| Valorable en función de resultados de otros estadísticos y el tipo de estudio realizado | $NSE \leq 0,50$        | $PBIAS \geq \pm 25$          |

Nota: conforme a Moriasi et al., 2007.

Estos índices por sí solos no son adecuados para describir el rendimiento de un modelo. Se demuestra que modelos relativamente pobres pueden dar un valor alto del índice y viceversa (Jain and Sudheer n.d.). Por lo tanto, es aconsejable emplear otras medidas estadísticas antes de llegar a una conclusión definitiva sobre el rendimiento de un modelo.

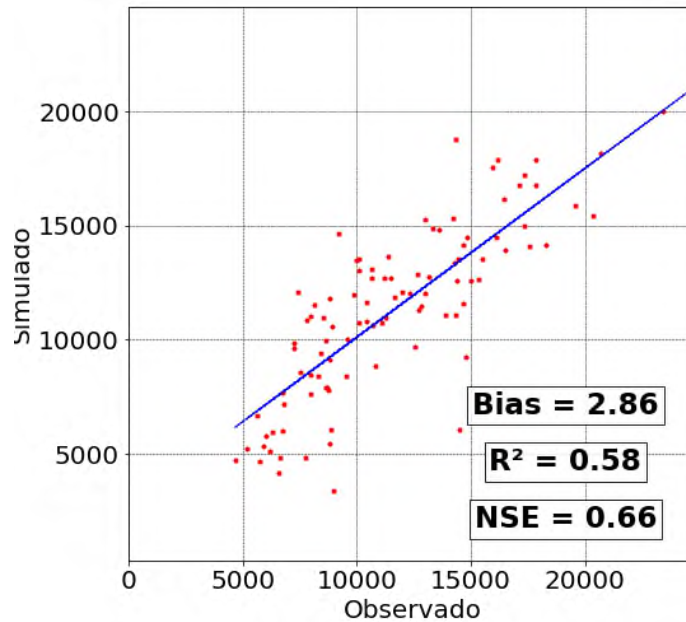
Otros de los coeficientes que se analizan es el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar. Es importante saber que el resultado del coeficiente de determinación oscila entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que estamos intentando explicar. De forma inversa, cuanto más cerca de cero, menos ajustado estará el modelo y, por tanto, menos fiable será.

$$R^2 = \frac{\sigma_{XY}^2}{\sigma_X^2 \sigma_Y^2} \quad (4)$$

Donde  $\sigma_{XY}^2$  es la covarianza entre las aportaciones simuladas y las aportaciones observadas,  $\sigma_X^2$  la varianza de las aportaciones observadas y  $\sigma_Y^2$  la varianza de las aportaciones simuladas

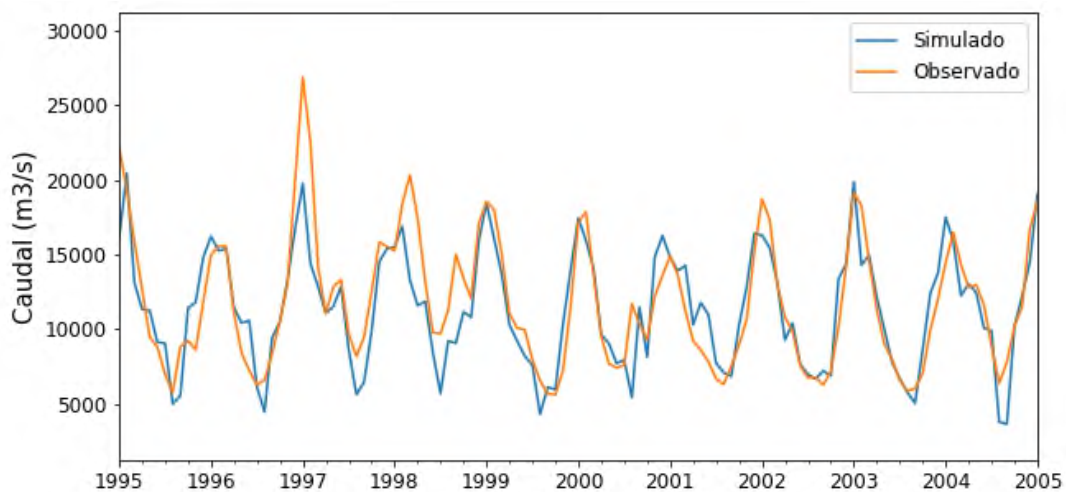
Como resultado de la aplicación de las herramientas de esta guía para la validación de las aportaciones resultantes, se obtienen los coeficientes NSE,  $R^2$  y PBIAS, además del grado de ajuste entre los resultados observados y simulados a través de gráficas como las que se muestra en la Figura 8.

**Figura 8:** Validación de resultados obtenidos en la cuenca vertiente a la central de ITAIPU.



Además, a través de las herramientas proporcionadas con esta guía es posible comparar la serie temporal de forma gráfica, lo que permite identificar si el modelo reproduce la estacionalidad correctamente. En la Figura 9 se muestra un ejemplo de la comparativa entre la serie temporal de aportaciones simulada y la serie real. Como puede observarse los resultados obtenidos son de excelente calidad ya que se ajustan de forma precisa a la serie de referencia.

**Figura 9:** Central de ITAIPU.



### **2.7.3. Guardado de los modelos ajustados**

Tras calibrar y validar los modelos de regresión se guardan en un formato determinado que permita posteriormente cargarlos para simular cualquier escenario climático. El tipo de fichero utilizado es “.sav”, una extensión genérica que se utiliza para guardar los parámetros de ajuste de los modelos de regresión. Este tipo de ficheros permite cargar los modelos ajustados de forma automática e introducir en formato matricial las series temporales climáticas de los puntos distribuidos en la cuenca.

## **2.8. Análisis de cambio climático**

---

### **2.8.1. Proyecciones de cambio climático**

Para la caracterización climática futura, se han analizado los modelos globales denominados GCM (Global Climate Model). Estos modelos simulan numéricamente las interacciones de la atmósfera, los océanos, el relieve terrestre y el hielo. Son frecuentemente utilizados para el estudio de las dinámicas del sistema meteorológico y climático con el propósito de obtener proyecciones del clima futuro.

Sin embargo, el desconocimiento acerca de la posible evolución futura de la situación socioeconómica global hace necesario establecer escenarios de concentraciones de CO<sub>2</sub> mediante el uso de las denominadas rutas de concentración representativas (*Representative Concentration Pathways o RCP*). Estos RCP representan ciertas condiciones de emisión de gases de efecto invernadero (principalmente provenientes del desarrollo industrial) y cambios en el uso del suelo (desarrollo agrícola), que proporcionan situaciones de referencia para la simulación, de acuerdo con distintos escenarios plausibles de desarrollo socioeconómico.

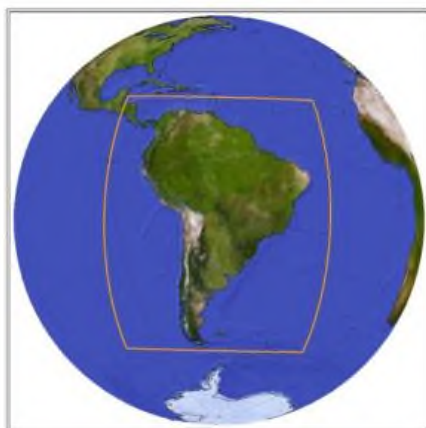
Los cambios que reflejan las proyecciones a partir de los GCM intentan representar las incertidumbres que se materializan mediante un espectro de opciones de modelado, dada la imperfección inherente de todas y cada una de ellas. Estas representaciones cuantitativas de la incertidumbre tienden a propagarse en modelos de impacto (Tebaldi and Knutti 2007). Por ejemplo, los modelos de gestión de los recursos hídricos, de los cultivos o los económicos pueden ser utilizados para estudiar las estrategias de toma de decisiones.

Los resultados de precipitación y temperatura para el clima futuro han sido obtenidos de las proyecciones climáticas de EURO-CORDEX. Los resultados de CORDEX se enmarcan en la línea del Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC).

Los modelos regionales de CORDEX cubren la superficie de Sudamérica con una resolución espacial de 0.44 °. En el presente proyecto se han utilizado las variables temperatura y precipitación diaria de 10 modelos regionales de CORDEX para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Se han seleccionado los RCP 4.5 y 8.5 ya que corresponden a un escenario de cambio

climático intermedio y uno extremo respectivamente en la Tabla 4. El RCP 4.5 corresponde a un escenario en el que se toman medidas de mitigación para estabilizar las emisiones para el año 2100, mientras que en el RCP 8.5 las emisiones para ese mismo año seguirían en aumento.

**Figura 10: Cobertura del dominio de Cordex “South America”**



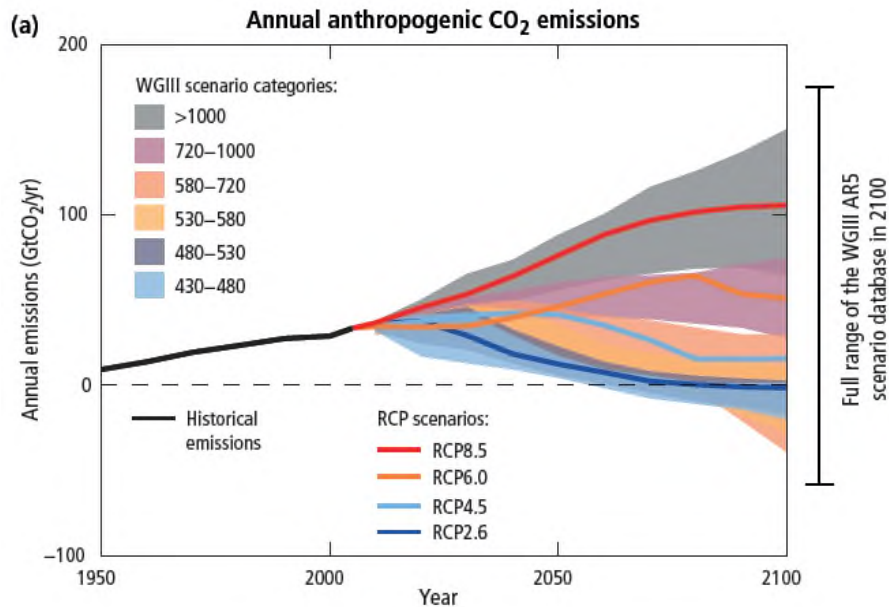
Fuente: CORDEX

**Tabla 4: RCPs y sus equivalentes en cuanto a la anomalía de la temperatura a nivel global. La tabla recoge para cada escenario el forzamiento radiactivo, CO<sub>2</sub>, anomalía en la temperatura global, el Pathway o ruta que va a seguir cada escenario y la elevación del nivel medio del mar global (SLR).**

| RCP | Forzamiento radiactivo                                 | Equivalente en CO <sub>2</sub> (ppm) | ΔT (°C) | Ruta                                | SLR (cm) |
|-----|--|--------------------------------------|---------|-------------------------------------|----------|
| 8.5 | 8.5 W/m <sup>2</sup> para 2100                         | >1370                                | 4,9     | Incremento                          | 62       |
| 6.0 | 6 W/m <sup>2</sup> para 2100                           | 850                                  | 3,0     | Estabilización                      | 47       |
| 4.5 | 4.5 W/m <sup>2</sup> para 2100                         | 650                                  | 2,4     | Estabilización                      | 47       |
| 2.6 | 3 W/m <sup>2</sup> a mediados de siglo y 2.6 para 2100 | 490                                  | 1,5     | Aumenta hasta un umbral y desciende | 40       |



**Figura 11: Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero.**



Fuente: [http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5\\_scenario\\_process/RCPs.html](http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html)

Cada una de las proyecciones climáticas incluye la temperatura máxima diaria, la temperatura mínima y la precipitación para los períodos, desde 1950 hasta 2005 (retrospectiva) y de 2006 a 2099 (ejecución prospectiva):

- “Historical” o histórica: Contiene datos desde 1950 hasta 2005 (retrospectiva)
- RCP 8.5: contiene datos desde 2006 a 2099 (ejecución prospectiva) considerando el escenario RCP 8.5
- RCP 4.5: contiene datos desde 2006 a 2099 (ejecución prospectiva) considerando el escenario RCP 4.5

La tabla siguiente resume las variables a las que se tiene acceso con este servicio, la descripción asociada a cada una de ellas, las unidades específicas en las que se descarga la información de cada una de ellas, y el empleo de las mismas en el marco del proyecto. Hay que tener en cuenta que para calcular la precipitación total es necesario sumar tanto la precipitación que considera la parte líquida y sólida, y la precipitación convectiva.

**Tabla 5: Variables climáticas de CORDEX utilizadas.**

| Variable                                     | Descripción  | Unidades                           | Base de datos  |   |
|--|--|------------------------------------|--|---|
|  |  |                                    | Generación de una rejilla para el análisis hidrológico | Generación de variables para 21 puntos individuales |
| Tasmin                                       | Temperatura mínima diaria del aire cercano a la superficie.  | °K                                 | Sí   | Sí  |
| Tasmax                                       | Temperatura máxima diaria del aire cercano a la superficie.  | °K                                 |  | Sí  |
| Precipitación                                | Precipitación diaria en la superficie; incluyendo tanto la fase líquida como la sólida de todo tipo de nubes   | kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> |  | Sí  |
| Precipitación convectiva                     | Precipitación convectiva   | kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> |  | No  |
| Velocidad del viento                         | Velocidad del viento a una altura de 10 m  | m s <sup>-1</sup>                  | No   | Sí  |
| Radiación solar descendente en la superficie | El flujo radiativo descendente de onda corta de energía por unidad de área. Los datos representan la media durante el período de agregación en la superficie | W m <sup>-2</sup>                  |  | Sí  |

La Tabla 6 muestra la institución, el modelo global (GCM), el modelo regional (RCM), la versión y la inicialización para cada uno de los modelos seleccionados.

**Tabla 6: Modelos de CORDEX seleccionados. En la tabla se muestra la institución encargada de realizar la simulación, el modelo climático global (GCM) utilizado como condición de contorno para el modelo regional, el modelo regional (RCM), la versión y la ejecución utilizadas.**

| Institución | GCM                       | RCM  | Versión | Inicialización |
|-------------|---------------------------|------|---------|----------------|
| SMHI        | CCCma-CanESM2             | RCA4 | v3      | r1i1p1         |
| SMHI        | CNRM-CERFACS-CNRM-CM5     | RCA4 | v3      | r1i1p1         |
| SMHI        | CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0 | RCA4 | v3      | r1i1p1         |
| SMHI        | ICHEC-EC-EARTH            | RCA4 | v3      | r1i1p1         |
| SMHI        | IPSL-IPSL-CM5A-MR         | RCA4 | v3      | r1i1p1         |
| SMHI        | MIROC-MIROC5              | RCA4 | v3      | r1i1p1         |
| SMHI        | MOHC-HadGEM2-ES           | RCA4 | v3      | r1i1p1         |
| SMHI        | MPI-M-MPI-ESM-LR          | RCA4 | v3      | r1i1p1         |
| SMHI        | NCC-NorESM1-M             | RCA4 | v3      | r1i1p1         |
| SMHI        | NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M      | RCA4 | v3      | r1i1p1         |

(\*) En el caso de la velocidad del viento y radiación no se han procesado las salidas del modelo GCM MOHC-HadGEM2-ES por ser muy compleja su estructura.

En los anexos de este documento se incluye información adicional acerca de los cambios que aportan estos modelos.

### **2.8.2. Corrección de sesgo**

La resolución de los RCM (como el caso de las regionalizaciones desarrolladas en el Proyecto CORDEX) suele coincidir con el tamaño de las cuencas de captación a mesoescala (es decir, entre 10 y 10.000 km), sin embargo, suele ser necesario corregir el sesgo. Los sesgos típicos son la aparición de demasiados días húmedos con lluvias de baja intensidad o la estimación incorrecta de las temperaturas extremas en las simulaciones RCM (Ines and Hansen 2006). Un sesgo en las variables simuladas por la RCM puede conducir a simulaciones hidrológicas poco

realistas de la escorrentía de los ríos (Donnelly, Andersson, and Arheimer 2016). Por ello, se recomienda la aplicación de métodos de corrección de sesgos. El término "corrección del sesgo" describe el proceso de escalar los resultados de los modelos climáticos para tener en cuenta los errores sistemáticos de los mismos. El principio básico es que se identifican los sesgos entre las series temporales climáticas simuladas y las observaciones y se utilizan para corregir tanto las series de control como las del escenario. Un supuesto principal es que la misma corrección de sesgo se aplica a las condiciones de control y de escenario. Por tanto, existen diferentes enfoques según la complejidad del método utilizado.

A lo largo de los años, se han desarrollado numerosos métodos de corrección de sesgos utilizando enfoques univariantes y multivariantes. Los métodos se dividen en dos grandes grupos:

- Aplicación de anomalías a las series instrumentales o método delta.
- Transformaciones a través de las funciones de distribución o métodos de mapeo.

En este estudio se utilizan los métodos de mapeo ya que permiten capturar la variabilidad climática de los modelos.

Dentro de los métodos de cuantiles existen a su vez diferentes métodos:

- Mapeo de cuantiles (QM)

La comunidad científica ha hecho un gran esfuerzo en revisar y comparar muchos métodos populares de corrección de sesgos existentes y se ha descubierto que el mapeo de cuantiles (QM) supera a otros métodos. Al mismo tiempo, los estudios han señalado los graves problemas que surgen al utilizar QM para la corrección de sesgos (Switanek et al. 2017).

En particular, el método puede alterar los cambios proyectados del modelo en bruto (Thiemeßl, Gobiet, and Heinrich 2012), esta inflación o deflación de la señal cruda de cambio climático simulado existe como un artefacto del supuesto de estacionariedad. Esta alteración de la señal de cambio climático sin procesar puede atribuirse al supuesto de estacionariedad, que implica que los valores de corrección de sesgos establecidos en un período de calibración pueden aplicarse a cualquier período de tiempo dentro o fuera del período de calibración.

- Mapeo de delta cuantiles (QDM)

El QDM se destaca de otros métodos típicos de QM en la medida en que no está limitado por el supuesto de estacionariedad. En el método QM tradicional, un valor modelado en bruto siempre se corrige por el mismo valor de sesgo o error que está determinado por su respectivo cuantil en el período de calibración. En cambio, el QDM multiplica los valores observados por la relación de los valores modelados (período de interés determinado por el período de calibración) en los mismos cuantiles (Cannon, Sobie, and Murdock 2015).

- Mapeo de distribución a escala (SDM)

El método SDM, comparte algunas similitudes con QDM; sin embargo, hay tres diferencias importantes: (1) SDM utiliza un modelo paramétrico en lugar de uno no paramétrico, (2) SDM y

QDM manejan los días con precipitación cero de manera muy diferente, y (3) SDM tiene en cuenta de manera más precisa las diferencias en las varianzas modeladas, para la temperatura, entre el período de interés y el período de calibración (Switanek et al. 2017).

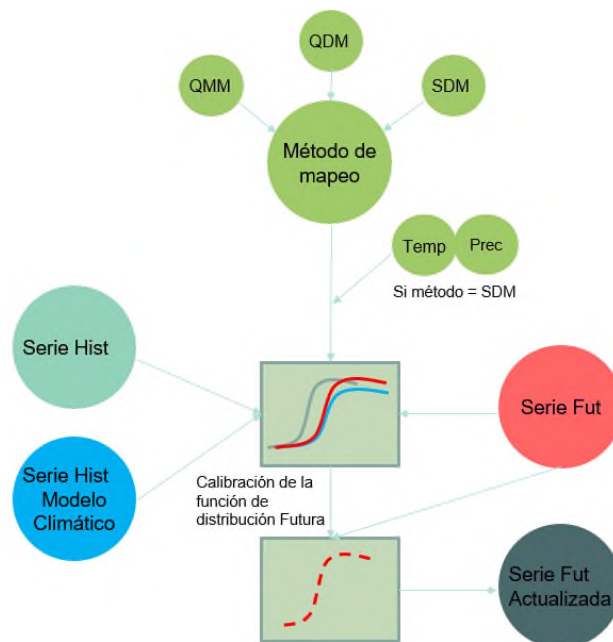
En este trabajo se utilizan tanto SDM para la corrección de las variables climáticas y QDM para la reducción de escala temporal de los resultados de caudal.

En la Figura 12 se muestra de forma esquemática el proceso que se sigue en la aplicación de métodos de mapeo para actualizar las series climática a futuro. En la Tabla 7 se detallan los planteamientos asumidos para aplicar la técnica SDM. Estos planteamientos se han establecido una vez que se han analizado las distribuciones estadísticas de las variables en los datos de observaciones de los 21 puntos analizados.

Este proceso se lleva a cabo con cada una de las variables climáticas, para cada uno de los modelos de cambio climático y escenario. Es decir, en total este proceso se realiza 30 veces (10 modelos x 2 Escenarios + 10 x 1 periodo histórico).

Es necesario destacar que además de corregir los modelos en el futuro, se han corregido las series históricas de los modelos por esta razón se corrigen dos períodos: 1976-2005 y 2036-2065.

**Figura 12: Proceso de reducción de escala a través de métodos de mapeo.**



**Tabla 7: Planteamientos para aplicar la técnica de SDM a diferentes variables.**

| Variable                          | Distribución estadística asumida | Tipo de corrección |
|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| Temperatura (tasmax, tasmin, tas) | Normal                           | Absoluto           |
| Precipitación (pr)                | Gamma                            | Relativo           |
| Radiación (rsds)                  | Gamma                            | Relativo           |
| Velocidad del viento (sfcWind)    | Weibull                          | Relativo           |

En los anexos de este documento se describen los archivos de información generados a partir de esta técnica.

### **2.8.3. Modelado de los escenarios de cambio climático de las aportaciones**

Una vez actualizadas las series climáticas a escenarios de cambio climático se procede a simular mediante los modelos de regresión para obtener los caudales en el futuro para cada uno de los escenarios de cambio climático. La forma de estructurar los datos para poder utilizar los modelos de regresión es la misma que aparece en la expresión (1) de este documento.

Como se ha reflejado anteriormente, en total es necesario realizar **30 simulaciones**, para cada uno de los escenarios y períodos

Tras haber realizado las diferentes simulaciones, las series de aportaciones se exportan en ficheros “.csv” para posteriormente realizar cualquier tipo de análisis sobre dichas series.

### **2.8.4. Corrección de los caudales simulados mensuales**

Tras el análisis de las series de caudal de diferentes puntos de la cuenca de estudio se observó que en algunos modelos de cambio climáticos en el período histórico la estacionalidad anual aparecía invertida, lo que podría dar lugar a problemas en las simulaciones energéticas del equipo TEA durante el proceso de simulación de los escenarios de cambio climático. Para evitar este problema, se realizó una nueva corrección de cuantiles en este caso de las series de caudal para cada modelo y escenario de cambio climático.

El proceso que se sigue es el siguiente:

Obtención de la función de distribución acumulada (CDF) de las series de caudales simuladas tanto para el período histórico como para los modelos de cambio climático en los distintos escenarios.

Aplicación de las siguientes expresiones:

$$q_{fut} = F_{hist}^{-1}(X_{fut}) \quad (5)$$

$$X_{hist,P} = F_{hist}(X_{hist}, q_{fut}) \quad (6)$$

$$X_{Obs,,P} = F_{hist,obs}(X_{Obs}, q_{fut}) \quad (7)$$

$$X_{Obs}^* = \frac{X_{Obs,,P}}{X_{hist,P}} * X_{fut} \quad (8)$$

Donde  $X_{fut}$  son los caudales simulados en escenarios de cambio climático,  $X_{hist}$  valores de caudal mensual en el periodo histórico del modelo,  $q_{fut}$  cuantil asociado a la CDF del modelo en el periodo histórico del valor en el escenario futuro,  $X_{hist,P}$  y  $X_{Obs,,P}$  valor de caudal histórico asociado al modelo climático y observado mensual correspondientes al cuantil futuro obtenido,  $F_{hist}$  y  $F_{hist,obs}$  a las CDFs empíricas del periodo histórico del modelo climático y de los datos observados semanales y  $X_{Obs}^*$  caudal semanal futuro asociado al modelo y escenario de estudio.

### **2.8.5. Reducción de escala temporal de los resultados de caudal**

Uno de los requisitos que se establecen en los modelos que el equipo de análisis técnico económico (TEA) utiliza es la escala temporal semanal de los datos de caudal, sin embargo, debido a las limitaciones que existen en cuanto a procesos de computación, comportamiento de los métodos de regresión y la escala especial del trabajo, no es posible realizar simulaciones a escala temporal por debajo del mes, por esta razón es necesario traducir los cambios que se producen en el futuro a escala mensual a escala semanal. Para ello se utiliza el método de mapeo de cuantiles QDM. Esto solamente puede realizarse en variables en las que se trabaja con la media como es el caso del caudal. Si la variable es acumulativa, esta técnica no podría realizarse.

El proceso que se sigue es similar al anterior donde las series observadas en vez de ser series mensuales son series semanales.

### 3. Resultados del análisis climático sobre la hidrología

---

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en cada uno de los pasos de la metodología aplicada.

#### 3.1. Resultados de caudal en el período de referencia

---

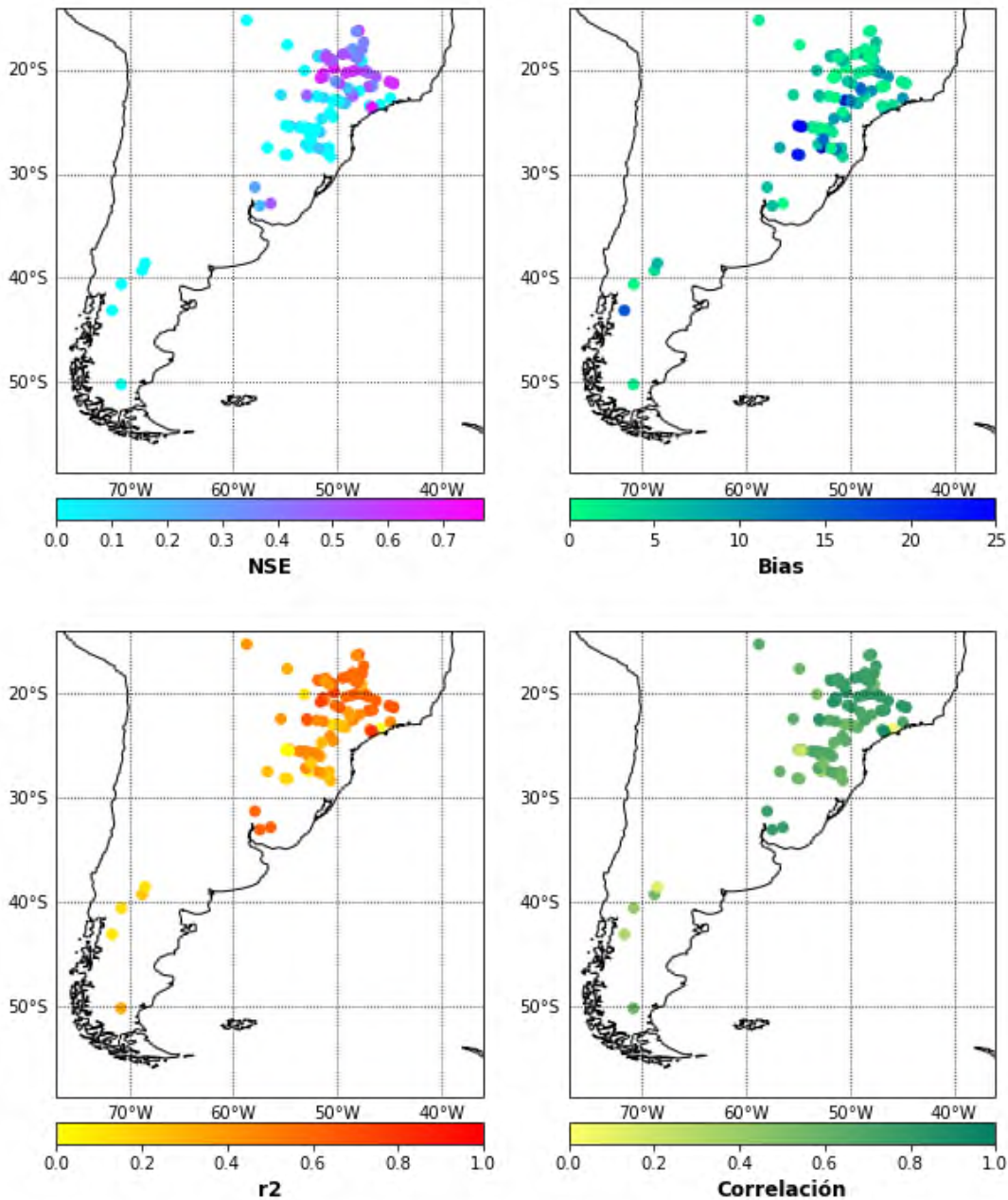
Durante el proceso de validación del modelo de redes neuronales, se analizan diversos coeficientes que permiten identificar la bondad del ajuste entre los caudales reales en régimen natural y los caudales simulados. Como se ha comentado en apartados anteriores los coeficientes son:

- Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe a nivel mensual (NSE) (D. N. Moriasi et al. 2007).
- Porcentaje de sesgo (PBIAS).
- Coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar.

Además, se analiza otro coeficiente que permita complementar el análisis como es el coeficiente de correlación de Pearson  $r_{x,y}$ , que es una prueba que mide la relación estadística entre dos variables continuas. El coeficiente de correlación puede tomar un rango de valores de +1 a -1. Un valor de 0 indica que no hay asociación entre las dos variables. Un valor mayor que 0 indica una asociación positiva. En la Figura 13 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las centrales de estudio.



**Figura 13: Validación modelos de redes neuronales.**



Como se puede observar en la Figura 13 los resultados son satisfactorios. El coeficiente NSE proporciona generalmente resultados por debajo de 0,5 en las centrales situadas más al sur, lo que indica que el comportamiento del caudal simulado se diferencia al caudal real, esto se debe principalmente a la secuencia de la serie de precipitación, aun habiendo corregido el sesgo de la base de datos de reanálisis, la serie de precipitación puede diferir en algunas cuencas situadas al sur donde la cantidad de estaciones disponibles disminuye considerablemente lo que da lugar a series climáticas con sesgos elevados o estacionalidades cambiadas.

Sin embargo, como se dijo anteriormente no es adecuado elegir o descartar un modelo solamente por los valores que arroja un único índice o estadístico ya que pueden obtenerse valores que lleven a descartar un modelo cuando realmente su comportamiento es bueno en el resto de los estadísticos o viceversa. En este caso se han evaluado otros 3 estadísticos que permitan identificar la capacidad predictiva de los modelos de redes neuronales ajustados. Uno de ellos es el coeficiente PBias que representa la capacidad que tiene el modelo de reproducir la cantidad de agua sobre la cuenca y que en un estudio de recursos es importante que se ajuste a la realidad. En la mayoría de los resultados el coeficiente PBias se sitúa por debajo del 25% en todos los casos, lo que indica que, a pesar de no reproducir totalmente la secuencia de caudales, se está capturando correctamente el caudal medio mensual en prácticamente todos los puntos de estudio. Lo mismo ocurre con el coeficiente de correlación, se obtienen valores por encima de 0,6 en todos los casos, lo que quiere decir que existe una relación grande entre la serie de caudales simulados y observados. En el caso del coeficiente de determinación se obtienen valores generalmente por encima de 0,5 lo que indica que en la mayor parte de los puntos de estudios la predicción a través de redes neuronales es correcta.

Por tanto, en base al análisis realizado los modelos que han sido ajustados muestran una buena capacidad predictiva, lo que permite reproducir la realidad de forma fidedigna.

### 3.2. Proyecciones de precipitación y temperatura

---

Una vez corregido el sesgo de los modelos para cada una de las variables y escenarios de cambio climático, se realiza un estudio del posible cambio que se produzca por la influencia del cambio climático para el período de estudio considerado (2035-2065) a partir de los modelos climáticos. La forma de representar el cambio difiere en función de la variable:

Para la precipitación el cambio se representa a través del factor relativo.

$$Cambio = \left( \frac{x^f}{x^p} \right) \quad (9)$$

En el caso de la temperatura el cambio se obtiene a través de la diferencia:

$$Cambio = x^f - x^p \quad (10)$$

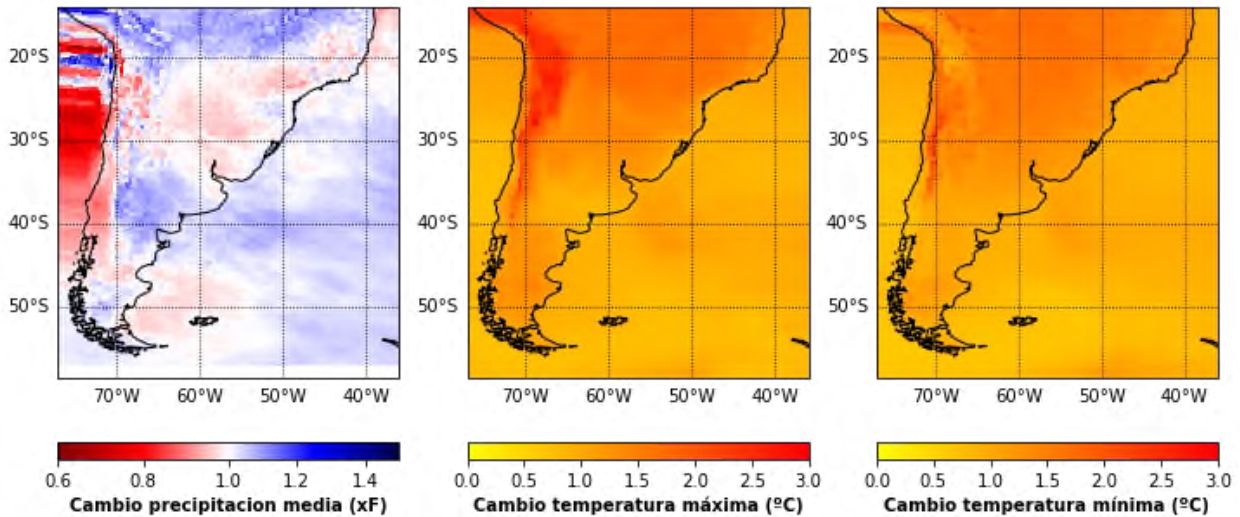
Siendo  $x^f$  y  $x^p$  serían las medias de los valores correspondientes.

Hay que tener en cuenta, que el conjunto de modelos y escenarios se enfrentan a una distribución desconocida de probabilidad de ocurrencia y a la misma confianza ya que nos existe una probabilidad de ocurrencia mayor o menor en la trayectoria de emisiones.

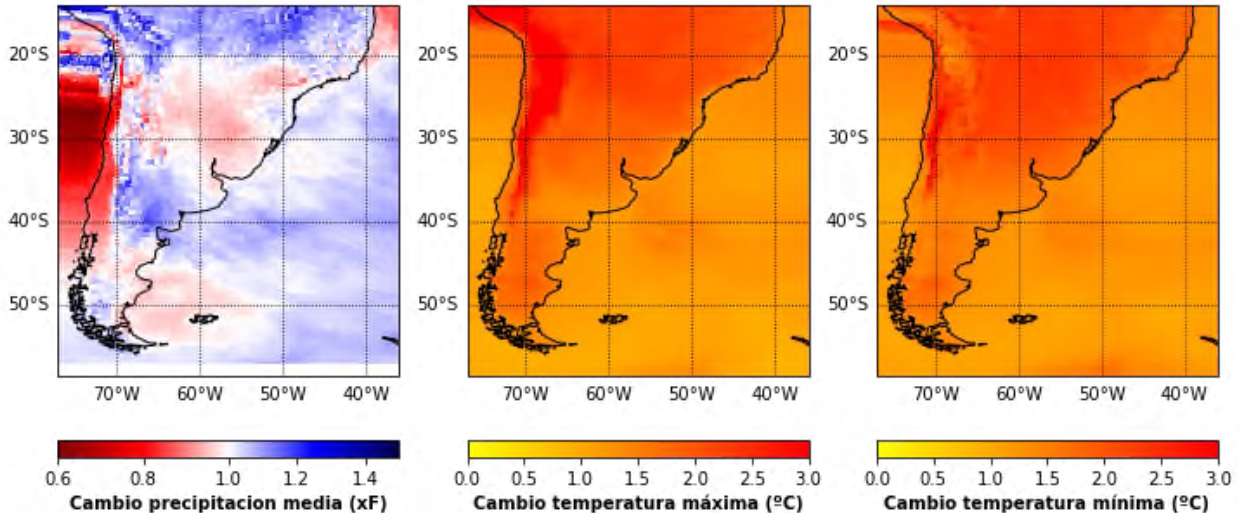
A continuación, en la Figura 14 y la Figura 15 se representa la **mediana de la distribución resultante de los cambios medios de**

**todos los modelos** para cada una de las variables en el período 2035-2065. Para obtener el cambio medio se han acoplado los cambios para cada uno de los modelos y se ha realizado la mediana de todos los cambios correspondientes a cada uno de los modelos para cada escenario.

**Figura 14: Cambios producidos en las variables climáticas para el RCP 4.5.**



**Figura 15: Cambios producidos en las variables climáticas para el RCP 8.5.**

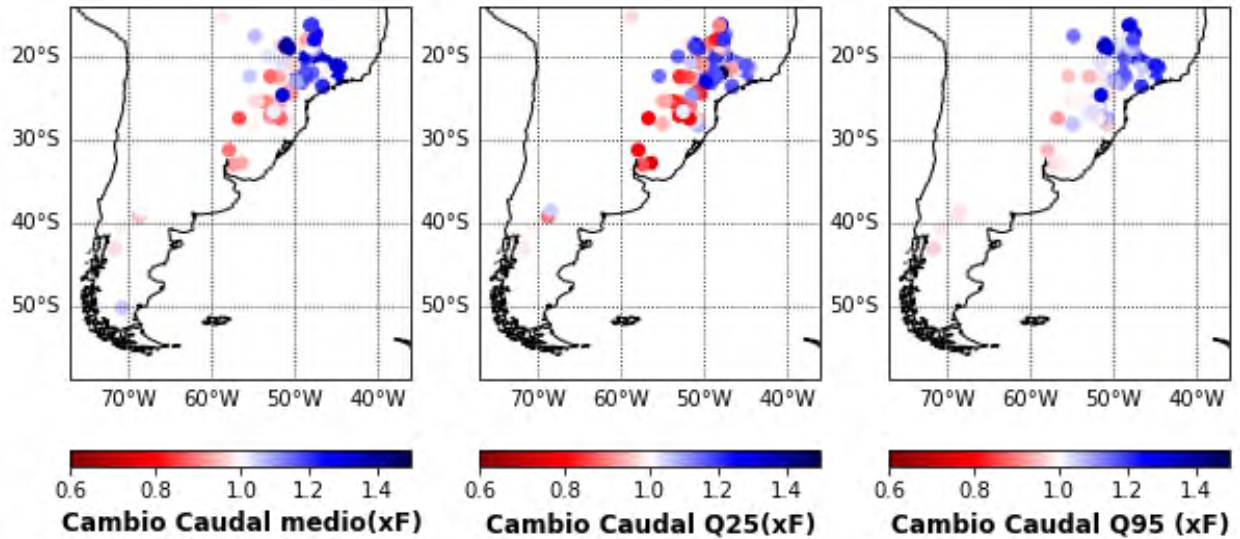


En las Figura 14 y Figura 15 se observa que los cambios no se producen de forma desigual en Sudamérica. La zona andina supone una frontera física que hace que el comportamiento del clima sea distinto a ambos lados de la cordillera. En la vertiente del pacífico se observa una disminución de la precipitación mientras que en la vertiente atlántica aparecen reducciones de precipitación en la zona central y aumentos en la zona sur de Argentina. En el caso de la temperatura el aumento es generalizado siendo los mayores incrementos en la zona Andina. Tanto lo cambio en precipitación como en la temperatura tienden a ser más drásticos en el RCP 8.5.

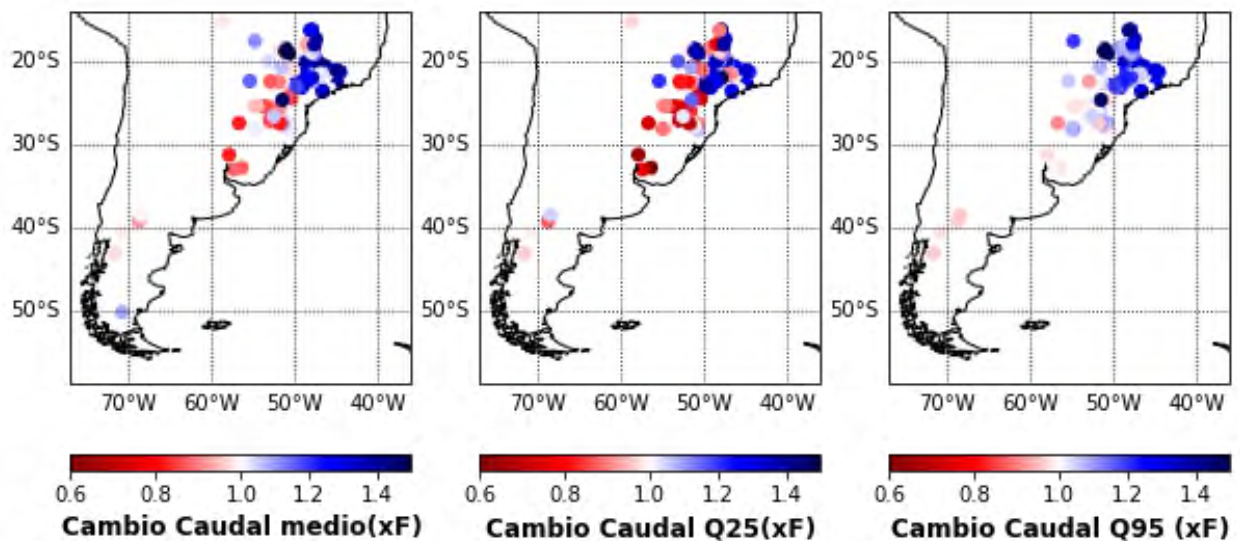
### 3.3. Proyecciones de caudal

De igual forma que en las variables climáticas se analizan los cambios en los caudales medios y en los cuantiles del 25% y el 95% que proporcionan los modelos. En las Figura 16 y Figura 17 se muestran los resultados obtenidos para el período 2035-2065 en cada uno de los escenarios.

**Figura 16: Cambios producidos en el caudal para el RCP 4.5.**



**Figura 17: Cambios producidos en el caudal para el RCP 8.5.**



Para poder tener una imagen general del comportamiento del caudal ante escenarios de cambio climático de todos los modelos, se analizan los cambios en los distintos estadísticos para cada uno de los modelos y posteriormente se realiza la mediana del conjunto de los cambios.

Como se puede observar en la Figura 16 y Figura 17 los posibles cambios se producen de forma desigual en los puntos de estudio. En los puntos situados más al norte se producen incrementos en el caudal, mientras que en los puntos situados en torno a los 30° de latitud se producen decrementos. Los cambios se agravan con el RCP 8.5, en las zonas donde en el RCP 4.5 aumentaba el caudal, en el RCP 8.5 aumenta aún más, y de forma inversa en las zonas donde disminuye.

En el caso de los cuantiles el caudal tiene un comportamiento similar que, en el valor medio, aunque en el caso del cuantil del 95% los decrementos son menores y los incrementos mayores, lo que indica un aumento de los valores máximos.

## 4. Resumen y conclusiones del análisis hidrológico

---

El análisis de la precipitación, de la temperatura actuales, los niveles y su variación en el tiempo por efecto del cambio climático, constituyen aspectos clave a la hora de abordar el análisis de las amenazas de la ciudad de Asunción y valorar su evolución en el futuro.

El objetivo principal del presente estudio es estimar, mediante técnicas de *dowscaling* estadístico, la evolución del clima en la zona de estudio, a partir de los resultados de los modelos climáticos globales.

Dicha predicción de cambio climático se realiza para dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero: el RCP 4.5 y 8.5 y solo RCP 4.5 para los niveles. El primero representa un escenario en la que se prevé que las emisiones de carbono continúen creciendo hasta el año 2040, fecha a partir de la cual se habrán establecido las medidas adecuadas para reducirlas. El escenario RCP 8.5 corresponde a una situación de emisiones poco optimista, en la que la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera seguirá creciendo por efecto de la actividad humana hasta el año 2100.

Las previsiones de cambio climático se estudian en el período 2036-2065.

Para la consecución los objetivos, se han realizado los siguientes estudios:

- La recopilación y análisis de la información hidrometeorológica actual, en concreto los datos de precipitación y temperatura de ERA5, los datos de precipitación de la base de datos *Global Historical Climatology Network Daily (GHC)* (Menne et al. 2012) y las series de caudales proporcionados por el TEA para cada una de las centrales de estudio.
- La caracterización de la variabilidad temporal y espacial de la precipitación y temperatura.
- La elaboración de modelos de redes neuronales que permitan sustituir modelos hidrológicos y reproduzcan el régimen de caudales en estado natural.
- La utilización de 10 modelos de cambio climático de la base de datos CORDEX de la malla SAM-44 para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 en el período 2036-2065 y periodo de referencia 1976-2005.
- Corrección del sesgo de los modelos de cambio climático.
- La utilización de redes neuronales que permitan traducir los cambios de la temperatura y la precipitación en cambios de caudal para cada uno de los escenarios de estudio.

La variabilidad climática de la zona y la calidad de las fuentes de datos climáticos condiciona el análisis del cambio climático y la incertidumbre existente.

Para reducir dicha incertidumbre, se debería de contar con la mayor cantidad de datos meteorológicos instrumentales posible. En este estudio se han utilizado fuentes de reanálisis, lo que incrementa la incertidumbre en el análisis realizado. Para reducir esta incertidumbre se corrige el sesgo existente en la precipitación de la base de datos a partir de datos instrumental procedentes de base de datos globales.

La utilización de redes neuronales permite realizar un modelo para cada cuenca vertiente de los puntos de estudio. El procedimiento para la construcción de los modelos consiste en extraer la cuenca vertiente y a su vez los datos climáticos en una serie de puntos distribuidos en la cuenca.

Posteriormente al análisis de la situación meteorológica actual de la zona de estudio, se ha procedido a la determinación de la evolución del clima en los escenarios y horizonte temporal señalado anteriormente.

A tal fin, se ha procedido, en primer lugar, a la corrección del sesgo de cada uno de los 10 modelos climáticos CORDEX de la malla SAM-44 para cada uno de los escenarios mediante técnicas de *downscaling* estadístico.

Una vez corregidos los modelos climáticos se procede a simular el caudal correspondiente a cada uno de los modelos tanto para el período considerado como referencia (1976-2005) como para los escenarios de cambio climático a partir de los modelos de redes neuronales.

Las conclusiones fundamentales del análisis del cambio climático en el municipio de Asunción son las siguientes:

- La utilización de redes neuronales en estudios con una alta cantidad de puntos de análisis permite realizar modelos individuales para reproducir las dinámicas fluviales de las cuencas vertientes a cada uno de los puntos de estudio, lo que se traduce en resultados más precisos que en modelos hidrológicos ya que se calibra individualmente.
- La calidad de la predicción de las redes neuronales depende fundamentalmente de la calidad de los datos climáticos y cómo de fidedigno sea la restitución a régimen natural de las series de caudal.
- El uso de redes neuronales aumenta la necesidad de recursos de cómputo para el ajuste predictivo, sin embargo, los tiempos de simulación son muy cortos.
- Uno de los inconvenientes del uso de redes neuronales es la resolución temporal a la que se puede simular. Por debajo de la resolución mensual la capacidad predictiva disminuye.
- El uso de una amplia cantidad de modelos climáticos permite analizar la incertidumbre que existe entre modelos sobre el resultado final que en este caso es la producción hidroeléctrica.
- Es necesario realizar un estudio previo de los periodos históricos de los modelos climáticos para observar si capturan correctamente la realidad.
- La utilización de un solo índice o estadístico no es apropiada para definir el rendimiento de un modelo predictivo, en ocasiones un valor bajo del índice de NSE no representa la totalidad de la bondad del ajuste, por ello es necesario valorar otro conjunto de índices.
- Para evitar que la falta de predictibilidad de los modelos climáticos en el período histórico se traslade a los escenarios futuros es necesario realizar una doble corrección de sesgo, la primera sobre las variables climáticas y la segunda sobre la variable resultante que en este caso es el caudal.

- Según las salidas de los modelos, el efecto del cambio climático se comporta de forma desigual en la zona de estudio dando lugar a zonas con fuertes incrementos y zonas con fuertes decrementos.
- Pequeños cambios en la precipitación pueden dar lugar a grandes cambios de caudal.
- El efecto de la temperatura sobre el caudal en algunas zonas es importante debido a la elevada evapotranspiración, efecto que es capturado por las redes neuronales.
- Aunque los eventos extremos se analizan a escala diaria, a escala mensual ya se aprecia que puede existir un incremento de los valores máximos de forma generalizada, aunque haya un descenso del caudal medio.



## 5. Etapa 2: análisis de escenarios climáticos en la generación fotovoltaica y eólica

---

### 5.1. Objetivos

---

Desarrollar un análisis de los escenarios climáticos disponibles para variables como la radiación, la velocidad del viento y la temperatura, sobre la generación eólica y solar fotovoltaica.

### 5.2. Planteamiento metodológico

---

En el presente apartado se presenta el planteamiento metodológico para el desarrollo de las proyecciones de cambio en el potencial de generación eólica y fotovoltaica.

### 5.3. Generación de proyecciones de variables climáticas corregidas

---

En la Etapa 1 del proyecto se ha desarrollado un análisis de las proyecciones generadas por CORDEX<sup>6</sup>. CORDEX es un programa patrocinado por el Programa Mundial de Investigación del Clima (WRCP) para organizar un marco coordinado internacionalmente para producir proyecciones regionales de cambio climático para todas las regiones terrestres del mundo. Dada la mayor resolución de las proyecciones regionales en relación con las proyecciones globales, el objetivo principal de CORDEX es facilitar el análisis de los impactos del cambio climático sobre regiones y actividades concretas, como es el caso del presente estudio.

Los datos empleados han sido los generados por modelos climáticos regionales para la Región 1 de Cordex (“South America”), con una resolución de 0,44 grados (Ver Figura 10).

Las proyecciones empleadas incluyen tanto el periodo histórico (considerando las salidas de los modelos climáticos de para el periodo 1975 – 2005) como los escenarios RCP4.5 y RCP 8.5 (considerando datos del periodo 2036-2055). Los datos originales generados por los modelos climáticos regionales o RCM han sido corregidos aplicando la técnica de corrección de sesgo denominada como Mapeo de distribución a escala o SDM (Switanek et al. 2017)<sup>7</sup>.

Estas series corregidas han sido generadas para 21 puntos de interés que se emplearán como centroides o puntos característicos del sistema energético de los países del Cono Sur. Como valores de referencia para abordar la corrección de sesgo se han considerado las observaciones

---

<sup>6</sup> WCRP CORDEX: Cordex. <https://cordex.org/>

<sup>7</sup> Switanek, B. Matthew et al. 2017. “Scaled Distribution Mapping: A Bias Correction Method That Preserves Raw Climate Model Projected Changes.” *Hydrology and Earth System Sciences* 21(6): 2649–66.

aportadas para estos 21 puntos por la empresa Meteoblue. Concretamente se han empleado los datos aportados por el producto “history+”<sup>8</sup>

Este proceso se ha llevado a cabo con cada una de las variables climáticas, para cada uno de los modelos de cambio climático y escenario. Es decir, en total este proceso se realiza para cada variable 27 veces (9 modelos x 2 Escenarios + 9 x 1 periodo histórico). Para otras variables, como la precipitación ha sido desarrollado 30 veces, pero en este caso, el modelo MOHC-HadGEM2-ES no arrojaba resultados coherentes y ha sido descartado en esta aplicación concreta.

#### **5.4. Proyecciones de cambio en la generación solar fotovoltaica**

Esta sección describe la metodología que se aplicará para evaluar el impacto del cambio climático en la energía solar. El potencial de generación de una instalación fotovoltaica depende principalmente de la cantidad de recurso solar (radiación solar), pero también de otros factores (internos y externos) que pueden influir en la eficiencia de las células, como las características físicas de la instalación, su antigüedad, temperatura ambiente, viento, sombras, contaminación y pérdidas eléctricas.

En relación al cambio climático, la radiación, la temperatura ambiente y el viento son las variables que podrían verse significativamente alteradas y que son evaluadas a través del análisis de las proyecciones de cambio climático bajo los siguientes planteamientos:

- Los aumentos de radiación solar implican aumentos proporcionales en la producción energética de la instalación.
- La temperatura ambiente sigue el patrón inverso, por lo que un aumento de este parámetro supondría una disminución del rendimiento y, por tanto, de la producción energética de la instalación.
- Respecto al viento, es un factor de “refrigeración” de las células fotovoltaicas, por lo que incrementos de viento (dentro de ciertos límites) serían beneficiosos para el sistema.

Diferentes tecnologías se ven afectadas de manera diferente bajo las mismas condiciones de radiación y temperatura (Crook 2011<sup>9</sup>). Existen múltiples estudios (por ejemplo, Panagea et al 2014<sup>10</sup>). En el presente análisis, la evaluación del cambio climático se realiza considerando los

---

<sup>8</sup>Meteoblue: History+: <https://www.meteoblue.com/es/historyplus>

<sup>9</sup> Crook, J. A. 2011. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. <http://dx.doi.org/10.1039/C1EE01495A>

<sup>10</sup> Panagea, I. S., Tsanis, I. K., Koutroulis, A. G. & Grillakis, M. G. 2014. Climate Change Impact on Photovoltaic Energy Output: The Case of Greece. *Advances in Meteorology*. doi:10.1155/2014/264506

algoritmos propuestos por Jerez (Jerez et al 2015<sup>11</sup>), que han sido empleados por varios autores posteriores (por ejemplo, por Changyong et al 2021<sup>12</sup>).

La ecuación principal de esta metodología es la siguiente:

$$PV_{pot}(t) = P_R(t) * \frac{RSDS(t)}{RSDS_{STC}} \quad (11)$$

Siendo:

PVpot(t) es Potencial de generación fotovoltaico para un determinado tiempo o periodo. Es una magnitud adimensional que relaciona la producción con la potencia nominal de las instalaciones.

STC hace referencia a condiciones normalizadas de ensayo o “standard test conditions”

RSDS<sub>STC</sub> es una constante de 1.000Wm<sup>-2</sup> (condiciones de ensayo).

RSDS(t) es la radiación solar descendente en la superficie, una de las salidas de los modelos de CORDEX

PR es la ratio de rendimiento y se calcula conforme a la siguiente ecuación:

$$P_R(t) = 1 + \gamma[T_{cell}(t) - T_{STC}] \quad (12)$$

Donde:

T<sub>cell</sub> es la temperatura en el interior la célula fotovoltaica,

T<sub>STC</sub> e la temperatura a la que se realizan los test, siendo 25 °C y

γ es una constante que representa la respuesta típica de los paneles de silicio monocristalino y se estima en -0,005 °C<sup>-1</sup>

Finalmente, T<sub>cell</sub>, se calcula considerando los efectos de la temperatura, la radiación y la velocidad del viento conforme a la siguiente fórmula.

$$T_{cell}(t) = c_1 + c_2TAS(t) + c_3 RSDS(t) + c_4 VWS(t) \quad (13)$$

Esta ecuación se alimenta con los datos de proyecciones corregidas generados en la Etapa 1 del proyecto:

---

<sup>11</sup> Sonia Jerez et al. 2015. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. Nature Communications. DOI: 10.1038/ncomms10014

<sup>12</sup> Changyong Park, Dong-Hyun Cha, Seok-Woo Shin, Gayoung Kim, and Taehyung Kim. 2021. Future projections of photovoltaic power generation on climate change simulated by CORDEX II multi-RCMs over East Asia. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-12934>

TAS(t) = Temperatura en la superficie para cada uno de los momentos temporales o “tiempos” t estudiados.

RSDS(t) = Radiación solar descendente en la superficie para cada uno de los momentos estudiados.

VWS(t) = velocidad del viento para cada uno de los momentos o tiempos estudiados.

Adicionalmente, los factores  $c_1$  a  $c_4$  se toman de Chenni et al. 2007<sup>13</sup>, aplicando los siguientes valores:

$$c_1 = 4.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$c_2 = 0.943 \text{ (adimensional)}$$

$$c_3 = 0.028 \text{ } ^\circ\text{C m}^2\text{W}^{-1}$$

$$c_4 = - 1.528 \text{ } ^\circ\text{Csm}^{-1}$$

En el artículo original de Jerez et al. las ecuaciones anteriores se calculaban para cada 3 horas, ya que ese es el “paso de tiempo” de los modelos empleados en dicho estudio. En el presente estudio se han aplicado con resolución horaria. Para ello se han generado valores horarios de temperatura, radiación y velocidad del viento a partir de los datos diarios aportados por C3S para CORDEX y los perfiles diarios que indican los datos de MeteoBlue.

## 5.5. Proyecciones de potencial eólico.

Los elementos clave considerados para caracterizar los cambios en la producción de energía eólica son los siguientes.

- Régimen eólico: sin duda el principal y más directo mecanismo por el que el cambio climático puede afectar al sector eólico. Esto también puede verse modificado por cambios en el uso del suelo (vegetación, rugosidad superficial), siendo este un efecto muy local y difícil de cuantificar.
- Densidad del aire: que también tiene un impacto directo en la producción eólica, aunque en menor medida. Su valor depende de la humedad, la temperatura y la presión atmosférica. Las temperaturas muy bajas podrían hacer que el generador funcionara por encima de su potencia nominal, lo que podría dañarlo e incluso requerir que la turbina se apague. Si se forma hielo en las palas, también podría aumentar su resistencia aerodinámica, lo que provocaría una desaceleración del rotor y, finalmente, la desconexión de la red.

---

<sup>13</sup> Chenni, R., Makhlouf, M., Kerbache, T. & Bouzid, A. A detailed modeling method for photovoltaic cells. Energy 32, 1724–1730 (2007). DOI: 10.1016/j.energy.2006.12.006

La primera barrera para evaluar el impacto del cambio climático en la energía eólica está relacionada con los resultados de los modelos. La velocidad del viento generalmente aumenta con la altura (conocido como "cizalladura") por lo que es esencial medir la velocidad del viento lo más cerca posible del eje de la turbina o, alternativamente, estimar el perfil de cizalladura. Los resultados del modelo generalmente proporcionan velocidades del viento cercanas a la superficie (típicamente 10 metros sobre la superficie). Algunas referencias (por ejemplo, Stadler 2015<sup>14</sup>) aplican la siguiente ecuación a todos los puntos de la cuadrícula y pasos de tiempo (en nuestro caso horarios):

$$U(t) = UR(t) * \left[ \frac{Z}{ZR} \right]^\alpha \quad (14)$$

Dónde:

U es la velocidad del viento estimada a la altura del eje (80 metros).

UR es la velocidad del viento cerca de la superficie (10 metros)

Z/ZR es la relación de la altura deseada sobre el suelo (Z = altura del eje) sobre la altura de referencia (ZR = altura a la que se midieron los datos de viento disponibles).

$\alpha$  = es un parámetro que refleja la estabilidad atmosférica y varía con las condiciones atmosféricas y la rugosidad del terreno (podría verse alterado por el cambio climático y dependiendo de la evolución del uso del suelo). Este exponente de cizalladura del viento normalmente se establece en 1/7 para condiciones de estabilidad neutral. Aunque la ecuación 4 no tiene en cuenta las variaciones temporales y espaciales en la rugosidad de la superficie y las condiciones de estabilidad atmosférica, que pueden afectar el perfil de la velocidad del viento, se usa ampliamente en el análisis de la energía eólica (por ejemplo, por Karnaukas et al.<sup>15</sup> y Tobin et al.<sup>16</sup>)

Una vez considerado este punto, a continuación, se describe la metodología empleada para transformar las series corregidas generadas a partir de salidas de CORDEX. Las salidas de estos modelos han sido ampliamente empleadas para calcular cambios en el potencial eólico. Un ejemplo

---

<sup>14</sup> Stadler, Stephen, James M. Dryden Jr., and J. S. Greene. 2015. "Climate Change Impacts on Oklahoma Wind Resources: Potential Energy Output Changes" Resources 4, no. 2: 203-226. <https://doi.org/10.3390/resources4020203>

<sup>15</sup> Karnaukas KB, Lundquist JK, Zhang L. Southward shift of the global wind energy resource under high carbon dioxide emissions. Nature Geosci. 2018;11(1):38-43. DOI: 10.1038/s41561-017-0029-9

<sup>16</sup> Tobin I, Jerez S, Vautard R, et al. Climate change impacts on the power generation potential of a European mid-century wind farms scenario. Environ Res Lett. 2016;11(3):034013. DOI: 10.1088/1748-9326/11/3/034013

es el estudio realizado por Clarke et al.<sup>17</sup>. En estos análisis, el planteamiento se basa en calcular la Densidad de Energía Eólica (WED) evaluando la energía cinética contenida en el viento. Este enfoque se usa comúnmente para evaluar las implicaciones de los cambios de velocidad del viento cerca de la superficie para el recurso de energía eólica aplicando la siguiente ecuación:

$$WED = \frac{1}{2} \times \rho \times U^3 \quad (15)$$

Siendo,

WED = Densidad energética del viento.

P = Densidad del aire

U = velocidad del viento.

La densidad del aire es evaluada a partir de la temperatura y presión. Por ejemplo, MacLeod<sup>18</sup> y otros autores proponen aplicar una relación lineal basada en una expansión adiabática. Sin embargo, en el presente estudio se ha considerado la metodología indicada en el Modelo de central de generación eólica, redactado por Pablo Soubes, Felipe Palacio y Ruben Chaer en 2018 para la Administración del Mercado Eléctrico de Uruguay<sup>19</sup>. En base a este procedimiento, se aplicará la siguiente ecuación para calcular la influencia de los parámetros ambientales en la densidad del aire:

$$Potencia = Potencia (v) * \left( \frac{15 + 273.15}{TAS + 273.15} \right)^{1/3} \quad (16)$$

Siendo:

Potencia: Potencia final considerando el efecto de la temperatura.

Potencia (v): potencia acorde a la curva de potencia de un generador tipo. Se puede apreciar en la tabla siguiente.

TAS= temperatura generada a partir de los modelos de Cordex

---

<sup>17</sup> Eadaoin Doddy Clarke, Conor Sweeney, Frank McDermott, Seánie Griffin, João Monteiro Correia, Paul Nolan, Laura Cooke. 2021. Climate change impacts on wind energy generation in Ireland. <https://doi.org/10.1002/we.2673>

<sup>18</sup> MacLeod, D., Torralba, V., Davis, M. & Doblaz-Reyes, F. 2018. Transforming climate model output to forecasts of wind power production: how much resolution is enough? *Meteorol. Appl.* 25, 1–10. <https://doi.org/10.1002/met.1660>

<sup>19</sup> Pablo Soubes, Felipe Palacio, Ruben Chaer. 2018. Modelo de central de generación eólica. Administración del Mercado Eléctrico. [https://www.adme.com.uy/db-docs/Docs\\_secciones/nid\\_324/ModeloCentralGeneradoraEolica.pdf](https://www.adme.com.uy/db-docs/Docs_secciones/nid_324/ModeloCentralGeneradoraEolica.pdf)

**Tabla 8: Curva de potencia considerada para el generador tipo**

| Velocidad del viento [m/s] | Potencia Generada para una velocidad del viento v[MW] | Potencia/Potencia máxima |
|----------------------------|---|--------------------------|
| 0.00                       | 0.000   | 0.000                    |
| 1.00                       | 0.000   | 0.000                    |
| 2.00                       | 0.000   | 0.000                    |
| 3.00                       | 0.035   | 0.015                    |
| 4.00                       | 0.161   | 0.067                    |
| 5.00                       | 0.362   | 0.150                    |
| 6.00                       | 0.651   | 0.270                    |
| 7.00                       | 1.046   | 0.434                    |
| 8.00                       | 1.533   | 0.636                    |
| 9.00                       | 2.045   | 0.849                    |
| 10.00                      | 2.334   | 0.969                    |
| 11.00                      | 2.409   | 1.000                    |
| 12.00                      | 2.409   | 1.000                    |
| 13.00                      | 2.409   | 1.000                    |
| 14.00                      | 2.409   | 1.000                    |
| 15.00                      | 2.409   | 1.000                    |
| 16.00                      | 2.409   | 1.000                    |
| 17.00                      | 2.409   | 1.000                    |
| 18.00                      | 2.409   | 1.000                    |
| 19.00                      | 2.409   | 1.000                    |
| 20.00                      | 2.409   | 1.000                    |
| 21.00                      | 0   | 0                        |
| 22.00                      | 0   | 0                        |
| 23.00                      | 0   | 0                        |
| 24.00                      | 0   | 0                        |
| 25.00                      | 0   | 0                        |
| 26.00                      | 0   | 0                        |
| 27.00                      | 0   | 0                        |
| 28.00                      | 0   | 0                        |
| 29.00                      | 0   | 0                        |
| 30.00                      | 0   | 0                        |
| 31.00                      | 0   | 0                        |

## 6. Resultados del análisis climático sobre la generación fotovoltaica y eólica

En este apartado se presentan los resultados obtenidos al aplicar las metodologías anteriormente expuestas considerando los escenarios climáticos generados en las primeras etapas del proyecto. En las tablas siguientes se presente proyecciones de cambio del potencial fotovoltaico para los 21 puntos seleccionados como centroides del sistema energético de Cono Sur. Para cada uno de ellos se realizarán 9 estimaciones de cambio de ambos potenciales, una para cada modelo RCM.

**Tabla 9: Coordenadas de los puntos analizados**

| Número de punto | Latitud    | Longitud  |
|-----------------|------------|-----------|
| 1               | -34.666725 | -56.25    |
| 2               | -25.666733 | -52.5     |
| 3               | -24.666733 | -56.25    |
| 4               | -25.333405 | -59.53125 |
| 5               | -28.000065 | -62.34375 |
| 6               | -32.333393 | -60       |
| 7               | -26.666733 | -55.3125  |
| 8               | -23.333405 | -59.53125 |
| 9               | -31.666729 | -54.375   |
| 10              | -33.00006  | -56.25    |
| 11              | -30.666729 | -63.75    |
| 12              | -29.000065 | -52.03125 |
| 13              | -30.666729 | -58.125   |
| 14              | -34.333393 | -62.34375 |
| 15              | -32.666725 | -65.625   |
| 16              | -37.000053 | -67.96875 |
| 17              | -37.66672  | -59.53125 |
| 18              | -45.33338  | -68.90625 |
| 19              | -47.333378 | -69.84375 |
| 20              | -39.000053 | -62.8125  |
| 21              | -40.666718 | -67.5     |

Los resultados se presentan mostrando los promedios y la amplitud (diferencia entre los valores máximos y mínimos de todos los modelos), que es representativa de la incertidumbre.



**Tabla 10: Ratio de cambio en el potencial fotovoltaico para el escenario RCP4.5**

| Punto | CCMa-<br>CanESM2 | CNRM-<br>CERFACS-CNRM-<br>r <sub>MFE</sub> | CSIRO-QCCCE-<br>CSIRO-Mk3-6-0 | ICHEC-EC-<br>EARTH | IPSL-IPSL-CM5A-<br>MR | MIROC-MIROC5 | MPI-M-MPI-ESM-<br>LR | NCC-NorESM1-M | NOAA-GFDL-<br>GFDL-ESM2M | Promedio | Amplitud de los<br>resultados |
|-------|------------------|--|-------------------------------|--------------------|-----------------------|--------------|----------------------|---------------|--------------------------|----------|-------------------------------|
| 1     | -0.016           | -0.009                                     | -0.011                        | -0.007             | -0.023                | -0.003       | -0.013               | -0.001        | -0.009                   | -0.010   | 0.023                         |
| 2     | -0.013           | -0.017                                     | -0.019                        | -0.019             | -0.038                | -0.020       | -0.022               | -0.018        | -0.023                   | -0.021   | 0.024                         |
| 3     | -0.021           | -0.001                                     | -0.021                        | 0.002              | -0.001                | -0.010       | -0.010               | -0.009        | 0.004                    | -0.007   | 0.025                         |
| 4     | -0.032           | -0.004                                     | -0.015                        | -0.002             | -0.004                | -0.013       | -0.020               | -0.008        | -0.003                   | -0.011   | 0.029                         |
| 5     | -0.018           | -0.002                                     | -0.002                        | 0.001              | -0.007                | -0.004       | -0.012               | 0.010         | -0.008                   | -0.005   | 0.027                         |
| 6     | -0.014           | -0.007                                     | -0.002                        | -0.004             | -0.013                | -0.001       | -0.009               | 0.006         | -0.009                   | -0.006   | 0.021                         |
| 7     | -0.010           | -0.017                                     | -0.017                        | -0.021             | -0.037                | -0.021       | -0.022               | -0.018        | -0.023                   | -0.021   | 0.027                         |
| 8     | -0.032           | -0.005                                     | -0.025                        | -0.003             | 0.003                 | -0.019       | -0.011               | -0.016        | -0.004                   | -0.012   | 0.035                         |
| 9     | -0.016           | -0.006                                     | -0.021                        | -0.020             | -0.026                | -0.018       | -0.028               | -0.015        | -0.020                   | -0.019   | 0.021                         |
| 10    | -0.014           | -0.007                                     | -0.004                        | -0.010             | -0.018                | 0.000        | -0.011               | 0.002         | -0.008                   | -0.008   | 0.021                         |
| 11    | -0.017           | -0.007                                     | -0.001                        | -0.007             | -0.017                | -0.002       | -0.011               | 0.011         | -0.007                   | -0.007   | 0.028                         |
| 12    | -0.008           | -0.008                                     | -0.014                        | -0.019             | -0.036                | -0.020       | -0.027               | -0.021        | -0.025                   | -0.020   | 0.027                         |
| 13    | -0.018           | -0.005                                     | -0.011                        | -0.003             | -0.021                | -0.006       | -0.016               | 0.006         | -0.010                   | -0.009   | 0.027                         |
| 14    | -0.012           | -0.008                                     | -0.006                        | -0.008             | -0.020                | -0.004       | -0.011               | 0.011         | -0.004                   | -0.007   | 0.031                         |
| 15    | -0.017           | -0.010                                     | 0.014                         | -0.006             | 0.000                 | 0.014        | -0.012               | 0.040         | 0.017                    | 0.004    | 0.057                         |
| 16    | -0.018           | -0.012                                     | -0.025                        | -0.011             | -0.013                | -0.004       | -0.011               | 0.005         | 0.002                    | -0.010   | 0.030                         |
| 17    | -0.016           | -0.010                                     | -0.017                        | -0.011             | -0.010                | -0.010       | -0.010               | 0.000         | -0.001                   | -0.009   | 0.017                         |
| 18    | -0.009           | -0.012                                     | -0.019                        | -0.008             | -0.008                | -0.007       | -0.007               | -0.004        | -0.004                   | -0.009   | 0.015                         |
| 19    | -0.021           | -0.016                                     | -0.029                        | -0.017             | -0.017                | -0.014       | -0.013               | -0.013        | -0.005                   | -0.016   | 0.023                         |
| 20    | -0.016           | -0.015                                     | -0.029                        | -0.007             | -0.014                | -0.013       | -0.013               | -0.004        | -0.001                   | -0.012   | 0.028                         |
| 21    | -0.024           | -0.014                                     | -0.024                        | -0.008             | -0.011                | -0.010       | -0.011               | 0.000         | -0.002                   | -0.012   | 0.024                         |

**Tabla 11: Ratio de cambio en el potencial fotovoltaico para el escenario RCP8.5**

| Punto | CCCma-CanESM2 | CNRM-CERFACS-<br>CNRM-CM5 | CSIRO-QCCCE-<br>CSIRO-Mk3-6-0 | ICHEC-EC-EARTH | IPSL-IPSL-CM5A-<br>MR | MIROC-MIROC5 | MPI-M-MPI-ESM-LR | NCC-NorESM1-M | NOAA-GFDL-GFDL-<br>ESM2M | Promedio | Amplitud de los<br>resultados |
|-------|---------------|---------------------------|-------------------------------|----------------|-----------------------|--------------|------------------|---------------|--------------------------|----------|-------------------------------|
| 1     | -0.020        | -0.011                    | -0.008                        | -0.003         | -0.024                | -0.006       | -0.020           | -0.001        | -0.008                   | -0.011   | 0.022                         |
| 2     | -0.023        | -0.019                    | -0.014                        | -0.031         | -0.047                | -0.026       | -0.029           | -0.018        | -0.035                   | -0.027   | 0.033                         |
| 3     | -0.022        | -0.005                    | -0.021                        | -0.002         | 0.005                 | -0.008       | -0.012           | -0.012        | -0.005                   | -0.009   | 0.027                         |
| 4     | -0.030        | -0.006                    | -0.005                        | -0.004         | -0.005                | -0.012       | -0.021           | -0.004        | -0.014                   | -0.011   | 0.026                         |
| 5     | -0.024        | -0.008                    | 0.010                         | -0.001         | -0.004                | -0.006       | -0.014           | 0.017         | -0.004                   | -0.004   | 0.041                         |
| 6     | -0.016        | -0.010                    | 0.005                         | -0.005         | -0.011                | -0.007       | -0.017           | 0.011         | -0.004                   | -0.006   | 0.028                         |
| 7     | -0.016        | -0.022                    | -0.014                        | -0.039         | -0.050                | -0.028       | -0.035           | -0.021        | -0.035                   | -0.029   | 0.035                         |
| 8     | -0.027        | -0.005                    | -0.017                        | -0.003         | 0.004                 | -0.016       | -0.015           | -0.016        | -0.016                   | -0.012   | 0.031                         |
| 9     | -0.025        | -0.009                    | -0.012                        | -0.039         | -0.042                | -0.022       | -0.041           | -0.024        | -0.024                   | -0.027   | 0.033                         |
| 10    | -0.021        | -0.010                    | 0.002                         | -0.006         | -0.017                | -0.001       | -0.018           | 0.002         | -0.009                   | -0.009   | 0.023                         |
| 11    | -0.017        | -0.010                    | 0.003                         | -0.007         | -0.016                | -0.002       | -0.016           | 0.016         | -0.006                   | -0.006   | 0.033                         |
| 12    | -0.017        | -0.013                    | -0.012                        | -0.037         | -0.050                | -0.027       | -0.036           | -0.031        | -0.033                   | -0.029   | 0.037                         |
| 13    | -0.026        | -0.009                    | 0.003                         | -0.006         | -0.018                | -0.007       | -0.022           | 0.005         | -0.007                   | -0.010   | 0.031                         |
| 14    | -0.015        | -0.012                    | -0.007                        | -0.007         | -0.022                | -0.004       | -0.019           | 0.011         | -0.006                   | -0.009   | 0.032                         |
| 15    | -0.011        | -0.020                    | 0.012                         | -0.007         | 0.008                 | 0.023        | -0.024           | 0.036         | 0.007                    | 0.002    | 0.061                         |
| 16    | -0.014        | -0.019                    | -0.023                        | -0.012         | -0.014                | -0.002       | -0.019           | 0.005         | -0.002                   | -0.011   | 0.028                         |
| 17    | -0.018        | -0.012                    | -0.015                        | -0.007         | -0.011                | -0.005       | -0.020           | 0.004         | -0.004                   | -0.010   | 0.023                         |
| 18    | -0.012        | -0.017                    | -0.021                        | -0.011         | -0.011                | -0.007       | -0.010           | -0.006        | -0.006                   | -0.011   | 0.015                         |
| 19    | -0.021        | -0.034                    | -0.033                        | -0.010         | -0.018                | -0.010       | -0.017           | -0.015        | -0.008                   | -0.018   | 0.025                         |
| 20    | -0.021        | -0.019                    | -0.026                        | -0.012         | -0.013                | -0.011       | -0.020           | -0.004        | -0.008                   | -0.015   | 0.022                         |
| 21    | -0.024        | -0.016                    | -0.026                        | -0.014         | -0.013                | -0.011       | -0.016           | -0.003        | -0.008                   | -0.015   | 0.023                         |

Los cambios del potencial fotovoltaico en el escenario RCP4.5 se sitúan en torno al 1% (0,01), aunque con diferencias notables entre los diferentes puntos y modelos considerados. De hecho, para algunos puntos hay estimaciones de reducciones del potencial del doble de esta cantidad (por ejemplo, del 2% de promedio en los puntos 7, 9 y 12), y en otros de la mitad (como en el punto 5). En el escenario RCP8.5 en promedio, la reducción del potencial fotovoltaico es del 1,3%. Es conveniente tener presente que los cambios en la radiación son similares en ambos escenarios (en torno al 0,5%). En cambio, con carácter general, las mayores temperaturas del escenario RCP4.5 hacen que un mayor número de días se registren pérdidas de eficiencia por temperatura elevada en las células fotovoltaicas. No obstante, no se puede establecer que en todos los puntos el escenario RCP8.5 sea más negativo que el RCP4.5.

**Tabla 12: Ratio de cambio en el potencial eólico para el escenario RCP4.5**

| Punto | CCCma-CanESM2 | CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 | CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0 | ICHEC-EC-EARTH | IPSL-IPSL-CM5A-MR | MIROC-MIROC5 | MPI-M-MPI-ESM-LR | NCC-NotESM1-M | NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M | Promedio | Amplitud de resultados |
|-------|---------------|-----------------------|---------------------------|----------------|-------------------|--------------|------------------|---------------|----------------------|----------|------------------------|
| 1     | -0.004        | 0.002                 | 0.016                     | 0.030          | -0.013            | 0.011        | -0.003           | -0.002        | 0.034                | 0.008    | 0.047                  |
| 2     | 0.081         | 0.010                 | 0.061                     | -0.022         | 0.017             | 0.080        | 0.036            | 0.065         | 0.103                | 0.048    | 0.125                  |
| 3     | 0.055         | 0.031                 | 0.083                     | 0.064          | 0.069             | 0.028        | 0.071            | 0.023         | 0.074                | 0.055    | 0.060                  |
| 4     | -0.001        | 0.022                 | 0.065                     | 0.063          | 0.092             | 0.040        | 0.053            | 0.033         | 0.065                | 0.048    | 0.093                  |
| 5     | 0.025         | 0.031                 | 0.063                     | 0.080          | 0.071             | 0.044        | 0.046            | 0.048         | 0.045                | 0.050    | 0.055                  |
| 6     | 0.017         | 0.023                 | 0.035                     | 0.052          | 0.030             | 0.025        | 0.024            | 0.037         | 0.027                | 0.030    | 0.035                  |
| 7     | 0.096         | -0.008                | 0.054                     | -0.008         | 0.022             | 0.083        | 0.032            | 0.062         | 0.113                | 0.050    | 0.122                  |
| 8     | 0.041         | 0.027                 | 0.053                     | 0.049          | 0.056             | 0.032        | 0.080            | 0.014         | 0.050                | 0.045    | 0.066                  |
| 9     | 0.046         | -0.072                | -0.005                    | 0.028          | -0.032            | -0.037       | 0.006            | -0.016        | 0.016                | -0.007   | 0.118                  |
| 10    | 0.033         | 0.029                 | 0.041                     | 0.055          | 0.017             | 0.048        | 0.034            | 0.023         | 0.037                | 0.035    | 0.039                  |
| 11    | 0.002         | 0.022                 | 0.030                     | 0.057          | 0.041             | 0.048        | 0.018            | 0.044         | 0.050                | 0.035    | 0.055                  |
| 12    | 0.089         | -0.045                | 0.024                     | 0.021          | 0.008             | 0.030        | 0.016            | 0.039         | 0.076                | 0.029    | 0.134                  |
| 13    | 0.037         | 0.032                 | 0.055                     | 0.070          | 0.062             | 0.060        | 0.037            | 0.043         | 0.046                | 0.049    | 0.038                  |
| 14    | 0.009         | 0.005                 | 0.010                     | 0.029          | -0.029            | -0.001       | 0.011            | 0.001         | 0.024                | 0.007    | 0.058                  |

|    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 15 | 0.024  | 0.004  | 0.030  | 0.047  | 0.007  | 0.032  | 0.029  | 0.010  | 0.058  | 0.027  | 0.054 |
| 16 | -0.028 | -0.028 | -0.040 | -0.008 | -0.025 | 0.001  | -0.018 | 0.000  | 0.001  | -0.016 | 0.041 |
| 17 | -0.033 | -0.016 | -0.031 | 0.015  | -0.034 | -0.025 | -0.017 | -0.010 | 0.016  | -0.015 | 0.051 |
| 18 | -0.039 | -0.024 | -0.036 | -0.002 | 0.000  | -0.006 | -0.011 | -0.005 | 0.010  | -0.013 | 0.049 |
| 19 | -0.045 | -0.024 | -0.038 | -0.001 | 0.014  | 0.002  | -0.004 | -0.011 | 0.018  | -0.010 | 0.063 |
| 20 | -0.025 | -0.012 | -0.035 | 0.017  | -0.028 | -0.020 | -0.014 | -0.022 | 0.017  | -0.014 | 0.052 |
| 21 | -0.089 | -0.028 | -0.060 | -0.014 | -0.048 | -0.021 | -0.039 | -0.018 | -0.009 | -0.036 | 0.080 |

**Tabla 13: Ratio de cambio en el potencial eólico para el escenario RCP8.5**

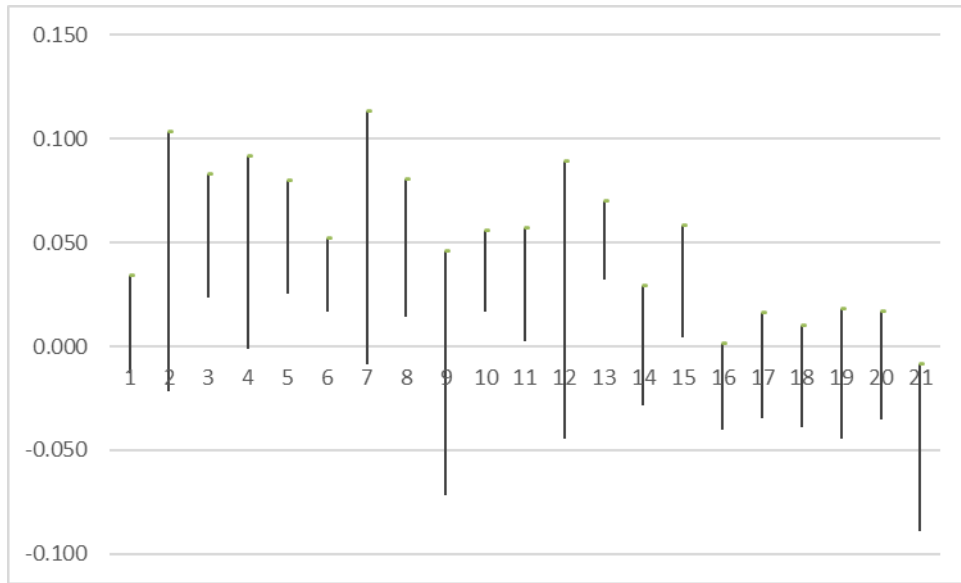
| Punto | CCCma-CanESM2 | CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 | CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0 | ICHEC-EC-EARTH | IPSL-IPSL-CM5A-MR | MIROC-MIROC5 | MPI-M-MPI-ESM-LR | NCC-NorESM1-M | NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M | Promedio | Amplitud de resultados |
|-------|---------------|-----------------------|---------------------------|----------------|-------------------|--------------|------------------|---------------|----------------------|----------|------------------------|
| 1     | -0.001        | 0.010                 | 0.040                     | 0.048          | -0.003            | 0.011        | 0.003            | -0.007        | 0.023                | 0.014    | 0.055                  |
| 2     | 0.101         | 0.019                 | 0.080                     | 0.020          | -0.018            | 0.080        | 0.055            | 0.088         | 0.144                | 0.063    | 0.162                  |
| 3     | 0.082         | 0.033                 | 0.084                     | 0.059          | 0.089             | 0.076        | 0.100            | 0.029         | 0.130                | 0.076    | 0.101                  |
| 4     | 0.053         | 0.026                 | 0.108                     | 0.059          | 0.117             | 0.075        | 0.078            | 0.044         | 0.094                | 0.073    | 0.091                  |
| 5     | 0.035         | 0.056                 | 0.102                     | 0.080          | 0.116             | 0.046        | 0.074            | 0.045         | 0.078                | 0.070    | 0.081                  |
| 6     | 0.030         | 0.020                 | 0.075                     | 0.049          | 0.062             | 0.023        | 0.043            | 0.036         | 0.063                | 0.045    | 0.056                  |
| 7     | 0.124         | -0.010                | 0.086                     | 0.037          | -0.018            | 0.073        | 0.053            | 0.087         | 0.158                | 0.065    | 0.176                  |
| 8     | 0.088         | 0.021                 | 0.072                     | 0.038          | 0.103             | 0.076        | 0.101            | 0.014         | 0.052                | 0.063    | 0.090                  |
| 9     | 0.065         | -0.085                | -0.002                    | 0.055          | -0.081            | -0.033       | -0.001           | -0.010        | 0.002                | -0.010   | 0.149                  |
| 10    | 0.057         | 0.037                 | 0.094                     | 0.069          | 0.042             | 0.048        | 0.047            | 0.031         | 0.052                | 0.053    | 0.063                  |
| 11    | 0.028         | 0.003                 | 0.059                     | 0.063          | 0.077             | 0.040        | 0.038            | 0.065         | 0.078                | 0.050    | 0.075                  |
| 12    | 0.119         | -0.056                | 0.048                     | 0.059          | -0.036            | 0.023        | 0.033            | 0.055         | 0.102                | 0.039    | 0.175                  |

|    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 13 | 0.053  | 0.053  | 0.110  | 0.071  | 0.097  | 0.064  | 0.056  | 0.078  | 0.094  | 0.075  | 0.057 |
| 14 | 0.019  | -0.010 | 0.018  | 0.050  | -0.021 | 0.009  | 0.004  | -0.009 | 0.026  | 0.010  | 0.071 |
| 15 | 0.024  | -0.017 | 0.046  | 0.057  | 0.022  | 0.021  | 0.022  | -0.003 | 0.055  | 0.025  | 0.074 |
| 16 | -0.018 | -0.052 | -0.028 | 0.002  | -0.026 | -0.017 | -0.036 | -0.005 | -0.019 | -0.022 | 0.054 |
| 17 | -0.024 | -0.029 | -0.015 | 0.029  | -0.036 | -0.015 | -0.028 | -0.026 | 0.002  | -0.016 | 0.064 |
| 18 | -0.039 | -0.029 | -0.030 | 0.011  | -0.004 | 0.008  | -0.008 | 0.011  | 0.005  | -0.008 | 0.050 |
| 19 | -0.049 | -0.024 | -0.035 | 0.018  | 0.007  | 0.024  | 0.000  | 0.007  | 0.009  | -0.005 | 0.073 |
| 20 | -0.023 | -0.036 | -0.017 | 0.023  | -0.022 | -0.015 | -0.022 | -0.030 | -0.002 | -0.016 | 0.059 |
| 21 | -0.092 | -0.044 | -0.054 | -0.008 | -0.045 | -0.038 | -0.043 | -0.018 | -0.042 | -0.043 | 0.083 |

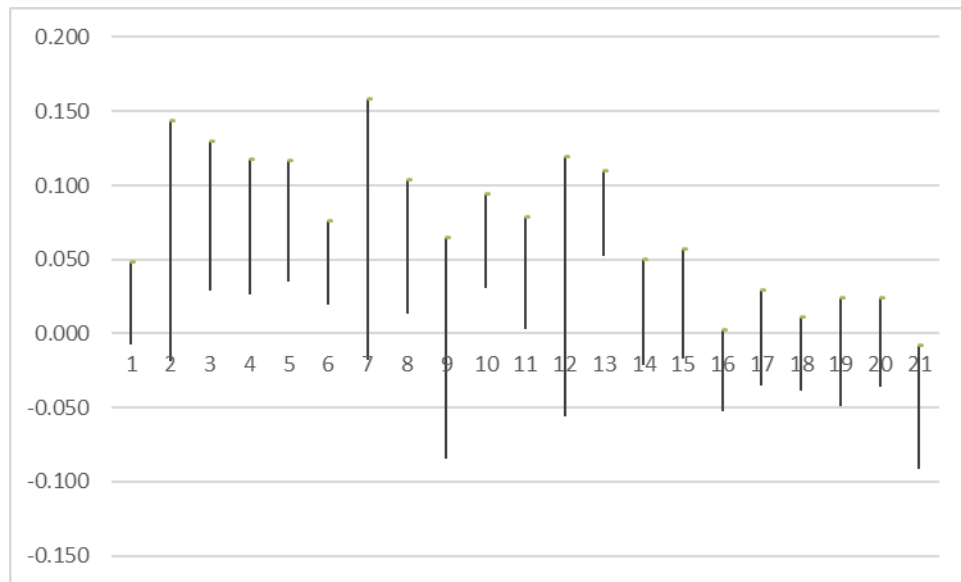
Los cambios del potencial eólico presentan una gran amplitud de resultados en función del modelo RCM considerado, tanto para el escenario RCP4.5 como para el escenario RCP8.5. Como promedio, en los diferentes puntos estudiados el potencial eólico se ve incrementado en un 2% con el escenario RCP4.5, mientras que con el escenario RCP8.5, este promedio se aproxima al 3%. No obstante, estos cambios promedios, no reflejan las grandes diferencias entre los diferentes puntos. En ambos escenarios hay puntos donde el cambio es de signo positivo y otros en los que es de carácter negativo.

Al analizar la amplitud de los resultados generados con diferentes modelos para cada uno de los puntos, se puede ver que la amplitud de resultados supera generalmente a la tasa de cambio estimada. De este modo, más que establecer tendencias generales, es posible concluir que para, esta fuente de generación, las tendencias futuras son altamente inciertas. Para reflejar esta situación, en las imágenes siguientes se muestra la amplitud de los resultados generados.

**Figura 18:** Amplitud de las tasas de cambio del potencial eólico generadas con 9 modelos RCM diferentes para los 21 puntos estudiados considerando el escenario RCP4.5



**Figura 19:** Amplitud de las tasas de cambio del potencial eólico generadas con 9 modelos RCM diferentes para los 21 puntos estudiados considerando el escenario RCP8.5



## 7. Bibliografía

---

Cannon, Alex J., Stephen R. Sobie, and Trevor Q. Murdock. 2015. "Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes?" *Journal of Climate* 28(17): 6938–59.

Changyong Park, Dong-Hyun Cha, Seok-Woo Shin, Gayoung Kim, and Taehyung Kim. 2021. Future projections of photovoltaic power generation on climate change simulated by CORDEX II multi-RCMs over East Asia. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-12934>

Chenni, R., Makhlof, M., Kerbache, T. & Bouzid, A. 2006. A detailed modeling method for photovoltaic cells. *Energy* 32, 1724–1730 (2007). DOI: 10.1016/j.energy.2006.12.006

Crook, J. A. 2011. Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. <http://dx.doi.org/10.1039/C1EE01495A>

Copernicus Climate Change Service. "CORDEX Regional Climate Model Data on Single Levels." <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cordex-domains-single-levels?tab=overview> (June 8, 2022).

D. N. Moriasi et al. 2007. "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations." *Transactions of the ASABE* 50(3): 885–900.

Donnelly, Chantal, Jafet C.M. Andersson, and Berit Arheimer. 2016. "Using Flow Signatures and Catchment Similarities to Evaluate the E-HYPE Multi-Basin Model across Europe." *Hydrological Sciences Journal* 61(2): 255–73.

Eadaoin Duddy Clarke, Conor Sweeney, Frank McDermott, Seánie Griffin, João Monteiro Correia, Paul Nolan, Laura Cooke. 2021. Climate change impacts on wind energy generation in Ireland. <https://doi.org/10.1002/we.2673>

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. 2017. "ERA5 Reanalysis." <https://doi.org/10.5065/D6X34W69>.

Eyring, Veronika et al. 2016. "Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) Experimental Design and Organization." *Geoscientific Model Development* 9(5): 1937–58.

Hausfather, Zeke. 2019. "The High-Emissions 'RCP8.5' Global Warming Scenario." *CarbonBrief*. <https://www.carbonbrief.org/explainer-the-high-emissions-rcp8-5-global-warming-scenario/> (June 8, 2022).

Hausfather, Zeke, and Glen P. Peters. 2020. "Emissions – the 'Business as Usual' Story Is Misleading." *Nature* 2021 577:7792 577(7792): 618–20. <https://www.nature.com/articles/d41586-020-00177-3> (June 8, 2022).

Ines, Amor V.M., and James W. Hansen. 2006. "Bias Correction of Daily GCM Rainfall for Crop Simulation Studies." *Agricultural and Forest Meteorology* 138(1–4): 44–53.

IPCC. 2022. "Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report." <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/> (June 8, 2022).

Jain, Sharad K, and K P Sudheer. "Fitting of Hydrologic Models: A Close Look at the Nash-Sutcliffe Index."

del Jesus, M. et al. 2020. "Efectos Del Cambio Climático En El Recurso Hídrico de Los Países Andinos." *Ingeniería del agua* 24(4): 219.

Karnauskas KB, Lundquist JK, Zhang L. Southward shift of the global wind energy resource under high carbon dioxide emissions. *Nature Geosci.* 2018;11(1):38-43. DOI: 10.1038/s41561-017-0029-9

MacLeod, D., Torralba, V., Davis, M. & Doblas-Reyes, F. 2018. Transforming climate model output to forecasts of wind power production: how much resolution is enough? *Meteorol. Appl.* 25, 1–10. <https://doi.org/10.1002/met.1660>

Menne, Matthew J et al. 2012. "Global Historical Climatology Network - Daily (GHCN-Daily), Version 3." <https://www.ncei.noaa.gov/metadata/geoportal/rest/metadata/item/gov.noaa.ncdc:C00861/html>.

Meteoblue: History+: <https://www.meteoblue.com/es/historyplus>

Panagea, I. S., Tsanis, I. K., Koutroulis, A. G. & Grillakis, M. G. 2014. Climate Change Impact on Photovoltaic Energy Output: The Case of Greece. *Advances in Meteorology.* doi:10.1155/2014/264506

Parisouj, Peiman, Hamid Mohebzadeh, and Taesam Lee. 2020. "Employing Machine Learning Algorithms for Streamflow Prediction: A Case Study of Four River Basins with Different Climatic Zones in the United States." *Water Resources Management* 34(13): 4113–31.

Sonia Jerez et al. 2015. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nature Communications.* DOI: 10.1038/ncomms10014

Soubes, Pablo, Palacio, Felipe, Chaer, Ruben. 2018. Modelo de central de generación eólica. Administración del Mercado Eléctrico. [https://www.adme.com.uy/db-docs/Docs\\_secciones/nid\\_324/ModeloCentralGeneradoraEolica.pdf](https://www.adme.com.uy/db-docs/Docs_secciones/nid_324/ModeloCentralGeneradoraEolica.pdf)

Switanek, B. Matthew et al. 2017. "Scaled Distribution Mapping: A Bias Correction Method That Preserves Raw Climate Model Projected Changes." *Hydrology and Earth System Sciences* 21(6): 2649–66.

Tebaldi, C., and R. Knutti. 2007. "The Use of the Multi-Model Ensemble in Probabilistic Climate Projections." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 365(1857): 2053–75.



Themeßl, Matthias Jakob, Andreas Gobiet, and Georg Heinrich. 2012. “Empirical-Statistical Downscaling and Error Correction of Regional Climate Models and Its Impact on the Climate Change Signal.” *Climatic Change* 112(2): 449–68.

Tobin I, Jerez S, Vautard R, et al. Climate change impacts on the power generation potential of a European mid-century wind farms scenario. *Environ Res Lett.* 2016;11(3):034013. DOI: 10.1088/1748-9326/11/3/034013

van Vuuren, Detlef P. et al. 2011. “The Representative Concentration Pathways: An Overview.” *Climat. Change* 109(1): 5.

WCRP CORDEX: Cordex. <https://cordex.org/>

## 8. Anexo 1: Descripción de la información aportada por los modelos climáticos

---

En el presente apartado se incluye más información acerca de los datos de los modelos climáticos empleados para generar las proyecciones climáticas.

### 8.1. Análisis de la incertidumbre

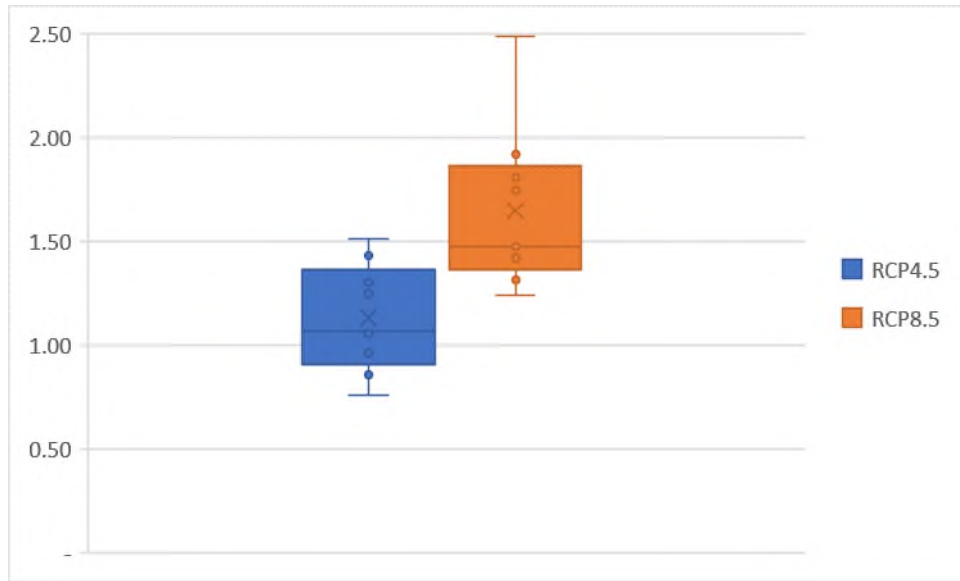
---

El uso de datos de diferentes modelos tiene el objetivo principal de recoger la incertidumbre existente en cuanto a nuestro actual conocimiento de la previsible evolución del clima gracias al uso de modelos climáticos. Ya que cada modelo cuenta con diferentes características y componentes, el rango de posibles resultados refleja la incertidumbre existente en cuanto a como el sistema climático va a responder a cambios en los forzamientos climáticos (definidos por diferentes RCP comunes para todos ellos).

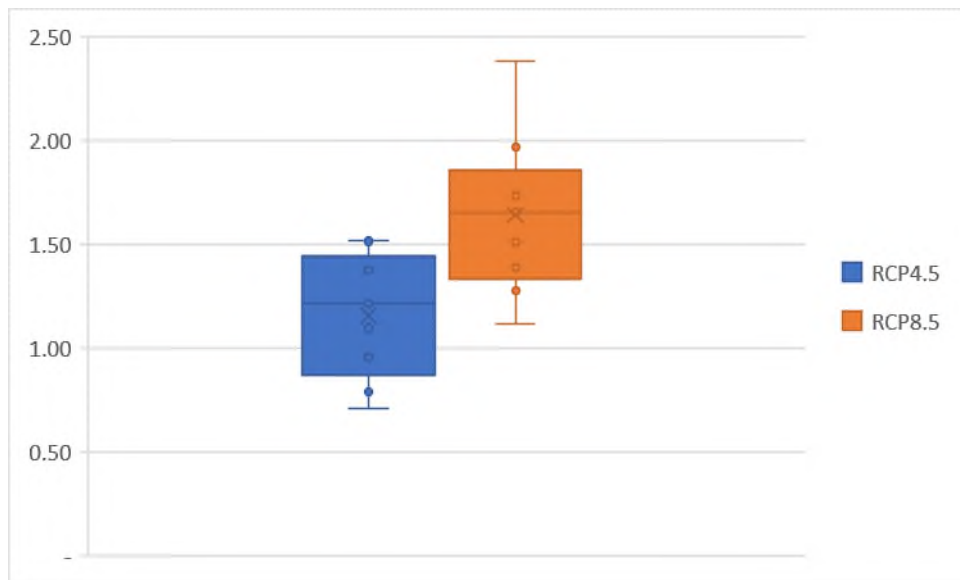
En las imágenes siguientes se presenta el promedio del cambio de diferentes variables para los 21 puntos para los que se han generado proyecciones climáticas corregidas. Estos datos son previos a la aplicación de ninguna técnica de corrección y muestran las tasas de cambio que nos indican las salidas de los modelos sin procesar. Se puede emplear la amplitud de resultados como una aproximación de la incertidumbre asociada al empleo de diferentes modelos.

En las mismas, la “X” representa el cambio promedio. La caja representa los valores del percentil 25 (borde superior), 50 (línea intermedia) y 75 (borde inferior). Las cajas pueden tener líneas que se extienden verticalmente llamadas “bigotes”. Estas líneas indican los valores máximos y mínimos.

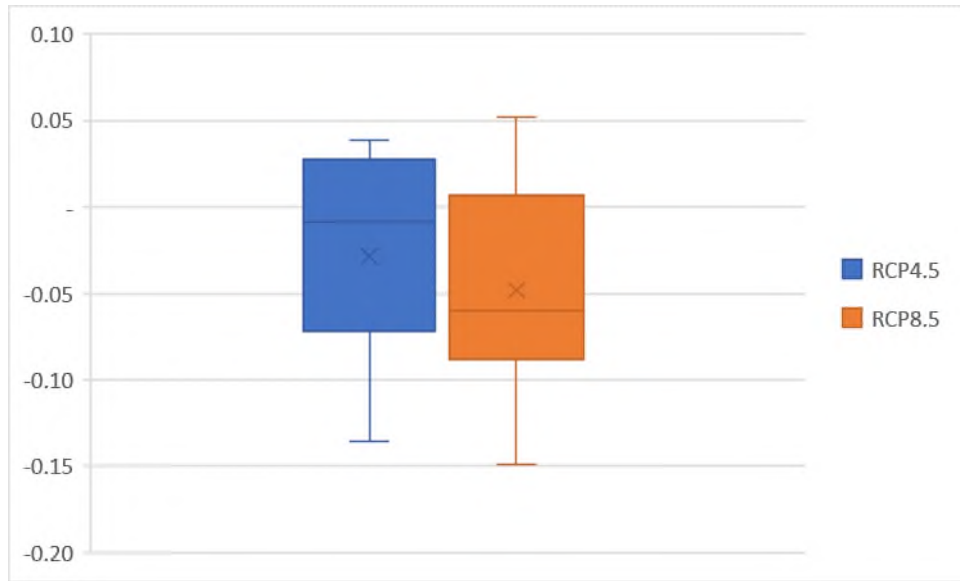
**Figura 20:** Cambios promedio de la temperatura máxima diaria (°C) para los 21 puntos representativos del sistema energético del Cono Sur arrojados por los modelos RCM de CORDEX.



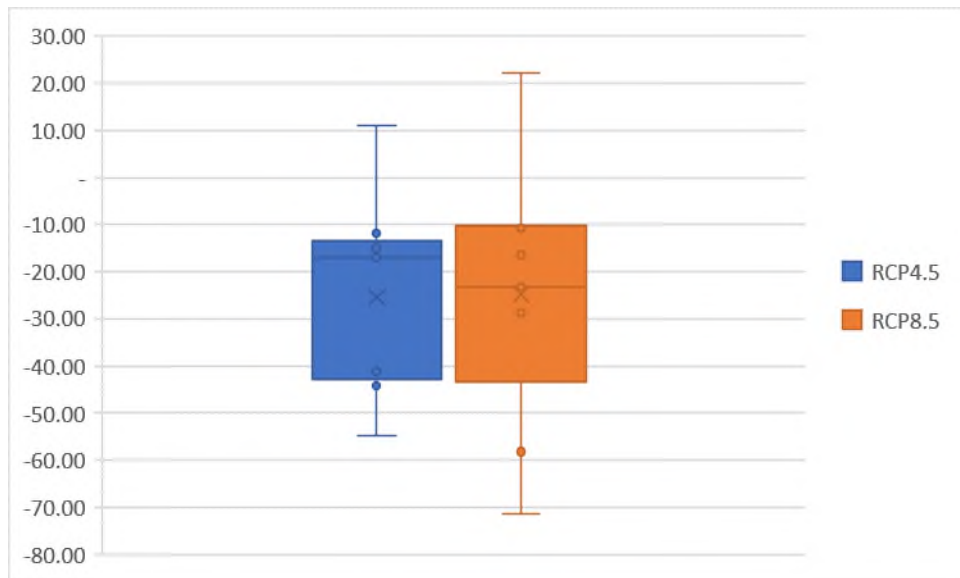
**Figura 21:** Cambios promedio de la temperatura mínima diaria (°C) para los 21 puntos representativos del sistema energético del Cono Sur arrojados por los modelos RCM de CORDEX.



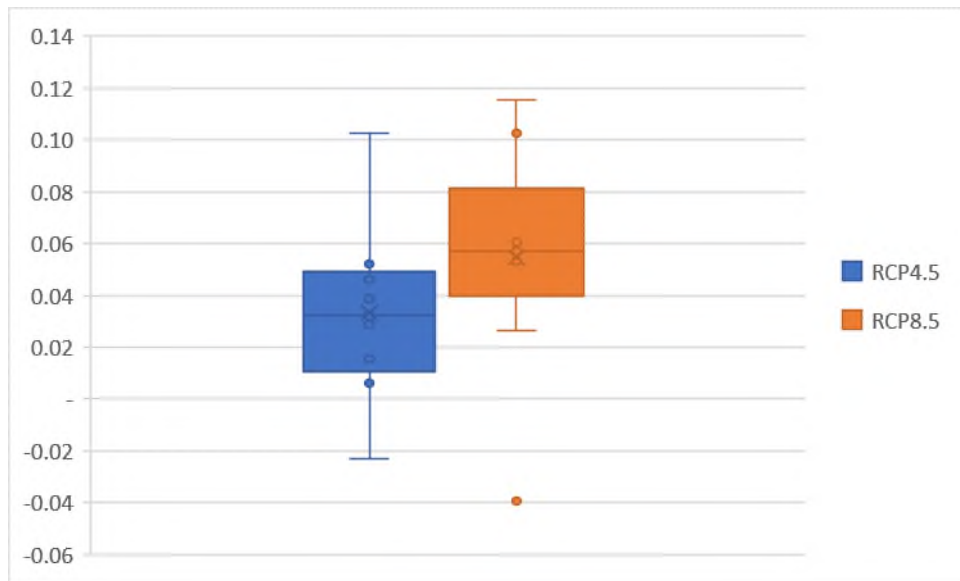
**Figura 22:** Cambios promedio de las precipitaciones diarias (mm/día) para los 21 puntos representativos del sistema energético del Cono Sur arrojados por los modelos RCM de CORDEX.



**Figura 23:** Cambios promedio de la radiación solar ( $W \cdot h \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$ ) para los 21 puntos representativos del sistema energético del Cono Sur arrojados por los modelos RCM de CORDEX.



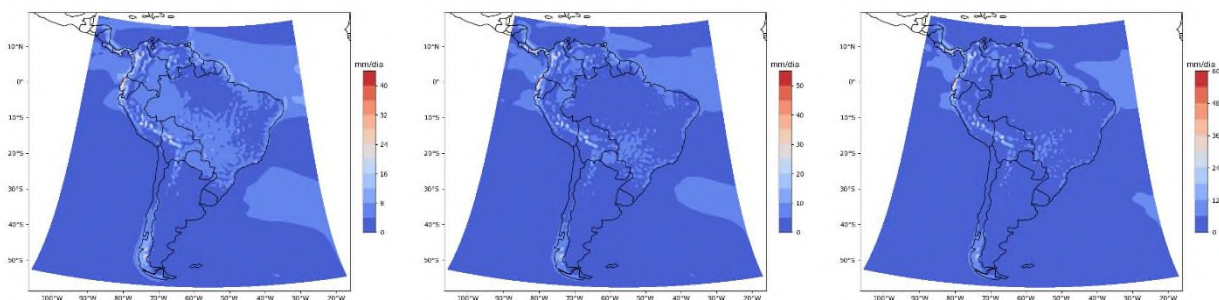
**Figura 24:** Cambios promedio de la velocidad del viento (m/s) para los 21 puntos representativos del sistema energético del Cono Sur arrojados por los modelos RCM de CORDEX.



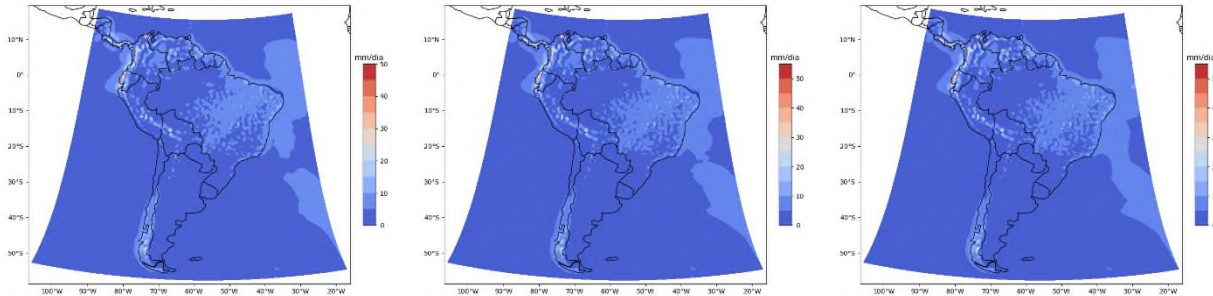
## 8.2. : Análisis de la distribución espacial de los cambios

Las imágenes del apartado anterior permiten obtener una visión global de la señal climática aportada por los modelos para el conjunto de la región. No obstante, la distribución espacial de los cambios es muy importante para evaluar las consecuencias de estos cambios sobre el sistema energético. En el presente apartado se muestran las salidas de los modelos para la precipitación. Imágenes mostrando la distribución espacial del resto de los modelos se encuentran junto con los archivos de datos generados por este proyecto.

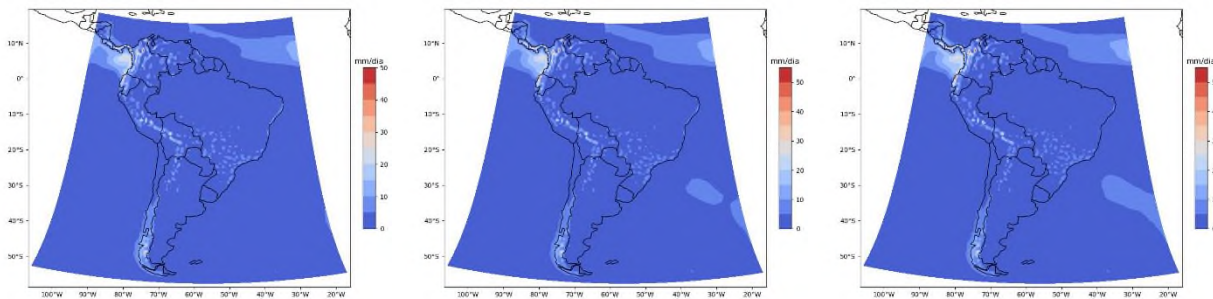
**Figura 25:** Salidas del modelo CCCma-CanESM2 para precipitación en el periodo histórico (izquierda), y en el año 2050 para el RCP 4.5 (centro) y RCP 8.5 (derecha).



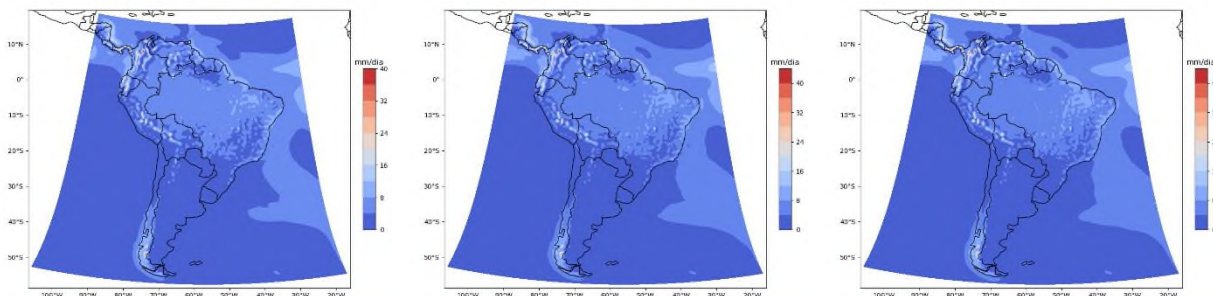
**Figura 26:** Salidas del modelo CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 para precipitación en el periodo histórico (izquierda), y en el año 2050 para el RCP 4.5 (centro) y RCP 8.5 (derecha).



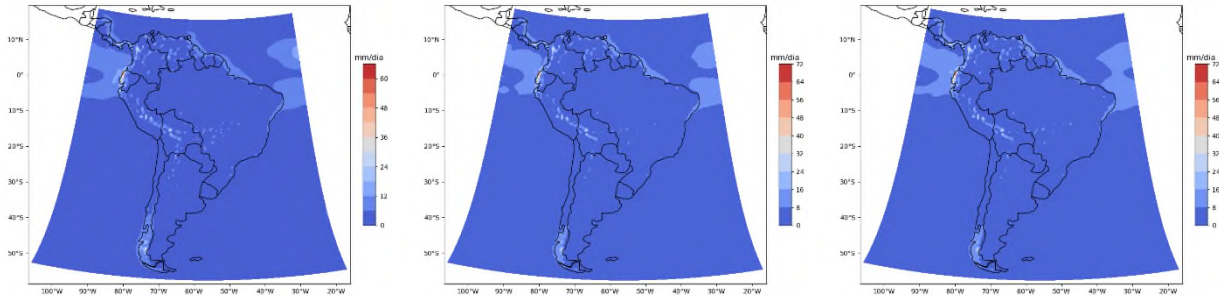
**Figura 27:** Salidas del modelo CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0 para precipitación en el periodo histórico (izquierda), y en el año 2050 para el RCP 4.5 (centro) y RCP 8.5 (derecha).



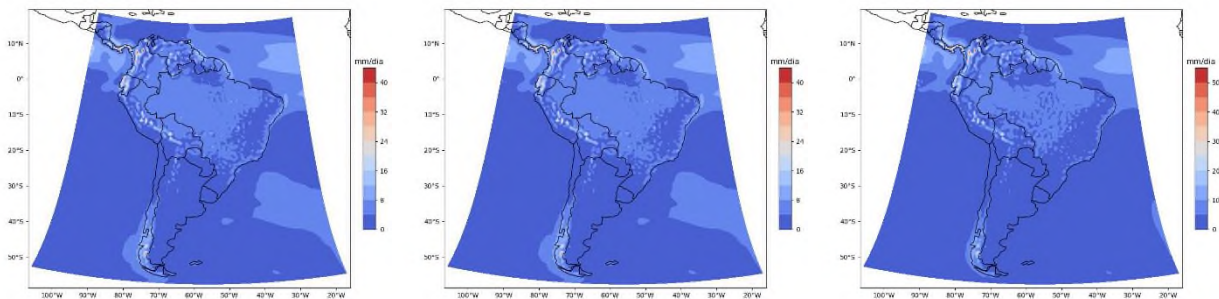
**Figura 28:** Salidas del modelo ICHEC-EC-EARTH para precipitación en el periodo histórico (izquierda), y en el año 2050 para el RCP 4.5 (centro) y RCP 8.5 (derecha).



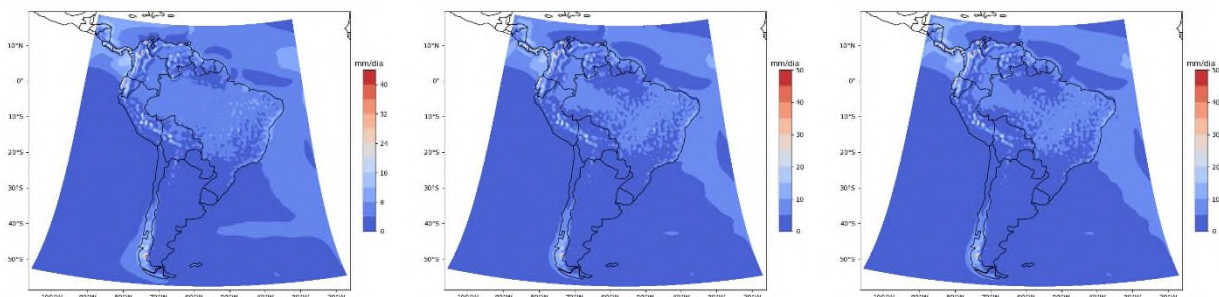
**Figura 29:** Salidas del modelo IPSL-IPSL-CM5A-MR para precipitación en el periodo histórico (izquierda), y en el año 2050 para el RCP 4.5 (centro) y RCP 8.5 (derecha).



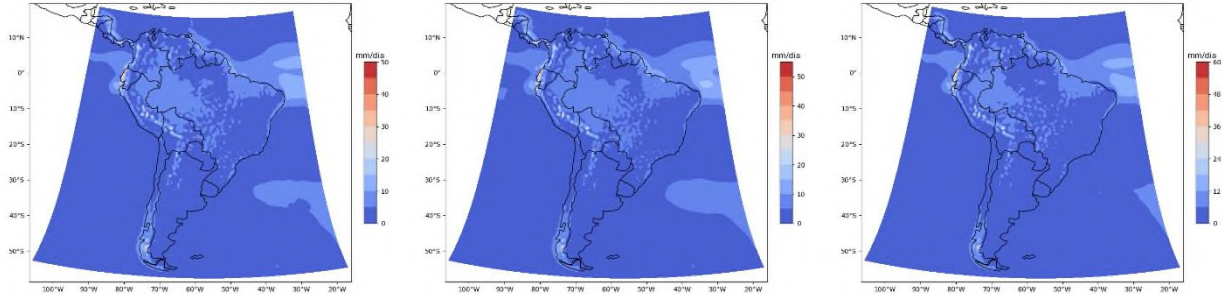
**Figura 30:** Salidas del modelo MIROC-MIROC5 para precipitación en el periodo histórico (izquierda), y en el año 2050 para el RCP 4.5 (centro) y RCP 8.5 (derecha).



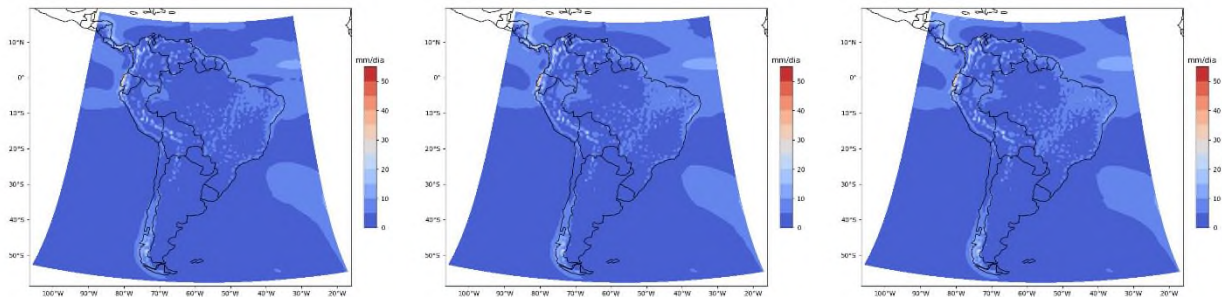
**Figura 31:** Salidas del modelo MPI-M-MPI-ESM-LR para precipitación en el periodo histórico (izquierda), y en el año 2050 para el RCP 4.5 (centro) y RCP 8.5 (derecha).



**Figura 32:** Salidas del modelo NCC-NorESM1-M para precipitación en el periodo histórico (izquierda), y en el año 2050 para el RCP 4.5 (centro) y RCP 8.5 (derecha).



**Figura 33:** Salidas del modelo NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M para precipitación en el periodo histórico (izquierda), y en el año 2050 para el RCP 4.5 (centro) y RCP 8.5 (derecha).





## 9. Anexo 2: Descripción de los archivos de datos generados.

Los trabajos realizados a generado los siguientes conjuntos de datos.

### 9.1. Conjuntos de datos generados para el periodo histórico

| Identificador | Nombre de archivo          | Descripción  | Campos                                | Características   |
|---------------|----------------------------|--|---------------------------------------|---|
| Prec_h        | Prec_X_historical_v01.xlsx | Contienen datos sobre precipitación diaria en la superficie utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 1976 y 2005 con resolución diaria para los 21 puntos de interés        | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: mm/día<br>Acumulación: suma de la precipitación diaria<br>Altura: superficie            |
| Rad_h         | Rad_X_historical_v01.xlsx  | Contienen datos sobre radiación solar descendente en la superficie utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 1976 y 2005 con resolución diaria para los 21 puntos de interés | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: Wh*m-2dia-1<br>Acumulación: suma de la radiación acumulada diaria<br>Altura: superficie |

| Identificador | Nombre de archivo           | Descripción   | Campos                                | Características  |
|---------------|-----------------------------|---|---------------------------------------|--|
| Tmax_h        | Tmax_X_historical_v01.xlsx  | Contienen datos sobre temperatura máxima del aire cercano a la superficie utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 1976 y 2005 con resolución diaria para los 21 puntos de interés | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: °C<br>Acumulación: valor máximo de todas las horas del día<br>Altura: 2 metros sobre la superficie |
| Tmean_h       | Tmean_X_historical_v01.xlsx | Contienen datos sobre temperatura media del aire cercano a la superficie utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 1976 y 2005 con resolución diaria para los 21 puntos de interés  | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: °C<br>Acumulación: promedio de todas las horas del día<br>Altura: 2 metros sobre la superficie     |

| Identificador | Nombre de archivo             | Descripción   | Campos                                | Características   |
|---------------|-------------------------------|---|---------------------------------------|---|
| Tmin_h        | Tmin_X_historical_v01.xlsx    | Contienen datos sobre temperatura mínima del aire cercano a la superficie utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 1976 y 2005 con resolución diaria para los 21 puntos de interés | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: °C<br>Acumulación: valor mínimo de todas las horas del día<br>Altura: 2 metros sobre la superficie              |
| Windmax_h     | WindMax_X_historical_v01.xlsx | Contienen datos sobre velocidad máxima del viento a 10 m de altura utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 1976 y 2005 con resolución diaria para los 21 puntos de interés        | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: m/s<br>Acumulación: valor máximo de los promedios horarios de cada día<br>Altura: 80 metros sobre la superficie |

| Identificador | Nombre de archivo              | Descripción  | Campos                                | Características   |
|---------------|--------------------------------|--|---------------------------------------|---|
| Windmean_h    | Windmean_X_historical_v01.xlsx | Contienen datos sobre velocidad media del viento a 10 m de altura utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 1976 y 2005 con resolución diaria para los 21 puntos de interés  | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: m/s<br>Acumulación: valor medio de los promedios horarios de cada día<br>Altura: 80 metros sobre la superficie  |
| Windmin_h     | Windmin_X_historical_v01.xlsx  | Contienen datos sobre velocidad mínima del viento a 10 m de altura utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 1976 y 2005 con resolución diaria para los 21 puntos de interés | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: m/s<br>Acumulación: valor mínimo de los promedios horarios de cada día<br>Altura: 80 metros sobre la superficie |

Donde "X" es cada uno de los modelos GCM seleccionados por Tecnalía: CCCma-CanESM2; CNRM-CERFACS-CNRM-CM5; CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0; ICHEC-EC-EARTH; IPSL-IPSL-CM5A-MR; MIROC-MIROC5; MOHC-HadGEM2-ES (excepto velocidad del viento y radiación); MPI-M-MPI-ESM-LR; NCC-NorESM1-M y NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M.

## 9.2. Conjuntos de datos generados para los como escenarios futuros.

| Identificador | Nombre de archivo    | Descripción  | Campos                                | Características   |
|---------------|----------------------|--|---------------------------------------|---|
| Prec_r        | Prec_X_rcpY_v01.xlsx | Contienen datos sobre precipitación diaria en la superficie utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 2036 y 2065 con resolución diaria para los 21 puntos de interés        | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: mm/día<br>Acumulación: suma de la precipitación diaria<br>Altura: superficie            |
| Rad_r         | Rad_X_rcpY_v01.xlsx  | Contienen datos sobre radiación solar descendente en la superficie utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 2036 y 2065 con resolución diaria para los 21 puntos de interés | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: Wh*m-2dia-1<br>Acumulación: suma de la radiación acumulada diaria<br>Altura: superficie |

|         |                       |      |   |                                       |  |
|---------|-----------------------|------|---|---------------------------------------|--|
| Tmax_r  | Tmax_X_<br>_v01.xlsx  | rcpY | Contienen datos sobre temperatura máxima del aire cercano a la superficie utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 2036 y 2065 con resolución diaria para los 21 puntos de interés | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: °C<br>Acumulación: valor máximo de todas las horas del día<br>Altura: 2 metros sobre la superficie |
| Tmean_r | Tmean_X_<br>_v01.xlsx | rcpY | Contienen datos sobre temperatura media del aire cercano a la superficie utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 2036 y 2065 con resolución diaria para los 21 puntos de interés  | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: °C<br>Acumulación: promedio de todas las horas del día<br>Altura: 2 metros sobre la superficie     |

|           |                             |      |   |                                       |   |
|-----------|-----------------------------|------|---|---------------------------------------|---|
| Tmin_r    | Tmin_X_<br>_v01.xlsx        | rcpY | Contienen datos sobre temperatura mínima del aire cercano a la superficie utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 2036 y 2065 con resolución diaria para los 21 puntos de interés | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: °C<br>Acumulación: valor mínimo de todas las horas del día<br>Altura: 2 metros sobre la superficie              |
| Windmax_r | WindMax_X_<br>rcpY_v01.xlsx |      | Contienen datos sobre velocidad máxima del viento a 10 m de altura utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 2036 y 2065 con resolución diaria para los 21 puntos de interés        | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: m/s<br>Acumulación: valor máximo de los promedios horarios de cada día<br>Altura: 80 metros sobre la superficie |

|            |                          |  |                                       |   |
|------------|--------------------------|--|---------------------------------------|---|
| Windmean_r | Windmean_X_rcpY_v01.xlsx | Contienen datos sobre velocidad media del viento a 10 m de altura utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 2036 y 2065 con resolución diaria para los 21 puntos de interés  | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: m/s<br>Acumulación: valor medio de los promedios horarios de cada día<br>Altura: 80 metros sobre la superficie  |
| Windmin_r  | Windmin_X_rcpY_v01.xlsx  | Contienen datos sobre velocidad mínima del viento a 10 m de altura utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 2036 y 2065 con resolución diaria para los 21 puntos de interés | Fecha y uno por cada punto de interés | Unidades: m/s<br>Acumulación: valor mínimo de los promedios horarios de cada día<br>Altura: 80 metros sobre la superficie |



|       |   |   |   |   |
|-------|---|---|---|---|
| Q_r   | Caudal_week_X<br>_rcpY_2036_20<br>65.csv    | Contienen datos sobre caudales utilizando los modelos GCM seleccionados entre los años 2035 y 2066 con resolución semanal (por downscaling de resultados mensuales) para 109 caudales de interés.     | Fecha y uno por cada caudal de interés según envío de TEA | Unidades: m3/s<br>Acumulación: valor medio diario<br>Altura: superficie |
| Q_r_m | Caudal_monthly<br>_X_rcpY_2036_<br>2065.csv | Contienen datos sobre caudales resultantes de la simulación de los modelos GCM seleccionados entre los años 2035 y 2066 con resolución mensual para 109 caudales de interés mediante redes neuronales | Fecha y uno por cada caudal de interés según envío de TEA | Unidades: m3/s<br>Acumulación: valor medio diario<br>Altura: superficie |

|              |  |   |   |   |
|--------------|--|---|---|---|
| Q_r_m2       | Caudal_monthly<br>2_X_rcpY_2036<br>_2065.csv               | Contienen datos sobre caudales resultantes de la corrección de sesgo realizada a partir de las series reales mensuales y las series de caudal simuladas a partir de los os modelos GCM seleccionados entre los años 2035 y 2066 con resolución mensual para 109 caudales de interés mediante redes neuronales | Fecha y uno por cada caudal de interés según envío de TEA | Unidades: m3/s<br>Acumulación: valor medio diario<br>Altura: superficie |
| Q_r_m_SIMSEE | Caudal_monthly<br>_historical_sims<br>ee_1976_2005.c<br>sv | Series mensuales obtenidas a partir del tratado de las series iniciales semanales enviadas por el equipo TEA  | Fecha y uno por cada caudal de interés según envío de TEA | Unidades: m3/s<br>Acumulación: valor medio diario<br>Altura: superficie |

Donde “X” es cada uno de los modelos GCM seleccionados por Tecnalía: CCCma-CanESM2; CNRM-CERFACS-CNRM-CM5; CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0; ICHEC-EC-EARTH; IPSL-IPSL-CM5A-MR; MIROC-MIROC5; MOHC-HadGEM2-ES (excepto velocidad del viento y radiación); MPI-M-MPI-ESM-LR; NCC-NorESM1-M y NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M.

E “Y” son las trayectorias de concentración representativas RCP 4.5 y 8.5.