

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



“ANÁLISIS DE FUENTES DE INCERTIDUMBRE EN LOS MODELOS CLIMÁTICOS CMIP6 PARA LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN SUDAMÉRICA”

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título de:

INGENIERO METEORÓLOGO

JHONATAN EDWIN BRUNO RAMIREZ

Lima – Perú

2023

**La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)**

Document Information

| | |
|--------------------------|--|
| Analyzed document | Borrador_final_TSP_2022_JHONATANBRUNO_corregido.pdf (D150614972) |
| Submitted | 11/22/2022 7:45:00 PM |
| Submitted by | Victoria Calle Montes  |
| Submitter email | vcmquebec@lamolina.edu.pe |
| Similarity | 5% |
| Analysis address | vcmquebec.unalm@analysis.arkund.com |

Sources included in the report

| | | | |
|-----------|--|---|---|
| SA | Borrador de tesis _v1.pdf Document Borrador de tesis _v1.pdf (D64343336) |  | 1 |
| SA | Tesis-Jhandry Llanes-Urkund.docx Document Tesis-Jhandry Llanes-Urkund.docx (D82787860) |  | 1 |
| SA | Burbano_Flores_TESIS.pdf Document Burbano_Flores_TESIS.pdf (D142613163) |  | 7 |
| W | URL: http://www.iapjournals.ac.cn/aas/en/article/doi/10.1007/s00376-020-0213-5 Fetched: 11/24/2021 8:54:14 PM |  | 4 |
| W | URL: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fclim.2022.948499/full Fetched: 10/18/2022 5:57:57 AM |  | 1 |
| W | URL: https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3109 Fetched: 11/22/2022 7:45:00 PM |  | 1 |
| SA | TESIS 2022_JAVIER E. LOPEZ CABELLO.pdf Document TESIS 2022_JAVIER E. LOPEZ CABELLO.pdf (D143685263) |  | 2 |
| W | URL: https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained/ Fetched: 11/22/2022 7:45:00 PM |  | 1 |
| W | URL: https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6 Fetched: 11/22/2022 7:45:00 PM |  | 1 |
| SA | Universidad Nacional Agraria La Molina / Proyecto_tesis_final.docx Document Proyecto_tesis_final.docx (D149288440) Submitted by: cramost@lamolina.edu.pe Receiver: cramost.unalm@analysis.arkund.com |  | 1 |
| SA | TESIS_FORESTAL_ROJAS CHUYAN_2022.docx Document TESIS_FORESTAL_ROJAS CHUYAN_2022.docx (D150204129) |  | 1 |

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“ANÁLISIS DE FUENTES DE INCERTIDUMBRE EN LOS MODELOS
CLIMÁTICOS CMIP6 PARA LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS
DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN SUDAMÉRICA”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Presentada por:

JHONATAN EDWIN BRUNO RAMIREZ

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Maest. Cs. Alessandri Canchoa Quispe
Presidente

Mg. Sc. Jerónimo García Villanueva
Miembro

Ing. Héctor Ladislao Huisacaina Soto
Miembro

Mg. Sc. Victoria Doris Calle Montes
Asesora

DEDICATORIA

Quiero dedicar este logro de obtener mi título profesional a mis padres, hermana y abuelos que son lo más cercanos y siempre estuvieron apoyándome en mis estudios. Por último, agradecer a Sugar, que me acompañó en este objetivo, brindándome consejos, compañía y cariño, gracias.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Libélula Instituto para el Cambio Global y al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología que me permitieron ser parte del Proyecto de Apoyo a la Gestión del Cambio Climático en su Segunda Fase, a la subdirectora M. Sc. Delia Acuña Azarte por brindarme su confianza y la autorización de utilizar uno de los trabajos de investigación, a mis amigos de la Subdirección de Modelamiento Numérico de la Atmósfera, Jonathan Paredes, Alan Llacza, Gustavo de las Cruz, al M. Sc. Péter Szabo por explicar detalladamente la metodología de bipartición de incertidumbre utilizadas en este estudio. De la misma forma agradecer por la paciencia, palabras de aliento y enseñanzas que me brindó mi asesora la Mg. Sc. Victoria Calle Montes en cada uno de los pasos realizados a través de mi trabajo de suficiencia hasta mi sustentación final, al Mestre. Jerónimo García Villanueva como miembro jurado que con sus observaciones puntuales pude mejorar y afinar el documento y al Dr. Ever Menacho Casimiro quien durante mi etapa universitaria fue profesor y me brindó consejos para ser un gran profesional, Por último, a todos y muchos más que aportaron en el desarrollo final de mi trabajo de sustentación gracias por todo.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| RESUMEN..... | v |
| ABSTRACT | vi |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Problemática | 1 |
| 1.2 Objetivos: | 2 |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA | 4 |
| 2.1 Incertidumbre..... | 4 |
| 2.2 Incertidumbre climática..... | 5 |
| 2.3 Modelos de Climáticos Globales (GCM)..... | 7 |
| 2.4 Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6)..... | 7 |
| III. DESARROLLO DEL TRABAJO | 9 |
| 3.1 Delimitación temporal y ámbito geográfico | 9 |
| 3.2 Datos Observados | 11 |
| 3.3 Metodología de validación de parámetros..... | 11 |
| 3.4 Metodología de validación estadística | 14 |
| 3.5 Metodología partición de incertidumbres | 15 |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 18 |
| 4.1 Validación dinámica | 18 |
| 4.2 Validación estadística..... | 21 |
| 4.3 Incertidumbre de modelos climático para la precipitación en Sudamérica..... | 25 |
| 4.4 Incertidumbre de modelos climático para la temperatura en Sudamérica | 27 |
| V. CONCLUSIONES..... | 31 |
| VI. RECOMENDACIONES | 32 |
| VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 33 |
| VIII. ANEXOS..... | 36 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Modelos CMIP6 para el estudio de incertidumbres | 10 |
| Tabla 2. Modelo de reanálisis para el estudio de incertidumbres..... | 11 |
| Tabla 3. Parámetros de validación para la evaluación de los modelos climáticos globales..... | 12 |
| Tabla 4. Parámetros de validación modelos CMIP6..... | 18 |
| Tabla 5. Estadísticos de precipitación CMIP6 | 21 |
| Tabla 6. Estadísticos de temperatura del aire CMIP6..... | 22 |
| Tabla 7. Modelos Representativos..... | 25 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Figura adaptada de partición de incertidumbres de temperatura para diciembre, enero y febrero (DJF), junio, julio y agosto (JJA) para el norte y sur de Europa y la cuenca Carpathian | 6 |
| Figura 2. Imagen adapta de matriz de escenarios que combina los niveles de SSP (vías socioeconómicas compartidas) y RF (forzamiento radiativo) | 8 |
| Figura 3. Dominio Sudamérica..... | 9 |
| Figura 4. Presión a nivel medio del mar en invierno de los modelos más representativos | 19 |
| Figura 5. Altura Geopotencial para Sudamérica de los modelos más representativos | 20 |
| Figura 6. Diagrama de Taylor Precipitación acumulada..... | 22 |
| Figura 7. Diagrama de Taylor temperatura | 23 |
| Figura 8. Correlación Temporal de Precipitación acumulada anual de los modelos CMIP6 | 24 |
| Figura 9. Correlación Temporal de Temperatura del aire promedio anual de los modelos CMIP6..... | 24 |
| Figura 10. Cambio porcentual de precipitación para los escenarios SSP245 y ssp585 | 26 |
| Figura 11. Fracción de incertidumbre precipitación CMIP6..... | 27 |
| Figura 12. Cambio de temperatura del aire promedio para los escenarios SSP245 y ssp585 | 28 |
| Figura 13. Fracción de incertidumbre temperatura CMIP6 | 29 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|----|
| Anexo 1: Tabla de datos de validación de modelos globales del CMIP6 | 37 |
| Anexo 2: Gráfica de bias temporales de precipitación acumulada anual y temperatura del aire promedio anual modelos representativos del CMIP6 | 40 |
| Anexo 3: Tabla de región latitudinal de Sudamérica con de modelos globales del CMIP6 representativos | 41 |
| Anexo 4: Gráfica de dispersión de datos de modelos globales del CMIP6 | 42 |
| Anexo 5: Gráficas de Variabilidad interna, Relación Señal Ruido y Tiempo de emergencia de precipitación acumula estacional en las proyecciones del CMIP6 | 43 |
| Anexo 6: Gráficas de Variabilidad interna, Relación Señal Ruido, Tiempo de emergencia de temperatura del aire estacional en las proyecciones del CMIP6 | 45 |

RESUMEN

Ante la realidad del cambio climático se requiere de rigurosos métodos en las predicciones del clima, uno de estos es el cálculo de incertidumbre de modelos climáticos que ayudan a los tomadores de decisiones y comunidad científica, a establecer medidas de prevención. En el presente estudio se muestran los resultados y el análisis de las fuentes de incertidumbre de un conjunto de modelos climáticos representativos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados en su sexta fase (CMIP6), con resolución espacial 100 km y datos mensuales, teniendo período de referencia 1981 - 2010 y Rutas Socioeconómicas Compartidas SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en el período 2015-2100. El área de estudio es Sudamérica y se filtraron los modelos más representativos considerando las siguientes metodologías, la parte física considera la posición e intensidad del núcleo de los sistemas sinópticos; Anticiclón del Pacífico Sur Oriental (APSO), Alta de Bolivia (AB) y Baja Amazónica (BA), y la estadística se evaluó mediante Correlación Pearson, Error medio (BIAS) y Error Cuadrático Medio (RMSE), teniendo como modelo observado ERA5, los resultados indicaron que los modelos climáticos representativos son los desarrollados por el instituto EC-Earth-Consortium, de Europa, E3SM-1-1-ECA de E3SM-Project-USA, GFDL-ESM4 de NOAA-USA, GFDL-USA y NorESM2-MM de NCC-Noruega. El cálculo de las fuentes de incertidumbre se define mediante la suma de la variabilidad interna, incertidumbre del modelo e incertidumbre del escenario. Se evidencia que la variable precipitación acumulada estacional en las proyecciones climáticas indican que la variabilidad interna es el factor de incertidumbre dominante, la incertidumbre del escenario varía en cada estación presentando mayor área en primavera (SON), la incertidumbre del modelo crece continuamente hasta el 2100, la temperatura del aire promedio estacional indica que la variabilidad interna es dominante hasta el 2050, debido a que la incertidumbre del escenario tiene un impacto sobre la región esta aumenta continuamente hasta el 2100, a diferencia de la incertidumbre del modelo que aumentan hasta el 2050 y luego disminuye.

Palabras clave: Cambio climático, Modelos climáticos globales, Variabilidad interna, Incertidumbre del modelo, Incertidumbre del escenario, CMIP6.

ABSTRACT

Given the reality of climate change, rigorous methods that seek quantitative climate predictions are required, one of which is the calculation of uncertainty in climate models that help decision makers and the scientific community to establish preventive measures. The present study calculates and analyzes the sources of uncertainty of a set of representative climate models of the Coupled Model Intercomparison Project in its sixth phase (CMIP6), with spatial resolution 100 km and monthly data, having historical period 1981 - 2010 and Shared Socioeconomic Pathways SSP2-4.5 and SSP5-8.5 in the future period 2015-2100. The study area is South America and the most representative climate models were filtered using two methodologies, the physical part considers the position and intensity of the core of the synoptic systems; Anticyclone of the South East Pacific (APSO), High of Bolivia (AB) and Amazonian Low (BA), and the statistical part was evaluated by Pearson Correlation, Mean Error (BIAS) and Root Mean Square Error (RMSE), having as observed model ERA5, the results indicated that the representative climate models are EC-Earth-Consortium, from Europe, E3SM-1-1-ECA, GFDL-ESM4 and NorESM2-MM. The calculation of the sources of uncertainty is defined by the sum of internal variability, model uncertainty and scenario uncertainty, obtained results that the seasonal cumulative precipitation variable in the climate projections indicate that internal variability is the dominant uncertainty factor, the scenario uncertainty varies in each season presenting greater area in spring (SON), the model uncertainty increases continuously until 2100, the seasonal average air temperature indicates that the internal variability is dominant until 2050, because the scenario uncertainty has an impact on the region it increases continuously until 2100, unlike the model uncertainty that increases until 2050 and then decreases.

Keywords: Climate change, Global climate models, Internal variability, Model uncertainty, Scenario uncertainty, CMIP6.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Problemática

Actualmente hay pocos estudios que evalúen las fuentes de incertidumbre en las proyecciones hasta el 2100 de modelos climáticos en la región de Sudamérica, si bien se realizan investigaciones de cambio climático usando diversos modelos climáticos se debe considerar una óptima selección de estos, optando por quienes representen mejor el clima en la región Sudamericana, se recomienda realizar una validación física y validación estadística previa, ya que permite filtrar a los modelos representativos.

La cuantificación de las incertidumbres ha sido necesaria en la investigación de modelos climáticos desde la construcción del primer conjunto de resultados del modelo climático global, para los datos del Proyecto de intercomparación de modelos acoplados, fase 3 (CMIP3) donde realizaron un análisis exhaustivo de las proyecciones de temperatura basado en 15 modelos acoplados y 3 escenarios de emisiones SRES 3 diferentes (Hawkins y Sutton, 2009), además se realizó una evaluación similar para las proyecciones de precipitación indicando que tienen características de incertidumbre diferentes a la temperatura, siendo la principal diferencia el bajo impacto de la incertidumbre del escenario, que es especialmente menor a escala continental, concluyendo que las incertidumbres en las proyecciones de precipitación son causadas principalmente por la variabilidad interna del modelo y la incertidumbre del modelo, en este último caso por los esquemas de parametrización aplicados para la descripción de los procesos físicos relacionados con la precipitación (Hawkins y Sutton, 2009).

En consecuencia, el estudio de fuentes de incertidumbre para las variables temperatura del aire y precipitación acumulada en Sudamérica permite comprender que la variabilidad interna puede estimarse mejor a partir de una simulación de control a largo plazo o de un conjunto de modelos, incluyendo cómo podría cambiar la variabilidad bajo un forzamiento externo (Brown et al. 2017; Maher et al. 2018), la incertidumbre del modelo, presenta diferencias estructurales entre ellos, debido a las parametrizaciones realizadas por los diversos centros de modelización estos responderán diferente al forzamiento externo, la

incertidumbre del escenario surge ante la falta de conocimiento del forzamiento radiativo futuro que se genera por las emisiones futuras desconocidas de gases de efecto invernadero, puede cuantificarse comparando un conjunto de modelos bajo diferentes escenarios de emisiones. Esta incertidumbre es irreductible desde el punto de vista de la ciencia del clima, ya que los escenarios son "hipotéticos" socioeconómicos (Lehner, 2020).

Además, tener esta información será de utilidad para las instituciones públicas, instituciones privadas y tomadores de decisiones, permitiendo seleccionar los modelos climáticos más representativos con los cuales se pueden realizar diversidad de estudios confiables de cambio climático y reducciones de escala dinámicas o estadísticas para escalas regionales o locales, asimismo, la información de las incertidumbres de las proyecciones climáticas para la variable temperatura del aire promedio y precipitación acumulada permiten conocer cuál de las tres fuentes de incertidumbre tienen mayor presencia, que tanto aumentan o disminuyen porcentualmente en los años futuros, pudiendo con esta información gestionar políticas de cambio climático y mitigación.

La generación de información sobre el clima a futuro para la toma de decisiones, fue de interés en el Proyecto de Apoyo a la Gestión del cambio climático – II Fase, el cual finalizó con éxito en el año 2021. En este contexto, Libélula encargó al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), realice el estudio de nombre “Estudio de Incertidumbre de la temperatura y precipitación en el Perú desde modelos globales”, este estudio presenta actualizaciones debido a que en el presente año 2022 la disponibilidad de modelos climáticos globales del CMIP6 es mayor, por ello se desarrolla un estudio actualizado en el presente trabajo de suficiencia profesional.

1.2 Objetivos:

Objetivo general

- Determinar el aporte de las fuentes de incertidumbre con respecto a la incertidumbre total en las proyecciones de temperatura del aire promedio estacional y precipitación acumulada estacional utilizando modelos climáticos acoplados de intercomparación (CMIP6) para Sudamérica en el período futuro 2015 - 2100

Objetivos específicos

- Validar los modelos climáticos acoplados de intercomparación (CMIP6) que mejor representen las condiciones climáticas y sinópticas en Sudamérica, para el período histórico 1981 – 2010.
- Describir y calcular la contribución de las tres fuentes de incertidumbres (variabilidad interna, incertidumbre del modelo e incertidumbre del escenario) con respecto a la incertidumbre total, utilizando modelos climáticos acoplados de intercomparación (CMIP6) para el período futuro 2015 – 2100.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Incertidumbre

Es el estado de conocimiento incompleto que puede deberse a una falta de información o a un desacuerdo con respecto a lo que es conocido o incluso cognoscible. Puede deberse a distintas circunstancias, desde la imprecisión en los datos hasta una definición ambigua de un concepto o término, o una proyección incierta. Por ello, la incertidumbre puede representarse mediante magnitudes cuantitativas (p. ej., una función de densidad de probabilidad), o mediante afirmaciones cualitativas (que reflejen, por ejemplo, una apreciación de un equipo de expertos) (IPCC, 2014).

Cualquier información relacionada con las condiciones futuras de los sistemas naturales y sociales tiene incertidumbres que los usuarios de esta información deben conocer. Algunas de las principales fuentes de incertidumbre relacionadas con los impactos del cambio climático y la adaptación incluyen (EEA, 2017):

- Errores de medición resultantes de instrumentos de observación imperfectos (p. ej., pluviómetros) y/o procesamiento de datos (p. ej., algoritmos para estimar la temperatura de la superficie basados en datos satelitales)
- Variabilidad natural resultante de procesos naturales impredecibles dentro del sistema climático (variabilidad climática interna; por ejemplo, variabilidad atmosférica y oceánica), que influyen en el sistema climático (por ejemplo, futuras erupciones volcánicas) y/o dentro de sistemas ambientales y sociales sensibles al clima (por ejemplo, dinámica de ecosistemas)
- Limitaciones del modelo (de modelos climáticos y de impacto climático) resultantes de la resolución limitada de los modelos (p. ej., obstaculizando la resolución explícita de la física de las nubes), una comprensión incompleta de los componentes individuales del sistema terrestre (p. ej., procesos dinámicos de la capa de hielo) o sus interacciones y retroalimentaciones (p. ej., retroalimentaciones del ciclo del carbono y el clima), y/o una comprensión incompleta del sistema ambiental o social que se está considerando (p. ej.,

- desarrollo demográfico en zonas de riesgo de inundaciones)
- Las trayectorias de las emisiones futuras (de gases de efecto invernadero y aerosoles) determinan la magnitud y el ritmo del cambio climático futuro. Los futuros niveles de emisión dependen del desarrollo demográfico, económico y tecnológico, así como de los acuerdos internacionales para la mitigación del cambio climático discutidos en La Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)
- El desarrollo futuro de factores no climáticos (socioeconómicos, demográficos, tecnológicos y ambientales) determina cómo un cambio climático dado afecta el medio ambiente y la sociedad

2.2 Incertidumbre climática

La incertidumbre de partición definida por Hawking & Sutton (2011), define las tres fuentes de incertidumbres de la siguiente manera:

- A. **Variabilidad interna del sistema climático**, se define como las fluctuaciones naturales que surgen en ausencia de forzamiento radiativo. La variabilidad interna en los modelos climático globales (GCM's) y los modelos climático regionales (RCM's) puede dividirse en sus componentes a gran escala y a escala local (Karoly & Wu 2005). La componente a gran escala puede atribuirse a la variabilidad caótica del clima a escala global, producido principalmente por el propio modelo climático global (GCM) y la componente a escala local se le atribuye al downscaling estadístico de los modelos (Buishand & Brandsma, 2001; Mezghani and Hingray, 2009).
- B. **La incertidumbre del modelo**, se da debido a la dispersión entre las diferentes respuestas climáticas obtenidas con diferentes modelos para la misma configuración de forzamiento, así mismo, se debe a las limitaciones de la estructura del modelo y parametrizaciones utilizadas para representar procesos geofísicos.
- C. **La incertidumbre del escenario**, La incertidumbre del escenario está relacionada con el futuro poco conocido de las emisiones de gases de efecto invernadero, por ejemplo, causa incertidumbre en el forzamiento radiativo futuro y, por lo tanto, en el clima.

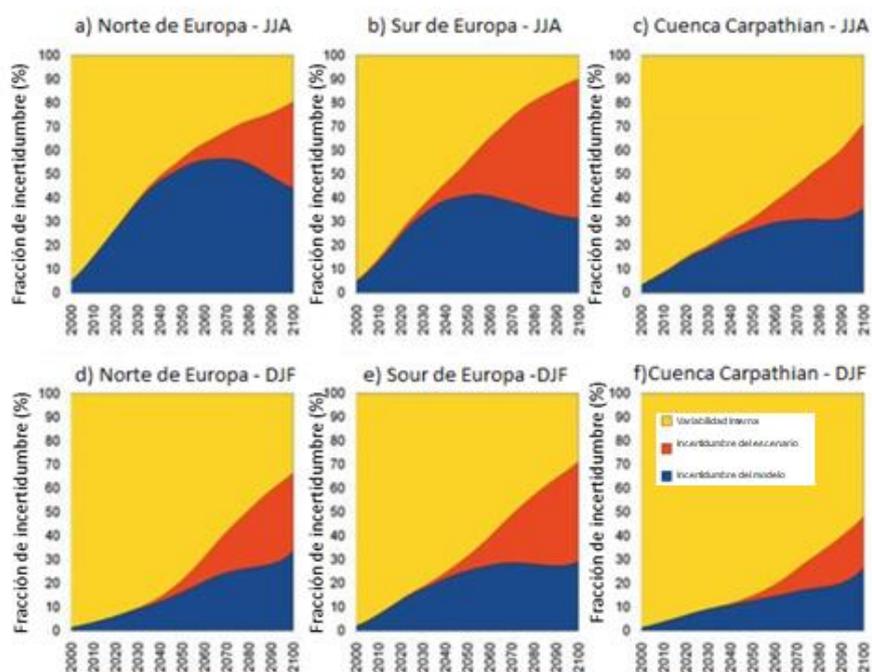


Figura 1. Figura adaptada de partición de incertidumbres de temperatura para diciembre, enero y febrero (DJF), junio, julio y agosto (JJA) para el norte y sur de Europa y la cuenca Carpathian
FUENTE: Fracciones de la incertidumbre total en porcentaje Szabó, 2016

Las fracciones de la incertidumbre total en la de la temperatura son diferentes en el norte y el sur de Europa. La incertidumbre del escenario (color naranja) crece más para todas las estaciones sobre el sur de Europa que sobre el norte. Para la parte norte de Europa es menor que la incertidumbre del modelo (color azul) en DJF y JJA. Sobre la parte sur de Europa, cuanto más cálida es la estación, antes supera el escenario el papel de la incertidumbre del modelo para el año de 2075 (color azul, Fig. 1 b, e). La incertidumbre del modelo (color azul) es muy significativa en JJA para ambas regiones, y alcanza su punto máximo en torno a 2070 para el norte Europa y 2050 para el sur Europa. El sur de Europa comparte valores más bajos de importancia del modelo para todas las estaciones que el norte de Europa, lo que puede deberse a la mayor sensibilidad del modelo en el Norte a cambios de circulación más intensos. Las proyecciones de temperatura sobre la cuenca de los Carpathian son más parecidas a los resultados de temperatura de Europa del Norte, pero presentan una variabilidad natural significativamente mayor que en las escalas continentales más grandes. Es la más importante fuente de incertidumbre para todas las estaciones.

2.3 Modelos de Climáticos Globales (GCM)

Los modelos numéricos climáticos globales representan procesos físicos en la atmósfera, el océano, la criósfera y la superficie terrestre, y son herramientas disponibles actualmente para simular la respuesta del sistema climático global al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero, generalmente tiene una resolución horizontal de entre 100 y 600 km, de 10 a 20 capas verticales en la atmósfera y, a veces, hasta 30 capas en los océanos

2.4 Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6)

El Proyecto de intercomparación de modelos acoplados, que comenzó en 1995 bajo los auspicios del Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP), ahora se encuentra en su sexta fase (CMIP6), donde en el año 2022 se presentó el sexto informe de evaluación del IPCC (AR6) el cual cuenta con nuevos modelos climáticos distintos,

El período histórico en los modelos CMIP6 comprenden los años 1850 hasta 2014 y los escenarios llamados también rutas socioeconómicas compartidas (SSP) comprenden los años 2015 hasta 2100, donde el período futuro empieza desde el 2015 en todos los modelos climáticos.

Si bien los resultados de solo 40 modelos CMIP6 publicados en 2021, se evidencian que algunos de ellos tienen una sensibilidad climática notablemente mayor que los modelos CMIP5 (Carbonbrief, 2019). Esta mayor sensibilidad contribuye a las proyecciones de un mayor calentamiento en este siglo, alrededor de 0,4 °C a 0,9 °C más cálido que escenarios similares en CMIP5, aunque estas proyecciones de calentamiento pueden cambiar a medida que haya más modelos disponibles.

En el período previo al IPCC AR6, la comunidad de modelos energéticos ha desarrollado un nuevo conjunto de escenarios de emisiones impulsados por diferentes supuestos socioeconómicos. Estas son las "Rutas Socioeconómicas Compartidas" (SSP) para CMIP6. El IPCC AR5 presentó cuatro vías de concentración representativas (RCP) que examinaron diferentes posibles emisiones futuras de gases de efecto invernadero. Estos escenarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) tienen nuevas versiones en CMIP6, estos escenarios actualizados se denominan SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 y SSP5-8.5, estos escenarios mencionados se presentan en la Figura 2.

SSP585: Con un forzamiento radiativo adicional de 8,5 W/m² para el año 2100, este escenario representa el límite superior del rango de escenarios descritos en la

literatura. Puede entenderse como una actualización del escenario RCP8.5 de la CMIP5, ahora combinado con razones socioeconómicas.

SSP370: Con 7 W/m² para el año 2100, este escenario se encuentra en la parte media-alta de la gama completa de escenarios. Se introdujo recientemente después de los escenarios RCP, cerrando la brecha entre RCP6.0 y RCP8.5.

SSP245: Como actualización del escenario RCP4.5, SSP245 con un forzamiento radiativo adicional de 4,5 W/m² para el año 2100 representa la trayectoria media de futuras emisiones de gases de efecto invernadero. Este escenario asume que se están tomando medidas de protección climática.

SSP126: Este escenario con 2,6 W/m² para el año 2100 es una reedición del escenario optimista RCP2.6 y fue diseñado con el objetivo de simular un desarrollo compatible con la meta de 2°C. Este escenario también asume que se están tomando medidas de protección climática.

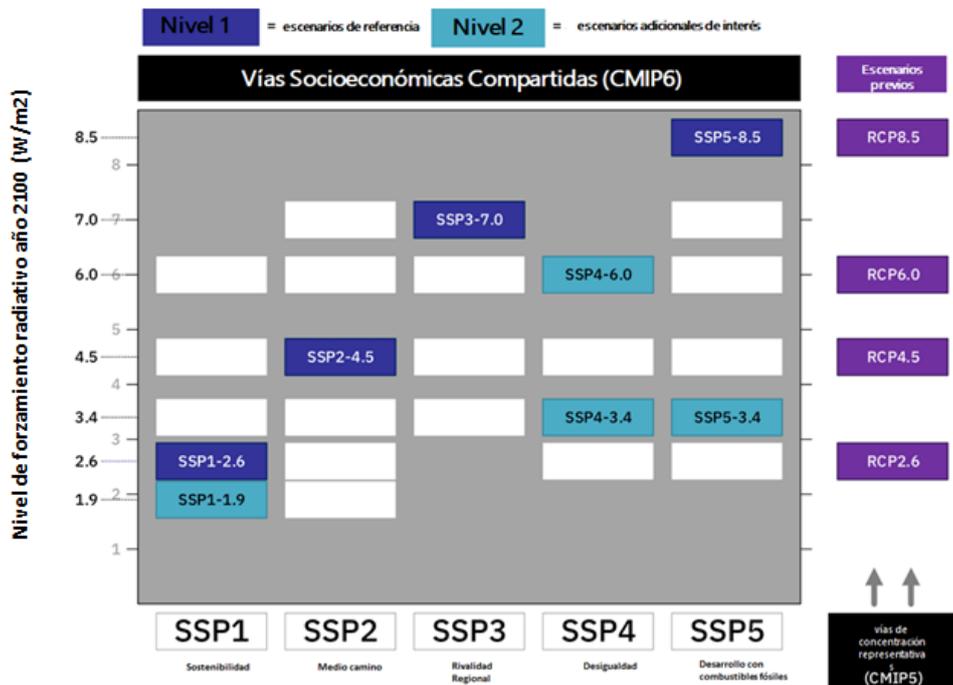


Figura 2. Imagen adapta de matriz de escenarios que combina los niveles de SSP (vías socioeconómicas compartidas) y RF (forzamiento radiativo)
FUENTE: vías socioeconómicas compartidas O'Neill, 2019

III. DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1 Delimitación temporal y ámbito geográfico

Área de estudio

En el presente estudio se realizó para la región de Sudamérica la cual se limita en las siguientes coordenadas: Latitud de 60°S a 20°N, Longitud de 130°W a 20°W, se presenta en la Figura 3.



Figura 3. Dominio Sudamérica

FUENTE: Dominio de Sudamérica para regionalización dinámica y estudio de Escenarios Climáticos, SENAMHI, 2020

Los modelos del CMIP6 que se usaron en el estudio son cincuenta y tres presentan resolución temporal mensual, se muestran en la Tabla 1 donde se indica el instituto donde se realizó, país y resolución espacial

Tabla 1. Modelos CMIP6 para el estudio de incertidumbres

| | MODELOS | INSTITUTO | PAIS | RESOLUCION ESPACIAL lat°xlon° |
|----|-------------------|---------------------|-----------|-------------------------------------|
| 1 | ACCESS-CM2 | CSIRO-ARCCSS | Australia | 1.875°x1.25° |
| 2 | ACCESS-ESM1-5 | CSIRO | Australia | 1.875°x1.25° |
| 3 | AWI-CM-1-1-MR | AWI | Alemania | 0.9375°x0.935059° |
| 4 | AWI-ESM-1-1-LR | AWI | Alemania | 1.875°x1.865237° |
| 5 | BCC-CSM2-MR | BCC | China | 1.125°x1.121485° |
| 6 | BCC-ESM1 | BCC | China | 2.8125°x2.790546° |
| 7 | CAMS-CSM1-0 | CAMS | China | 1.125°x1.121485° |
| 8 | CanESM5 | CCCma | Canada | 2.8125°x2.790546° |
| 9 | CAS-ESM2-0 | CAS | China | 1.40625°x1.417323° |
| 10 | CESM2-FV2 | NCAR | USA | 2.5°x1.894737° |
| 11 | CESM2-WACCM-FV2 | NCAR | USA | 2.5°x1.894737° |
| 12 | CESM2-WACCM | NCAR | USA | 1.25°x0.9424084° |
| 13 | CESM2 | NCAR | USA | 1.25°x0.9424084° |
| 14 | CIESM | THU | China | 1.25°x0.9424084° |
| 15 | CMCC-CM2-HR4 | CMCC | Italia | 1.25°x0.9424084° |
| 16 | CMCC-CM2-SR5 | CMCC | Italia | 1.25°x0.9424084° |
| 17 | CMCC-ESM2 | CMCC | Italia | 1.25°x0.9424084° |
| 18 | E3SM-1-0 | E3SM-Project | USA | 1°x1° |
| 19 | E3SM-1-1-ECA | E3SM-Project | USA | 1°x1° |
| 20 | E3SM-1-1 | E3SM-Project | USA | 1°x1° |
| 21 | EC-Earth3-AerChem | EC-Earth-Consortium | Europa | 0.703125°x0.7017519° |
| 22 | EC-Earth3-CC | EC-Earth-Consortium | Europa | 0.703125°x0.7017519° |
| 23 | EC-Earth3-Veg-LR | EC-Earth-Consortium | Europa | 1.125°x1.121485° |
| 24 | EC-Earth3-Veg | EC-Earth-Consortium | Europa | 0.703125°x0.7017519° |
| 25 | EC-Earth3 | EC-Earth-Consortium | Europa | 0.703125°x0.7017519° |
| 26 | FGOALS-f3-L | CAS | China | 1.25°x1° |
| 27 | FGOALS-g3 | CAS | China | 2° × 2.3° |
| 28 | FIO-ESM-2-0 | FIO-QLNM | China | 1.3° × 0.9° |
| 29 | GFDL-ESM4 | NOAA-GFDL | USA | 1.3° × 1° |
| 30 | GISS-E2-1-G | NASA-GISS | USA | 2.5° × 2° |
| 31 | GISS-E2-1-H | NASA-GISS | USA | 2.5° × 2° |
| 32 | GISS-E2-2-H | NASA-GISS | USA | 2.5° × 2° |
| 33 | ICON-ESM-LR | MPI-M | Alemania | 1°x1° |
| 34 | IITM-ESM | CCCR-IITM | India | 1.9° × 1.9° |
| 35 | INM-CM4-8 | INM | Rusia | 2° × 1.5° |

Continuación ...

| | | | | |
|----|-------------------|-----------------------------|-------------|--------------------|
| 36 | INM-CM5-0 | INM | Rusia | 2° × 1.5° |
| 37 | IPSL-CM6A-LR-INCA | IPSL | Francia | 2.5° × 1.3° |
| 38 | IPSL-CM6A-LR | IPSL | Francia | 2.5° × 1.3° |
| 39 | KACE-1-0-G | NIMS-KMA | Corea | 1.875°x1.25° |
| 40 | KIOST-ESM | KIOST | Corea | 1.875°x1.894737° |
| 41 | MCM-UA-1-0 | UA | USA | 3.75°x2.235947° |
| 42 | MIROC6 | MIROC | Japón | 1.40625°x1.400758° |
| 43 | MPI-ESM-1-2-HAM | HAMMOZ- | Alemania | 1.875°x1.865237° |
| 44 | | Consortium | | |
| 45 | MPI-ESM1-2-HR | MPI-M | Alemania | 0.9375°x0.935059° |
| 46 | MPI-ESM1-2-LR | MPI-M | Alemania | 0.9375°x0.935059° |
| 47 | MRI-ESM2-0 | MRI | Japón | 1.125°x1.121485° |
| 48 | NESM3 | NUIST | China | 1.875°x1.865237° |
| 49 | NorCPM1 | NCC | Noruega | 2.5°x1.894737° |
| 50 | NorESM2-LM | NCC | Noruega | 2.5°x1.894737° |
| 51 | NorESM2-MM | NCC | Noruega | 1.25°x0.9424084° |
| 52 | SAM0-UNICON | SNU | Corea | 1.25°x0.9424084° |
| 53 | TaiESM1 | AS-RCEC | Taiwan | 1.25°x0.9424084° |
| 54 | HadGEM3-GC31-MM | Met Office Hadley Centre | Reino Unido | 0.8333°x0.5556° |

FUENTE: Adaptación a partir de datos del Programa Mundial de Investigación Climática (WRCP)

3.2 Datos Observados

El modelo observado en el estudio es ERA5, con resolución temporal mensual para el período 1981-2010 y se usaron variables climáticas, esta información se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Modelo de reanálisis para el estudio de incertidumbres

| MODELO | INSTITUTO | REGION | VARIABLES |
|--------|-----------|--------|---|
| ERA5 | ECMWF | Europa | precipitación total temperatura en superficie altura geopotencial en 200hPa presión a nivel del mar |

FUENTE Elaboración propia a partir de datos de Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF)

3.3 Metodología de validación de parámetros

La metodología de validación de parámetros evalúa la capacidad de los modelos climáticos en representar la posición del núcleo del Anticiclón del Pacífico Sur Oriental (APSO) durante verano e invierno; el núcleo de Alta de Bolivia (AB) durante verano; y el núcleo de Baja

Amazónica (BA), durante verano para el hemisferio Sur, ver Tabla 3.

Los modelos del CMIP6 y ERA5 ya que tienen resoluciones espaciales diferentes, deben uniformizarse a una grilla en común $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ mediante el regrillado horizontal bilinear (Barreto, 2016)

Para realizar esta metodología de validación se requiere de datos de presión a nivel del mar y altura geopotencial 200hPa, mensuales el período 1981-2010 de los cuales se obtendrán su climatología estacional para las comparaciones.

Los modelos eficientes del conjunto de modelos de CMIP6 serán aquellos que superen el tercio superior ($p_v < 0.33$) en todos parámetros de validación de los sistemas sinópticos (Barreto, 2016)

Tabla 3. Parámetros de validación para la evaluación de los modelos climáticos globales

| Parámetro de Validación(PV) | Descripción |
|-----------------------------|--|
| 1 | Valor absoluto de la diferencia en intensidad del núcleo del APSO, entre un modelo del CMIP6 y el Reanálisis ERA5. Para el periodo de verano |
| 2 | Diferencia de la posición del núcleo del APSO, entre un modelo del CMIP6 y el Reanálisis ERA5. Para el periodo de verano |
| 3 | Valor absoluto de la diferencia en intensidad del núcleo del APSO, entre un modelo del CMIP6 y el Reanálisis ERA5. Para el periodo de invierno |
| 4 | Diferencia de la posición del núcleo del APSO, entre un modelo del CMIP6 y el Reanálisis ERA5. Para el periodo de invierno |
| 5 | Valor absoluto de la diferencia en intensidad del núcleo de la AB, entre un modelo del CMIP6 y el Reanálisis ERA5. Para el periodo de verano |
| 6 | Diferencia de la posición del núcleo de la AB, entre un modelo del CMIP6 y el Reanálisis ERA5. Para el periodo de verano |
| 7 | Valor absoluto de la diferencia en intensidad del núcleo de la BA, entre un modelo del CMIP6 y el Reanálisis ERA5. Para el periodo de verano |

El cálculo de los parámetros de validación relacionados con las diferencias en intensidad (1,3, 5, 7) y diferencias en posición (2, 4, 6) se realizaron con la ecuación 1 y ecuación 2, respectivamente.

$$PV_{j,i} = (x_i - xrea) \quad j = 1,3,5, \text{ ó } 7; i = 1,2,3, \dots, 15 \quad (1)$$

Donde:

$PV_{j,i}$ = Es el j-ésimo parámetro de validación del i-ésimo modelo del CMIP6.

x_i = Es la intensidad del núcleo del sistema a evaluar (APSO, AB, o BA) del i-ésimo modelo del CMIP6.

$xrea$ = Es la intensidad del núcleo del sistema a evaluar (APSO, AB, o BA) de REI.

$$PV_{j,i} = \sqrt{(lat_i - latrea)^2 + (lon_i - lonrea)^2} \quad j = 2,4, \text{ ó } 6; i = 1,2,3, \dots, 15 \quad (2)$$

Donde:

$PV_{j,i}$ = Es el j-ésimo parámetro de validación del i-ésimo modelo del CMIP5.

lat_i y lon_i = Latitud y longitud del núcleo del APSO y/o AB del i-ésimo modelo del CMIP5.

$latrea$ y $lonrea$ = Latitud y longitud del núcleo del APSO y/o AB de REI.

Posteriormente, cada uno de los siete Parámetros de Validación (PV) se estandarizó empleando la ecuación 3.

$$PVS_{i,j} = \frac{PV_{j,i} - PV_{minj}}{PV_{maxj} - PV_{minj}} \quad j = 1,2,3 ; i = 1,2,3 \quad (3)$$

Donde:

$PVS_{i,j}$ = Es el valor del j-ésimo parámetro de validación estandarizado del i-ésimo modelo del CMIP6.

$PV_{j,i}$ = Es el j-ésimo parámetro de validación del i-ésimo modelo del CMIP6

PV_{maxj} = Es el valor máximo del j-ésimo parámetro de validación.

PV_{minj} = Es el valor mínimo del j-ésimo parámetro de validación.

Finalmente, los modelos que indiquen parámetros de validación menores a 0.33 son los que

tendrán mayor capacidad en representar la dinámica de los sistemas Anticiclón del Pacífico Sur Oriental, La Alta de Bolivia y La Baja Amazónica. Los modelos que lleguen a tener desde 5 a 7 parámetros validados se utilizaron para el cálculo de incertidumbres.

3.4 Metodología de validación estadística

Para la comparación entre los modelos climáticos y el modelo observado se utilizaron los siguientes parámetros estadísticos: coeficiente de correlación, error cuadrático medio y bias, para el período 1981-2010 y para las variables temperatura y precipitación, estos estadísticos se aplicarán en toda su resolución espacial es decir para cada punto de grilla, la definición de los estadísticos son las siguientes:

COEFICIENTE DE CORRELACION DE PEARSON (r):

El coeficiente de Correlación de Pearson indica la fuerza y la dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

Dónde:

x: variable 1

y: variable 2

r: coeficiente de correlación

ERROR CUADRATICO MEDIO (RMSE):

El error cuadrático medio (RMSE) mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos, o se encarga de comparar un valor predicho y un valor observado.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

Dónde:

y_i : es el valor real

\hat{y}_i : es el valor esperado

N: Total de datos.

BIAS:

Bias o error medio mide la diferencia media entre los datos simulados y observados.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Pronosticado_i - Observado_i) \quad (6)$$

Donde:

N: Total de datos.

Pronosticado: Valores simulados por el modelo.

Observado: Valores obtenidos por observación.

Los modelos climáticos globales (CMIP6) se validaron y se seleccionaron cuando la metodología de validación de parámetros indique que modelos representen mejor la dinámica de los sistemas sinópticos y la metodología validación estadística indique que modelos tienen alta correlación, y el bias y error cuadrático medio sean los menores posibles.

Los resultados de las metodologías de validación permiten elegir que modelos representan mejor el clima en Sudamérica en el período histórico. El ensemble o conjunto de modelos climáticos permiten abordar las incertidumbres de diferente naturaleza asociadas a las mismas (AEMET, 2022), de esta manera se calcularán los cambios en la temperatura y precipitación promedio para las proyecciones futuras y las fuentes de incertidumbre.

3.5 Metodología partición de incertidumbres

La metodología de partición de incertidumbre, propuesta por Hawkins & Sutton(2009), indica que la suma de tres fuentes independientes: (1) variabilidad interna, (2) incertidumbre del modelo e (3) incertidumbre del escenario; da como resultado la incertidumbre total de un conjunto de modelos. Como aplicación de esta metodología se tiene el estudio propuesto por Szabó & Szépszó (2016), estos autores evaluaron las fuentes de incertidumbres en dos regiones de Europa y en la cuenca Carpathian, la aplicación de esta metodología se realizó para Sudamérica con el objetivo determinar el aporte de las fuentesde incertidumbre de la temperatura y precipitación para el período futuro 2015 – 2100.

Para cálculo de las fuentes de incertidumbre se ejecutan los siguientes pasos:

1. Realizar un ajuste de polinomio de cuarto orden a la temperatura del aire promedio estacional $X_T(t)$ y la precipitación estacional acumulada $X_P(t)$, período 1951 – 2100, mostrada en la ecuación 7.

$$X_T(t) = \Delta T(t) + \bar{T} + \varepsilon(t)$$

$$X_P(t) = \left(\frac{\Delta P(t) + 100}{100} \right) * \bar{P} * \left(\frac{\varepsilon(t) + 100}{100} \right), \quad (7)$$

Dónde:

\bar{T} y \bar{P} son los promedios polinómicos de temperatura y precipitación para el periodo de referencia de 1981–2014.

$\Delta T(t)$ se calcula como, la diferencia de la serie valores polinómicos evaluados en 2014 -2100 menos el promedio de los valores polinómicos evaluados en su período de referencia.

$$\Delta T(t) = T(t) - \bar{T}$$

$\Delta P(t)$ se calcula en porcentaje, es la división de la serie valores polinómicos evaluados en 2014 - 2100 entre el promedio de los valores polinómicos evaluados en su período de referencias, multiplicado por cien menos cien.

$$\Delta P(t) = \frac{P(t)}{\bar{P}} * 100 - 100 \quad (8)$$

$\varepsilon(t)$ son los residuos de temperatura, serie de datos del polinomio menos el dato del modelo en el período 1951-2100.

$\varepsilon(t)$ son los residuos de precipitación, serie de datos del modelo entre la serie de datos del polinomio 1951-2100, multiplicado por cien menos cien.

$$\varepsilon(t) = \frac{XP(t)}{P(t)} * 100 - 100 \quad (9)$$

2. Variabilidad interna $V(t)$ se calcula como la varianza de los residuos, sin embargo, solo para realizar la gráfica de variabilidad interna estacional se calcula aplicandodesviación estándar

$$V(t) = var_{m,s,t} \varepsilon(t) \Big| t = (1951 \dots 1980) \rightarrow (2071 \dots 2100) \quad (10)$$

1. Previo al cálculo de la variabilidad interna de la temperatura, se realiza un recalculado de 30 años del conjunto de modelos, luego se calcula la desviación estándar (solo para gráfico) y varianza (para todos los siguientes cálculos), finalmente se aplica una media móvil de 10 años para el suavizar la serie.

2. Para el cálculo de variabilidad interna de precipitación se realiza de la misma manera explicada anteriormente, pero con datos de residuos de precipitación en porcentaje.
3. La incertidumbre del modelo $M(t)$, representa el cálculo de la varianza de los modelos paracada escenario donde se obtiene una serie, luego se suma las series de los escenarios y se divide entre en número de escenarios.

$$M(t) = \frac{1}{N_s} \sum_s var_m \Delta T(t) \quad (11)$$

Donde:

N_s : número de escenarios

4. La incertidumbre del escenario $S(t)$, representa la suma de las series de los modelos en cada escenario y se divide entre en número de modelos (equivalente al promedio), luego se calcula la varianza de las series de escenarios.

$$S(t) = var_s \left(\frac{1}{N_m} \sum_m \Delta T(t) \right) \quad (12)$$

Donde:

N_m : número de modelos

5. Incertidumbre total $T(t)$ en la ecuación 13, es definida por la suma de variabilidad interna, la incertidumbre del modelo e incertidumbre del escenario. El porcentaje de fracción de incertidumbre será de cada una de ellas entre el total por 100.

$$T(t) = V(t) + M(t) + S(t) \quad (13)$$

Donde:

$T(t)$: incertidumbre total

$V(t)$: variabilidad interna

$M(t)$: variabilidad del modelo

$S(t)$: variabilidad del escenario

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Validación dinámica

Se validaron 54 modelos climáticos del CMIP6, siete de ellos son los más representativos al realizar la validación respecto a la posición e intensidad de los núcleos de los sistemas sinópticos Anticiclón del Pacífico Sur Oriental (APSO), Alta de Bolivia (AB) y Baja Amazónica (BA), la selección según la metodología de validación de parámetros la cual indica que valores menores o iguales a 0.33 (Barreto, 2016) se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de validación modelos CMIP6

| Modelos | val_maxAB _DEF | ubi_val_maxA B_DEF | val_maxAPS O_DEF | ubi_val_maxAPS O_DEF | val_maxAPS O_JJA | ubi_val_maxAPS O_JJA | val_minBA _DEF |
|-------------------|-------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|
| EC-Earth3 | 0.012 | 0.186 | 0.200 | 0.191 | 0.200 | 0.143 | 0.200 |
| GFDL-ESM4 | 0.036 | 0.167 | 0.000 | 0.121 | 0.000 | 0.286 | 0.200 |
| NorESM2-MM | 0.010 | 0.167 | 0.200 | 0.157 | 0.200 | 0.319 | 0.200 |
| E3SM-1-1-ECA | 0.051 | 0.167 | 0.000 | 0.091 | 0.200 | 0.000 | 0.000 |
| EC-Earth3-CC | 0.015 | 0.186 | 0.200 | 0.191 | 0.200 | 0.143 | 0.200 |
| EC-Earth3-Veg | 0.005 | 0.186 | 0.200 | 0.191 | 0.200 | 0.286 | 0.200 |
| EC-Earth3-AerChem | 0.025 | 0.186 | 0.200 | 0.191 | 0.200 | 0.143 | 0.200 |

Se presenta las gráficas de los modelos representativos para Sudamérica para las variables presión a nivel del mar y altura geopotencial en la figura 4 y 5 respectivamente, donde la presión de nivel del mar para invierno en el hemisferio sur (junio, julio y agosto) presenta el núcleo del APSO con valores de 1022 hPa

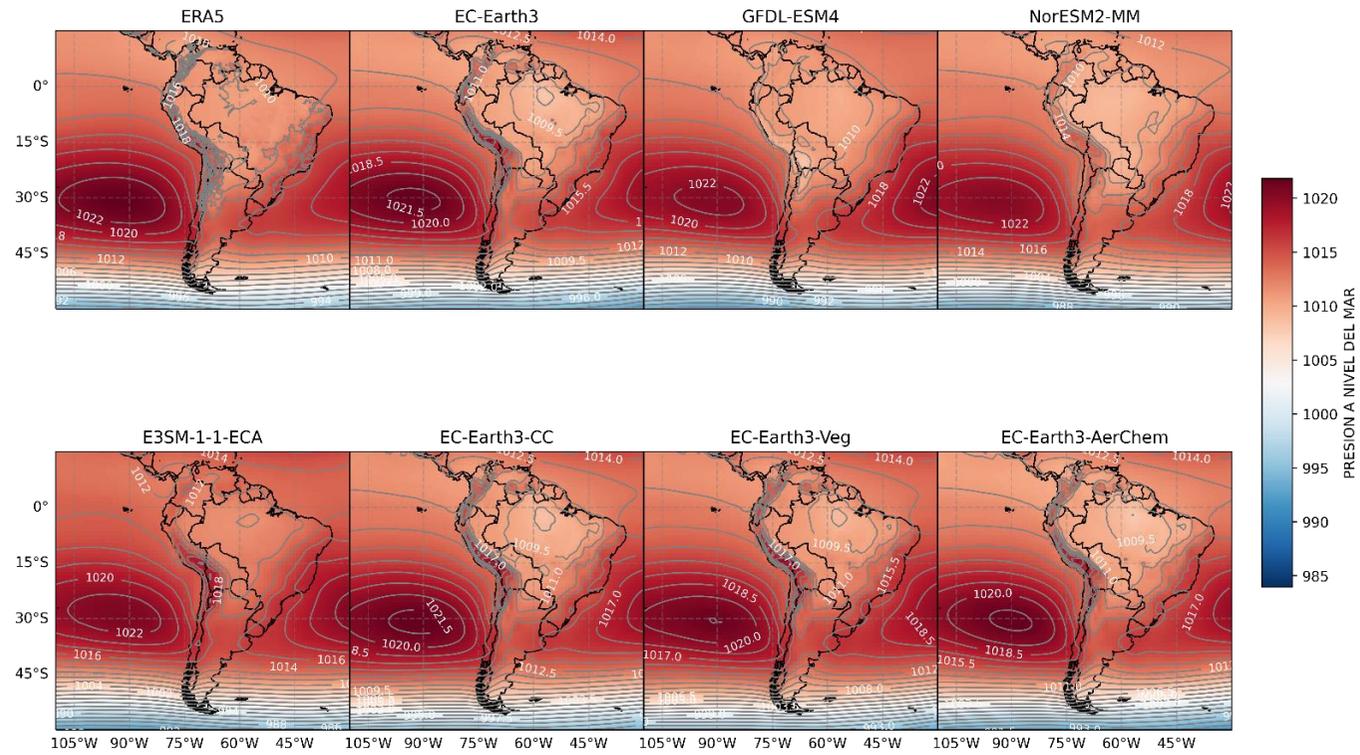


Figura 4. Presión a nivel medio del mar en invierno de los modelos más representativos

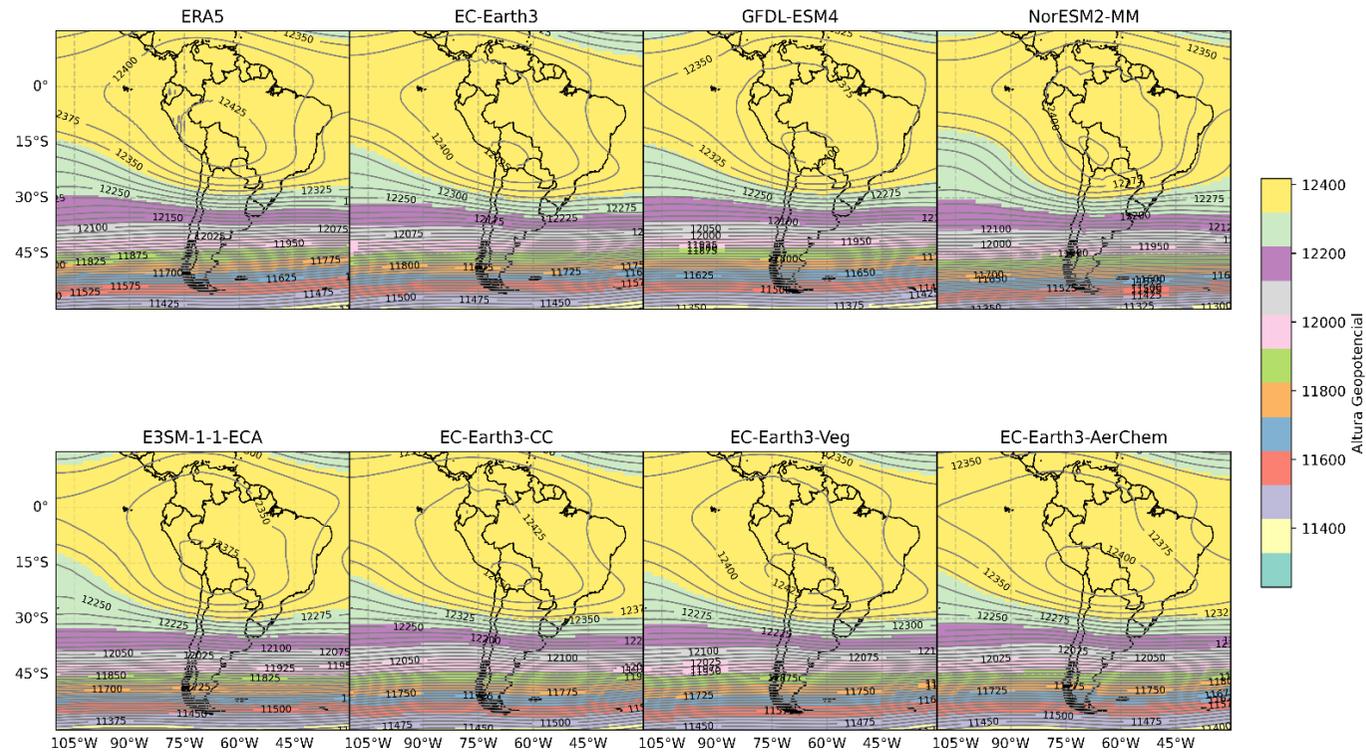


Figura 5. Altura Geopotencial para Sudamérica de los modelos más representativos

4.2 Validación estadística

En la validación estadística, se calcularon tres estadísticos: correlación de Pearson (r), sesgo promedio (BIAS) y raíz del error cuadrático medio (RMSE), se evaluaron en ocho modelos climáticos globales del CMIP6 seleccionados de la validación dinámica, se tiene como dato observado al modelo de reanálisis ERA5, todos los modelos fueron previamente llevados a una grilla regular de $1^\circ \times 1^\circ$ para el área de Sudamérica, mediante el programa Climate data Operators (CDO). Los estadísticos para precipitación acumulada anual y temperatura del aire promedio anual se muestran en las tablas 5 y 6 respectivamente.

En la Tabla 5, indica que para la precipitación promedio anual los modelos NorESM2-MM, EC-Earth3 y EC-Earth3-Veg muestran mayores valores de correlación, el bias es negativo en la mayoría de modelos indicando que subestiman la precipitación en la región de estudio, sin embargo, el modelo como el EC-Earth3 sobre estima tanto en bias como RMSE.

Tabla 5. Estadísticos de precipitación CMIP6

| MODELOS | r | BIAS | RMSE |
|-------------------|----------|-------------|-------------|
| E3SM-1-1-ECA | 0.67 | -20 | 689 |
| EC-Earth3-AerChem | 0.75 | -53 | 615 |
| EC-Earth3-CC | 0.77 | -25 | 593 |
| EC-Earth3-Veg | 0.78 | -33 | 586 |
| EC-Earth3 | 0.79 | 1123 | 1411 |
| GFDL-ESM4 | 0.75 | -69 | 615 |
| MPI-ESM1-2-HR | 0.75 | -42 | 620 |
| NorESM2-MM | 0.79 | -88 | 579 |

El diagrama de Taylor de precipitación acumulada anual, Figura 6, indica que el modelo NorESM2-MM representa una alta correlación a diferencia el modelo E3SM-1-1-ECA presenta la correlación menor, el modelo EC-Earth3 presenta una alta desviación estándar y RMSE respecto del observado.

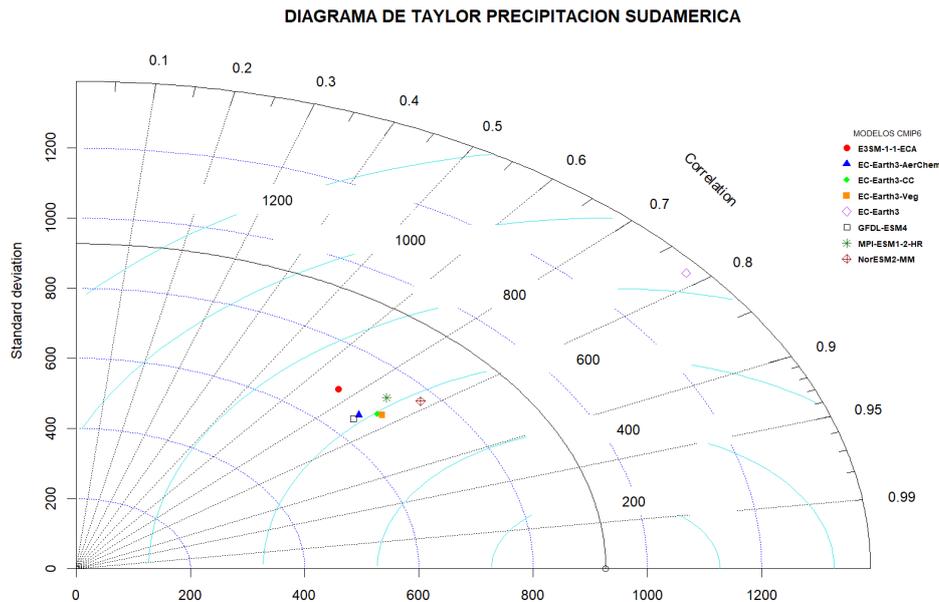


Figura 6. Diagrama de Taylor Precipitación acumulada

La Tabla 6, indica que para la temperatura del aire promedio anual el modelo GFDL-ESM4, EC-Earth3, EC-Earth3-Veg, indican mayores valores de correlación, el bias es negativo en el modelo GFDL-ESM4, respecto al RMSE y Bias el modelo EC-Earth3-CC presenta mayor valor.

Tabla 6. Estadísticos de temperatura del aire CMIP6

| MODELOS | r | BIAS | RMSE |
|-------------------|-------|--------|------|
| E3SM-1-1-ECA | 0.986 | 0.388 | 1.49 |
| EC-Earth3-AerChem | 0.99 | 0.566 | 1.56 |
| EC-Earth3-CC | 0.99 | 1.157 | 1.89 |
| EC-Earth3-Veg | 0.99 | 0.801 | 1.62 |
| EC-Earth3 | 0.99 | 0.786 | 1.6 |
| GFDL-ESM4 | 0.99 | -0.084 | 1.14 |
| MPI-ESM1-2-HR | 0.988 | 0.223 | 1.38 |
| NorESM2-MM | 0.986 | 0.197 | 1.41 |

Analizando la Figura 7 el diagrama de Taylor para la temperatura del aire promedio anual, indica que la mayoría de modelos presentan correlación en 0.99, sin embargo, el modelo BCC-CSM2-MR presenta ligeramente mayor RMSE respecto a los otros.

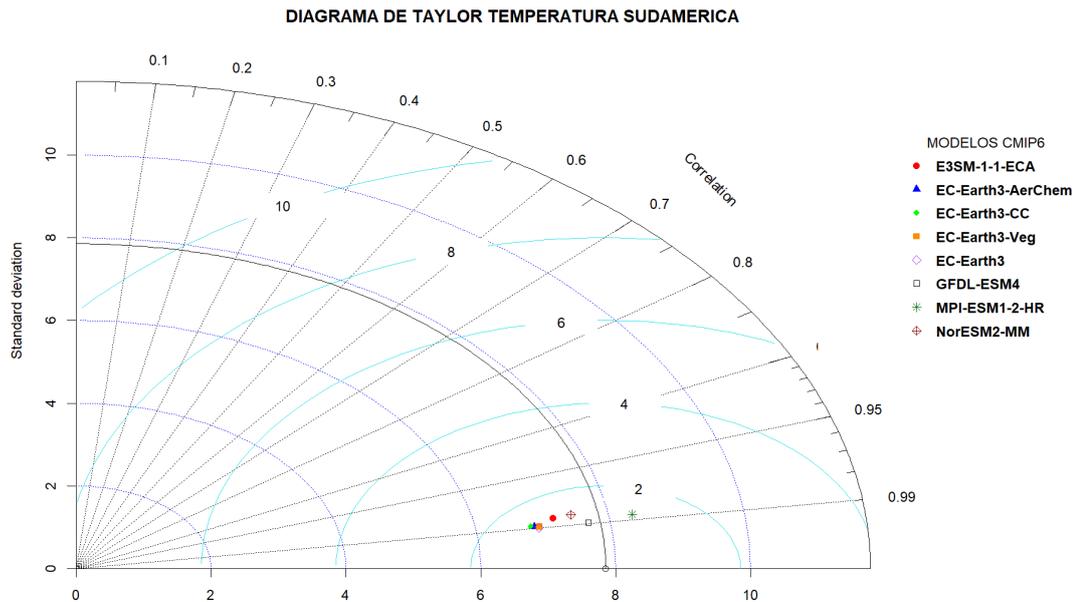


Figura 7. Diagrama de Taylor temperatura

Se realiza análisis de correlación temporal de precipitación acumulada anual y temperatura del aire promedio anual para cada grilla de los modelos más representativo en las figuras 8 y 9 respectivamente, para descripción de las variables climática en estudio se consideraron cuatro regiones de análisis: latitud ecuatorial (0° hasta 15°S), latitud tropical (0° hasta 23.5°S), latitud subtropical (de 23.5°S hasta 35°S) y latitud media (35°S hasta 60°S).

La precipitación acumulada anual indica que los modelos climáticos E3SM-1-1-ECA, EC-Earth3-AerChen y NorESM2-MM, presentan altas correlaciones en latitudes ecuatoriales. En latitudes tropicales presentan altas correlaciones E3SM-1-1-ECA, EC-Earth3-AerChen, NorESM2-MM y bajas correlaciones en la región amazónica EC-Earth3 y EC-Earth3-CC y MPI-ESM1-2-HR. Las latitudes subtropicales presentan correlaciones altas los modelos MPI-ESM1-2-HR, EC-Earth3-AerChen y EC-Earth3-Veg. Latitudes medias altas correlaciones E3SM-1-1-ECA, EC-Earth3-CC, MPI-ESM1-2-HR y GFDL-ESM4 y baja correlación NorESM2-MM.

La temperatura promedio anual indica que todos los modelos representativos presentan altas correlaciones en latitudes ecuatoriales y latitudes tropicales, sin embargo, el modelo EC-Earth3 indica los mayores valores de correlación, también evidencia que el modelo MPI-ESM1-2-HR presenta bajas correlaciones sobre la región costera del Perú. En latitudes subtropicales y latitudes medias todos los modelos representativos presentan altas correlaciones, con excepción de los modelos MPI-ESM1-2-HR y EC-Earth3-CC, cual presenta bajas correlaciones sobre el norte de Argentina y Chile.

CORRELACION TEMPORAL DE PRECIPITACION ANUAL - SUDAMERICA

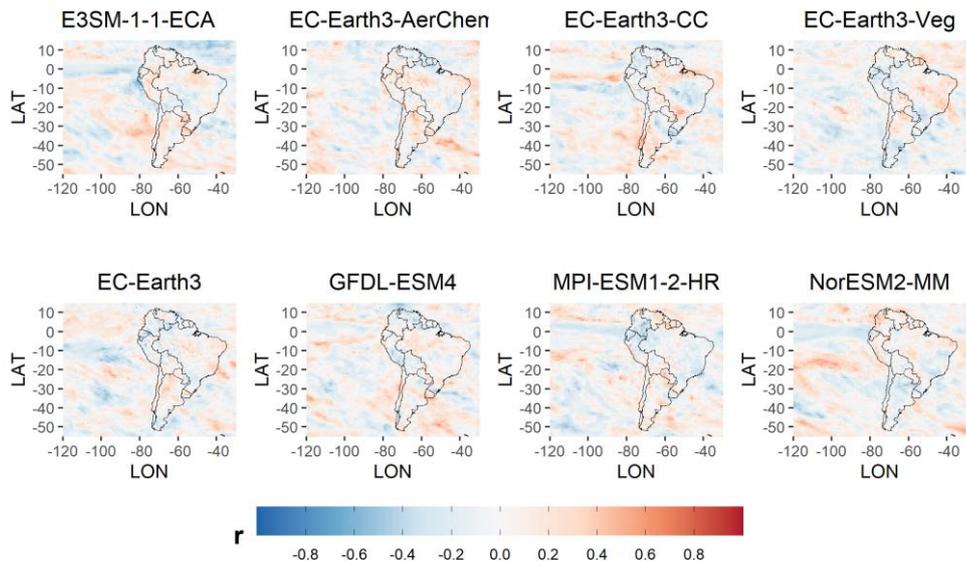


Figura 8. Correlación Temporal de Precipitación acumulada anual de los modelos CMIP6

CORRELACION TEMPORAL DE TEMPERATURA ANUAL - SUDAMERICA

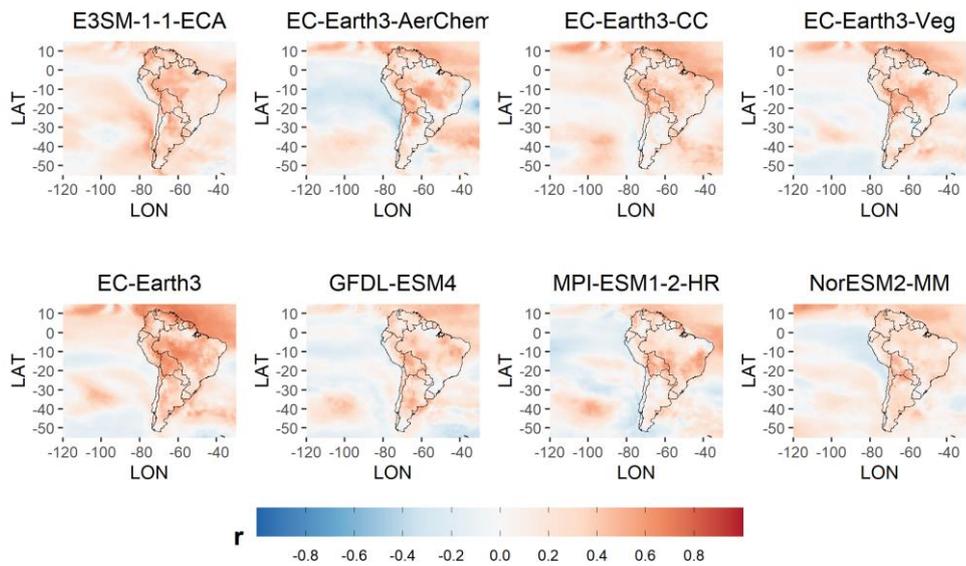


Figura 9. Correlación Temporal de Temperatura del aire promedio anual de los modelos CMIP6

Luego de validar distintos modelos del CMIP6 para las variables temperatura y precipitación, se eligieron los siguientes modelos presentados en la Tabla 7 para realizar el cálculo de incertidumbres para Sudamérica.

Tabla 7. Modelos Representativos

| MODELOS CMIP6 | |
|----------------------|----------------------|
| TEMPERATURA | PRECIPITACION |
| EC-Earth3 | EC-Earth3-AerChem |
| EC-Earth3-AerChem | EC-Earth3-Veg |
| EC-Earth3-Veg | EC-Earth3-CC |
| GFDL-ESM4 | GFDL-ESM4 |
| E3SM-1-1-ECA | E3SM-1-1-ECA |
| NorESM2-MM | NorESM2-MM |

4.3 Incertidumbre de modelos climático para la precipitación en Sudamérica

En esta sección se realizó la cuantificación de la incertidumbre del conjunto de modelos climáticos representativos (Climate ensemble) para la región de Sudamérica estos fueron seleccionados concluyendo la validación dinámica y estadística estos son: EC-Earth3, EC-Earth3-CC, EC-Earth3-Veg, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR y NorESM2-MM de la evaluando las variables precipitación acumulada estacional y temperatura promedio del aire estacional.

El análisis del cambio porcentual de la precipitación acumulada anual de los modelos representativos del CMIP6, en dos escenarios la línea roja y verde indican en cambio porcentual promedio del conjunto de modelos y los puntos indican los valores en cambio porcentual de un modelo, ver la Figura 10, los modelos del CMIP6 en sus escenarios ssp245 y ssp585 el cambio porcentual promedio de la precipitación diverge en la proyección de horizonte medio centrado al 2050, para el escenario ssp245 el cambio porcentual promedio se mantiene entre 0 y +20% hasta el 2080 donde se presenta un cambio de +45% indicando que hay un aumento de la precipitación. El escenario ssp585 presenta mayores valores negativos de cambio porcentual de precipitación, indicando que la precipitación disminuya sobre la región de estudio en un 20% y 40 para el año 2060 y 2080 respectivamente.

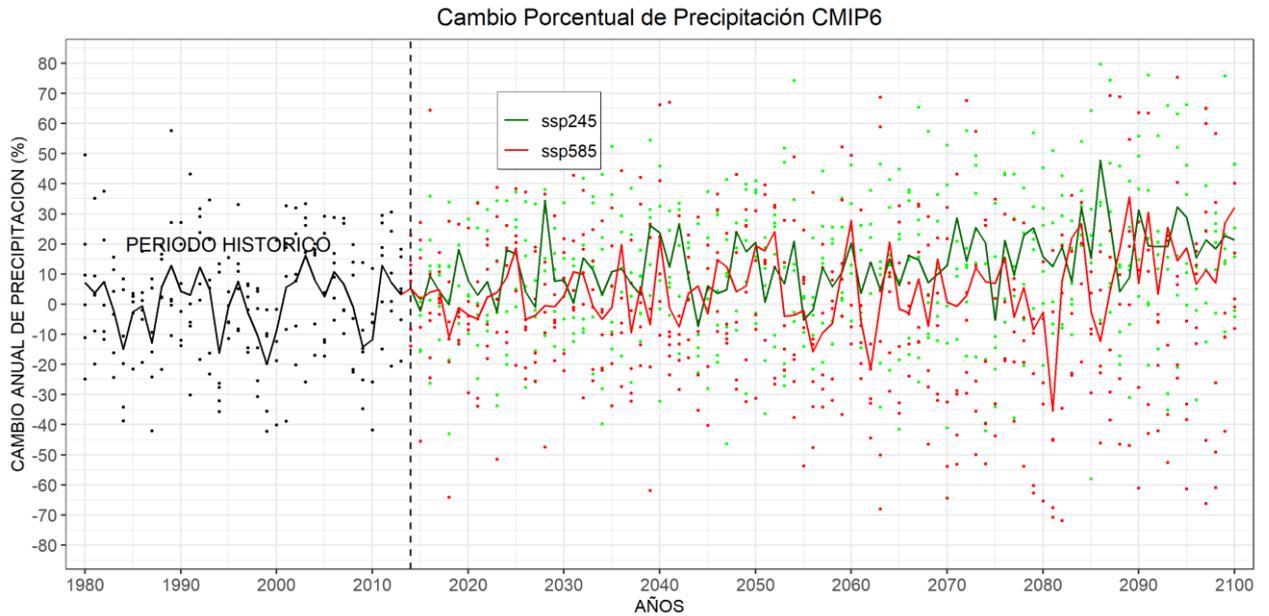


Figura 10. Cambio porcentual de precipitación para los escenarios SSP245 y ssp585

La fracción de contribución de las fuentes de incertidumbre de la precipitación acumulada estacional de los modelos CMIP6, ver Figura 11 la variabilidad interna y la incertidumbre del escenario son los factores dominantes en todas las estaciones, para la estación de verano se observa que la variabilidad interna, la incertidumbre del modelo, la incertidumbre del escenario presenta valores de 60%, 30% y 10% respectivamente, hacia mediados de siglo, luego 35% y 65% hacia finales de siglo. En la estación de otoño se observa que la variabilidad interna, la incertidumbre del modelo, presentan valores de 70% y 30% respectivamente hacia mediados de siglo, luego 40% y 50% hacia finales de siglo evidenciando el aumento de incertidumbre del escenario en 10%. En la estación de invierno se observa que la variabilidad interna, la incertidumbre del modelo, la incertidumbre del escenario presenta valores de 85%, 10% y 5% respectivamente, hacia mediados de siglo, luego 70%, 25% y 5% hacia finales de siglo. En la estación de primavera se observa que la variabilidad interna, la incertidumbre del modelo, la incertidumbre del escenario presenta valores de 65%, 25% y 10% respectivamente, hacia mediados de siglo, luego 50%, 20% y 30% hacia finales de siglo.

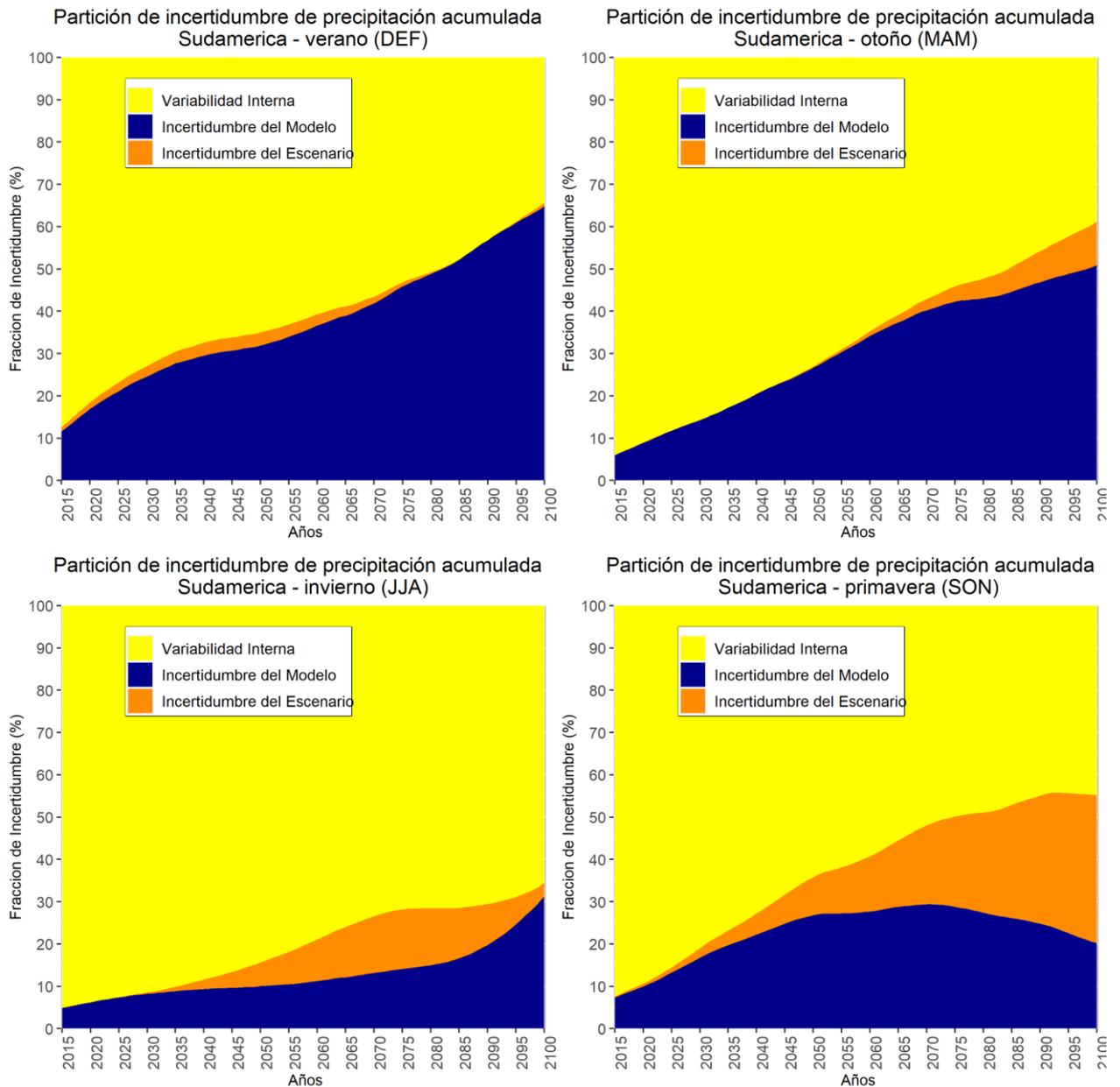


Figura 11. Fracción de incertidumbre precipitación CMIP6

4.4 Incertidumbre de modelos climático para la temperatura en Sudamérica

El análisis del cambio de la temperatura del aire promedio anual de los modelos representativos del CMIP6, en dos escenarios la línea roja y verde indican en cambio de la temperatura del aire promedio, ver la Figura 12, en sus escenarios ssp245 y ssp585 divergen en la proyección en el año 2040, para el escenario ssp245 el cambio de temperatura promedio en las proyecciones de horizonte medio centrado al 2050 es $+1^{\circ}\text{C}$ y al horizonte lejano 2085 es $+1.6^{\circ}\text{C}$, además, el escenario ssp585 indica el cambio de temperatura promedio en las proyecciones de horizonte medio centrado al 2050 es $+1.3^{\circ}\text{C}$ y al horizonte lejano 2085 es

+2.8°C, evidenciando que ante estos escenarios el aumento de la temperatura del aire es notable.

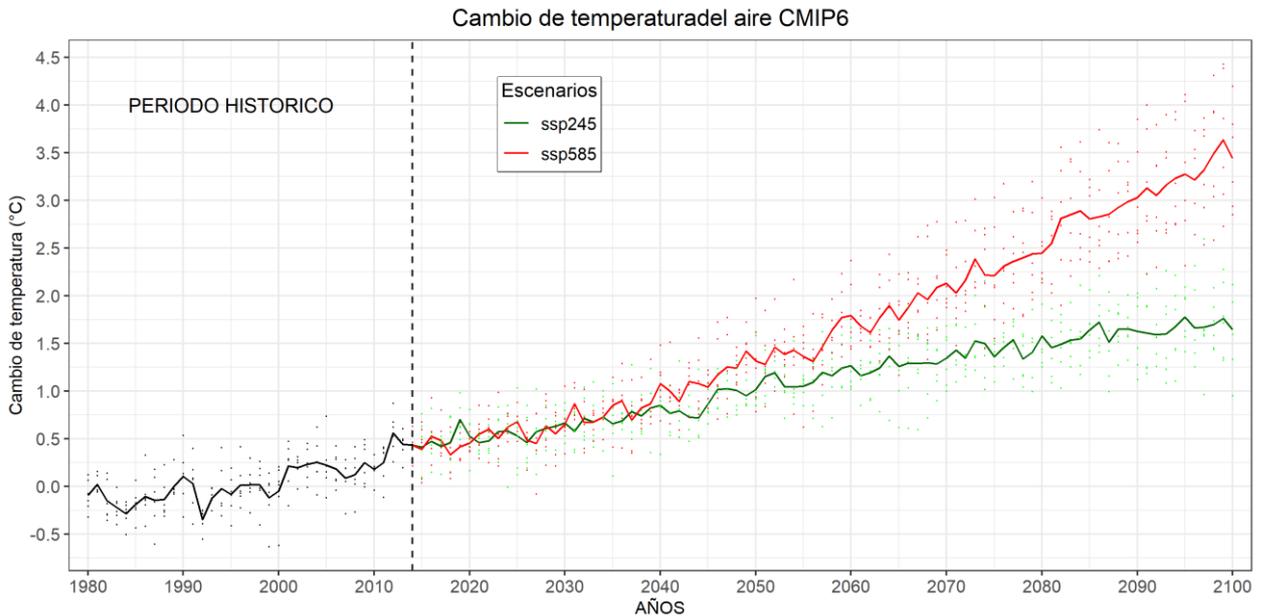


Figura 12. Cambio de temperatura del aire promedio para los escenarios SSP245 y ssp585

La fracción de contribución de las fuentes de incertidumbre de la temperatura del aire promedio estacional de los modelos CMIP6, ver Figura 13, indican que, de la variabilidad interna, la incertidumbre del modelo y la incertidumbre del escenario predominan hacia mediados de siglo, estos factores cambian hacia finales de siglo siendo la incertidumbre del modelo y la incertidumbre del escenario las predominante. Para la estación de verano y otoño se observa que la variabilidad interna, la incertidumbre del modelo, la incertidumbre del escenario presenta valores de 50%, 25% y 25% respectivamente, hacia mediados de siglo, luego 2%, 13% y 85% hacia finales de siglo. Para la estación de invierno y primavera se observa que la variabilidad interna, la incertidumbre del modelo, la incertidumbre del escenario presenta valores de 45%, 22% y 33% respectivamente, hacia mediados de siglo, luego 2%, 10% y 88% hacia finales de siglo

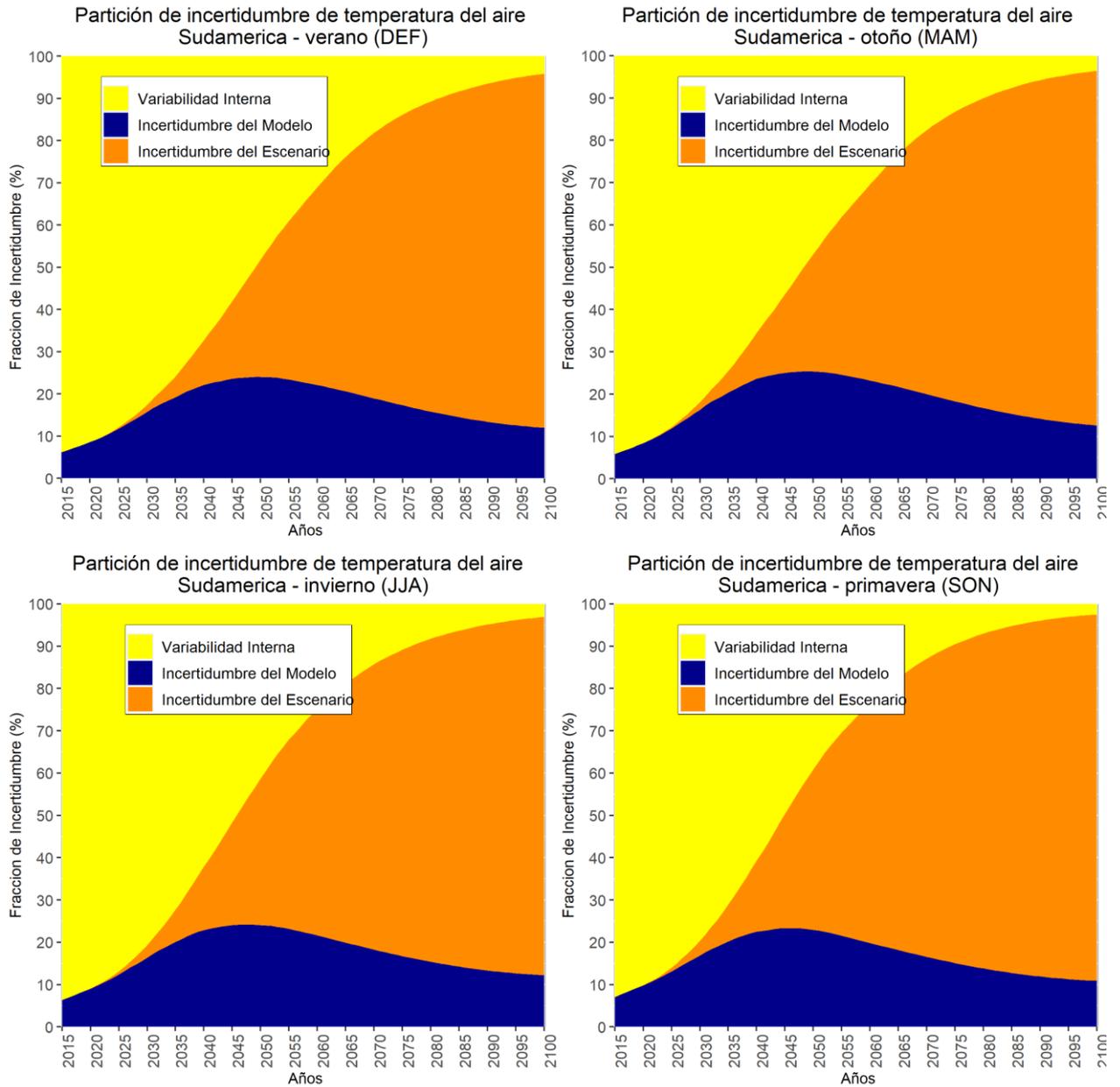


Figura 13. Fracción de incertidumbre temperatura CMIP6

Las principales diferencias entre las proyecciones de temperatura y de precipitación; son que la variabilidad interna e incertidumbre del modelo son los factores que predominan en las precipitaciones hacia mitad de siglo y la incertidumbre del escenario aumente significativamente hacia finales de siglo solo en la estación primavera, para la temperatura las tres incertidumbres predominan hacia mitad de siglo y hacia finales predominan la incertidumbre del modelo e incertidumbre del escenario.

El análisis para proyecciones de precipitación acumulada para verano estación húmeda en Sudamérica acontezcan aumentos o disminución en las próximas décadas, que están asociadas a fluctuaciones naturales o a la variabilidad caótica del clima a escala global en un

60% para mitad de siglo y 35% para finales de siglo y a la dispersión entre las diferentes respuestas climáticas obtenidas de los diferentes modelos para la misma configuración de forzamiento en un 30% hacia mitad de siglo y 65% hacia finales de siglo.

El análisis para proyecciones de temperatura promedio para verano en Sudamérica presentan aumentos hasta de +3.6°C en SSP585 y +1.8°C en SSP245 hacia finales de siglo, que están asociadas a fluctuaciones naturales o a la variabilidad caótica del clima a escala global en un 50% para mitad de siglo y disminuyen hasta 2% para finales de siglo, así mismo, el futuro poco conocido de las emisiones de gases de efecto invernadero va en aumento desde 25% para mitad de siglo y hasta 85% para finales de siglo.

Esto implica que, para las próximas décadas, los tomadores de decisiones deben considerar que la alta variabilidad natural es la principal fuente de incertidumbre hacia mediados de siglo en las proyecciones de precipitación, y que la incertidumbre del escenario debe ser considerada de importancia en las proyecciones de temperatura en Sudamérica

V. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en la presente investigación se presentan las siguientes conclusiones

- La partición de incertidumbre de las proyecciones de la precipitación acumulada de los modelos climáticos del CMIP6 para Sudamérica; indican que en verano y otoño los factores de incertidumbre predominante son la variabilidad interna e incertidumbre del modelo, para mitad de siglo indican valores aproximados de 65% y 30% y para finales de siglo 35% y 50% respectivamente, para la estación invierno predominan la variabilidad interna y la incertidumbre del modelo, sin embargo, el aumento de la incertidumbre del escenario tiene un máximo de 15% hacia el 2075 y luego su disminución hacia finales de siglo, para primavera la predominancia hacia mediados de siglo es de la variabilidad interna e incertidumbre del modelo con valores de 65% y 25%, sin embargo, la incertidumbre del escenario aumenta hacia finales de siglo en un 30%.
- La partición de incertidumbre de las proyecciones de la temperatura del aire promedio de los modelos climáticos del CMIP6 para Sudamérica; indican que en verano y otoño los factores de incertidumbre predominante son la variabilidad interna, incertidumbre del modelo y la incertidumbre del escenario hacia mitad de siglo consecutivamente hacia finales de siglo la variabilidad interna disminuye hasta 2% , la incertidumbre del escenario aumenta hasta 85% y la incertidumbre del modelo disminuye ligeramente hasta 13%; de la misma manera este aumento significativo de la incertidumbre del escenario hasta valores de 88% se observa en las estaciones de invierno y primavera.
- Los modelos climáticos del CMIP6 representativos luego de la validación de parámetros y validación estadística para el estudio de análisis de incertidumbres de temperatura del aire promedio estacional y precipitación acumulada estacional son: EC-Earth3, EC-Earth3-CC, EC-Earth3-Veg, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR y NorESM2-MM.

VI. RECOMENDACIONES

- La metodología de partición de incertidumbres puede realizarse en modelos con mayor resolución espacial como los modelos regionales.
- La metodología permite elaborar un mapa de incertidumbres a nivel regional para estudios de cambio climático.
- Considerar que algunos modelos climáticos globales del CMIP6 carecen algunos escenarios de Rutas Socioeconómicas Compartidas (SSP).

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña D., Llacza A., Cubas F., Jácome G, Díaz A. & Avalos G. (2012). Escenarios de cambio climático en las regiones Cusco y Apurímac: precipitación y temperatura 2030 y 2050 (Climate change scenarios for the region of Cusco and Apurimac: Precipitation and temperatura, 2030 and 2050). Report, Servicio Nacional de Meteorología a Hidrología del Perú (SENAMHI), Lima, Perú, 144 pp
- Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T. C., & Wieringa, J. (2003). Guidelines on Climate Metadata and Homogenization. In World Meteorological Organization.
- Almazroui. A. (2021). Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. *Earth Systems and Environment* (2021) 5:155–183 <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>
- Agencia Estatal de Meteorología (2022). Evaluación de modelos climáticos Recuperado de http://www.aemet.es/es/idi/clima/evaluacion_modelos_climaticos
- Barreto, C. (2016). Comportamiento del alta de Bolivia hacia finales del siglo XXI bajo el escenario de emisión RCP8.5 [tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3109>
- Barreto, C. & Llacza A. (2014). Validation of CMIP5 models by means of representing patterns of mesoscale systems on South America for the Summer and Winter. Poster en WRCP VAMOS/CORDEX LAC II.
- Buishand, T. A., & T. Brandsma, (2001). Multisite simulation of daily precipitation and temperature in the Rhine Basin by nearest-neighbor resampling. *Water Resour. Res.*, 37, 2761– 2776, doi:10.1029/2001WR00029
- Brown, P.T., Ming, Y., Li, W., & Hill, S.A. (2017). Change in the magnitude and mechanisms of global temperature variability with warming, *Nat. Clim. Change*, 7, 743–748, Doi <https://doi.org/10.1038/nclimate3381>, 2017.

- Bruyère, C.L., Monaghan, A.J., Steinhoff, D.F. & Yates, D. (2015). Bias-Corrected CMIP5 CESM Data in WRF/MPAS Intermediate File Format. National Center for Atmospheric Research.
- Ceccherini, G., Russo, S., Ameztoy, I., Patricia Romero, C., & Carmona–Moreno, C. (2016). Magnitude and frequency of heat and cold waves in recent decades: The case of South America. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(3), 821–831. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-821-2016>
- Cambio Climático 2014. (2014). [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs
- CarbonBrief.org, Hausfather. Z. CMIP6. (2023). The next generation of Climate models explained. Recuperado de <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained/>
- European Environment Agency (EEA). (2017). Uncertainty guidance topic 3. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/knowledge/tools/uncertainty-guidance/topic3>
- Hawkins, E. & Sutton, R (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 90, 1095–1107 (2009). doi:10.1175/2009BAMS2607.1
- Hawkins, E. & Sutton, R. (2011). The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Clim. Dyn.* 37, 407–418 (2011). doi:10.1007/s00382-010-0810-6
- IPCC (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el
- Karoly, D.J., & Wu, Q. (2005). Detection of regional surface temperature trends. *J. Climate*, 18, 4337–4343, doi:10.1175/JCLI3565.1.
- Lehner, F., Deser, C., Maher, N., Marotzke, J., Fischer, E.M., Brunner, L., Knutti, R. & Hawkins, E. (2020). Partitioning climate projection uncertainty with multiple large ensembles and CMIP5/6. *Earth System Dynamics*, 11(2), 491-508. Doi CMIP5/6. <https://doi.org/10.5194/esd-2019>
- Maher, N., Matei, D., Milinski, S., & Marotzke, J. (2018). ENSO Change in Climate Projections: Forced Response or Internal Variability?, *Geophys. Res. Lett.*, 45,

11390-11398, <https://doi.org/10.1029/2018GL079764>, 2018.

- Mezghani, A., & B. Hingray, (2009). A combined downscaling– disaggregation weather generator for stochastic generation of multisite hourly weather variables over complex terrain: Development and multi-scale validation for the Upper Rhone River basin. *J. Hydrol.*, 377, 245–260, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.08.033.
- Magrin, G.O., Marengo, J.A., Boulanger, J., Buckeridge, M.S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F.R., & Vicuña, S. (2014). Central and South America. In V. R. Barros, C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects* (pp. 1499–1566). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.5860/choice.45-5008>
- O’Neill, B.C., Tebaldi, C., van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., . . . & Sanderson, B.M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. doi: 10.5194/gmd-9-3461-2016
- Palomino, R., Cordoba, S. & Esteban, M. (2015). Evaluación de modelos climáticos globales del CMIP5 sobre el noroeste de América del Sur. *Rev. Biodivers. Neotrop.* ISSN 2027- 8918
- SENAMHI. (2020). *Guía metodológica para la generación de escenarios de cambio climático*. Ediciones SENAMHI, Lima, Perú.
- Szabó, P., & Szépszó, G. (2016). Quantifying sources of uncertainty in temperature and precipitation projections over different parts of Europe. In *Mathematical problems in meteorological modelling* (pp. 239-261). Springer International Publishing. DOI 10.1007/978-3-319-40157-7_12
- World Climate Data & Monitoring Programme. (2009). *Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*. In *Climate Data and Monitoring (Issue WCDMP–No. 72)*. File Attachment
- World Meteorological Organization. (2018). *Guía de prácticas climatológicas (2018th ed., Issue 153)*. World Meteorological Organization.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Tabla de datos de validación de modelos globales del CMIP6

| MODELS | INSTITUTO | PAIS | PVS_NUCLAPSO_DJF | PVS_POSIAPSO_DJF | PVS_NUCLBAMAZ_DJF | PVS_NUCLAPSO_JJA | PVS_POSIAPSO_JJA | PVS_NUCLALTABO_DJF | PVS_POSIALTABO_DJF |
|-----------------|--------------|-----------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| ERA5 | ECMWF | Europe | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ACCESS-CM2 | CSIRO-ARCCSS | Australia | 0.055 | 0.493 | 0.563 | 0.137 | 0.283 | 0.022 | 0.089 |
| ACCESS-ESM1-5 | CSIRO | Australia | 0.273 | 0.493 | 0.356 | 0.056 | 0.721 | 0.085 | 0.2 |
| AWI-CM-1-1-MR | AWI | Germany | 0.262 | 0.232 | 0.15 | 0.2 | 0.6 | 0.006 | 0.089 |
| AWI-ESM-1-1-LR | AWI | Germany | 0.291 | 0.52 | 0.361 | 0.317 | 0.583 | 0.088 | 0.522 |
| BCC-CSM2-MR | BCC | China | 0.038 | 0.164 | 0.522 | 0.019 | 0.583 | 0.013 | 0.369 |
| BCC-ESM1 | BCC | China | 0.333 | 0.493 | 0.484 | 0.145 | 0.316 | 0.005 | 0.322 |
| CAMS-CSM1-0 | CAMS | China | 0.115 | 0.593 | 0.306 | 0.199 | 0.632 | 1 | 0.089 |
| CanESM5 | CCCma | Canada | 0.397 | 0.52 | 0.794 | 0.233 | 0.583 | 0.064 | 0.456 |
| CAS-ESM2-0 | CAS | China | 0.823 | 0.368 | 0.71 | 0.405 | 0.583 | 0.058 | 0.988 |
| CESM2-FV2 | NCAR | USA | 0.57 | 0.52 | 0.085 | 0.422 | 0.316 | 0.028 | 0.322 |
| CESM2-WACCM-FV2 | NCAR | USA | 0.368 | 0.164 | 0.102 | 0.094 | 0.447 | 0.01 | 0.447 |
| CESM2-WACCM | NCAR | USA | 0.832 | 0.52 | 0.118 | 0.506 | 0.424 | 0.031 | 0.268 |
| CESM2 | NCAR | USA | 0.534 | 0.164 | 0.157 | 0.298 | 0.141 | 0.042 | 0.268 |
| CIESM | THU | China | 0.359 | 0.493 | 0.055 | 0.109 | 0.316 | 0.047 | 0.268 |
| CMCC-CM2-HR4 | CMCC | Italy | 0.091 | 0.368 | 0.304 | 0.072 | 0 | 0.077 | 0.268 |
| CMCC-CM2-SR5 | CMCC | Italy | 0.129 | 0.368 | 0.341 | 0.095 | 0.424 | 0.04 | 0.268 |
| CMCC-ESM2 | CMCC | Italy | 0.311 | 0.164 | 0.319 | 0.058 | 0.583 | 0.033 | 0.358 |
| E3SM-1-0 | E3SM-Project | USA | 0.053 | 0.232 | 0.106 | 0.322 | 0.141 | 0.056 | 0.2 |

Continuación ...

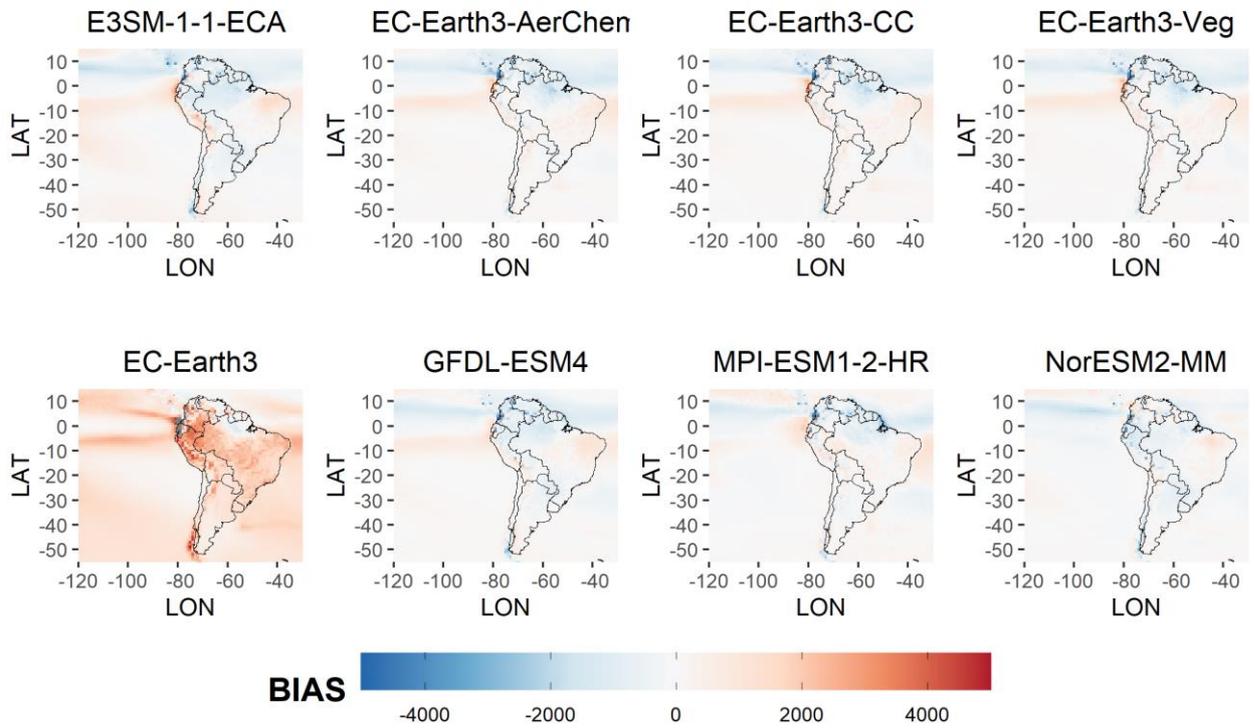
| MODELS | INSTITUTO | PAIS | PVS_NUCLAPSO_DJF | PVS_POSIAPSO_DJF | PVS_NUCLBAMAZ_DJF | PVS_NUCLAPSO_JJA | PVS_POSIAPSO_JJA | PVS_NUCLALTABO_DJF | PVS_POSIALTABO_DJF |
|----------------------------|---------------------|---------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| E3SM-1-1-ECA | E3SM-Project | USA | 0.168 | 0.368 | 0.015 | 0.238 | 0.141 | 0.062 | 0.2 |
| E3SM-1-1-EC-Earth3-AerChem | E3SM-Project | USA | 0.148 | 0.164 | 0.016 | 0.356 | 0.141 | 0.067 | 0.2 |
| EC-Earth3-AerChem | EC-Earth-Consortium | Europe | 0.3 | 0.164 | 0.127 | 0.228 | 0.2 | 0.034 | 0.283 |
| EC-Earth3-CC | EC-Earth-Consortium | Europe | 0.348 | 0.164 | 0.135 | 0.179 | 0.2 | 0.006 | 0.283 |
| EC-Earth3-Veg-LR | EC-Earth-Consortium | Europe | 0.506 | 0.368 | 0.122 | 0.261 | 0.51 | 0.061 | 0.369 |
| EC-Earth3-Veg | EC-Earth-Consortium | Europe | 0.278 | 0.164 | 0.118 | 0.16 | 0.316 | 0.013 | 0.283 |
| EC-Earth3-FGOALS-f3-L | EC-Earth-Consortium | Europe | 0.447 | 0.164 | 0.134 | 0.242 | 0.2 | 0.021 | 0.283 |
| FGOALS-g3 | CAS | China | 0.763 | 0.593 | 0.596 | 0.832 | 0.51 | 0.149 | 0.951 |
| FIO-ESM-2-0 | CAS | China | 0.348 | 0.697 | 0.123 | 0.043 | 0.762 | 0.063 | 0.283 |
| GFDL-ESM4 | FIO-QLNM | China | 0.225 | 0.232 | 0.098 | 0.192 | 0.583 | 0.009 | 0.482 |
| GISS-E2-1-G | NOAA-GFDL | USA | 0.12 | 0.164 | 0.106 | 0.057 | 0.316 | 0.046 | 0.2 |
| GISS-E2-1-H | NASA-GISS | USA | 0.589 | 0.164 | 0.323 | 0.763 | 0.583 | 0.012 | 0.81 |
| GISS-E2-2-H | NASA-GISS | USA | 0.663 | 0.52 | 0.899 | 1 | 0.316 | 0.007 | 0.544 |
| ICON-ESM-LR | NASA-GISS | USA | 1 | 0.368 | 0.878 | 0.676 | 0.51 | 0.216 | 0.81 |
| IITM-ESM | MPI-M | Germany | 0.004 | 0.52 | 0.502 | 0.457 | 0.424 | 0.087 | 0.447 |
| INM-CM4-8 | CCCR-IITM | India | 0.041 | 0.164 | 0.634 | 0.135 | 0.316 | 0.147 | 0.4 |
| INM-CM5-0 | INM | Russia | 0.228 | 0.52 | 0.11 | 0.161 | 0.141 | 0.078 | 0.456 |
| IPSL-CM6A-LR-INCA | INM | Russia | 0.315 | 0.52 | 0.136 | 0.262 | 0.2 | 0.096 | 0.456 |
| | IPSL | France | 0.259 | 0.368 | 0.064 | 0.075 | 0.632 | 0.108 | 0.322 |

Continuación ...

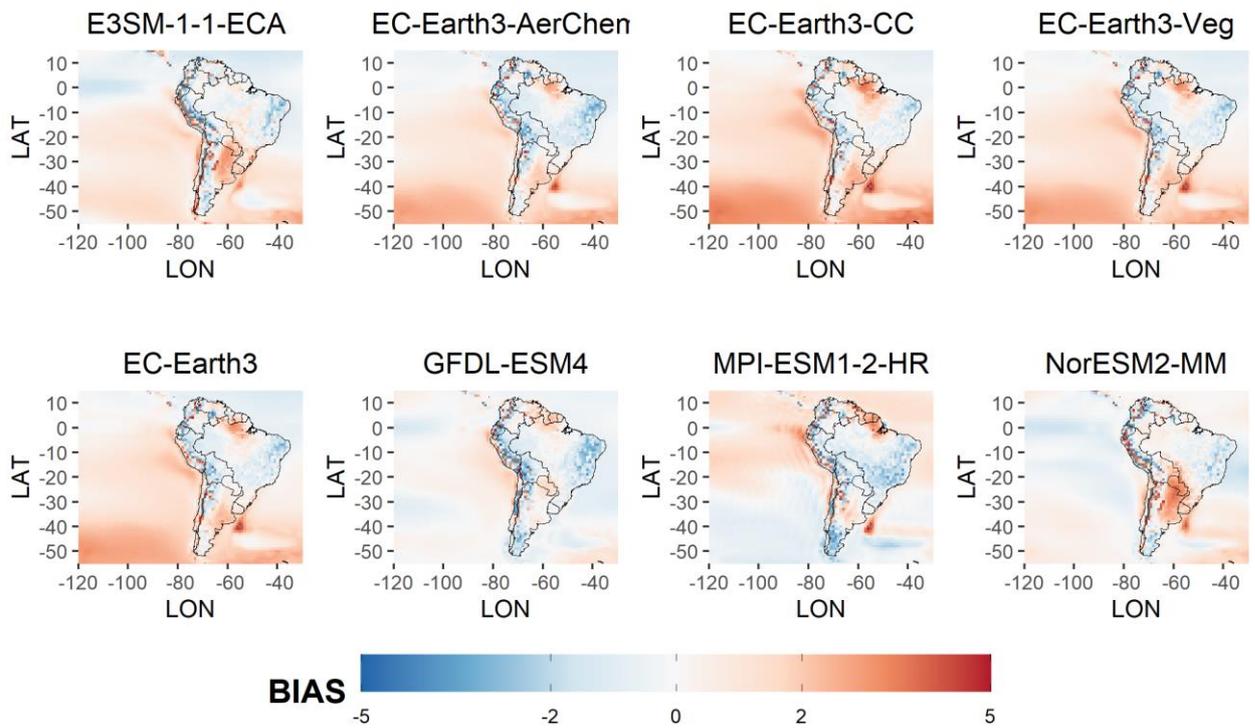
| MODELS | INSTITUTO | PAIS | PVS_NUCLAPSO_DJF | PVS_POSIAPSO_DJF | PVS_NUCLBAMAZ_DJF | PVS_NUCLAPSO_JJA | PVS_POSIAPSO_JJA | PVS_NUCLALTABO_DJF | PVS_POSIALTABO_DJF |
|-----------------------|-----------------------|---------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| IPSL- CM6A-LR | IPSL | France | 0.246 | 0.368 | 0.049 | 0.094 | 0.86 | 0.112 | 0.322 |
| KACE-1-0- G | NIMS-KMA | Korea | 0.124 | 0.329 | 0.6 | 0.233 | 0 | 0.004 | 0.2 |
| KIOST- ESM | KIOST | Korea | 0.136 | 0.52 | 0.057 | 0.3 | 0.849 | 0.025 | 0.566 |
| MCM-UA- 1-0 | UA | USA | 0.044 | 0.593 | 0.147 | 0.55 | 0.424 | 0.089 | 1 |
| MIROC6 | MIROC | Japan | 0.541 | 0.52 | 1 | 0.846 | 0.316 | 0.07 | 0.322 |
| MPI-ESM- 1-2-HAM | HAMMOZ- Consortium | Germany | 0.081 | 0.52 | 0.384 | 0.237 | 1 | 0.067 | 0.447 |
| MPI- ESM1-2- HR | MPI-M | Germany | 0.084 | 0.329 | 0.124 | 0.094 | 0.894 | 0.019 | 0.934 |
| MPI- ESM1-2- LR | MPI-M | Germany | 0.257 | 0.52 | 0.136 | 0.054 | 1 | 0.031 | 0.089 |
| MRI- ESM2-0 | MRI | Japan | 0.185 | 0.593 | 0.017 | 0.377 | 0.4 | 0.028 | 0.2 |
| NESM3 | NUIST | China | 0.328 | 0.735 | 0.126 | 0.027 | 0.447 | 0.038 | 0.447 |
| NorCPM1 | NCC | Norway | 0.065 | 0.329 | 0.433 | 0.136 | 0.424 | 0.066 | 0.447 |
| NorESM2- LM | NCC | Norway | 0.152 | 1 | 0.009 | 0.08 | 0.141 | 0.031 | 0.447 |
| NorESM2- MM | NCC | Norway | 0.182 | 0.368 | 0.136 | 0.226 | 0.283 | 0.018 | 0.2 |
| SAMO- UNICON | SNU | Korea | 0.136 | 0.329 | 0.156 | 0.032 | 0.707 | 0.037 | 0.358 |
| TaiESM1 | AS-RCEC | Taiwan | 0.212 | 0.164 | 0.065 | 0.134 | 0.316 | 0.02 | 0.358 |

Anexo 2: Gráfica de bias temporales de precipitación acumulada anual y temperatura del aire promedio anual modelos representativos del CMIP6

BIAS TEMPORAL DE PRECIPITACION ANUAL - SUDAMERICA



BIAS TEMPORAL DE TEMPERATURA ANUAL SUDAMERICA

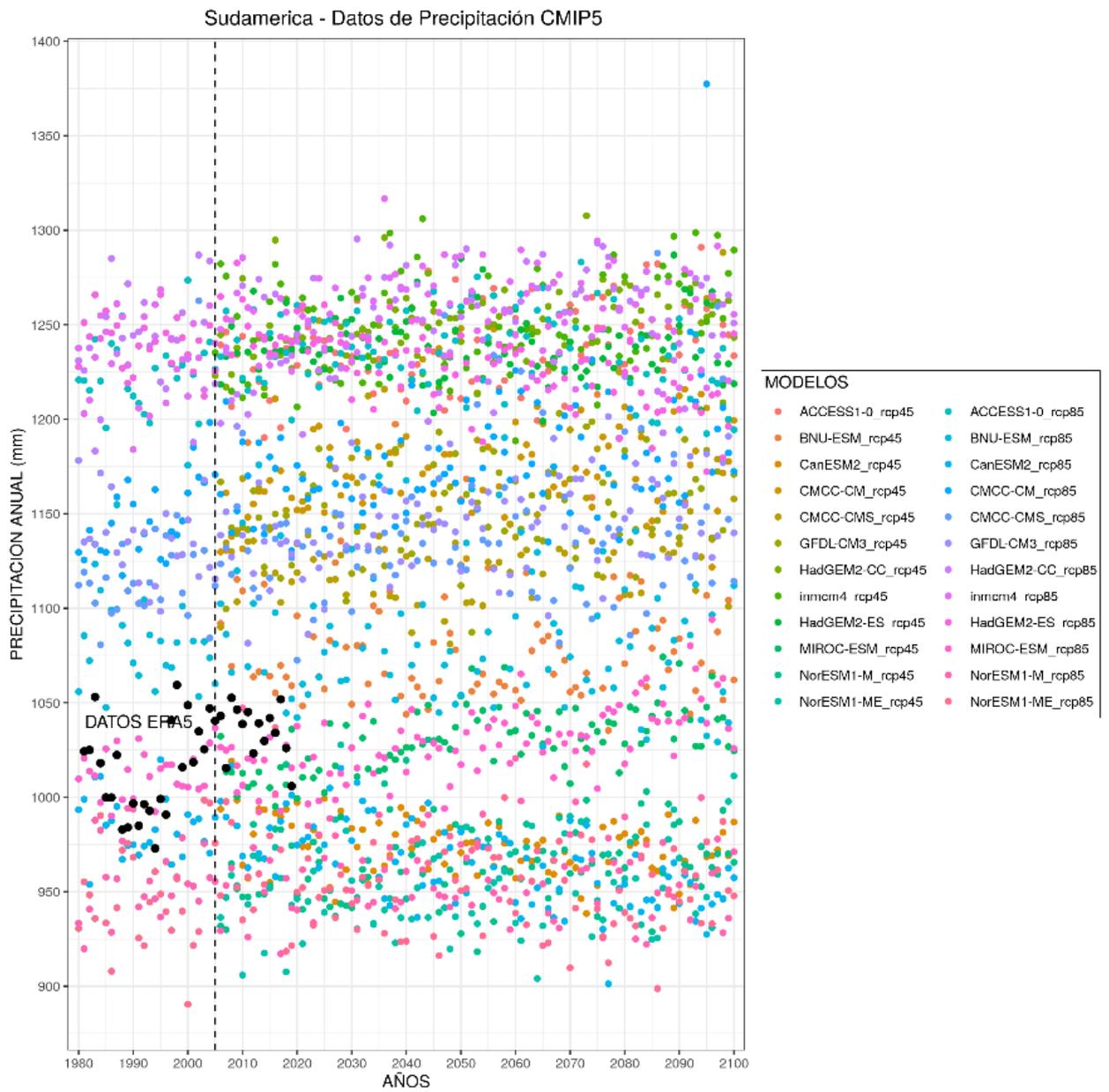


Anexo 3: Tabla de región latitudinal de Sudamérica con de modelos globales del CMIP6 representativos

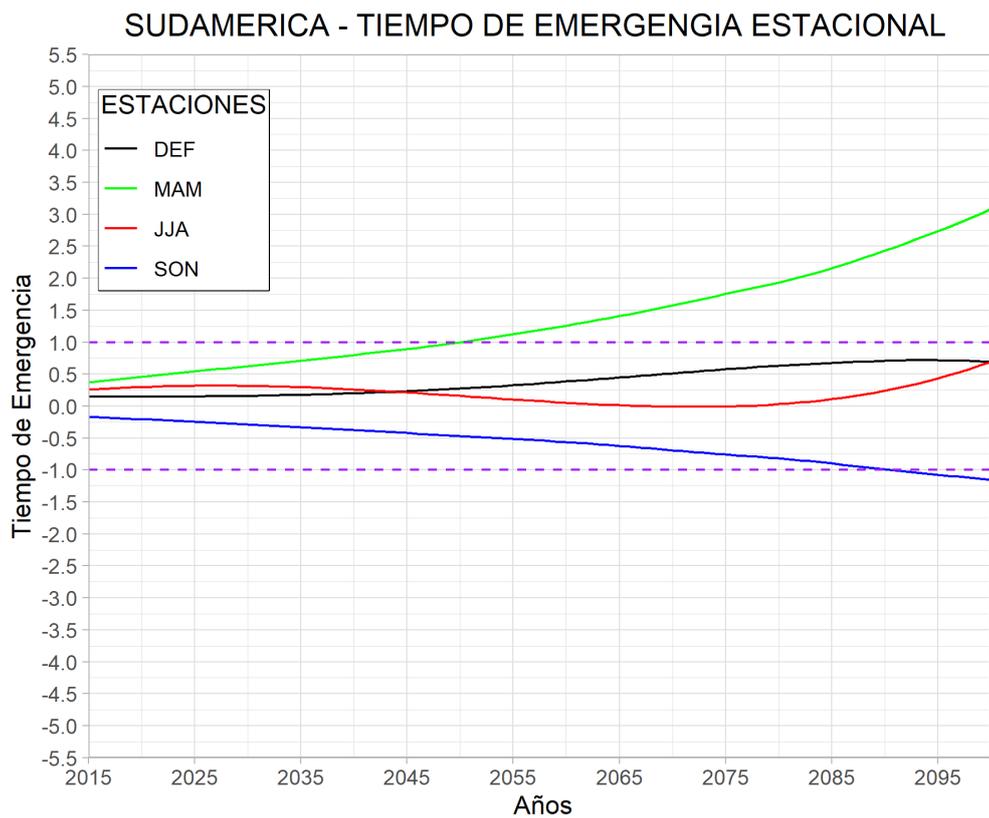
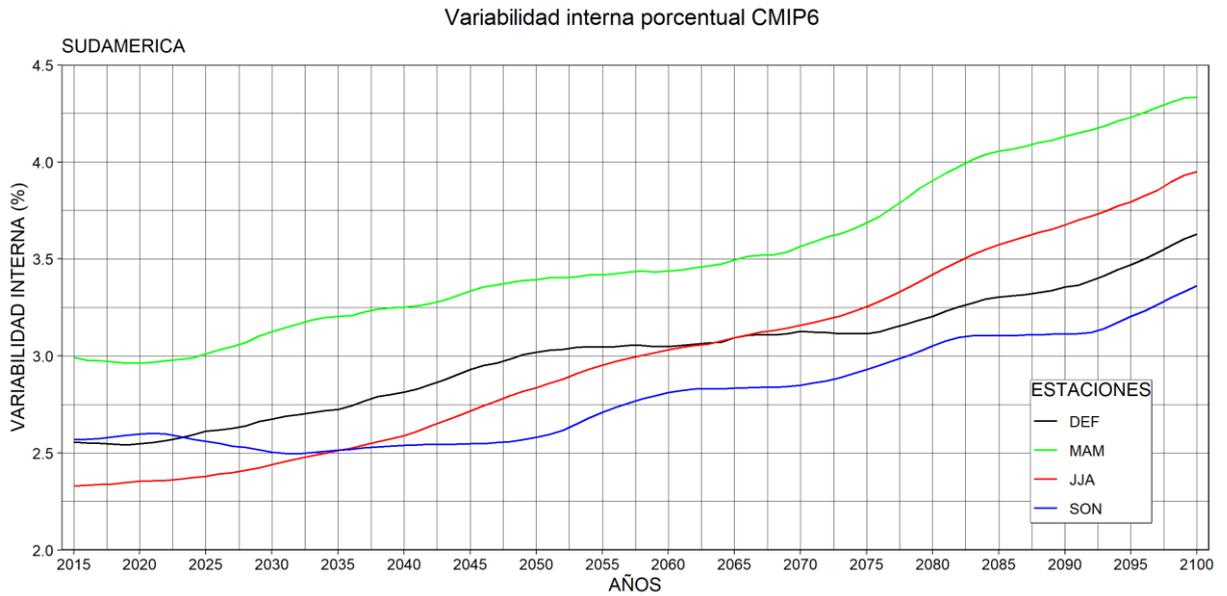
| Región | Temperatura Modelos representativos | Precipitación |
|-------------------------------------|--|--|
| Latitud Ecuatorial (0°-15°S) | EC-Earth3 | E3SM-1-1-ECA EC-Earth3-AerChen NorESM2-MM |
| Latitud Tropical (0°-23.5°S) | EC-Earth3 | EC-Earth3-CC MPI-ESM1-2-HR |
| Latitud Subtropical (23.5°-35°S) | EC-Earth3 E3SM-1-1-ECA EC-Earth3-AerChem EC-Earth3-Veg EC-Earth3 | E3SM-1-1-ECA EC- Earth3-AerChen NorESM2-MM |
| Latitud Media (35°-60°S) | GFDL-ESM4 NorESM2-MM | E3SM-1-1-ECA EC-Earth3-CC MPI-ESM1-2-HR GFDL-ESM4 |

Anexo 4: Gráfica de dispersión de datos de modelos globales del CMIP6

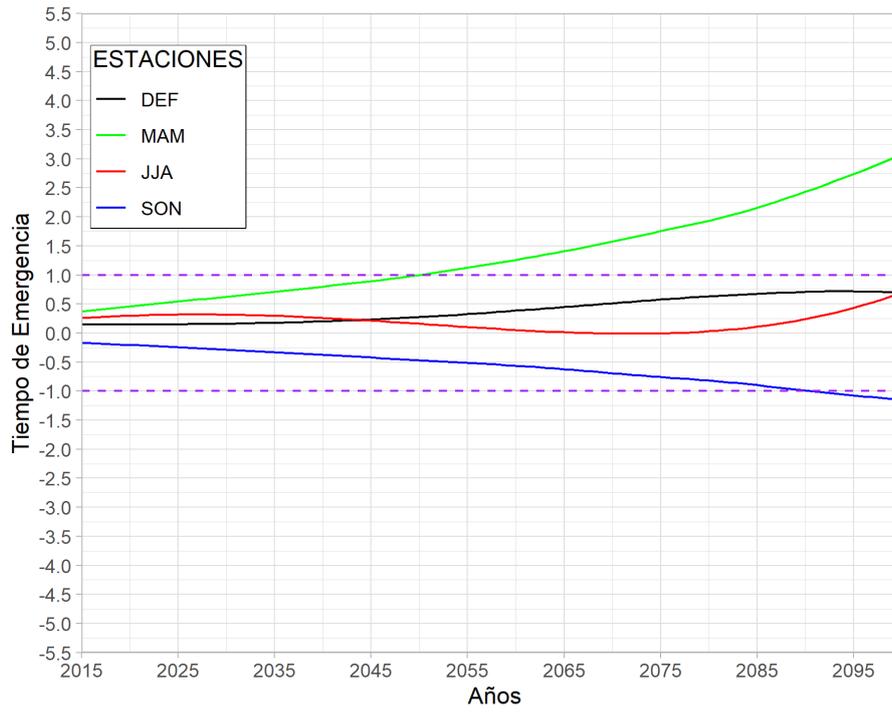
Cambios de precipitación



Anexo 5: Gráficas de Variabilidad interna, Relación Señal Ruido y Tiempo de emergencia de precipitación acumula estacional en las proyecciones del CMIP6



SUDAMERICA - TIEMPO DE EMERGENCIA ESTACIONAL



Anexo 6: Gráficas de Variabilidad interna, Relación Señal Ruido, Tiempo de emergencia de temperatura del aire estacional en las proyecciones del CMIP6

