

Python: Una alternativa para el procesamiento de escenarios de cambio climático

Nieves Soledad Vásquez Perales¹

vasquez.perales.nieves@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8153-1716>

Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”

Doctorado en Ciencias

Tarija – Bolivia

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación es proponer el lenguaje de programación Python como una alternativa para el procesamiento de escenarios de cambio climático, considerando a la temperatura máxima del aire como la variable climática de estudio. Los escenarios futuros de cambio climático se basan en las rutas socioeconómicas compartidas utilizadas en el Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, de donde se toman en cuenta cuatro (4) escenarios delimitados entre sí: SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585, los cuales se extraen de los datos públicos de la Nube de Google, como parte del Proyecto Pangeo, los mismos que se derivan de los archivos originales del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6. El modelo de circulación general seleccionado es MRI-ESM2.0, desarrollado por el Instituto de Investigación Meteorológica de la Agencia Meteorológica de Japón. Como resultado del procesamiento de datos, se tienen cuatro (4) representaciones gráficas a nivel global de la variación de la variable de estudio en el periodo 2023-2100 en comparación con el periodo 1937-2014 por cada uno de los cuatro (4) escenarios futuros establecidos, donde se observa un aumento inminente de la temperatura máxima a nivel mundial, principalmente en la región del Ártico. Finalmente, el lenguaje de programación Python, al tener la capacidad para la lectura de archivos que contienen información climática, puede ser considerada como una herramienta más para su procesamiento.

Palabras clave: Python; escenario de cambio climático; ruta socioeconómica compartida; proyecto de intercomparación de modelos acoplados; modelo de circulación general

¹ Autor Principal

Python: An alternative for processing climate change scenarios

ABSTRACT

The objective of this research work is to propose the Python programming language as an alternative for the processing of climate change scenarios, considering the maximum air temperature as the climatic variable of study. The future climate change scenarios are based on the shared socioeconomic pathways used in the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, from which four (4) delimited scenarios are taken into account: SSP126, SSP245, SSP370 and SSP585, which are extracted from the public data of the Google Cloud, as part of the Pangeo Project, the same ones that are derived from the original files of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6. The selected general circulation model is MRI-ESM2.0, developed by the Meteorological Research Institute of the Japan Meteorological Agency. As a result of data processing, there are four (4) global graphic representations of the variation of the study variable in the period 2023-2100 compared to the period 1937-2014 for each of the four (4) established future scenarios, where an imminent increase in maximum temperature is observed globally, mainly in the Arctic region. Finally, the Python programming language, having the ability to read files that contain climate information, can be considered as one more tool for its processing.

Keywords: *Python; climate change scenario; shared socioeconomic pathway; coupled model intercomparison project; general circulation model*

Artículo recibido: 15 marzo 2023

Aceptado para publicación: 05 abril 2023

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los mayores problemas en la actualidad, ya que amenaza la vida y el sustento de la humanidad, de los animales, de la naturaleza y en sí, de todas las especies que habitan en la Tierra, cuyas causas pueden atribuirse a los cambios de índole natural como las variaciones del ciclo solar o aquellas ocasionadas por el hombre a través de la quema de combustibles fósiles como ser el carbón, gas o petróleo; provocando el aumento en las temperaturas, escasez del agua, sequías, aumento en el nivel del mar, incendios, inundaciones, entre otras consecuencias ambientales; sin embargo, el cambio climático, no solo es una consecuencia de la situación ambiental, sino también de la situación económica y social.

El documento *Cambio Climático 2014: Informe de Síntesis*, publicado por el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014; el nombre puede ser traducido como “Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático”), confirma que la influencia humana en el sistema climático es la principal causa del calentamiento global y va en aumento, estableciendo que mientras más sea la perturbación de las actividades humanas, mayores son los impactos en todos los componentes del sistema climático (p. v).

El *Resumen para Responsables de Políticas* en el marco del documento *Cambio Climático 2021: Bases Físicas* publicado por el IPCC, establece que desde el año 2011 las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) han aumentado, alcanzando en el año 2019 una media anual de 410 partes por millón (ppm) de dióxido de carbono (CO₂), 1866 partes por billón (ppb) de metano (CH₄) y 332 ppb de óxido nitroso (N₂O), donde la Tierra y el océano, han absorbido anualmente aproximadamente el 56% de las emisiones de CO₂ procedentes de las actividades humanas en las últimas seis (6) décadas (IPCC, 2021a, p. 4).

Asimismo, las últimas cuatro (4) décadas fueron las más calurosas comparadas con cualquier otra década anterior al año 1850; por ejemplo, la temperatura global en la superficie en los periodos 2001-2020 y 2011-2020 fueron superiores en 0.99 [0.84 a 1.10] °C y 1.09 [0.95 a 1.20] °C respectivamente en comparación del periodo 1850-1900, donde este aumento, se debe principalmente al mayor calentamiento a partir del periodo 2003-2012, presentando +0.19 [0.16 a 0.22] °C (IPCC, 2021, p. 5).

El IPCC define al *cambio climático* como:

Una variación del estado del clima identificable (p. ej., mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante periodos prolongados, generalmente décadas o periodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos, tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra. (IPCC, 2018, definición de Cambio climático)

Por otra parte, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992), en su artículo 1, define al *cambio climático* como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables” (p. 6).

La CMNUCC realiza una diferenciación entre el cambio climático inducido por las actividades originadas por los humanos que alteran la composición de la atmósfera con el significado de la variabilidad climática, la cual se atribuye a causas naturales.

Con respecto al concepto de *escenario*, (IPCC, 2000; Rounsevell y Metzger, 2010; O'Neill et al., 2014, como se citó en IPCC, 2021b) lo definen como “a description of how the future may develop, based on a coherent and internally consistent set of assumptions about key drivers including demography, economic processes, technological innovation, governance, lifestyles, and relationships among these driving forces” [una descripción de cómo puede desarrollarse el futuro, basado en un conjunto coherente e internamente consistente de supuestos acerca de impulsores que incluyen demografía, procesos económicos, innovación tecnológica, gobernanza, estilos de vida y relaciones entre estas fuerzas motrices] (p. 227).

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2017) señala que un *escenario de cambio climático* es:

Una representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basados en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construyen para ser utilizados de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del

cambio climático antropogénico, y que sirven a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos. (p. 1)

Es así que, los escenarios de cambio climático permiten explorar las emisiones futuras CO₂, los impactos y los riesgos asociados basados en una variedad de supuestos futuros a través de diferentes caminos o vías que examinan cómo la sociedad, demografía y la economía global pueden cambiar, donde se asume también un aumento de las concentraciones de GEI seguido de un equilibrio bajo diferentes situaciones, siendo estas proyecciones de carácter cuantitativo, donde estos comportamientos pueden ser simulados a través de *Global Climate Models* [Modelos de Circulación General; GCM] con el fin de proyectar la respuesta del clima a los forzamientos inducidos por el hombre, además de las medidas a tomar que permitan la estabilización de las concentraciones de GEI. A este conjunto de caminos o vías se las denominan *Shared Socioeconomic Pathway* [Rutas Socioeconómicas Compartidas; SSP], que ofrecen una exploración sistemática de los posibles futuros climáticos, los cuales fueron la base para el *Sexto Informe de Evaluación* del IPCC donde se adoptaron cinco (5) SSP, caracterizándose por tener una mayor gama de suposiciones respecto a las medidas de mitigación de la calidad del aire en comparación con las *Representative Concentration Pathways* [Rutas de Concentración Representativas; RCP] definidas en el *Quinto Informe de Evaluación* del IPCC.

A continuación, se proporciona una breve descripción de cada uno de estos escenarios futuros basados en la compilación realizada por el *Deutsche Klimarechenzentrum* (DKRZ, s.f.; el nombre puede ser traducido como “Centro Alemán de Cómputo Climático”):

- **SSP1:** Considerado el escenario más optimista. Proporciona el escenario más positivo y sostenible para el desarrollo humano, donde se tiene mejoras en la educación y la salud, cambiando el enfoque de crecimiento económico hacia el bien común, reduciendo así la desigualdad de ingresos entre y dentro de los Estados.

Este escenario es el único que da cumplimiento a lo manifestado en el objetivo a largo plazo referente a la temperatura (artículo 2) del Acuerdo de París, donde al respecto la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2015) indica que “el Acuerdo de París, al tratar de fortalecer la respuesta mundial al cambio climático, reafirma el objetivo de limitar el aumento de la

temperatura mundial muy por debajo de los 2 °C, al tiempo que prosiguen los esfuerzos para limitarlo a 1.5 °C” (p. 1).

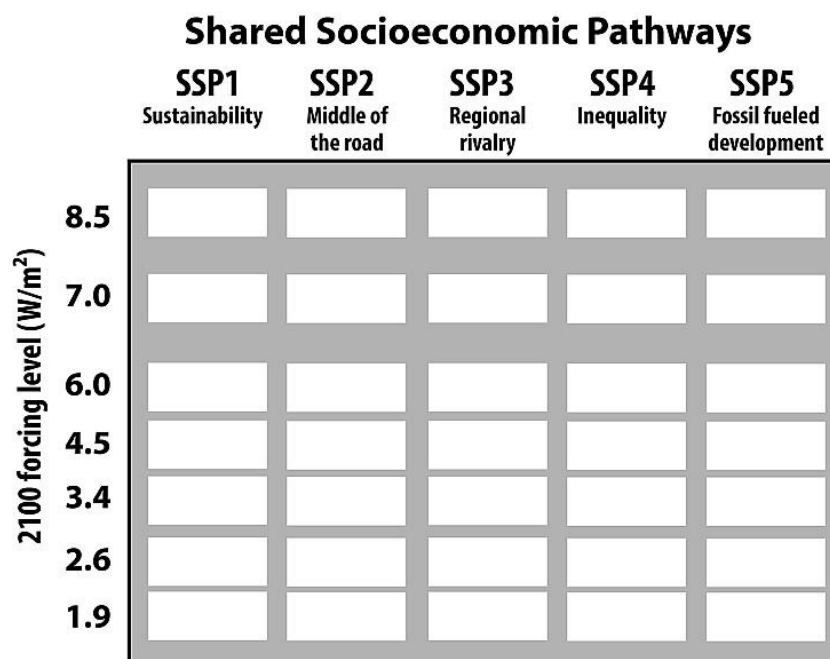
- **SSP2:** Considerado como un escenario intermedio o la mitad del camino, donde las emisiones de CO₂ mantienen los actuales niveles, pero disminuyen en el año 2050. El crecimiento de la población mundial es moderado y la tendencia en la diferencia de los ingresos de los países se va acentuando; sin embargo, aún se mantiene la cooperación. Los sistemas ambientales comienzan a degradarse.
- **SSP3:** Considerado como un escenario peligroso. Los países se vuelven más competitivos entre sí, surgiendo el nacionalismo y conflictos regionales, ocasionando la desigualdad entre los países. La temperatura y las emisiones de GEI aumentan de manera constante. Las inversiones en educación y desarrollo tecnológico disminuyen.
- **SSP4:** Considerado como el escenario de la desigualdad. La diferencia entre los países es elevada en cuanto al desarrollo y los ingresos generados, a esto sumado el estancamiento de la educación. Las políticas ambientales no son suficientes.
- **SSP5:** Considerado como el escenario más pesimista. Donde las emisiones de CO₂ se duplican hasta mediados de siglo, el desarrollo económico y social se basa en la explotación intensificada de los recursos de combustibles fósiles con un alto porcentaje de carbón y un estilo de vida intensivo basado en el consumo excesivo de energía.

Los factores que determinan la estructuración de los posibles escenarios climáticos son: intensidad del forzamiento radiativo como producto de los GEI provocados por el hombre, los cinco (5) SSP y los *Shared Climate Policy Assumptions* [Supuestos de Políticas Climáticas Compartidas; SPA]. La Figura 1 muestra las diferentes combinaciones de los niveles de forzamiento radiativo en relación con las SSP.

El *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* [Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6; CMIP6] representa un esfuerzo internacional, ya que ha desarrollado estándares, protocolos y mecanismos para representar el conocimiento más avanzado acerca de cómo podría evolucionar el sistema climático futuro a través de experimentos idealizados.

Figura 1

Relación de los niveles de forzamiento radiativo en relación con las SSP



Nota. Tomado de *The SSP Scenarios en CMIP6 (AR6)*, por O’Neill et al., 2016, Deutsche Klimarechenzentrum DKRZ (<https://www.dkrz.de/en/communication/climate-simulations/cmip6-en/the-ssp-scenarios>)

CMIP6 consta de veintitrés (23) *Model Intercomparison Project* [Proyecto de Intercomparación de Modelos; MIP], donde las proyecciones climáticas de múltiples modelos basadas en futuros alternativos de emisiones y cambios en el uso de la tierra se coordinan dentro del *Scenario Model Intercomparison Project* [Proyecto de Intercomparación de Modelos de Escenarios; ScenarioMIP]; teniendo un acuerdo general acerca de las cuatro (4) combinaciones denominadas estándar que son mostradas en la Figura 2 (DKRZ, s.f.).

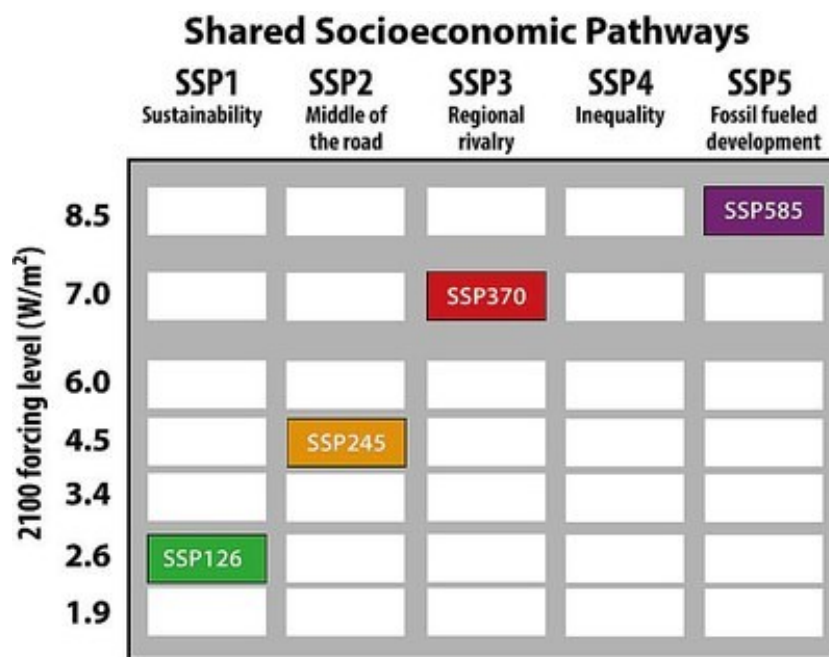
Entonces, los factores socioeconómicos en los escenarios climáticos futuros brindan un marco de trabajo fundamental, ya que se consideran como impulsores del cambio climático, como así también de los avances en la mitigación y la adaptación.

“In the past, socioeconomic factors were implicit, hidden behind the emission and the concentration projections that the models were using as input. With the SSPs, we can better understand how the population and economy are affected by climate change and

climate policies” [En el pasado, los factores socioeconómicos estaban implícitos, ocultos detrás de las proyecciones de emisión y concentración que los modelos usaban como entrada. Con las SSP, podemos comprender mejor cómo la población y la economía se ven afectadas por el cambio climático y las políticas climáticas]. (Drouet, s.f., como se citó en Bassetti, 2022)

Figura 2

Escenarios SSP estándar



Nota. Tomado de *The SSP Scenarios en CMIP6 (AR6)*, por O’Neill et al., 2016, Deutsche Klimarechenzentrum DKRZ (<https://www.dkrz.de/en/communication/climate-simulations/cmip6-en/the-ssp-scenarios>)

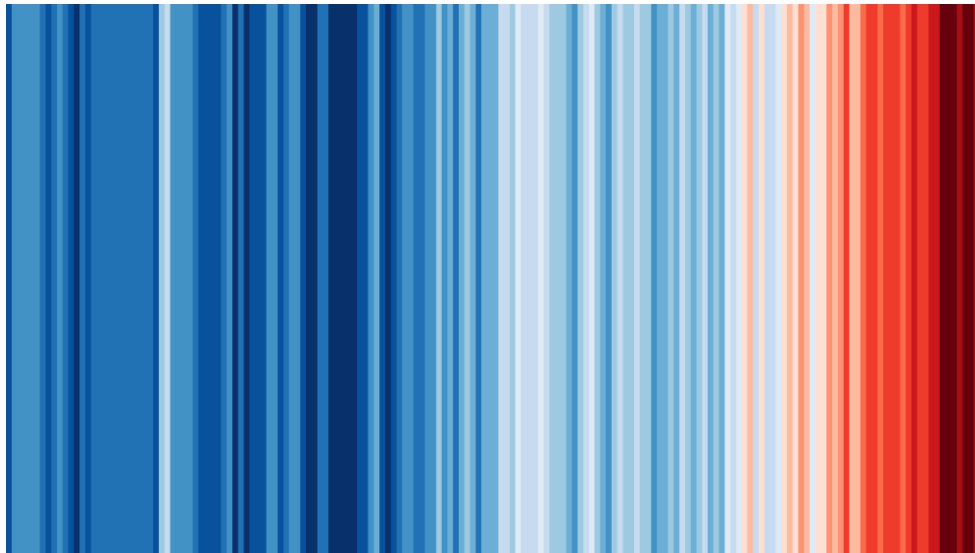
En este contexto, comprender y abordar el concepto de cambio climático, permite desarrollar estrategias de prevención y adaptación a través de herramientas capaces de procesar y visualizar el futuro climático en comparación con periodos pasados.

Son varios los esfuerzos realizados por la comunidad científica para encarar el procesamiento y visualización del cambio climático futuro, entre los cuales se destaca al trabajo realizado por Ed Hawkins, científico climático de la Universidad de Reading (Inglaterra), quien propuso la visualización del cambio global de la temperatura (1850-2022) a través de franjas climáticas, además indica que el exceso de calor se está acumulando en todo el planeta a un ritmo alarmante (Hawkins,

2023). La Figura 3 muestra los cambios en la temperatura global en el periodo 1850-2022, donde las rayas cálidas son una manera visual de poder resaltar el aumento observado.

Figura 3

Cambios en la temperatura global en el periodo 1850-2022 a través de franjas climáticas



Nota. Tomado de *Changes in global temperature (1850-2022)*, de Hawkins, 2023, (https://twitter.com/ed_hawkins/status/1613567967781855232)

Finalmente, el objetivo del presente trabajo de investigación es proponer el lenguaje de programación Python como una alternativa para el procesamiento de escenarios climáticos basada en el modelo CMIP6: MRI-ESM2.0, teniendo como alcance la visualización del estado histórico y la proyección de la temperatura máxima global hasta el año 2100 para los escenarios SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585.

MATERIALES Y MÉTODOS

El método científico que se aplica al presente trabajo de investigación es el inductivo-deductivo, porque por una parte se realiza generalizaciones respecto a escenarios climáticos a partir de GCM y, por otra parte, se toman en cuenta conceptos generalmente aceptados para obtener explicaciones específicas en el marco del trabajo desarrollado.

La investigación se circunscribe en el enfoque mixto, debido a que se considera la recolección de datos fundamentado en lenguajes de programación con el fin de obtener datos de GCM, donde se precisa las variables de estudio y se establece un análisis crítico de los resultados.

El alcance es de tipo explicativo, debido a que la investigación va más allá de la descripción del fenómeno que se estudia, ya que está orientado a poder responder las causales de los eventos y determinar la manera de representación del cambio climático futuro versus la situación histórica.

El diseño corresponde a la investigación no experimental de tipo longitudinal, porque se realiza el estudio, análisis y procesamiento de GCM, de los cuales no se tiene control porque ya se llevaron a cabo; asimismo, se tiene en cuenta el análisis de los cambios que suceden en las variables climáticas en periodos largos.

Considerando que el presente trabajo de investigación propone una alternativa para el procesamiento de escenarios climáticos basada en los modelos CMIP6, es la *Earth System Grid Federation* [Federación de Redes del Sistema Terrestre; ESGF] la entidad que desarrolla, implementa y mantiene una infraestructura de software, además proporciona las herramientas y los servicios que se necesitan para investigar los procesos del sistema climático con el fin de gestionar, difundir y analizar los resultados de los modelos y datos de observación.

ESGF es un esfuerzo internacional, considerado el repositorio más grande de modelos de datos climáticos, dirigido por el *Department of Energy* [Departamento de Energía; DOE], y cofinanciado por la *National Aeronautics and Space Administration* [Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio; NASA], *National Oceanic and Atmospheric Administration* [Administración Nacional Oceánica y Atmosférica; NOAA], *National Science Foundation* [Fundación Nacional de Ciencias; NSF], y los laboratorios internacionales: *Max Planck Institute for Meteorology* [Instituto Max Planck de Meteorología; MPI-M], *German Climate Computing Centre* [Centro Alemán de Cómputo Climático; DKRZ], *Australian National University National Computational Infrastructure* [Infraestructura Computacional Nacional de la Universidad Nacional Australiana; ANU/NCI], *Institut Pierre-Simon Laplace* [Instituto Pierre-Simon Laplace; IPSL], y *British Atmospheric Data Center* [Centro Británico de Datos Atmosféricos; BADC] (ESGF, s.f.).

La consulta de los modelos CMIP6 existentes para la obtención de la ruta y descarga correspondiente puede ser realizado a través de la *API RESTful* de ESGF, que es un estilo arquitectónico para una *Application Programming Interface* [Interfaz de Programación de Aplicaciones; API], de manera que dos sistemas de computación lo utilicen para intercambiar información de manera segura, confiable y

eficiente a través de Internet basado en un conjunto de condiciones de cómo debe funcionar una API denominada *Representational State Transfer* [Transferencia de Estado Representacional; REST]; exponiendo así un *Uniform Resource Locator* [Localizador Uniforme de Recursos; URL].

Para el presente trabajo, se utilizan los datos públicos disponibles en *Google Cloud* [Nube de Google], que son mantenidos por el *Climate Data Science Lab at Lamont Doherty Earth Observatory* [Laboratorio de Ciencias de Datos Climáticos en el Observatorio de la Tierra Lamont Doherty; LDEO] de la Universidad de Columbia, como parte del Proyecto Pangeo, los cuales se derivan de los archivos originales de CMIP6 de ESGF-DKRZ, pero con una característica importante, que es la concatenación de los intervalos de tiempo, además de la conversión del tipo *netCDF* a formato *Zarr*.

El modelo seleccionado para el trabajo corresponde a MRI-ESM2.0, el cual fue desarrollado por el *Meteorological Research Institute of the Japan Meteorological Agency* [Instituto de Investigación Meteorológica de la Agencia Meteorológica de Japón; MRI/JMA] como participante de CMIP6, con resoluciones horizontales nominales de 100 km para los componentes de la atmósfera y el océano, y resolución vertical atmosférica de 80 capas; donde se evalúa el clima actual y el cambio climático en los experimentos correspondientes (Yukimoto et al., 2019).

Ahmadalipour (2022) propone una serie de lineamientos para el procesamiento de variables climáticas, las cuales se consideraron como base para la ejecución de código en Python desarrollado en la interfaz de código abierto Jupyter Notebook para el procesamiento y visualización de escenarios climáticos SSP versus el histórico de temperatura máxima del aire en el marco del alcance propuesto.

La Figura 4 muestra las librerías utilizadas en el trabajo de investigación, las cuales se importan con el fin de obtener las funcionalidades para el procesamiento de los datos de estudio.

Figura 4

Librerías de Python utilizadas en el trabajo

```
In [1]: import datetime
import gcsfs
import numpy as np
import os
import pandas as pd
import xarray as xr
from matplotlib import pyplot as plt
```

Nota. Se trata de un conjunto de funciones orientadas al procesamiento del proyecto.

La Figura 5 muestra el código para el establecimiento del modelo, variable climática, periodo histórico y escenario futuro de estudio; además se incorpora la variable *tempKaC* para la conversión de la temperatura a grados Celsius (°C), dado que en el modelo, esta variable climática se encuentra en grados Kelvin (°K).

Figura 5

Código para la parametrización de variables globales

```
In [2]: #Parametrización de variables globales
modeloSeleccionado = 'MRI-ESM2-0'
variableClimatica = 'tasmax'
denominacionVarClim = 'temperatura máxima del aire'

#Establecimiento del periodo histórico de estudio
historicoAnioInicio = 1937
historicoMesInicio = 1
historicoDiaInicio = 16
historicoAnioFin = 2014
historicoMesFin = 12
historicoDiaFin = 16

#Establecimiento del periodo futuro de estudio
sspAnioInicio = 2023
sspMesInicio = 1
sspDiaInicio = 16
sspAnioFin = 2100
sspMesFin = 12
sspDiaFin = 16

#Los modelos presentan la temperatura en °K, entonces se convierte a °C
tempKaC = -273.15
```

Nota. Se trata del establecimiento de las variables globales.

La Figura 6 muestra el código para la lectura del archivo con formato *Comma Separated Values* [Valores Separados por Comas; csv] del repositorio de la nube de Google que contiene el consolidado de modelos CMIP6.

Figura 6

Código para la obtención del listado de modelos CMIP6 de la nube de Google

```
In [3]: # Carga de datos CMIP6 de la nube de Google
ur1NubeGoogle = 'https://storage.googleapis.com/cmip6/cmip6-zarr-consolidated-stores.csv'
lecturaCMIP6 = pd.read_csv(ur1NubeGoogle)
```

Nota. Lectura realizada a través de la librería *pandas*.

La Figura 7 muestra el código para la obtención de los modelos CMIP6 que contienen la variable climática y el experimento de estudio: *historical*. Para la obtención de modelos que contienen los experimentos SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585, las variables de carga son: *ssp126Lista*, *ssp245Lista*, *ssp370Lista* y *ssp585Lista*. Se asigna a las variables *activity_id == 'ScenarioMIP'*; *experiment_id == 'ssp126'*, *experiment_id == 'ssp245'*, *experiment_id == 'ssp370'* y *experiment_id*

== 'ssp585' respectivamente.

Figura 7

Código para la obtención de los modelos CMIP6 que contienen la variable climática y el experimento de estudio

```
In [4]: #Lista de modelos que contienen datos históricos de la variable climática seleccionada
historicoLista = lecturaCMIP6.query(f"variable_id == '{variableClimatica}' & " + "experiment_id == 'historical' & " + \
    "member_id == 'r1iip1f1' & activity_id == 'CMIP' & table_id == 'Amon'")
```

Nota. Se trata de un código base para la aplicación de consultas sobre el listado obtenido de la nube de Google.

La Figura 8 muestra el código para la carga del modelo seleccionado: MRI-ESM2.0 para el experimento histórico. Para los experimentos SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585, las variables de carga son: *ssp126Modelo*, *ssp245Modelo*, *ssp370Modelo* y *ssp585Modelo*, donde se asignan las consultas de *ssp126Lista*, *ssp245Lista*, *ssp370Lista* y *ssp585Lista*.

Figura 8

Código para la carga del modelo seleccionado

```
In [9]: #Cargado de gcsfs
gcs = gcsfs.GCSFileSystem(token='anon')
#Carga del modelo seleccionado
historicoModelo = historicoLista.query(f"source_id == '{modeloSeleccionado}'").zstore.values[0]
```

Nota. Se trata de un código base para la aplicación de la consulta respecto al modelo seleccionado sobre el listado obtenido de la nube de Google.

En este contexto, se codifica toda la secuencia de pasos propuestos por Ahmadalipour (2022) hasta la generación de las representaciones gráficas por cada uno de los escenarios SSP y modelo seleccionado para la variable climática de temperatura máxima del aire. Asimismo, se realiza la evaluación por cada resultado obtenido en cada una de las ejecuciones de manera independiente, esto gracias a la versatilidad de Jupyter Notebook, ya que permite realizar la codificación iterativamente a través de la codificación por fragmentos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producto del código desarrollado en Python, se tienen cuatro (4) representaciones gráficas del mundo, donde cada una de ellas hacen referencia al cambio de la variable climática de estudio –que en este caso lo constituye la temperatura máxima del aire– sobre promedios mensuales de cada uno de los

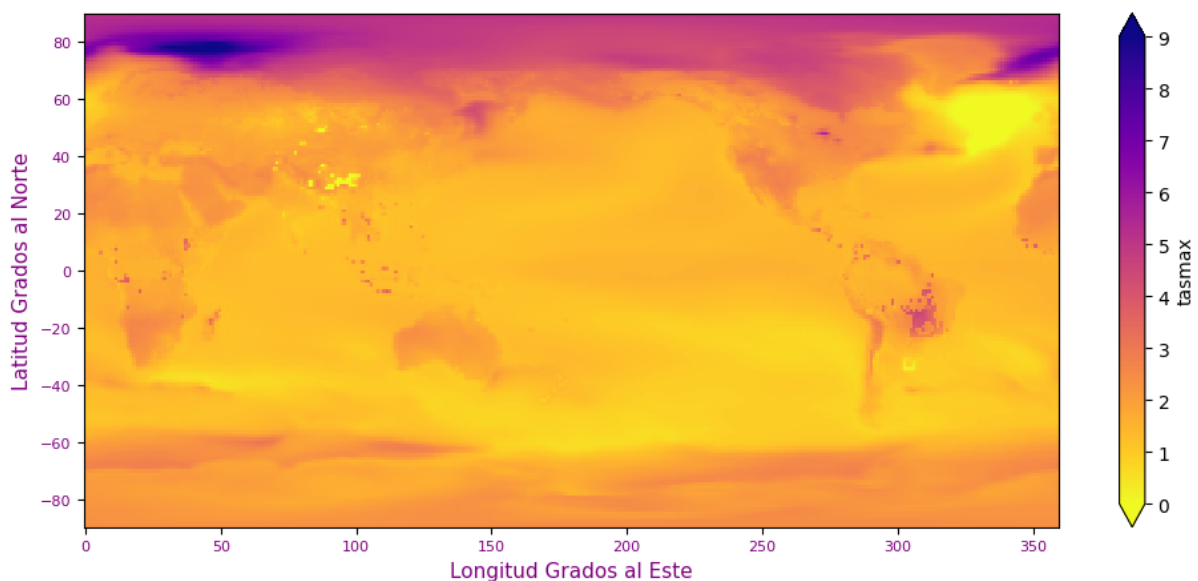
experimentos tomados en cuenta, realizando una comparativa entre dos (2) periodos: 2023-2100 versus 1937-2014, considerándose el primero como el periodo histórico y el segundo como el periodo proyectado según el escenario climático seleccionado, tomando como base de cálculo el modelo MRI-ESM2.0.

En la parte derecha de las representaciones gráficas, se muestra una cinta del aumento de temperatura máxima expresada en °C, donde es posible relacionar con la vista mundial las zonas que tendrán un mayor incremento en comparación con las zonas que tendrán un menor incremento, teniendo así, una relación a escala mundial del cambio de la variable climática de estudio, producto del cambio climático.

La Figuras 9, 10, 11 y 12 muestran el cambio en la temperatura máxima del aire entre el periodo 2023-2100 en comparación del periodo 1937-2014 basado en el modelo MRI-ESM2.0 para los escenarios SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585 respectivamente, observándose un aumento mayor de la temperatura máxima en la región del Ártico, donde, en un escenario más pesimista supera los 9 °C, asimismo, las latitudes medias presentan un aumento generalizado de aproximadamente 4 a 6 °C y la región de la Antártida, presenta un aumento de aproximadamente 2 a 4°C.

Figura 9

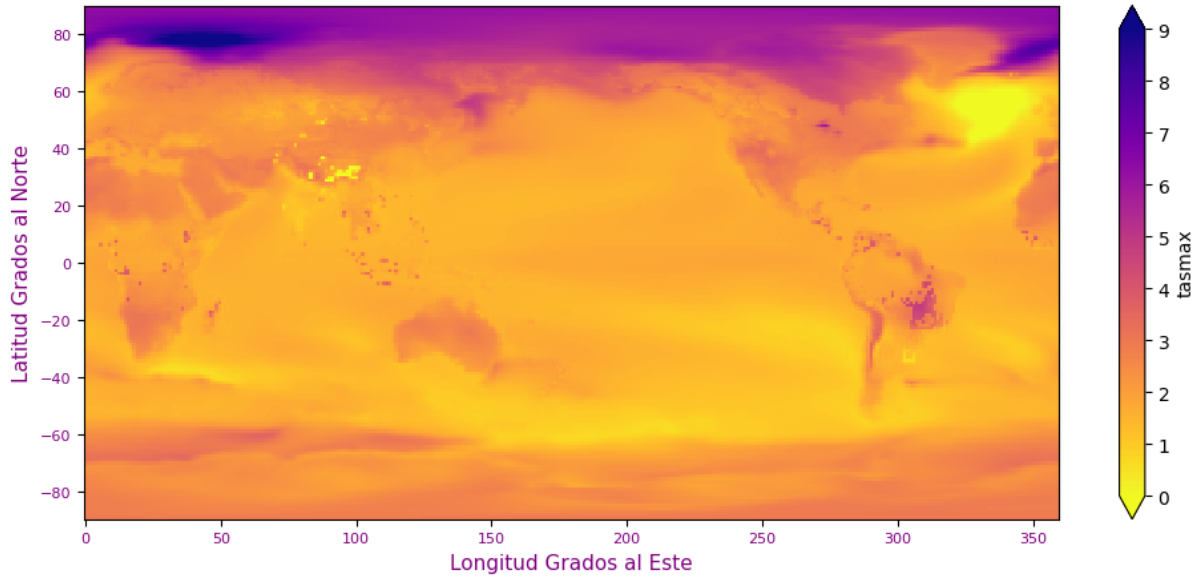
Cambio en la temperatura máxima del aire entre 2023-2100 versus 1937-2014 basado en el modelo MRI-ESM2.0 para el escenario SSP126



Nota. Producto de la ejecución del código desarrollado en Python.

Figura 10

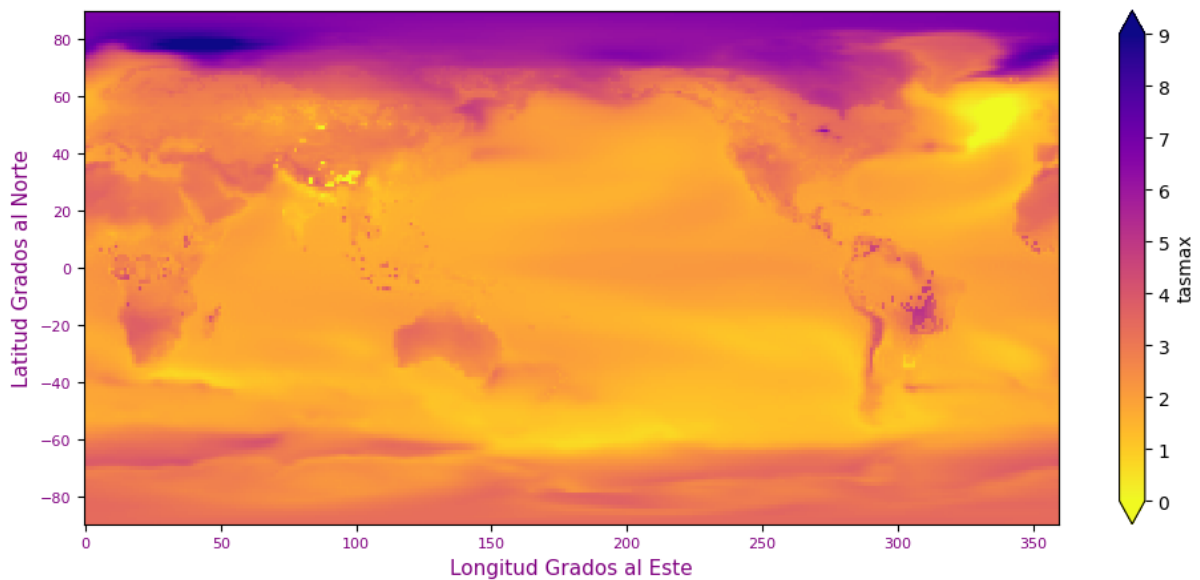
Cambio en la temperatura máxima del aire entre 2023-2100 versus 1937-2014 basado en el modelo MRI-ESM2.0 para el escenario SSP245



Nota. Producto de la ejecución del código desarrollado en Python.

Figura 11

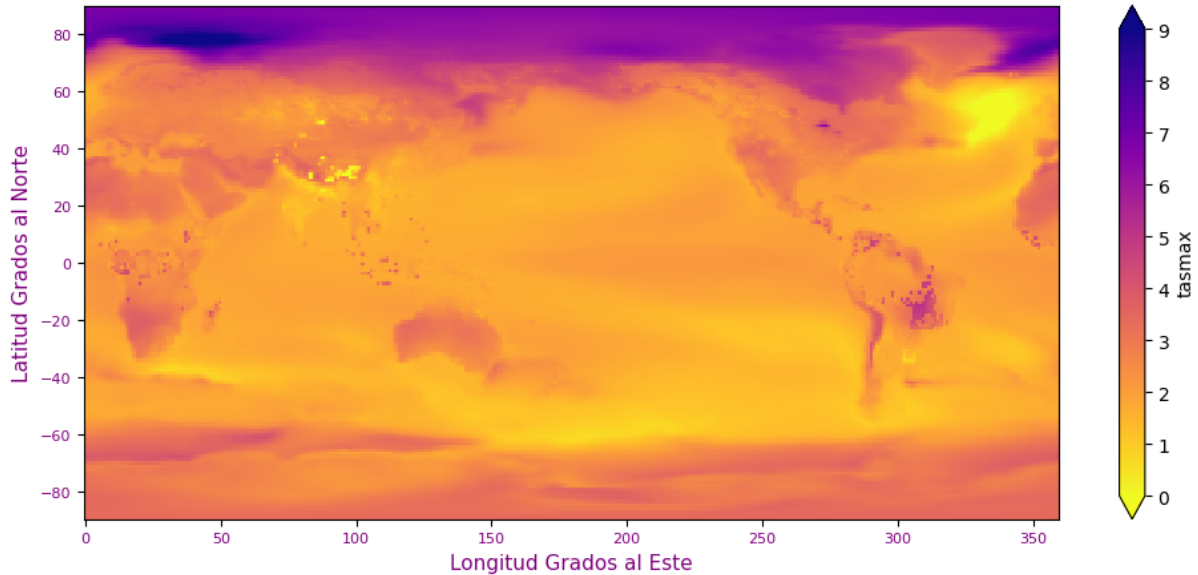
Cambio en la temperatura máxima del aire entre 2023-2100 versus 1937-2014 basado en el modelo MRI-ESM2.0 para el escenario SSP370



Nota. Producto de la ejecución del código desarrollado en Python.

Figura 12

Cambio en la temperatura máxima del aire entre 2023-2100 versus 1937-2014 basado en el modelo MRI-ESM2.0 para el escenario SSP585



Nota. Producto de la ejecución del código desarrollado en Python.

El presente trabajo de investigación considera al modelo MRI-ESM2.0, por lo que será necesario el cálculo correspondiente tomando en cuenta otros modelos CMIP6, además de otras variables climáticas con el fin de poder contrastar los resultados obtenidos entre uno y otro modelo para poder establecer qué tan aproximadas son las proyecciones que realizan tomando como base la información que proveen. Por otra parte, estos resultados deberían pasar por un proceso de corrección de sesgo (BIAS) con el fin de calcular el error sistemático del modelo aplicado, permitiendo obtener información respecto a la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable.

CONCLUSIONES

Una de las cualidades del lenguaje de programación Python, es la capacidad que tiene para la lectura de datos de archivos Zarr contenidos en los catálogos públicos de la Nube de Google del proyecto de código abierto Pangeo, caracterizados por incluir la concatenación de intervalos de tiempo y la conversión de archivos NetCDF, formato utilizado por la comunidad meteorológica y climática para el almacenamiento matricial de escenarios CMIP6 para diferentes GCM, donde se incluyen además todos los metadatos, información de la licencia e identificadores persistentes.

Producto del código ejecutado para la obtención de datos de la nube de Google y posterior procesamiento de la variable climática, modelo y periodo de estudio, fue posible la generación de la representación gráfica de la variación de la temperatura máxima del aire a nivel global en los cuatro (4) escenarios SSP establecidos en la investigación, permitiendo tener una mejor percepción del cambio climático proyectado.

Finalmente, se concluye que el lenguaje de programación Python puede ser considerado como una herramienta más de procesamiento y visualización de escenarios de cambio climático, capaz de procesar otras variables climáticas de interés contenidas en los modelos CMIP6 en un periodo determinado y bajo diferentes escenarios o experimentos.

LISTA DE REFERENCIAS

- Ahmadalipour, A. (2022). *Python for Climate Data Analysis* [Python para el Análisis de Datos Climáticos]. Recuperado en: 8 de enero de 2023, de <https://www.linkedin.com/pulse/python-climate-data-analysis-tutorial-code-ali-ahmadalipour/>
- Bassetti, F. (24 de febrero de 2022). *Shared Socioeconomic Pathways* [Rutas Socioeconómicas Compartidas]. Recuperado en 25 de enero de 2023, de <https://www.climateforesight.eu/seeds/shared-socioeconomic-pathways/>
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Artículo 1 de 1992. Recuperado en 3 de enero de 2023, de https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf
- Deutsche Klimarechenzentrum [Centro Alemán de Cómputo Climático; DKRZ]. (s.f.). *The SSP Scenarios* [Los Escenarios SSP]. Recuperado en 4 de enero de 2023, de <https://www.dkrz.de/en/communication/climate-simulations/cmip6-en/the-ssp-scenarios>
- Earth System Grid Federation [Federación de Redes del Sistema Terrestre; ESGF]. (s.f.). *ESGF*. Recuperado en 6 de enero de 2023, de <https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>
- Hawkins, E. [@ed_hawkins]. (12 de enero de 2023). *The data from 2022 is stark, however you look at it.* [Los datos de 2022 son claros, se mire como se mire.] [Tweet]. Twitter.

https://twitter.com/ed_hawkins/status/1613567967781855232

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (10 de julio de 2017). *Escenarios de Cambio Climático*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/escenarios-de-cambio-climatico-80126#:~:text=Los%20escenarios%20de%20cambio%20clim%C3%A1tico,consecuencias%20potenciales%20del%20cambio%20clim%C3%A1tico>

Intergovernmental Panel on Climate Change [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático; 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 Cambio Climático*. En Pachauri, R. Meyer, L. (Eds.). Recuperado en 9 de enero de 2023, de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático; IPCC]. (2018). *Anexo I: Glosario. Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza*. En Masson-Delmotte, V., Zhai P., Pörtner, H., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M. y Waterfield, T. (Eds.). Recuperado en 15 de enero de 2023, de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático; IPCC]. (2021a). *Resumen para responsables de políticas. En: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. En Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.,

Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J., Maycock, T., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. y Zhou, B. (Eds.). Cambridge University Press. Recuperado en 10 de marzo de 2023, de

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático; IPCC]. (2021b). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Cambio climático 2021: la base de la ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático]. En Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J., Maycock, T., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. y Zhou, B. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Recuperado en 10 de marzo de 2023, de https://report.ipcc.ch/ar6/wg1/IPCC_AR6_WGI_FullReport.pdf

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *¿Qué es el Acuerdo de París?*. Recuperado en 6 de enero de 2023, de <https://unfccc.int/es/most-requested/que-es-el-acuerdo-de-paris>.

Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T., Hosaka, M., Yabu, S., Yoshimura, H., Shindo, E., Mizuta, R., Obata, A., Adachi, Y. e Ishii, M. (2019). *The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component* [El Modelo del Sistema Terrestre del Instituto de Investigaciones Meteorológicas Versión 2.0, MRI-ESM2.0: Descripción y Evaluación Básica del Componente Físico]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 97(5), 931-965. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2019-051>