

Atlas interactivo para la visualización de escenarios de cambio climático en Cuba

Interactive atlas for visualizing climate change scenarios in Cuba



<https://cu-id.com/2377/v31n3e01>

 Abel Centella-Artola*,  Adrian Fuentes-Barrios,  Arnoldo Bezanilla-Morlot,
 Beatriz Velázquez Zaldivar,  Tomás Gutiérrez-Pérez

Instituto de Meteorología, Loma de Casablanca, Regla, La Habana, Cuba, Apdo. 17032, C.P. 11700, Habana 17. email: adrianfuentesbarrios@gmail.com; arnoldo.bezanilla@gmail.com; beatrizvelazquez242@gmail.com; tomas.gutierrez@insmet.cu

RESUMEN: Este artículo presenta el “Atlas Interactivo para la Visualización de Escenarios de Cambio Climático en Cuba”, una herramienta desarrollada para facilitar el acceso y análisis de proyecciones climáticas a nivel nacional y provincial. Para maximizar su accesibilidad, la herramienta se implementó en dos modalidades: una aplicación web y una aplicación de escritorio multiplataforma (Windows/Linux). Fue creada en el entorno RStudio, integrando funcionalidades de R y Python, y permite generar mapas, gráficos y tablas personalizables donde los usuarios seleccionan variables climáticas, escenarios de emisiones, períodos futuros y regiones de interés. El Atlas constituye un recurso valioso para satisfacer la creciente demanda de información climática proyectada en Cuba, facilitando que sectores, instituciones y actores clave realicen evaluaciones de impacto, alineándose así con las acciones y compromisos del Plan de Estado para el Enfrentamiento al Cambio Climático (Tarea Vida).

Palabras clave: Cuba, escenarios climáticos, proyección del clima futuro, sistema automatizado.

ABSTRACT: This article presents the "Interactive Atlas for Visualizing Climate Change Scenarios in Cuba", a tool developed to facilitate access to and analysis of climate projections at national and provincial levels. To maximize accessibility, the tool was implemented in two modalities: a web application and a cross-platform desktop application (Windows/Linux). Built within the RStudio environment by integrating R and Python functionalities, it enables users to generate customizable maps, graphs, and tables by selecting from various options, including climate variables, emission scenarios, future time periods, and regions of interest. The Atlas represents a valuable resource for meeting Cuba's growing demand for projected climate information. It supports key sectors, institutions, and stakeholders in conducting impact assessments, thereby aligning with the objectives and commitments outlined in the State Plan to Confront Climate Change, known as Tarea Vida.

Keywords: automatic system, future climate projection, climate scenarios, Cuba.

INTRODUCCIÓN

Centella *et al.* (2025) generaron nuevas proyecciones climáticas para Cuba a partir del conjunto de datos NEX-GDDP-CMIP6 (Thrasher *et al.*, 2022) y de la “NASA Sea Level Projection Tool (NASA-SLP)” (<https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>). A diferencia de trabajos anteriores (Centella *et al.*, 1999; Centella & Bezanilla, 2013 y Pérez-Parrado, 2019), estos escenarios incorporan

una mayor cantidad de modelos, variables e indicadores climáticos y son coherentes con los resultados del Sexto Informe de Evaluación Científica (AR6) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Este avance permite profundizar en el análisis de las repercusiones del cambio climático y actualizar las evaluaciones de impactos y adaptación realizadas previamente por Gutiérrez *et al.* (1999) y Planos *et al.* (2013).

*Autor para la correspondencia: Abel Centella-Artola. E-mail: abelcentella@gmail.com

Recibido: 20/10/2025

Aceptado: 14/11/2025

Conflicto de Intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Declaración de contribución: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Software, Redacción-borrador inicial, Redacción - revisión y edición, Visualización, Supervisión: Abel Centella Artola. Software, Metodología, Redacción - revisión y edición, Validación: Adrián Fuentes Barrios. Metodología, Validación: Arnoldo Bezanilla Morlot. Análisis formal, Metodología: Beatriz Velázquez Zaldivar. Conceptualización, revisión y edición: Tomás Gutiérrez Pérez.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Para facilitar el desarrollo de nuevos estudios, se desarrolló el "Atlas interactivo de visualización de escenarios climáticos para Cuba". Esta herramienta, de uso intuitivo y flexible, facilita el acceso a las proyecciones climáticas mediante la visualización gráfica y la exportación de datos numéricos. En este artículo se presenta una descripción general de la plataforma y se analizan las ventajas de su implementación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El procesamiento del contenido del Atlas se realizó empleando el lenguaje de programación R, en su versión 4.4.0, siguiendo la metodología descrita por Centella-Artola *et al.* (2025). Posteriormente, se empleó el lenguaje Python, para construir toda la interfaz de acceso al contenido.

Se utilizaron los datos de 17 variables e indicadores (tabla 1) agregados temporalmente para los periodos: anual, poco lluvioso de noviembre-abril (NOV-ABR) y lluvioso de mayo-octubre (MAY-OCT). Con esta información se calcularon los valores de cambio de todos los modelos, para el corto (2021-2040), mediano (2041-2060) y largo (2081-2100) plazos, respecto a varios periodos de referencia. La inclusión de varias líneas base facilita el análisis del impacto que puede tener su selección en las magnitudes de cambio del clima futuro. Los periodos de referencia considerados son los siguientes: i) 1961-1990: Normal climática de 30 años recomendada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para las evaluaciones de cambio climático (WMO, 2017); ii) 1981-2010: Normal climática de 30 años utilizada en el AR6;

iii) 1995-2014: Línea base de 20 años empleada por el AR6; iv) 1991-2020: Última normal estándar de la OMM.

Es importante precisar que el procesamiento de los indicadores de sequía y nivel del mar presenta particularidades. En ambos casos, las magnitudes se calcularon exclusivamente a nivel anual. Las diferencias principales son: i) Sequía: Utiliza el periodo de referencia 1961-1990; ii) Nivel del mar: Toma como referencia 1995-2014 y sus proyecciones se presentan por décadas, desde la de 2030 hasta 2100, y no para los periodos futuros arriba mencionados.

Toda la información se produjo para los escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5 (ver descripción resumida sobre los SSP en <https://www.dkrz.de/en/communication/climate-simulations/cmip6-en/the-ssp-scenarios>), aunque en algunas variables los datos bajo el escenario SSP1-2.6 no están disponibles.

Dado que los datos originales del conjunto NEX-GDDP-CMIP6 tienen una resolución de 25×25 km, se procedió a reinterpolarlos a una malla de 4 km mediante el método del vecino más cercano. Este proceso se realizó con el único propósito de mejorar la visualización de la distribución espacial de los resultados, manteniendo inalterados los valores originales. Además, la reinterpolación permitió obtener agregaciones por provincias con mayor precisión, utilizando los polígonos vectoriales correspondientes.

En el caso de las proyecciones de ascenso del nivel del mar, cuya resolución espacial original es de $1^\circ \times 1^\circ$, varias de las celdas cercanas a las costas de Cuba carecen de valores definidos.

Tabla 1. Lista de variables e indicadores climáticos proyectados en el Atlas a escala anual o estacional. *Itálicas:* Solo disponible anualmente. Asterisco (*): No disponible para el escenario SSP1-2.6

Variable (unidades de cambio)	Descripción
Precipitación Total (%)	Total de precipitación
Días Secos Consecutivos (Días)	Máxima cantidad de días consecutivos con precipitación inferior a 1mm
Máxima precipitación 1-día (%)	Cantidad máxima de lluvia en 24 horas
Evapotranspiración (%)*	Evapotranspiración calculada (definida por Perrier, 1984)
<i>Duración de la Sequía (meses)</i>	Duración media de los eventos de sequía
<i>Intensidad de la Sequía (%)</i>	Intensidad media de los eventos de sequía
Temperatura Media (°C)	Temperatura media del aire
Temperatura Máxima (°C)	Temperatura máxima promedio
Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Mínima promedio
Máxima Temperatura Máxima (°C)*	Máximo valor de la temperatura máxima
Máxima Temperatura Mínima (°C)*	Máximo valor de la temperatura mínima
Temperatura Efectiva Equivalente (°C)	Índice de sensación térmica y estrés fisiológico
Total de días con $VV \geq 3$ m/s (Días)	Cantidad total de días con velocidad del viento en superficie superior o igual a 3 m/s
Días Consecutivos con $VV \geq 3$ m/s (Días)	Máxima cantidad de días consecutivos con velocidad del viento en superficie superior o igual a 3 m/s
Velocidad del Viento (m/s)	Velocidad del viento en superficie
Radiación descendente de onda corta (W/m ²)	Suma de la radiación solar directa y difusa que incide sobre la superficie
<i>Aumento del Nivel del Mar (m)</i>	Cambio del nivel del mar total resultante de procesos en cuya proyección existe una confianza media

Esto se debe a que la baja resolución de los Modelos de Circulación General (MCG) no permite representar con exactitud los contornos terrestres. Para solventar este problema, se asignaron valores a las cuadrículas costeras indefinidas utilizando nuevamente el método del vecino más cercano. Posteriormente, se empleó un archivo “*shape*” de la línea costera para extraer los valores de la malla corregida.

La visualización de los cambios futuros se presenta mediante mapas que muestran la mediana del conjunto de modelos. Para representar el grado de incertidumbre asociado a estas proyecciones, se emplean dos métodos complementarios (tabla 2). En los mapas, el acuerdo entre los Modelos de Circulación General (MCG) se indica mediante símbolos gráficos. Estas marcas resaltan las áreas donde existe menor consenso respecto a la dirección del cambio o su significación estadística. Por el contrario, en las zonas donde hay un alto acuerdo o los cambios son robustos, los valores proyectados se muestran sin superposición de símbolos, lo que facilita su lectura e interpretación.

Adicionalmente, el Atlas incorpora el uso de percentiles para cuantificar el rango y la incertidumbre de las proyecciones. En la mayoría de variables, se utilizan los percentiles 10, 25, 75 y 90 junto con la mediana (P50) en tablas y gráficos. Esta información permite evaluar el nivel de concordancia entre los modelos, facilitando la identificación de proyecciones con mayor o menor consenso. En el caso del nivel del mar, sin embargo, se emplean los percentiles 17 y el 83, proporcionados directamente por la herramienta NASA-SLP, para mostrar el rango más probable de las proyecciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 1 muestra la estructura de la interfaz del Atlas destacando las 4 secciones que la componen, a saber: i) cabecera; ii) panel de control; iii) área de visualización; iv) descarga de figuras y datos.

El panel de control centraliza la configuración de todos los parámetros para generar proyecciones. En él, el usuario selecciona las variables (tabla 1), los períodos (de referencia y futuro), el escenario SSP, la estación del año (anual, NOV-ABR o MAY-OCT), y la región de interés (Cuba o una provincia). Los resultados se muestran en el área de visualización y se guardan en la sección de descarga. En función de la selección selección se pueden generar diferentes salidas (figuras 2-4), las cuales se describen a continuación:

- Los mapas de cambio representan la proyección de la variable seleccionada, en función del escenario, la estación del año, la región y los períodos de referencia y futuro definidos por el usuario. Un ejemplo de esta visualización se muestra en la figura 2 (paneles a y c), que ilustra las diferencias en los patrones de precipitación para el período MAY-OCT, comparando el futuro (2081-2100) con la línea base (1961-1990). Se observa que la señal de cambio hacia la reducción de la precipitación es más intensa y robusta (ver representación de la incertidumbre en la tabla 2) bajo el SSP5-8.5. Al comparar los paneles b y d, se identifica que, incluso manteniendo el mismo escenario y período futuro, un cambio en el período de referencia (línea base) genera resultados ligeramente distintos, lo que subraya la influencia de esta elección en las proyecciones.

Tabla 2. Métodos empleados para representar la fortaleza e incertidumbre de los patrones espaciales futuros

Método	Categoría	Definición	Representación
Simple	Alto acuerdo de modelos	80% o más de los modelos coinciden en la dirección del cambio	Sólo colores
	Bajo acuerdo de modelos	Menos del 80% de los modelos coincide en la dirección del cambio	
Avanzado	Cambios robustos	Cuando el 80% o más de los modelos coinciden en la dirección del cambio (positivo o negativo) y más del 60% de ellos muestran cambios estadísticamente significativos	Sólo colores
	Bajo acuerdo en la dirección	Cuando menos del 80% de los modelos coincide en la dirección del cambio, pero el 60% o más de ellos proyecta cambios estadísticamente significativos	
	Bajo acuerdo en la significación	Cuando menos del 60% de los modelos proyecta cambios estadísticamente significativos, pero el 80% o más de ellos coincide en la dirección del cambio	
	Cambios poco robustos	Cuando menos del 60% de los modelos proyecta cambios estadísticamente significativos y menos del 80% coincide en la dirección del cambio	

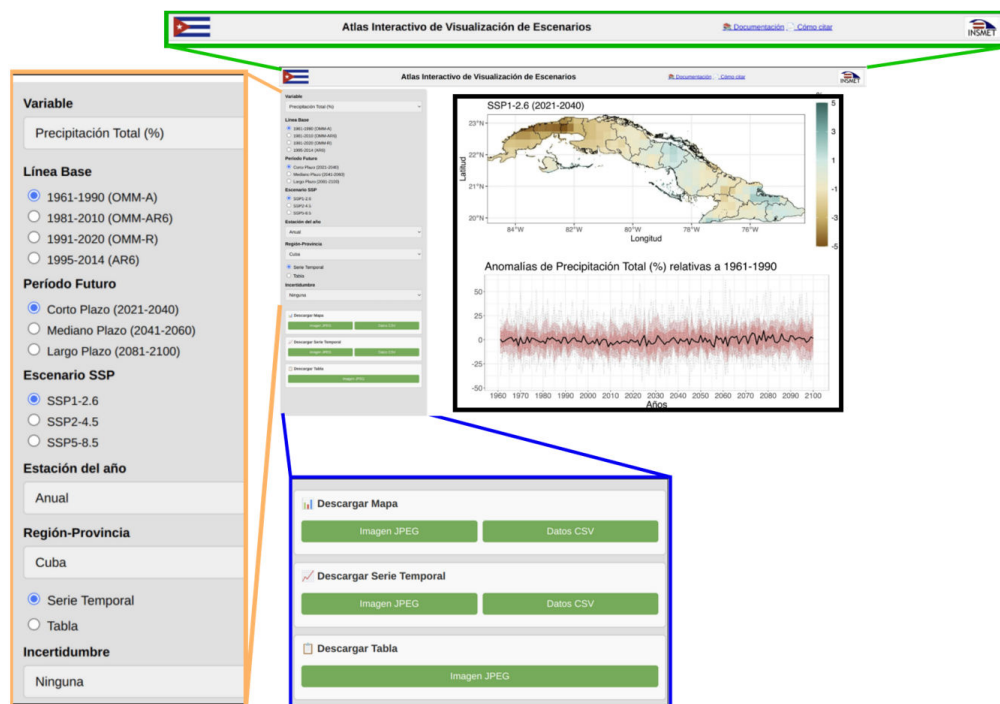


Figura 1. Esquema de la estructura de la interfaz. Los recuadros coloreados muestran una vista ampliada de las secciones. Verde: encabezado, naranja: panel de control y azul: descarga de figuras y datos. El cuadro negro corresponde al área de visualización principal

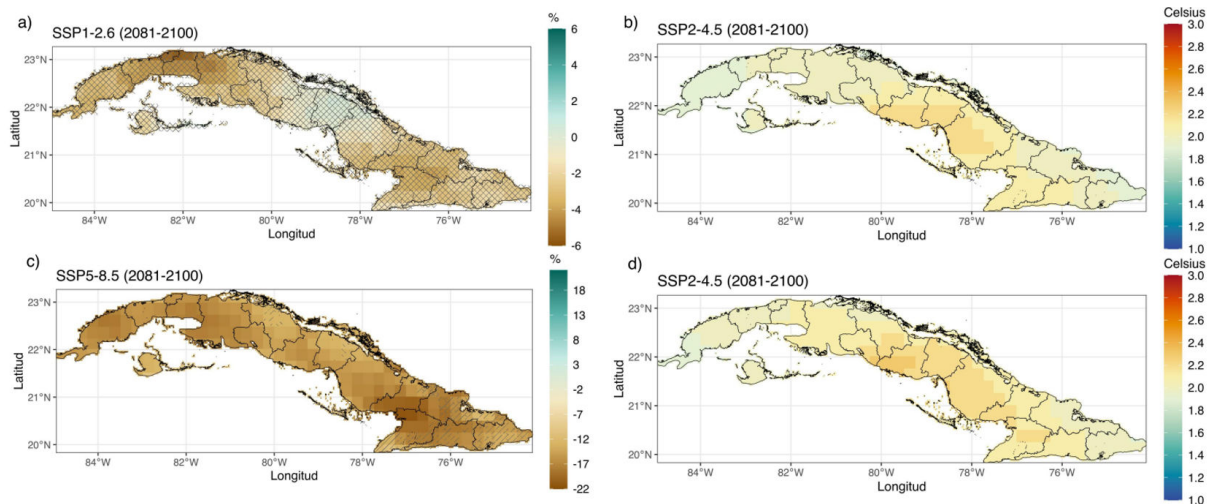
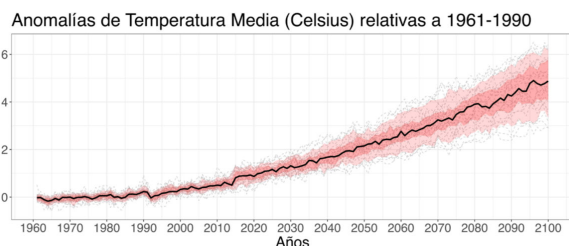


Figura 2. Ejemplos de salidas de los patrones espaciales de cambio futuros de la precipitación anual (a y c) y temperatura de MAY-OCT (b y d), para el período 2081-2100. En a) y b) la línea base es 1961-1990, pero los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5, respectivamente. En b) y d) el escenario es el mismo (SSP2-4.5), pero los períodos de referencia son 1991-2020 y 1995-2014 respectivamente

- Las series temporales de anomalías y las tablas de cambio (figura 3) presentan valores agregados espacialmente para el territorio seleccionado. La serie temporal muestra la mediana del conjunto de Modelos de Circulación General (MCG) mediante una línea negra. La incertidumbre asociada se representa con dos áreas sombreadas: una en rojo oscuro que abarca el rango percentílico 25-75, y otra en rojo claro que corresponde al rango 10-90. Por su parte, las tablas exhiben los valores de cambio (mediana y percentiles 10, 25, 75 y 90) para los tres plazos futuros contemplados en el escenario seleccionado.
- Para los cambios en el nivel del mar la información que se visualiza es ligeramente diferente (figura 4). Los mapas reflejan los valores de cambio sobre la línea costera de Cuba o la provincia seleccionada y las tablas muestran los cambios (mediana y percentiles 17 y 83) agregados para la costa del territorio seleccionado. Si la provincia seleccionada tiene costas al norte y sur se muestran dos tablas, de lo contrario sólo se mostrará una.



Plazo	Escenario	Mediana (Celsius)	P10	P25	P75	P90
Corto (2021-2040)	SSP-5.85	1.3	0.9	1.1	1.6	1.7
Medio (2041-2060)	SSP-5.85	2.2	1.5	1.8	2.5	2.8
Largo (2081-2100)	SSP-5.85	4.4	3.1	3.7	5.0	5.5

Figura 3. Serie temporal de anomalías y tabla con los valores de cambio de la temperatura media anual agregada para toda Cuba. En ambos casos la línea base es 1961-1990

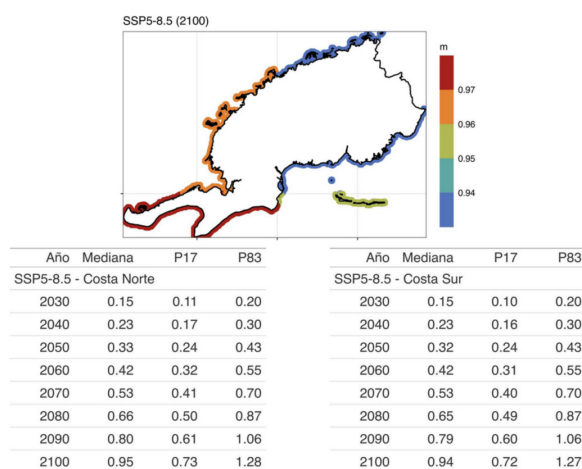


Figura 4. Ejemplo de las salidas de mapas y tablas correspondientes al cambio en el nivel del mar

CONCLUSIONES

El Atlas de Visualización de Escenarios de Cambio Climático para Cuba es una herramienta flexible y fácil de usar para desarrollar análisis espaciales y temporales. Permite explorar un amplio espectro de proyecciones climáticas futuras para el país y sus provincias.

Desarrollado en versiones web y de escritorio (para Windows y Linux), el Atlas requiere mínimos recursos informáticos y de conectividad. Esta versatilidad garantiza su amplia utilización en investigaciones y evaluaciones relacionadas con el cambio climático en Cuba.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con la contribución de los proyectos “Variaciones y Cambios del Clima en Cuba” y “Cuarta Comunicación Nacional de Cambio Climático” del Programa Nacional “Cambio Climático en Cuba: Impactos, Adaptación y Mitigación”.

REFERENCIAS

- Centella, A.; Gutiérrez, T.; Limia, M. & Jaspe, R. R. 1999. “Climate change scenarios for impact assessment in Cuba”. *Climate Research*, (12):223-230 <https://doi.org/10.3354/cr012223>
- Centella, A. & Bezanilla, A. 2013. “Escenarios climáticos” In Planos E., R. Rivero y A. Guevara (eds.) “Impacto del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba”. Ed. AMA, 430 pp. Instituto de Meteorología, Agencia de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, La Habana, Cuba.
- Centella, A.; Bezanilla, A.; Fuentes, A.; Vázquez, R.; Guevara, V.; Velázquez, B.; Roque, A.; & Gutiérrez, T. 2025. “Perfiles de cambio climático para Cuba y atlas interactivo de escenarios climáticos.”, Instituto de Meteorología, Informe de Resultado Científico, La Habana, 72 pp
- Gutiérrez, T.; Centella, A.; Limia, M. & López, M. 1999. “Impactos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba”. Instituto de Meteorología, Informe Final del Proyecto No. 01301-019. La Habana, 181 pp
- Pérez-Parrado, R. 2019. Ascenso del nivel del mar en Cuba por Cambio Climático. *Revista Cubana de Meteorología*. 25, 1 (feb. 2019), 76-83.
- Planos, E.; Rivero, R. E.; & Guevara, V (eds.) 2013. “Impacto del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba”, Ed. AMA, 430 pp. Instituto de Meteorología, Agencia de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, La Habana, Cuba.
- Thrasher, B.; Wang, W.; Michaelis, A.; Melton, F.; Lee, T.; & Nemani, R. 2022. “NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6”. *Scientific Data*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>
- WMO. 2017. “WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals”. WMO-No. 1203, World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland, 18 pp., https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166.