

Type of the Paper (Article)

Escenarios de precipitación, temperatura media y aumento del nivel del mar para República Dominicana, utilizando reducción de escala estadística en proyecciones para el período 2021-2100

Guillermo Eduardo Armenta Porras¹, Joel Pérez Fernández¹, Freddy Picado¹, Omar Ramírez Tejada² and Michela Izzo Gioiosa^{3*}

¹ Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC); GEAP: motsvanska@gmail.com; JPF: joel.perez@cathalac.int; FP: freddy.picado@cathalac.int.

² ENERGEIA NETWORK; omborate@gmail.com

³ GUAKÍA AMBIENTE; michela.izzo@guakiambiente.org

* Correspondence: FP: freddy.picado@cathalac.int; MIG: michela.izzo@guakiambiente.org; Tel.: FP: +507-317-3200; MIG: +1-809-995-7240

Resumen: Se presentan proyecciones de precipitación, temperatura media y aumento del nivel del mar para la República Dominicana bajo 4 escenarios de las Vías de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Estas proyecciones se generaron en el marco del proyecto Desarrollo de Capacidades para avanzar en el proceso del Plan Nacional de Adaptación en la República Dominicana, utilizando el método de reducción de escala estadística: Corrección del Sesgo por Disgregación espacial (BCSD por sus siglas en inglés) y Ensamble de confiabilidad ponderada (REA, por sus siglas en inglés), para generar datos de conjuntos de modelos múltiples, a partir de 5 modelos del proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados 5 (CMIP5) y 4 escenarios RCP para el período 2021-2100. Se obtuvieron datos históricos para el período 1981-2005, de los servicios meteorológicos e hidrológicos de República Dominicana (ONAMET e INDRHI) de precipitación, y datos derivados de satélite para temperatura media y aumento del nivel del mar. Los resultados muestran disminuciones en la precipitación, de 5 a 10 % a corto plazo y de 5 a 35 % a largo plazo para todos los escenarios. La temperatura media muestra aumentos de 0,5 a 1,5 °C para el período 2021-2060 y de 1 a 3 °C para el período 2061-2100, en comparación con el período histórico. Las proyecciones de aumento del nivel del mar muestran niveles más altos, de 0,3 a 0,8 centímetros por año a corto plazo y más de 1,5 centímetros por año a largo plazo. Las proyecciones generadas son insumos útiles para acciones y estrategias de adaptación y mitigación, ya que los cambios proyectados (menos lluvia, mayor temperatura y ascenso del nivel del mar) podrían generar diferentes impactos y desastres en muchos sectores (turismo, agricultura, recursos hídricos, etc.).

Palabras clave: República Dominicana; Escenarios de Cambio Climático; AR5; temperatura superficial; precipitación; elevación del nivel del mar.

Citation: Lastname, F.; Lastname, F.; Lastname, F. Title. *Atmosphere* 2022, 13, x. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

Academic Editor: Firstname Lastname

Received: date

Accepted: date

Published: date

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

El cambio climático es un problema de gran preocupación, siendo inequívoco el calentamiento de la atmósfera, el océano y la tierra producido por la influencia humana durante los dos últimos siglos, situándose cerca del umbral de 1,5°C de calentamiento global por encima de los niveles preindustriales [1,2]. Se espera que las modificaciones climáticas inducidas por este calentamiento produzcan impactos significativos en todos los componentes del sistema terrestre, incluidos todos los aspectos de la sociedad humana [1].

En ese contexto, el desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación, tanto a nivel nacional como global, ya no es una opción, sino una obligación. Cada país necesita definir su propia política de cambio climático hacia la neutralidad en carbono. Para alcanzar este objetivo, las proyecciones de las condiciones climáticas futuras, combinadas con las de las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI), son esenciales como herramienta para orientar las decisiones de los hacedores de políticas, así como de cualquier otro actor, cada uno en su propio rango de intervención.

La República Dominicana es un Pequeño Estado Insular en Desarrollo de la región del Caribe, perteneciente a las Antillas Mayores. Por su posición geográfica, fisiografía típica, contexto social y económico, así como por compartir la isla con Haití, el país más pobre del continente americano [3]. La República Dominicana es altamente vulnerable al cambio climático [4 5, 6]. Estudios recientes revelan tendencias climáticas significativas ocurridas en el último siglo en el país [7, 8], evidenciando un aumento en la temperatura máxima y mínima del aire, que alcanza $1,8 \pm 0,4^{\circ}\text{C}$ y $3,0 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ respectivamente desde 1936 [3], así como modificaciones en los patrones de lluvia, con características que varían de una región a otra dentro del país, dependiendo de la orografía y condiciones específicas [3]: se ha observado una disminución significativa de la precipitación total anual en las zonas de sotavento, mientras que ocurre lo contrario en las regiones de barlovento, expuesta a los vientos alisios. Se han registrado otras tendencias significativas en términos de aumento de la intensidad de las lluvias, especialmente a lo largo de la costa del Caribe [3]. Estos resultados muestran un aumento crítico de la exposición del país a los riesgos del cambio climático.

Por otro lado, la huella de carbono dominicana ha ido aumentando progresivamente, debido a su sostenido crecimiento económico, aún basado mayoritariamente en los combustibles fósiles [9]. Sin embargo, el país está orientado a un desarrollo más sostenible, basado en energías renovables, tal y como lo establece claramente la Estrategia Nacional de Desarrollo (Ley 2012-01).

En su camino para alcanzar las metas establecidas y el cumplimiento de los compromisos internacionales asumidos, la República Dominicana ha avanzado en el análisis de su clima [7,8], así como en la proyección del clima futuro [10].

Cuarenta estudios científicos y/o técnicos basados en modelos climáticos se han producido desde 2001 en República Dominicana, orientados a diferentes propósitos, con una tendencia creciente en su número durante el período analizado, y picos centrados en aquellos años en que el país preparaba sus Comunicaciones Nacionales para la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) [10]. No obstante, la mayor complejidad de los modelos aplicados y la mayor capacidad de cálculo no corresponden con una mejor resolución de las proyecciones. De hecho, la resolución espacial de la modelación climática en la República Dominicana ha sido generalmente baja, es decir, no superior a los 100 km², siendo las principales limitaciones la disponibilidad y accesibilidad de los datos observados [10]. Por ello, a pesar de los avances observados en los últimos diez años, estos aspectos continúan siendo un problema importante.

Por un lado, el número de estaciones meteorológicas de la red meteorológica nacional oficial es significativamente bajo, siendo menos de 90 estaciones que registran datos de lluvia las que generalmente funcionan y mucho menos, las que miden la temperatura superficial. Esto es especialmente crítico en un país como República Dominicana, que a pesar de ser una isla y tener un territorio relativamente pequeño (alrededor de 48,000 km²), se caracteriza por una alta diversidad climática, que va desde árido hasta perhúmedo [11], específicamente debido a su estructura fisiográfica, producida por la igualmente compleja tectónica del Caribe [12 13, 14]. En tal contexto, el número de puntos de medición debería ser mucho mayor, especialmente en el caso de la lluvia, cuyo comportamiento es menos predecible que el de la temperatura del aire, específicamente en zonas montañosas [5, 15]: según una evaluación preliminar [16], considerando su orografía altamente compleja, la

red meteorológica de República Dominicana debería contar con alrededor de 370 pluviómetros para medir adecuadamente el campo de lluvia a escala nacional.

Por otro lado, el acceso a los datos continúa siendo una barrera, debido a la falta de una base de datos común, así como a las debilidades institucionales.

Para dar respuesta a esta necesidad, el proyecto “Desarrollando capacidades para avanzar en el proceso del Plan Nacional de Adaptación”, llevado a cabo por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales dominicano e implementado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), con financiamiento del Fondo Verde Fondo Climático (FVC), promovió la elaboración de nuevos escenarios climáticos, de mediano y largo plazo, cuyos resultados se encuentran contenidos en este trabajo y serán la base para la Cuarta Comunicación Nacional sobre Cambio Climático, así como para la toma de decisiones y posteriores investigación sobre la vulnerabilidad de la tierra. Por lo tanto, el objetivo de este estudio es mejorar el conocimiento del clima en la República Dominicana, a través de la elaboración de escenarios de mayor resolución, basados en las técnicas de reducción de escala más recientes y datos climáticos más detallados.

2. Materiales y Métodos

2.1. Selección del Modelo

El primer paso del análisis consistió en la selección de modelos, realizada a partir de un inventario de los Modelos de Circulación General (GCM) disponibles en la base de datos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados 5 (CMIP5, por sus siglas al inglés). Se descargaron datos mensuales de precipitación, temperatura máxima, mínima y media, y nivel del mar para el período histórico 1961-2005 y para el periodo futuro (período 2021-2100), correspondientes a las Vías de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas al inglés).

De acuerdo con los resultados de un estudio previo [17], realizado sobre los datos antes mencionados para América Latina y el Caribe, que analizó los 42 modelos CMIP5 comparando los datos observados con los resultados obtenidos en diferentes análisis (ERA40, CRU, CFSR, etc.), se seleccionaron los 15 modelos presentados en la Tabla 1, por representar mejor las condiciones climáticas de la región.

Tabla 1. GCMs seleccionados para el estudio.

Model	Institución	Resolución Espacial
BCC-CSM1-1-M	BCC – Centro Climático de Beijing, Administración Meteorológica de China	2,8125x2,7906°
CCSM4	NCAR – Centro Nacional para la Investigación Atmosférica	1,25x0,9424°
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE – Organización de la Mancomunidad para la Investigación Científica e Industrial en Colaboración con el Centro de Excelencia de Cambio Climático de Queensland	1,875x1,8653°
FIO-ESM	FIO – Primer Instituto de Oceanografía, SOA, China	2,81x2,77°
GFDL-CM3	NOAA-GFDL – NOAA Laboratorio Geofísico de Dinámica de Fluidos	2,5x2°
GISS-E2-H	NASA-GISS – NASA Instituto Goddard para estudios Espaciales	2,5x2°
GISS-E2-R		2,5x2°
HadGEM2-AO	Oficina de Meteorología del Centro Hadley	1,88x1,25°
IPSL-CM5A-LR	IPSL – Instituto Pierre-Simon Laplace	3,75x1,8947°
IPSL-CM5A-MR		2,5x2,5352°
MIROC5		1,40625x1,4008°

Model	Institución	Resolución Espacial
MIROC-ESM-CHEM	MIROC – Instituto de Investigaciones del Océano y Atmósfera (Universidad de Tokio), Instituto Nacional para Estudios Ambientales, y la Agencia Japonesa para la Ciencia Marina-Terrestre y Tecnología	2,8125x2,7906°
MIROC-ESM	MIROC – Instituto de Investigaciones Meteorológicas	1,125x1,12148°
MRI-CGCM3	NCC – Centro Climático de Noruega	2,5x1,8947°
NorESM1-ME		

128

2.2. Datos

129

Para el período de referencia 1981-2005, se seleccionaron los datos mensuales observados cuando los datos faltantes eran inferiores al 15% [18], y las series resultaran homogéneas (mediante el uso de las pruebas T de Student y Chi-Cuadrado) [19]. Las series de datos climáticos procedían de 265 estaciones pluviométricas de la Oficina Nacional de Meteorología (ONAMET) y del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI). Solo 71 series de lluvia cumplieron con los criterios establecidos y se utilizaron para el estudio (Figura 1 y Apéndice A).

130

131

132

133

134

135

136

Los datos de temperatura del aire son más limitados, tanto en términos de las estaciones disponibles como de la calidad de los datos. De las 23 estaciones disponibles de ONAMET, fueron seleccionadas para el estudio solo 14 de temperatura máxima y media, así como 16 de temperatura mínima cumplieron con los criterios establecidos (Figura 2).

137

138

139

140

Debido al número limitado de estaciones disponibles, que deja sin cubrir áreas significativas, especialmente en el occidente y centro del país, para reducir la incertidumbre estadística de la modelación, se integraron datos de otras fuentes. En concreto, se utilizaron datos del Grupo de Riesgos Climáticos medidos con Temperatura infrarroja en las estaciones (CHIRTS, por sus siglas al inglés) [20] para el periodo 1983-2006, con una resolución de 5x5 km², tras validar y ajustar la serie con los datos observados y el Modelo Digital de Elevación con resolución de 30 m (DEM, por sus siglas al inglés) del país. Como resultado se generaron series de temperatura del aire (mínima, máxima y media) para el período considerado y para cada uno de los 1,796 píxeles en que se dividió el país.

141

142

143

144

145

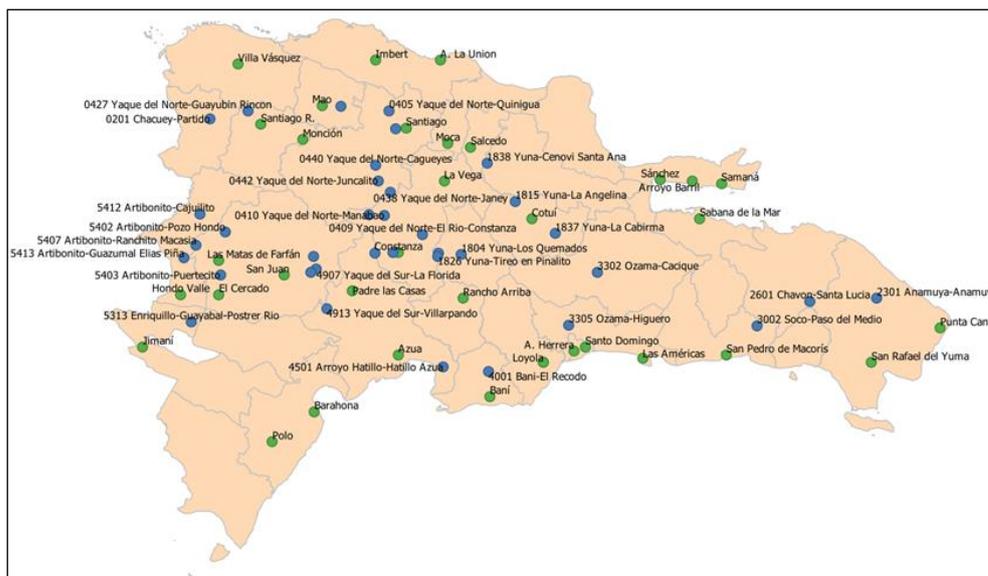
146

147

148

149

150



151

Figura 1. Distribución espacial de las estaciones pluviométricas de la ONAMET (verde) y del INDRHI (azul).

152

153

154

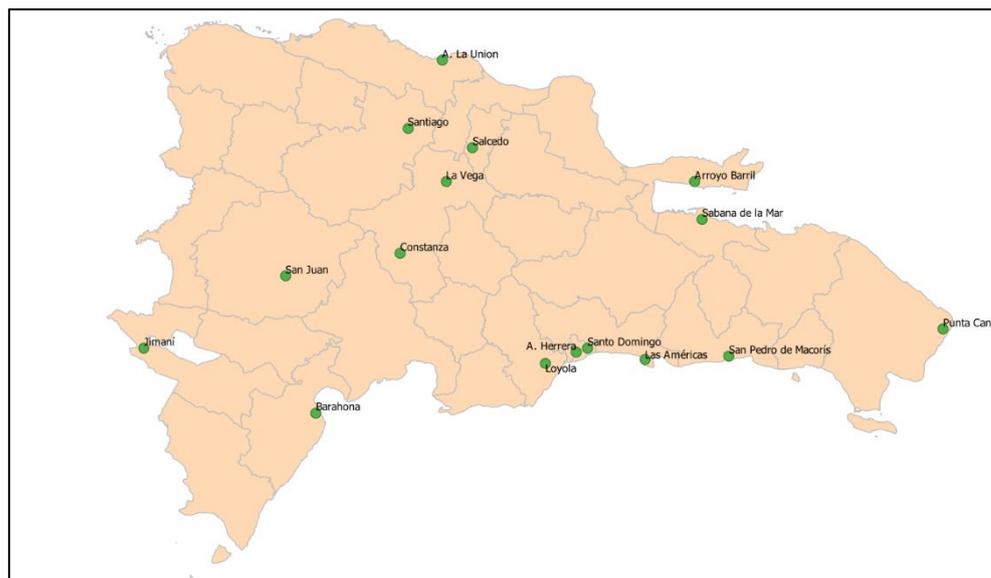


Figura 2. Distribución espacial de las estaciones con medición de temperatura del aire de la ONAMET.

Los datos del nivel del mar se derivaron del Servicio de Monitoreo Ambiental Marino del repositorio de datos de Copernicus [21]. Se extrajeron series mensuales para el período 1993-2019 para una franja de 5 kilómetros de ancho a lo largo de la costa dominicana, posteriormente se validaron y ajustaron con datos observados de 3 estaciones ubicadas en Barahona (Sur), Puerto Plata (Norte) y Punta Cana (Este).

2.2. Modelación

El primer paso consistió en la comparación entre las series mensuales generadas por los modelos globales seleccionados y los datos observados para los periodos analizados (1981-2005 para lluvia y temperatura del aire, 1993-2005 para el nivel del mar), según tres métricas: correlación, sesgo (BIAS, por sus siglas al inglés) y la desviación de la raíz cuadrática media (RMSE, por sus siglas al inglés). Cada métrica se aplicó para cada modelo, clasificando los modelos por mayor correlación y menores valores de BIAS y RMSE. En base a los resultados obtenidos para todos, se asignó un peso a cada uno de los 15 modelos, de los cuales se seleccionaron los primeros 5 modelos, basado en su mejor desempeño.

Además, con base en los mismos criterios, cada modelo fue evaluado de acuerdo con su desempeño promedio a escala nacional.

Se generaron series mensuales ajustadas para el período 2021-2100 a partir de los 5 modelos seleccionados, para cada estación y todas las variables analizadas, con base en los 4 escenarios RCP, mediante la reducción de escala de los datos mediante el método de Desagregación Espacial con Corrección de Sesgos [22].

Finalmente, se utilizó el método de Ensamble de Confiabilidad Ponderada (REA) [23 24] para generar un conjunto multimodelo de los modelos seleccionados. El método asigna ponderaciones en función de dos criterios principales:

1. desempeño, evaluado como la capacidad del modelo para reproducir el clima observado en el periodo de referencia.
2. Convergencia, evaluado al comparar las salidas de los modelos para el mismo escenario de emisiones: es decir, a mayor convergencia, implica una mejor confiabilidad.

La media y el rango de incertidumbres fueron calculados para cada conjunto de simulaciones [¡Error! Marcador no definido.]:

$$\widetilde{\Delta x} = \frac{\sum R_i \Delta x_i}{\sum R_i}$$

Donde R es un factor de confiabilidad para cada modelo, definido como:

$$R_i = [(R_{B,i})^m \times (R_{D,i})^n]^{1/(m \times n)}$$

Donde:

$R_{B,i}$ es el factor que mide la confiabilidad del modelo como función del sesgo o Bias del modelo o desempeño comparado con el clima observado; y

$R_{D,i}$ es el factor que mide la distancia del modelo específico respecto del cambio promedio de todo el conjunto: es decir, cuanto menor es la distancia, mayor es la confiabilidad del modelo.

El desempeño se calculó comparando los resultados de los modelos con los datos mensuales observados para los períodos 1981-2005 (lluvia y temperatura superficial) y 1993-2005 (nivel del mar).

Para la convergencia, está referida a las series mensuales simuladas por cada modelo para el período 2021-2100, comparándolas con las tendencias futuras. Se calcularon las tres métricas utilizadas para la evaluación de los GCM (correlación, sesgo y desviación cuadrática media), asignando un peso a cada modelo y luego procediendo al ensamble multimodelo para cada escenario.

Finalmente, el cambio futuro se estimó como porcentaje de desviación del período de referencia para las proyecciones de precipitación, y anomalía en °C para las temperaturas y cm/año para el aumento del nivel del mar.

3. Resultados

3.1. Desempeño del Modelo

El análisis realizado revela que la mayoría de los modelos seleccionados representan adecuadamente el ciclo interanual (13 de 15), a pesar de las sobreestimaciones y subestimaciones propias del comportamiento de los MCG y su resolución. Se seleccionaron cinco modelos (CCSM4, FIO-ESM, MI-ROC5, MIROC-ESM y NorESM1-M) en función de su mejor desempeño para describir las condiciones locales (Tabla 2).

Tabla 2. Pesos asignados a cada modelo de acuerdo a su desempeño en la descripción de cada variable analizada.

Modelo	Lluvia	T media	T max	T min	Nivel del mar
bcc-csm1-1-m	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08
CCSM4	0.09	0.1	0.09	0.1	0.1
CSIRO-Mk3-6-0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
FIO-ESM	0.08	0.08	0.08	0.09	0.07
GFDL-CM3	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
GISS-E2-H	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06
GISS-E2-R	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
HadGEM2-AO	0.05	0.05	0.05	0.05	0.08
IPSL-CM5A-LR	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06
IPSL-CM5A-MR	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
MIROC-ESM	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06
MIROC-ESM-CHEM	0.07	0.06	0.07	0.06	0.04
MIROC5	0.08	0.1	0.09	0.1	0.04

Modelo	Lluvia	T media	T max	T min	Nivel del mar
MRI-CGCM3	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06
NorESM1-M	0.09	0.09	0.08	0.08	0.1

3.2. Proyecciones climáticas

El análisis proporcionó la distribución espacial de las variaciones climáticas proyectadas para diferentes escenarios de emisión, a escala nacional y provincial.

Desde una perspectiva general, la reducción de lluvias y el aumento de la temperatura superficial del aire en todos los períodos analizados: 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 y 2081-2100.

Los detalles se presentan a continuación.

3.2.1. Precipitación

En el corto plazo (2021-2040), la lluvia muestra un comportamiento dentro del rango normal de variabilidad ($\pm 5,0\%$), con un ligero aumento para los RCP 2.6 y 6.0, y una ligera disminución para los RCP 4.5 y 8.5. Para RCP8.5, la reducción se vuelve más consistente ($-8,0\%$) en la zona sur y centro del país.

En el mediano plazo (2041-2060), se espera un patrón similar para el RCP2.6, mientras que se esperan reducciones en la precipitación entre -4.0 y -9.0% para los demás escenarios.

En el período siguiente (2061-2080), el escenario RCP2.6 muestra un aumento de la precipitación en el rango de $0,0-5,0\%$ en la mayor parte del país, mientras que en el Sur y el Oeste comienzan a presentarse disminuciones de la misma magnitud. En los demás RCP, la reducción se vuelve más significativa, siendo $8.0-15.0\%$ para el RCP4.5, $4.0-10.0\%$ para el RCP6.0 y $7.0-19.0\%$ para el RCP8.5.

En las últimas dos décadas del siglo (2081-2100), los cuatro escenarios revelan una disminución de la precipitación en todo el país, que va desde $4.0-8.0\%$ para el RCP2.6 hasta más del 20% para el RCP8.5 y superando el $30,0\%$ en las regiones del sur (Figura 3).

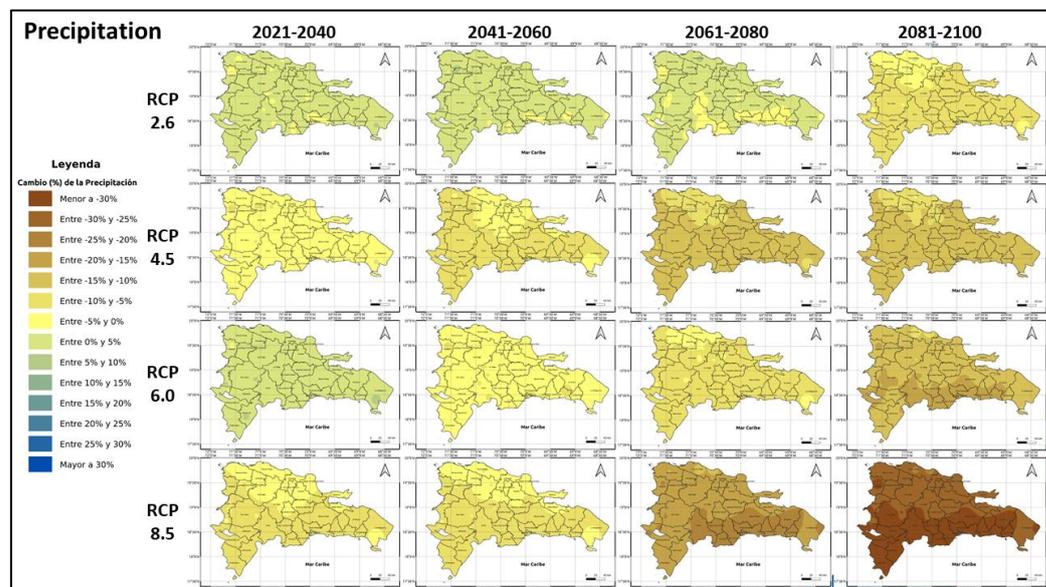


Figura 3. Cambios proyectados en la precipitación (en porcentaje) para la República Dominicana.

3.2.2. Temperatura media

A corto plazo (2021-2040), todos los escenarios muestran un aumento de la temperatura de $0,5-1,0$ °C.

Para el mediano plazo (2041-2060), se espera un patrón similar bajo RCP2.6, mientras que la temperatura media podría estar entre 1 y 1,5 °C más cálida que el período histórico bajo los demás escenarios.

En el período siguiente (2061-2080), bajo el RCP2.6 aún presenta incrementos de temperatura de 0.5-1.0°C en todo el país, mientras que en los demás RCPs los incrementos se vuelven más significativos, siendo de 1-2°C bajo RCP4.5 y RCP6.0, y 2-3°C para RCP8.5.

En las dos últimas décadas del siglo (2081-2100), todos los escenarios muestran una temperatura media más cálida que la del período histórico. Bajo RCP2.6, se tiene un aumento de la temperatura de 0,5-1,0°C, siendo de 1-2°C para RCP4.5, 1,5-2°C para RCP6.0 y 2-3°C para RCP8.5 (Figura 4).

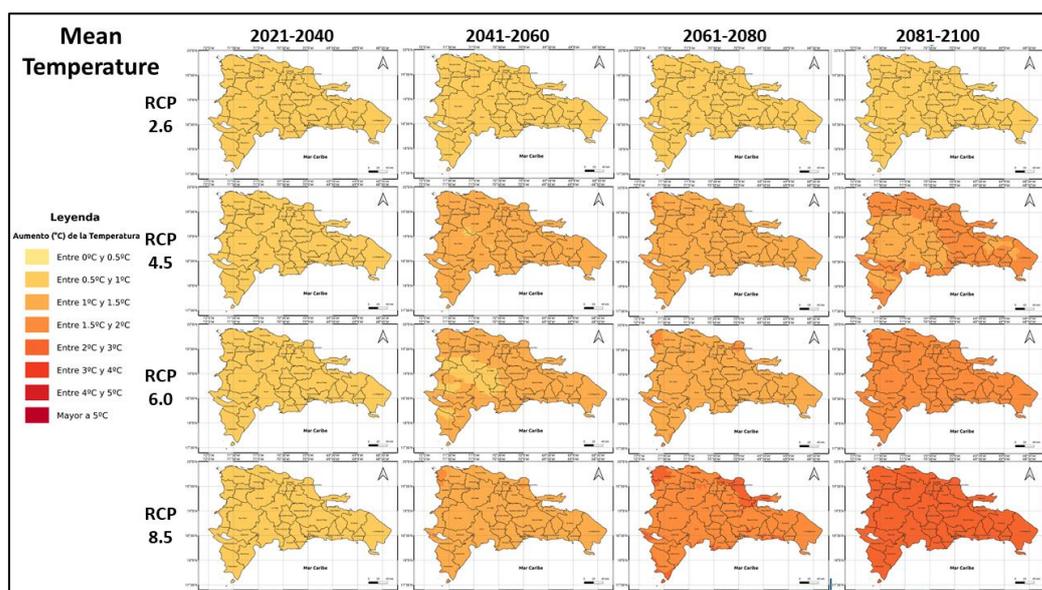


Figura 4. Cambios proyectados en la temperatura media (en °C) para la República Dominicana.

3.2.3. Elevación del nivel del mar

Es muy probable que el nivel del mar aumente entre 0,3 y 0,7 centímetros por año (cm/año) para todos los escenarios a corto plazo (2021-2040) en la zona costera de República Dominicana.

A medio plazo (2041-2060), la subida del nivel del mar podría ser de 0,5-0,8 cm/año en los primeros escenarios (RCP 2.6, 4.5 y 6.0), y de 0,7-0,8 cm/año bajo RCP8.5.

En el siguiente período (2061-2080), el nivel del mar podría aumentar entre 0,7 y 1,4 cm/año, con los cambios más bajos para RCP2.6 y los más altos para RCP8.5.

En las dos últimas décadas del siglo (2081-2100), los cuatro escenarios son coincidentes en mostrar que es muy probable que el nivel del mar aumente 1,2 cm/año, y valores más altos para RCP 4,5 y 6,0 (en 1-2 cm/año); así como bajo RCP 8,5 (por 2,5-3 cm/año). Para estos casos, las costas sur y este son las áreas más impactadas con los mayores aumentos del nivel del mar (Figura 5).

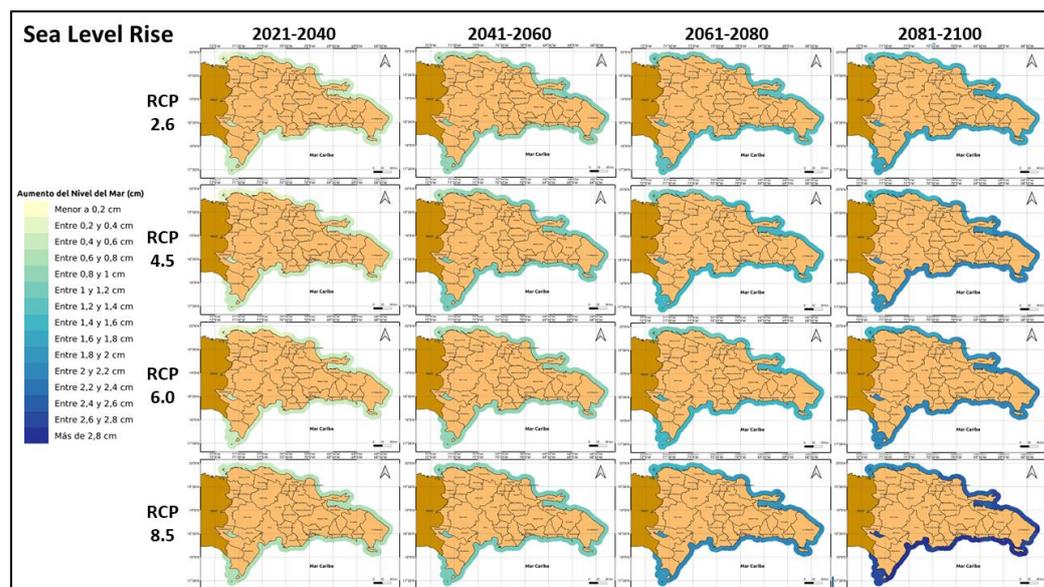


Figura 5. Cambios proyectados en la elevación del nivel del mar (en centímetros por año) para la República Dominicana.

4. Discusión

En cuanto a la precipitación, a escala nacional, las proyecciones muestran ligeras modificaciones en el corto y mediano plazo (2021-2040 y 2041-2060) bajo los RCP 2.6 y 4.5, con un incremento que no supera el 5.0% en comparación con el período de referencia (1981-2005). Para las restantes proyecciones bajo RCP (6.0 y 8.5) en el mediano plazo y para todos los RCP en la segunda parte del siglo, se espera que las precipitaciones disminuyan al menos en un 10.0% en comparación con el período 1981-2005. Bajo los RCP 6.0 y 8.5, la reducción supera el 20.0% en la mayor parte del país e incluso el 30.0% en la región Sur.

Se espera que la temperatura tenga un comportamiento más uniforme, ya que se proyecta un aumento generalizado en todo el país, con mayor crecimiento en la segunda parte del siglo y bajo los RCP 6.0 y 8.5. En el período analizado (2021-2100), el cambio esperado para la temperatura media oscila entre 0,7 y 1,2 °C bajo RCP2,6 y entre 0,8 y 2,9 °C para RCP8,5. Las diferencias espaciales se presentan en ciertas regiones del país, donde la parte central y occidental muestran incrementos menores. Estos resultados son coherentes con las tendencias históricas detectadas por estudios previos [3, 25].

Se espera que el nivel del mar aumente para todos los RCPs analizados, siendo probable un crecimiento de entre 0,3 y 0,8 cm en el corto y mediano plazo (2021-2040 y 2041-2060), y entre 1,0 y 3,0 cm hacia la segunda parte del siglo.

Si bien el cambio puede parecer pequeño, se espera que sus impactos sean significativos, ya que es probable que entre el 5% y el 10% de las áreas costeras se pierdan a finales de siglo, con consecuencias relevantes en infraestructuras, mayores costos para financiar instalación y mantenimiento y hacer frente al aumento del nivel del mar, pérdidas económicas y daños a la industria del turismo y otras actividades productivas, así como la pérdida de ecosistemas y biodiversidad, entre otros.

5. Conclusiones

El estudio es muy relevante para fortalecer el conocimiento acerca de las condiciones climáticas actuales y futuras en el país, además de proporcionar información e instrumentos útiles para los responsables de la formulación de políticas.

En comparación con estudios previos, las series de lluvia utilizada para el período de referencia (1981-2005) supera en más de cinco veces el número de estaciones de registro de datos utilizados anteriormente y están mejor distribuidas en todo el territorio dominicano.

Las proyecciones obtenidas del conjunto multimodelo para los cuatro RCP analizados alertan sobre los impactos más probables relacionados con los cambios identificados en la principal variable climática. Debe prestarse especial atención a las consecuencias del efecto combinado producido por la reducción de las precipitaciones y el aumento de la temperatura superficial, especialmente en aquellas zonas del país que ya cuentan con un clima semiárido o poco húmedo (tales como las zonas de Occidente y Sur del país). Es probable que estas regiones enfrenten un mayor riesgo de inseguridad alimentaria, hídrica y energética, con fuertes impactos en la población humana, la economía, los ecosistemas y la biodiversidad.

La falta de información sistemática, la baja calidad de los datos, así como las dificultades para acceder a los datos y registros disponibles continúan limitando el conocimiento climático en la República Dominicana, lo que deriva en un aumento en la incertidumbre en la modelación, al mismo tiempo que reduce el alcance de dicha herramienta para la toma de decisiones.

El desarrollo a futuro sobre el conocimiento climático en la República Dominicana debe incluir modelos capaces de brindar información de mayor resolución, así como facilitar análisis más sólidos sobre los impactos sectoriales y locales. Para ello, es necesario mejorar el registro local y la producción de datos en todo el territorio nacional. De esta manera, los pasos futuros deberían incluir la expansión de la red de medición meteorológica, así como el desarrollo de servicios climáticos de alta calidad, siguiendo los estándares de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) [26,27].

Esta acción debe ir acompañada de más estudios sobre el clima pasado y su dinámica en la República Dominicana y la isla Española, a fin de mejorar la comprensión de la variabilidad climática histórica y actual, incluyendo el comportamiento de los eventos extremos del clima. Con ello y con un mejor modelado del clima futuro, será posible robustecer las decisiones que toman en cuenta aspectos climáticos para contribuir en el desarrollo nacional y local.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias al proyecto “Desarrollando capacidades para avanzar en el proceso del Plan Nacional de Adaptación en la República Dominicana” con el liderazgo del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la República Dominicana y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) como agencia implementadora. El trabajo fue desarrollado por el Consorcio formado por el Centro del Agua para el Trópico Húmedo de América Latina y el Caribe (CATHALAC) y ENERGIA NETWORK. Los autores agradecen a la Sra. Gloria María Ceballos, Directora Nacional de la ONAMET y su equipo técnico de trabajo por todo el apoyo técnico brindado para el desarrollo de los escenarios de cambio climático para República Dominicana.

Apéndice A

Tabla 3. Coordenadas geográficas (datum WGS84) de las estaciones seleccionadas y provenientes de la ONAMET (verde) y el INDRHI (azul).

Estación	Longitud	Latitud
A. Herrera	-69.96670651	18.46678088
A. La Unión	-70.55000794	19.7500911
Arroyo Barril	-69.45000806	19.21678693

Azua	-70.73331714	18.45008139
Baní	-70.33331361	18.26678646
Barahona	-71.10001278	18.20008648
Constanza	-70.73287607	18.90185884
Cotuí	-70.15000848	19.05008591
El Cercado	-71.5167167	18.71678095
Hondo Valle	-71.68331254	18.71678877
Imbert	-70.83301165	19.75009136
Jimaní	-71.84960309	18.48516284
La Vega	-70.53330935	19.2167884
Las Américas	-69.66626829	18.43515949
Las Matas de Farfán	-71.5167183	18.86678563
Loyola	-70.10001332	18.41674859
Mao	-71.06670997	19.55008624
Moca	-70.51671615	19.38338649
Monción	-71.15001443	19.40008968
Padre las Casas	-70.93331465	18.73338786
Polo	-71.28331153	18.06678292
Punta Cana	-68.36624595	18.56855091
Rancho Arriba	-70.45000867	18.70008597
Sabana de la Mar	-69.41625959	19.05186149
Salcedo	-70.41670866	19.36678213
Samaná	-69.32227093	19.20713301
San Cristóbal	-70.10001355	18.41678473
San Juan	-71.23289399	18.80186224
San Pedro de Macorís	-69.30000535	18.45008276
San Rafael del Yuma	-68.66670826	18.41678484
Sánchez	-69.58963791	19.22287951
Santiago	-70.69958042	19.45186609
Santiago Rodríguez	-71.33301333	19.46708532
Santo Domingo	-69.91626973	18.48516027
Villa Vásquez	-71.43301807	19.73309027
0201 Chacuey-Partido	-71.55514958	19.49075598
0404 Yaque del Norte-Santiago-Isa	-70.7454129	19.4476985
0405 Yaque del Norte-Quinigua	-70.77319126	19.52825508
0409 Yaque del Norte-El Rio-Constanza	-70.62735682	18.98241864
0410 Yaque del Norte-Manabao	-70.79402554	19.06575241
0422 Yaque del Norte-Jinamagao	-70.98291685	19.54631053
0427 Yaque del Norte-Guayubín Rincón	-71.38848003	19.52686706
0434 Yaque del Norte-La Ciénaga-Manabao	-70.86152665	19.06797452
0438 Yaque del Norte-Janey	-70.76846991	19.16936391
0440 Yaque del Norte-Cagueyes	-70.83291478	19.28769772
0442 Yaque del Norte-Juncalito	-70.82180369	19.21880831
1804 Yuna-Los Quemados	-70.45790902	18.89352874
1815 Yuna-La Angelina	-70.22179354	19.12825169
1821 Yuna-La Ceiba-Rio Blanco	-70.55735576	18.89825098
1826 Yuna-Tireo en Pinalito	-70.56124488	18.88463992
1837 Yuna-La Cabirma	-70.04845789	18.98602848
1838 Yuna-Cenovi Santa Ana	-70.34651729	19.29630793
2301 Anamuya-Anamuya	-68.64287865	18.70018967
2601 Chavón-Santa Lucia	-68.93566165	18.68796836
3002 Soco-Paso del Medio	-69.1662218	18.57963527
3302 Ozama-Cacique	-69.86345505	18.81574916
3305 Ozama-Higuero	-69.98845769	18.58241503
4001 Bani-El Recodo	-70.33957513	18.37602548
4501 Arroyo Hatillo-Hatillo Azua	-70.53846742	18.39630292
4907 Yaque del Sur-La Florida	-71.09069807	18.82964046

4910 Yaque del Sur-Cacheo	-71.11514345	18.81575142
4913 Yaque del Sur-Villarpando	-71.04680865	18.65463931
4936 Yaque del Sur-Gajo de la Lagunita	-71.10375422	18.8860298
4981 Yaque del Sur-El Chorro-Constanza	-70.7570812	18.90130634
4982 Yaque del Sur-El Limoncito	-70.83680452	18.90047343
5313 Enriquillo-Guayabal-Postrer Rio	-71.63709681	18.59630582
5402 Artibonito-Pozo Hondo	-71.48848269	18.99353108
5403 Artibonito-Puertecito	-71.51070531	18.80186293
5407 Artibonito-Ranchito Macasia	-71.61626294	18.9351969
5412 Artibonito-Cajuilito	-71.5996044	19.07269462
5413 Artibonito-Guazumal Elías Piña	-71.66904089	18.87769656

356

357

Referencias bibliográficas

- 1 IPCC. Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu R., Zhou, B. Eds.; Cambridge University Press, Cambridge, 2020; pp. 1–41. In press.
- 2 WMO. WMO Provisional Report on the State of the Global Climate 2021; World Meteorological Organization, Geneva, 2021; pp. 1-47.
- 3 UNDP. *Global Multidimensional Poverty Index 2021: unmasking disparities by ethnicity, caste and gender*. United Nations Development Programme and Oxford Poverty & Human Development Initiative, New York and Oxford, 2021; pp. 1-41.
- 4 Izzo, M.; Araujo, N.; Aucelli, P.P.C.; Maratea, A.; Sánchez, A. Land sensitivity to desertification in the Dominican Republic: an adaptation of the ESA methodology. *Land Degrad. Dev.* **2013**, *24*(5), 486-498. <https://doi.org/10.1002/ldr.2241>
- 5 Izzo, M.; Aucelli, P.P.C.; Javier, J.; Pérez, C.; Roskopf, C.M. The tropical storm Noel and its effects on the territory of the Dominican Republic. *Nat. Hazards* **2010**, *53*, 139-158. DOI:10.1007/s11069-009-9417-9
- 6 Izzo, M.; Rathe, L.; Arias Rodríguez, D. *Puntos críticos para la vulnerabilidad a la variabilidad y cambio climático en la República Dominicana y su adaptación al mismo*. Programa para la Protección Ambiental: Acuerdo de Cooperación No. 517-A-00-09-00106-00. United States Agency for International Development (USAID), The Nature Conservancy and Instituto Dominicano de Desarrollo Integral (IDDI), Santo Domingo, 2012; pp. 1-399.
- 7 Izzo, M.; Aucelli, P.P.C.; Maratea, A. Historical trends of rain and air temperature in the Dominican Republic. *Int. J. Climatol.* **2021**, *41*(S1), E563-E581. <https://doi.org/10.1002/joc.6710>
- 8 Pérez, C.R.; Jury, M-R. Spatial and temporal analysis of climate change in Hispaniola. *Theor. Appl. Climatol.* **2013**, *113*, 213-224. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0781-0>
- 9 Carneiro, F.G. *Policy notes to build a better future together with Dominican Republic*. Working Paper No. 110917. The World Bank, Washington DC, 2016; pp. 1-118.
- 10 Guakía Ambiente. *Evolución histórica de los estudios sobre escenarios climáticos en la República Dominicana*. Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y El Caribe: Proyecto “Consultoría para el desarrollo de escenarios climáticos de precipitación, temperatura y ascenso del nivel del mar para los periodos 2020-2040; 2041-2060; 2061-2080 y 2081-2100”, Santo Domingo; pp. 1-38.
- 11 Izzo, M.; Aucelli, P.P.C.; Maratea, A.; Méndez, R.; Pérez, C.; Roskopf, C.M.; Segura, H. A new climatic map of the Dominican Republic based on the Thornthwaite classification. *Phys. Geogr.* **2010**, *32*(5), 455-472. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.31.5.455>
- 12 Lewis, J.F. Review of the Geology of Hispaniola. In *Memoirs of the 9th Geological Conference of the Caribbean*, Santo Domingo, Dominican Republic, 15th-26th of August 1980.
- 13 Burke, K.C.; Cooper, C.; Dewey, J.F.; Mann, P.; Pindell, J.L. Caribbean tectonics and relative plate motions. In *The Caribbean–South American Plate boundary and regional tectonics*; Bonini, W.E., Hargraves, R.B., Shagam, R. Eds.; Publisher: Geological Society of America: Boulder, CO, 1984; Volume 162, pp. 31-63.
- 14 DeMets, C.; Gordon, R.G.; Argus, D.F.; Stein, S. Current plate motions. *Geophys. J. Int.* **1990**, *101*, 425-478. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x>
- 15 Buytaert, W.; Celleri, R.; Willems, P.; De Bièvre, B.; Wyseure, G. Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *J. Hydrol.* **2006**, *329*, 413-421. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.02.031
- 16 SalvaTerra; EGIS; Meteodyn; Carbonium; IRD. *Evaluación de la situación de los servicios climáticos para la agricultura en República Dominicana*. Adapt' Action, Agence Française de Développement (AFD), Santo Doimngo, 2021; pp. 1-105.
- 17 Ruiz, M.J.F.; Melo, F.J.Y. *Modelación numérica de tiempo y clima IDEAM*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá, 2020. <http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/>

-
- 18 WMO (2011) Guide to Climatological Practices, WMO-No. 100. 3rd Edition, World Meteorological Organization, Geneva. 400
- 19 Beersma, Jules J.; Adri Buishand, T. A Simple Test for Equality of Variances in Monthly Climate Data. *J. Clim.* **1999**, *12*(6), 1770– 401
1779. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1770:ASTFEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1770:ASTFEO>2.0.CO;2) 402
- 20 Funk, C. et al. A high-resolution 1983–2016 Tmax climate data record based on infrared temperatures and stations by the 403
Climate Hazard Center. *J. Clim.* **2019**, *32*, 5639–5658. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0698.1> 404
- 21 Copernicus Marine Service. Global Ocean Physics Reanalysis. <https://doi.org/10.48670/moi-00021> 405
- 22 Wood, A.W.; Leung, L.R.; Sridhar, V.; Lettenmaier, D. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to 406
downscaling climate model outputs. *Clim. Change* **2004**, *62*, 189–216. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013685.99609.9e> 407
- 23 Giorgi, F.; Mearns, L.O. Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from aogcm 408
simulations via the “Reliability Ensemble Averaging” (REA) method. *J. Clim.* **2002**, *15*(10), 1141–1158. 409
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1141:COAURA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1141:COAURA>2.0.CO;2) 410
- 24 Tebaldi, C.; Knutti, R. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philos. Trans. Royal Soc. A* **2007**, 411
365(1857), 2053–2075. <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2076> 412
- 25 Pérez, C.R.; Jury, M.R. Spatial and temporal analysis of climate change in Hispañola. *Theor. Appl. Climatol* **2013**, *113*, 213–224. 413
<https://doi.org/10.1007/s00704-012-0781-0> 414
- 26 WMO. *Implementation plan of the Global Framework for Climate Services*; World Meteorological Organization, Geneva, 2014; pp. 1– 415
81. 416
- 27 Vaughan, C.; Dessai, S. Climate services for society: origins, institutional arrangements, and design elements for an evaluation 417
framework. *WIREs Clim. Change* **2014**, *5*(5), 587–603. <https://doi.org/10.1002/wcc.290> 418
419
420