

Elaboración de una herramienta para la enseñanza del cambio climático a nivel local para generar conciencia en estudiantes de colegios.

Verónica Patricia González Matoma

Trabajo de Grado para optar al título de Física

Director

Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez

Doctorado en Ciencias

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Bucaramanga

2021

Tabla de Contenido

Introducción	12
1. Objetivos	16
1.1. Objetivo general	16
1.2. Objetivos específicos	16
2. Marco Referencial	17
2.1. Cambio Climático	17
2.2. Anomalía Climática	17
2.2.1. Anomalía de Temperatura	18
2.2.2. Índice de Precipitación	19
2.3. Estrategias para la enseñanza del Cambio Climático	19
2.3.1. Proyecto “ <i>Climate Change: Acting and Understanding</i> ”	20
2.3.2. Proyecto Astropáramo	21
2.4. Atlas Climático Alemán	22
3. Metodología	24
3.1. Fase Preliminar	24
3.1.1. Características de la nueva herramienta	24

3.1.2. Adquisición de Datos de Normales y Anomalías Climáticas	27
3.1.3. Adquisición de Datos del Promedio Nacional Anual	30
3.1.4. Adquisición de Datos de Nivel del Mar	31
3.2. Fase Intermedia	31
3.2.1. Gráficos Interactivos	32
3.2.1.1. Ipywidgets	32
3.2.1.2. Plotly	32
3.2.2. Análisis para la corrección de efectos de la topografía en los mapas	33
3.2.3. Mapas de Temperatura y Precipitación	36
3.2.4. Serie de Tiempo del Nivel del Mar	37
3.3. Fase Final	40
4. Resultados	43
4.1. Mapas Climáticos	43
4.2. Gráficos de Tendencias	49
4.2.1. Precipitación y Temperatura	49
4.2.2. Nivel del Mar	52
4.3. VENICE	54
5. Recomendaciones	57
6. Trabajo futuro	58

7. Conclusiones	59
Referencias Bibliográficas	62
Apéndices	67

Lista de Figuras

Figura 1.	Mapas de normal climática (1981-2010) y precipitación total de octubre de 2017 en Magdalena.	25
Figura 2.	Mapas de normal climática (1981-2010) e índice de precipitación de octubre de 2020 en Santander.	26
Figura 3.	Distribución espacial de las estaciones usadas para generar mapas de temperatura de Santander y Magdalena.	29
Figura 4.	Distribución espacial de las estaciones usadas para generar mapas de precipitación de Santander y Magdalena.	29
Figura 5.	Captura de pantalla de implementación en VENICE de las librerías interactivas.	33
Figura 6.	Coeficiente de correlación lineal (R) de Pearson entre las variables climáticas y altitud topográfica.	35
Figura 7.	Nivel del Mar en Santa Marta (eje y) vs Cartagena (eje x).	38
Figura 8.	Nivel del Mar Diario en Santa Marta (rojo) y Cartagena (azul) en el periodo 2013-2018.	39
Figura 9.	Captura de pantalla de la sección de VENICE correspondiente a la variable temperatura.	41
Figura 10.	Mapas de Normal Climática de Temperatura (izquierda) y Valor Absoluto de Temperatura Media (derecha) de Santander en Enero 2019.	44

Figura 11. Mapas de Normal Climática de Temperatura (izquierda) y Anomalía de Temperatura Media (derecha) de Santander en Enero 2019.	44
Figura 12. Captura de pantalla del mapa interactivo de Temperatura Media en Jupyter Notebook.	45
Figura 13. Gráfico de Tendencias de Temperatura Media de Colombia para cada año entre 1984-2020 (rojo) y el promedio de 1984-2010 como referencia (azul).	50
Figura 14. Regresión Lineal de la Temperatura Media de Colombia en el periodo 1984-2010.	51
Figura 15. Regresión Lineal de la Precipitación Media de Colombia en el periodo 1980-2010.	52
Figura 16. Regresión Lineal del Nivel del Mar Diario en Santa Marta en el periodo 2013-2018.	53
Figura 17. Regresión Lineal del Nivel Medio del Mar Anual en Cartagena en el periodo 1985-2018.	54
Figura 18. Captura de pantalla del Índice la herramienta VENICE en Jupyter Notebook. .	55
Figura 19. Captura de pantalla de la Introducción del libro de Jupyter Notebook.	56
Figura 20. Distribución espacial de las 228 estaciones representativas de Colombia usadas para calcular la temperatura promedio nacional (derecha) y de las 1168 estaciones para la precipitación promedio nacional (izquierda).	66
Figura 21. Tendencia de Temperatura Media Nacional (arriba) y Precipitación Media Nacional (abajo) en el periodo 1980-2011.	67

Lista de Tablas

Tabla 1.	Datos de Temperatura, Precipitación y Nivel del Mar obtenidos por las fuentes de información.	27
Tabla 2.	Correlación de Mapas de normal climática de MGN: Magdalena y SND: Santander.	47
Tabla 3.	Correlación de los mapas de Anomalía de Temperatura en Magdalena y Santander.	48
Tabla 4.	Correlación de los mapas de Índice de Precipitación en Magdalena y Santander.	48

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Interpolación IDW (Inverse Distance Weighting).	65
Apéndice B. Mapas de la distribución de estaciones representativas para el cálculo del promedio nacional.	66
Apéndice C. Indicadores de temperatura y precipitación anual de Colombia.	67

Glosario

Anomalía Climática es la desviación de un valor de una variable climatológica respecto a su respectivo promedio de referencia (Normal Climática). Por ejemplo, en el caso de la variable temperatura esta variable se denomina Anomalía de Temperatura mientras que, en términos de precipitación se encuentra el Índice de Precipitación.

Cambio Climático es la variación de clima del sistema terrestre en grandes periodos de tiempo.

Interpolación Multivariable es la interpolación de funciones de mas de una variable. Si estas variables son coordenadas espaciales, se denomina Interpolación Espacial.

Normal Climática es un promedio de una variable meteorológica en un periodo de 30 años. Es usada comúnmente como referencia para analizar los datos climáticos recientes.

Resumen

Título: Elaboración de una herramienta para la enseñanza del cambio climático a nivel local para generar conciencia en estudiantes de colegios. *

Autor: Verónica Patricia González Matoma **

Palabras Clave: Cambio Climático, Normal Climática, Anomalía Climática, Interpolación multivariable, Atlas Climático Alemán.

Descripción: El presente trabajo muestra el desarrollo una herramienta “offline” e interactiva para la enseñanza del cambio climático en escuelas. El propósito de este proyecto es generar conciencia en estudiantes de escuelas urbanas y rurales sobre el efecto del cambio climático en distintas regiones y, por tanto, motivar acciones de mitigación y adaptación al fenómeno. Para ello, se adaptó la herramienta “online” Atlas Climático Alemán para el seguimiento del cambio climático por medio de mapas y series de tiempo generadas en Python para comparar datos históricos y actuales. En particular, este cambio se representó con valores absolutos y anomalías climáticas respecto a la normal climática (1981-2010). También se adaptó la metodología seguida por esta herramienta para generar mapas, considerando la altitud de las estaciones. Los resultados consisten en mapas y gráficos interactivos que ilustran el efecto del cambio climático en los departamentos de Magdalena y Santander por medio de las variables climáticas Temperatura, Precipitación y Nivel del Mar. En específico, se evidencia el incremento de la temperatura media en ambos departamentos, así como el aumento en el nivel del mar en Santa Marta. Finalmente, todo este ambiente se recopiló en forma de un libro interactivo en Jupyter Notebooks: VENICE, un Visualizador Interactivo para la Enseñanza Interactiva del Cambio Climático en Escuelas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencia. Escuela de Física. Director: Luis Alberto Núñez de Villavicencio.

Abstract

Title: Elaboración de una herramienta para la enseñanza del cambio climático a nivel local para generar conciencia en estudiantes de colegios. *

Author: Verónica Patricia González Matoma **

Keywords: Climate Change, Climate Normal, Climate Anomaly, Multivariable Interpolation, German Climate Atlas.

Description: This work shows the development of an offline and interactive tool for teaching climate change in schools. The purpose of this project is to raise awareness in students of urban and rural schools about the effect of climate change in different regions and, therefore, motivate mitigation and adaptation actions to the phenomenon. For this, the German Climate Atlas online tool was adapted to monitor climate change through maps and time series generated in Python to compare historical and current data. This change was represented with absolute values and climate anomalies with respect to the climate normal (1981-2010). The methodology followed by this tool to generate maps was also adapted, considering the altitude of the stations. The results consist of maps and interactive graphs that illustrate the effect of climate change in the departments of Magdalena and Santander through the climate variables Temperature, Precipitation and Sea Level. Specifically, the increase in average temperature in both departments is evidenced, as well as the rise in sea level in Santa Marta. Finally, this whole environment was compiled in the form of an interactive book in Jupyter Notebooks: VENICE, an Interactive Visualizer for Interactive Teaching of Climate Change in Schools.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ciencia. Escuela de Física. Director: Luis Alberto Núñez de Villavicencio.

Introducción

El cambio climático es considerado como la variación de clima del sistema terrestre en grandes periodos de tiempo. En los últimos años, la actividad humana ha influido mediante la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, generando un calentamiento global, con graves impactos en el medio ambiente y la humanidad.

Por otra parte, la educación sobre el cambio climático aspira a modificaciones en la conducta de la sociedad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, es importante para formar resiliencia y adaptación a los efectos del cambio climático, tales como cambios en la precipitación, aumentos en la temperatura y nivel del mar.

En Colombia se han hecho esfuerzos para concientizar sobre el cambio climático (Sampayo-Londoño et al., 2018; Cruz, 2020). Uno de éstos, ha sido la aplicación del proyecto Astropáramo¹ en instituciones educativas rurales cercanas al páramo en Santander. El material de este proyecto consta de un manual, una guía de actividades y una estación meteorológica. Además, se proveen materiales comunes para realizar los experimentos descritos en las guías, los cuales permiten explorar las bases científicas y las consecuencias del cambio climático de forma accesible. Por otra parte, también se dotó una estación meteorológica a cada colegio para permitir a los estudiantes

¹ Astropáramo; <https://halley.uis.edu.co/astroparamo/>

observar variables climáticas a tiempo real. No obstante, aún faltaba desarrollar herramientas que permitan al estudiante interactuar con datos climáticos históricos.

Esto es importante, ya que una forma de rastrear el efecto del cambio del cambio climático es a través de la variabilidad climática de una región en un largo plazo. Un ejemplo es la herramienta “online” interactiva Atlas Climático Alemán² del Servicio Meteorológico Alemán o “Deutscher Wetterdienst”. Esta herramienta permite visualizar la información del pasado, así como resultados de proyecciones futuras por medio de mapas climáticos y series temporales. Los mapas representan el área a escala regional y nacional. De esta forma, se muestran mapas tanto para cada uno de los estados federales como para toda Alemania.

Por otro lado, el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) ha desarrollado productos para la visualización el cambio climático en Colombia³. El IDEAM publica boletines climatológicos mensuales donde se analiza, a través de gráficos y mapas, la variabilidad climática del mes. Por otro lado, se encuentra herramientas como el Atlas Climatológico

² Deutscher Klimaatlas; <http://www.deutscher-klimaatlas.de>

³ Seguimiento del Clima; <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/seguimiento>

de Colombia⁴, que muestra el clima característico a escala nacional y el Geovisor⁵, que permite ver capas de parámetros de interés. Sin embargo, no existe una herramienta para el análisis de la información a escala local (por departamento), de uso “offline” y que permita al estudiante comparar entre el clima pasado y el reciente.

De la misma forma, surge la necesidad de incluir el departamento de Santander en la herramienta, puesto que allí se encuentran los colegios con semilleros del proyecto Astropáramo. Así mismo, es necesario incluir el departamento del Magdalena ya que compone uno de los territorios con más vulnerabilidad. De igual forma, se debe mostrar la variabilidad climática de departamentos en regiones distintas, ya que dispone una oportunidad para que los estudiantes identifiquen que el cambio climático es un fenómeno que no tiene fronteras y por tanto, concierne a todos por igual.

Es importante diseñar estrategias para divulgar información climática dirigida a estudiantes y que pueda ser implementada como parte de la formación en instituciones educativas. Así mismo, es necesario adaptarse a la modalidad “offline” teniendo en cuenta el problema de conectividad presente en la mayoría de las zonas rurales. Fundamentalmente, se debe permitir al estudiante interactuar con los datos climáticos históricos recolectados en su región con el fin de reconocer los

⁴ Atlas Climatológico de Colombia; <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>

⁵ Geovisor; <http://visor.ideam.gov.co/geovisor/#!/profiles/3>

cambios en el clima pasado y el actual.

Este trabajo pretende responder las siguientes preguntas:

- ¿Como se puede adaptar la metodología del Atlas Climático Alemán para ilustrar el cambio climático en Santander y Magdalena? ¿Cómo obtener mapas climáticos basados en esa metodología?
- ¿Como ejemplificar la tendencia de Aumento del Nivel del Mar en el departamento del Magdalena?
- ¿Los mapas y series de tiempo obtenidos pueden ilustrar el cambio climático en estos departamentos?
- Y, por último, ¿Cómo crear una herramienta interactiva, autónoma y “offline” dirigida a estudiantes de escuelas?

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Elaborar una herramienta para la enseñanza del efecto del cambio climático en los departamentos de Magdalena y Santander, Colombia para generar conciencia en estudiantes de colegios.

1.2. Objetivos específicos

- Adaptar la metodología presentada en el “Atlas Climático Alemán” y adquirir el conjunto de datos necesarios.
- Ilustrar los efectos del cambio climático en los departamentos de Magdalena y Santander por medio de mapas y series de tiempo interactivas.
- Desarrollar una herramienta interactiva para la enseñanza del cambio climático en los departamentos de Magdalena y Santander.

2. Marco Referencial

2.1. Cambio Climático

El cambio climático se define como la variabilidad en el clima terrestre durante largos periodos de tiempo. Este cambio se produce debido a causas naturales y la actividad humana que altera la composición de la atmósfera (CMNUCC, 1992, p. 3). En efecto, la actividad humana ha causado un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero, los cuales han alterado el balance de energía del planeta causando un aumento en la temperatura de la Tierra (Royal Society, 2020, p. 5).

Hasta 2017, se estimó un calentamiento global de aproximadamente 1.0°C por encima de niveles preindustriales y se prevé que alcanzará 1.5°C entre 2030 y 2052 (IPCC, 2018, p. 260). A pesar de que parezcan unos cambios pequeños, en el promedio global pueden representar un gran cambio en el clima (Houghton, 2009, p. 13). De esta manera, el cambio climático ha producido cambios en la temperatura, precipitación, aumento del nivel del mar y climas extremos sin precedentes.

2.2. Anomalía Climática

La anomalía climática es una medida estándar usada para vigilar el cambio climático. Según la OMM (2017b), la anomalía climática se define como “la desviación de una medición con

respecto al promedio del período de referencia”. Este promedio se denomina normal climática y se establece en un periodo de 30 años. Las normales climáticas son usadas como referencia para realizar predicciones y sirven para identificar las anomalías climáticas en observaciones recientes. Actualmente, la normal climática estándar corresponde al periodo 1981-2010 y se actualizará para el periodo de 1991-2020 a partir de 2021 (OMM, 2017a, p. 2).

2.2.1. *Anomalía de Temperatura*

Un ejemplo de Anomalía Climática es la Anomalía de Temperatura Media AT_{ijk} registrada en una estación j para un determinado mes i y año k :

$$AT_{ijk} = T_{ijk} - NT_{ij}, \quad (1)$$

donde T_{ijk} es la temperatura media mensual del aire y NT_{ij} es la normal climática (1981-2010) de temperatura estándar para el mes i .

Por su parte, la temperatura media mensual T_{ijk} del mes i del año k en la estación j se calcula como:

$$T_{ijk} = \frac{\sum_{h=1}^n t_{hjk}}{n}, \quad (2)$$

donde n es el número de días registrados en una estación j y t_{hjk} es la temperatura media diaria del aire del día h .

2.2.2. Índice de Precipitación

Otro ejemplo de Anomalía Climática es el de Índice de Precipitación IP_{ijk} de una estación j para un determinado mes i y año k :

$$IP_{ijk} = \frac{P_{ijk}}{NP_{ij}} * 100, \quad (3)$$

donde P_{ijk} es la precipitación total mensual y NP_{ij} es la normal climática (1981-2010) de precipitación estándar para el mes i .

Además, la precipitación total mensual P_{ijk} para el mes i y año k en la estación k se calcula como:

$$Pt_{ijk} = \sum_{h=1}^n p_{hj}, \quad (4)$$

donde p_{hj} es la suma total de la cantidad de precipitación durante cada día h del mes i en una estación j .

2.3. Estrategias para la enseñanza del Cambio Climático

Según Cruz (2020), la educación del cambio climático en América Latina se ha abordado principalmente con estudios de percepción y representaciones sociales. En la mayoría, se han detectado confusiones entre clima y tiempo, así como cambio climático y otros problemas ambien-

tales (Cruz, 2020, p. 481). En efecto, en un estudio de Sampayo-Londoño et al. (2018) en el Bajo Cauca, Colombia se observó que los estudiantes no conocen las causas, efectos y consecuencias del cambio climático y se le asocia, de manera errónea, con el concepto de variabilidad diaria o estacional del clima.

Es importante señalar que también se percibe el cambio climático como una situación lejana (Cruz, 2020, p. 483). Por otro lado, en un estudio realizado por Bello-Benavides et al. (2021) en Veracruz, México, se mostró que el cambio climático se aborda más como tema, caracterizado por contenidos dispersos, que como un problema, que engloba desde los aspectos científicos hasta los sociales. Así pues, es necesario que se aborde tanto las distintas dimensiones del cambio climático (científica-social) como sus efectos a nivel local.

2.3.1. Proyecto “*Climate Change: Acting and Understanding*”

Cabe considerar, por otra parte, algunas propuestas para generar conciencia sobre esta problemática en estudiantes de colegios. El Proyecto “*Climate Change: Acting and Understanding*” (Scorza et al., 2019), comprende un material de actividades con el fin de educar sobre el cambio climático a estudiantes de colegios en Baviera, Alemania. Este material consta de un kit de experimentos para ilustrar los principios físicos sistema climático global, dirigidos a los estudiantes, y un manual, dirigido a los profesores. Además, para el desarrollo de alguna de estas actividades se usan herramientas para visibilizar las anomalías climáticas, como el Atlas Climático Alemán ofrecido

por el Servicio Meteorológico de Alemania. El principio de este proyecto es motivar a los estudiantes para tomar acción y desempeñar un papel activo a partir del entendimiento de esta problemática.

2.3.2. *Proyecto Astropáramo*

El proyecto Astropáramo consta de un material didáctico con el objetivo de generar conciencia sobre el cambio climático en estudiantes de colegios. Actualmente, cuenta con semilleros en los municipios Vetás, Suratá y Berlin, ubicados en la región del Páramo de Santurbán en Santander, Colombia. Con respecto al material del proyecto, este se compone de guías y un kit de experimentos, así como infografías, videotutoriales y un pódcast. El contenido se basa en módulos temáticos que permiten al estudiante explorar desde la físico-química de la atmósfera hasta las condiciones de habitabilidad planetaria que hacen posible la vida en el planeta Tierra. De esta manera, se promueve la reflexión frente al problema del cambio climático desde la Física y Astrobiología del cambio climático.

Adicionalmente, se ha dotado una estación meteorológica a cada colegio para el monitoreo cuantitativo de variables ambientales y análisis de datos. La finalidad es proveer a los estudiantes experiencias de manejo y análisis de los datos ambientales obtenidos por las estaciones. En concreto, estas estaciones permiten registrar variables como la temperatura, presión y la humedad. Por último, se incorpora los datos recolectados por los estudiantes a la red de estaciones de la Red Ambiental Ciudadana de Monitoreo (RACIMO) (Asorey et al., 2017, p. 6).

2.4. Atlas Climático Alemán

El Atlas Climático Alemán⁶ es una herramienta “online” del “Deutsche Wetterdienst”, esto es, el Servicio Meteorológico Alemán, para suministrar información climática del pasado, presente y proyecciones del clima futuro de Alemania. En particular, esta herramienta permite realizar una comparación visual directa entre el clima del pasado (desde 1881) y proyecciones de distintos modelos climáticos (hasta 2100) (Kaspar et al., 2013, p. 104). Esto se realiza a partir de una combinación de mapas y series de tiempo. Además, permite escoger entre 23 parámetros entre los que se encuentran parámetros meteorológicos (temperatura del aire, precipitación, entre otros) y parámetros derivados de éstos (por ejemplo, el índice meteorológico de incendios). De igual forma, el usuario tiene la opción de guardar las visualizaciones y descargar como archivos con formato pdf.

En esta herramienta se muestran distintos mapas locales para cada estado federal Alemán según los parámetros escogidos. De esta forma, se posibilita conocer el efecto del cambio climático en el pasado y sus proyecciones de forma individual para cada estado federal.

Por otro lado, se sigue el procedimiento planteado por Müller-Westermeier (1995) para generar mapas que tengan en cuenta la topografía. Esto se debe a que una simple interpolación expresa resultados insuficientes porque no tiene en cuenta los efectos topográficos en las variables

⁶ Deutscher Klimaatlas; <http://www.deutscher-klimaatlas.de>

climáticas (Müller-Westermeier, 1995, p. 8). Este procedimiento consiste en utilizar la regresión lineal entre los parámetros climatológicos y las alturas topográficas para hallar un coeficiente C que las relacione. Luego, se reducen los valores correspondientes a cada estación meteorológica r al nivel de referencia (nivel del mar), como se expresa:

$$V_o = V_r - C \cdot A_r, \quad (5)$$

donde C es el coeficiente de regresión, V_r es el valor medido por la estación r , A_r es la altura de la estación r y V_o es el valor en el nivel de referencia.

Después, se aplica el método de interpolación IDW (ver Anexo 3) para interpolar los valores en toda el área, obteniendo una malla de valores en el nivel de referencia. Por último, se restablece a la altura de cada punto de la malla según la topografía del área, como se expresa:

$$V_{i,j} = V_o + C \cdot A_{i,j} \quad (6)$$

donde $V_{i,j}$ es el valor en el punto de la cuadrícula (i, j) , $A_{i,j}$ es el valor de altura en la cuadrícula (i, j) y V_o es el valor en el nivel de referencia.

3. Metodología

La metodología se desarrolló en tres fases principales, cada una correspondiente a cada objetivo específico. La fase preliminar, donde se definieron las características de la herramienta basada en el Atlas Climático Alemán y se recopilaron los datos climáticos necesarios. La fase intermedia, que abarcó desde el procesamiento de los datos hasta la obtención de gráficos que permitieran ilustrar el cambio climático y la fase final, en la que se implementaron los gráficos en VENICE, un libro interactivo en Jupyter Notebook para los estudiantes.

3.1. Fase Preliminar

3.1.1. *Características de la nueva herramienta*

En la fase preliminar, se establecieron las características a adaptar del Atlas Climático Alemán. Esta es una herramienta “online” basada en la representación de datos históricos y proyecciones futuras por medio de mapas climáticos de Alemania y sus estados federales. En particular, esta herramienta permite comparar valores absolutos recientes y sus respectivas Anomalías Climáticas con la normal climática (1971-2000) de referencia. Estos mapas se encuentran disponibles para un total de 23 parámetros entre los que se encuentra la temperatura del aire, precipitación, entre otros. De la misma forma, se incluye series de tiempo que muestran la tendencia del promedio nacional de distintas variables climáticas.

En el presente trabajo se adaptó la visualización simultanea de mapas históricos de referencia y recientes para ilustrar el efecto del cambio climático en Magdalena y Santander (Colombia). Para ello, se emplearon mapas de normal climática (1981-2010) para ilustrar el clima en el pasado, así como valores absolutos y anomalías climática de cada mes entre 2011-2020 para mostrar la información más reciente (ver figura 1 y 2). Asimismo, se implementaron listas despegables para la selección interactiva de los parámetros de los mapas. Por otro lado, también se utilizaron series de tiempo para ilustrar la tendencia del promedio de las variables climáticas a nivel nacional.

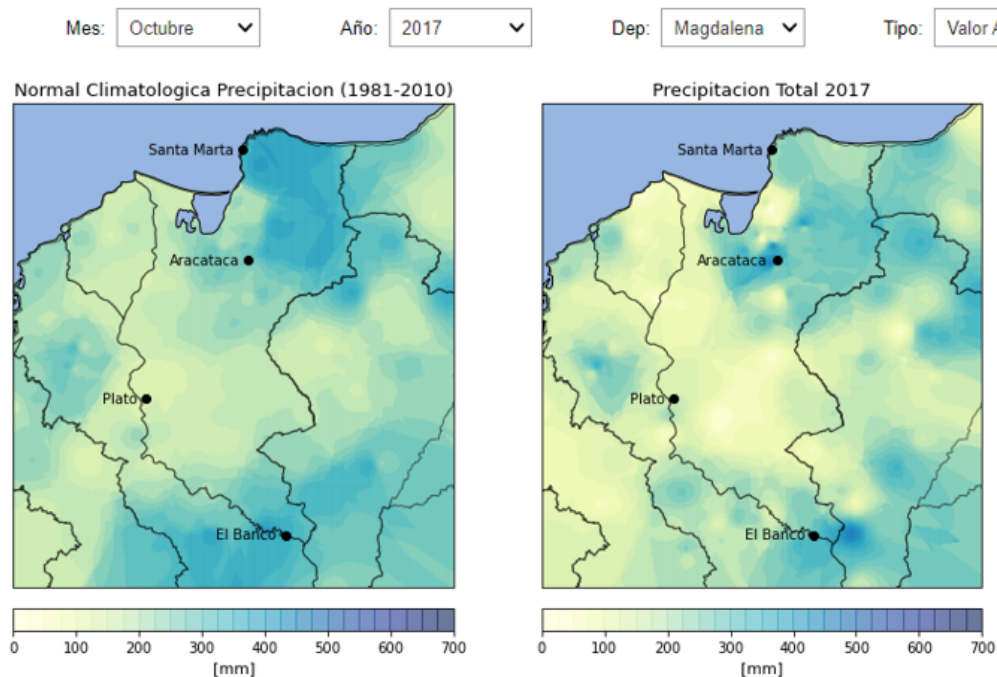


Figura 1. Mapa de normal climática en el periodo 1981-2010 (izquierda) estándar de octubre y precipitación total de octubre de 2017 (derecha) en el departamento del Magdalena. Es posible visualizar una disminución en la precipitación total mediante la comparación de ambos mapas.

A diferencia del Atlas Climático Alemán, la herramienta desarrollada se limitó solamente a representar los datos históricos de las variables temperatura, precipitación y nivel del mar. Se escogieron la temperatura y precipitación, ya que son los principales indicadores de cambio climático en Colombia. Además, cuentan con mayor disponibilidad de información que otras variables en las fuentes de información en Colombia. Por otra parte, se agregó la variable Nivel del Mar con el fin de evidenciar el impacto del cambio climático en las zonas costeras. En particular, se aplicó para mostrar la tendencia de esta variable en la costa del departamento del Magdalena.

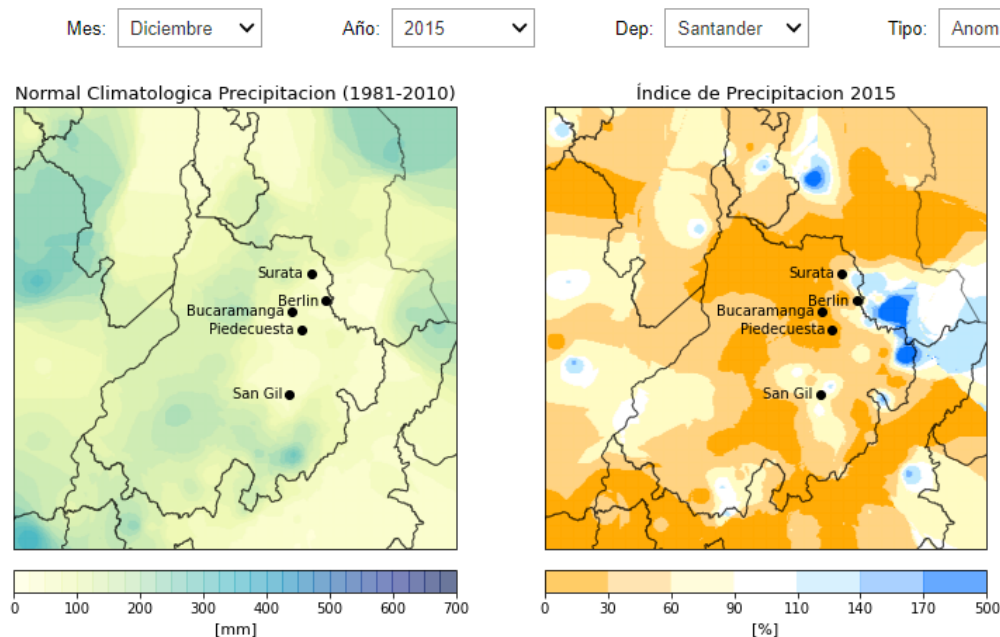


Figura 2. Mapa de normal climática en el periodo 1981-2010 (izquierda) estándar de diciembre e índice de precipitación [%] de diciembre de 2015 (derecha) en el departamento del Santander. Es posible visualizar un decrecimiento en la precipitación.

3.1.2. Adquisición de Datos de Normales y Anomalías Climáticas

Para empezar, se identificaron las fuentes de información que proveen datos de las variables climáticas seleccionadas en las áreas de estudio (ver tabla 1). Estas fueron: IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), para la obtención de datos climáticos de temperatura y precipitación; y UHSLC (University of Hawaii Sea Level Center) para los datos del Nivel del Mar. Luego, se solicitó los datos de normal climática (1981-2010) estándar de cada mes, el valor absoluto y anomalía climática mensual de los años recientes (2011-2020) para cada una de las estaciones en estas áreas.

Tabla 1

Datos de Temperatura, Precipitación y Nivel del Mar obtenidos por las fuentes de información.

Variable	Detalle	Frecuencia	Cantidad	Lugar	Fuente
Temperatura	• Normal Climática de Temperatura • Temperatura Seca de las 7, 13, 18	• Promedio (1981-2010) • 3 datos por día (1984-2021)	• 147 estaciones • 654 estaciones	Colombia	IDEAM
Precipitación	• Normal Climática de Precipitación • Día Pluviométrico	• Promedio (1981-2010) • Diario (2011-2020)	• 902 estaciones • 3287 estaciones	Colombia	IDEAM
Nivel del Mar	Nivel Medio del Mar	• Diario (1993-2019) • Diario (2013-2018))	• 1 estación • 1 estación	• Cartagena • Santa Marta	UHSLC

A pesar de que el IDEAM si compartió los valores de la normal climática (1981-2010) estándar por mes de cada estación, no adjuntó los valores de Anomalía Climática de años recientes. En cambio, se recibió los valores de temperatura seca a las 7, 13, 19 horas de cada estación, cuyo promedio corresponde a la variable de Temperatura Media Diaria (IDEAM, 2018, p. 23). De esta

manera, se procesó hasta obtener la Temperatura Media Mensual de cada estación por medio de la ecuación 2, para cada mes entre 2011-2021.

Por otro lado, los datos recibidos de precipitación correspondieron a la medida de un día pluviométrico, por lo que en este caso también se procesó hasta obtener la Precipitación Total Mensual. En ambos casos, se estableció un mínimo de 80% de los datos totales como condición para realizar el cálculo. Por último, a partir de la Temperatura Media Mensual, la Precipitación Total Mensual y las respectivas normales climatológicas (1981-2010) se obtuvieron los valores de Anomalía Climática, tal como se especifica más adelante en la Fase Intermedia.

Por otra parte, se seleccionaron las estaciones que tuvieran datos de normal climática en el periodo 1981-2010 con el fin de permitir el análisis de Anomalía Climática de los años recientes en dichos departamentos. Después, se analizó la distribución espacial y número de estaciones disponibles como se ilustra en figura 3 y 4. En general, se pudo observar un número bastante reducido de estaciones con datos de temperatura con respecto a las que proveen datos de precipitación.

Específicamente, se encontraron solo 4 estaciones en el departamento del Magdalena que cumplen la condición establecida, como se observa en la figura 3. Por tanto, se decidió incluir las estaciones más cercanas por fuera del área departamental, conformando en total un área con 10 y 31 estaciones para generar los mapas de normal climática de temperatura en el Magdalena y Santander, respectivamente. De igual modo, para la normal climática de precipitación se formó un

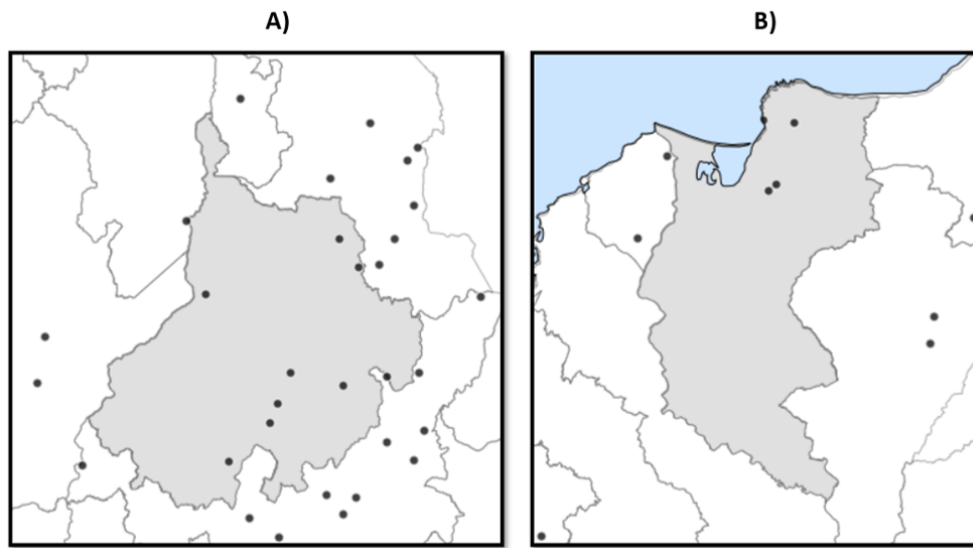


Figura 3. Distribución espacial de las estaciones usadas para generar mapas de temperatura en A) Santander y B) Magdalena. Se observa un número bastante reducido de estaciones con registro de normal climática de temperatura en el periodo 1981-2010.

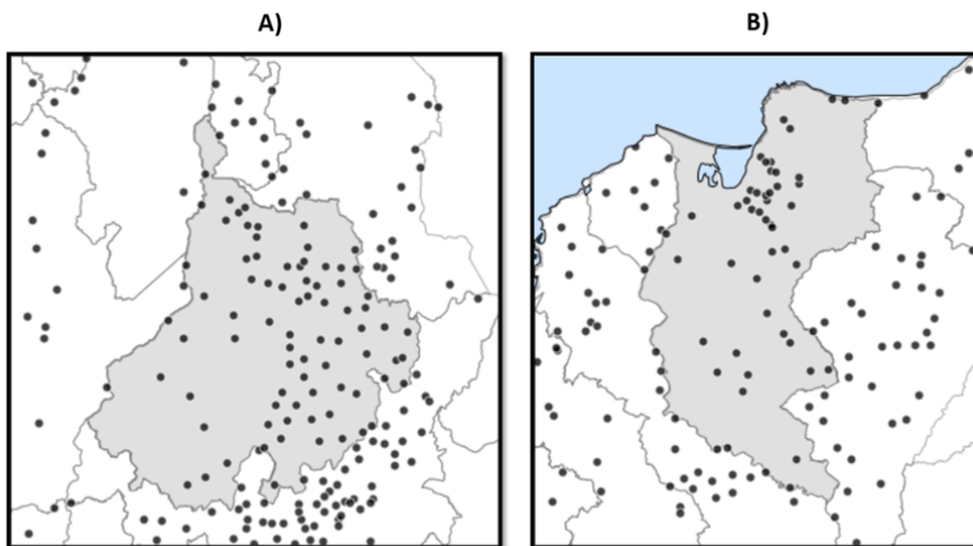


Figura 4. Distribución espacial de las estaciones usadas para generar mapas de precipitación en A) Santander y B) Magdalena. Se muestra una mayor densidad de estaciones con datos de normal climática de precipitación (1981-2010).

conjunto de 137 estaciones para Magdalena y 191 para Santander (ver figura 4).

3.1.3. Adquisición de Datos del Promedio Nacional Anual

Además, se recopilaron los datos para generar el gráfico de tendencias para la Temperatura Promedio de Colombia en el periodo entre 1984-2020. Primero, se seleccionaron las estaciones con mayor cantidad de datos y tiempo de operación en dicho periodo. Igualmente, se procuró garantizar la representación nacional en la distribución de las estaciones, como se muestra en la figura 20. Esta selección se realizó dentro del conjunto de estaciones con datos de Temperatura Diaria compartidos por el IDEAM para el periodo 1984-2020 a nivel nacional. En total, se escogió 228 estaciones para calcular el promedio a Nivel Nacional. De la misma manera, se seleccionó 1168 estaciones para representar la Precipitación Promedio de Colombia entre 1980-2020. La distribución de las estaciones representativas a nivel nacional se puede consultar en el anexo ??.

Ahora bien, a partir de los datos de temperatura y precipitación diaria se halló la temperatura media y precipitación total mensual de cada estación según las ecuaciones 2 y 4, respectivamente. Asimismo, se aplicó la condición de que cubriera un mínimo de 80 % del total de datos para realizar dicho cálculo, ya que existen lapsos en que las estaciones no registran datos. Posteriormente, se calculó el promedio anual de cada estación. Así pues, se obtuvo el promedio anual nacional de temperatura y precipitación a partir del promedio anual de todas las estaciones.

3.1.4. Adquisición de Datos de Nivel del Mar

En esta fase del proyecto se recopilieron los datos necesarios para representar la tendencia del aumento del nivel del mar en el departamento del Magdalena. Para ello, se identificaron los mareógrafos en la zona en los datos de UHSLC (University of Hawaii Sea Level Center) tal que contaran con calidad de la investigación (Caldwell et al., 2015). Al final, se obtuvo el nivel del mar diario de un mareógrafo ubicado en Santa Marta (Magdalena) con datos en el periodo 2013-2018. Sin embargo, se necesita al menos 10 años para realizar análisis climatológico (OMM, 2018, p. 32). Por tal razón, también se estudió los datos del mareógrafo más cercano ubicado en Cartagena (Bolívar), el cual posee datos entre 1993-2019.

3.2. Fase Intermedia

VENICE, la herramienta obtenida en este trabajo se apoyó principalmente en mapas y series de tiempo interactivas para ilustrar el cambio climático en los departamentos de Magdalena y Santander. Por lo tanto, fue necesario obtener los mapas climáticos y series de tiempo de las variables temperatura, precipitación y nivel del mar. Además, se implementó librerías de Python para la visualización interactiva de estos datos.

3.2.1. Gráficos Interactivos

Se implementaron funciones interactivas en los mapas y series de tiempo por medio de librerías en Python. En el caso de los mapas, se usó la librería Ipywidgets para permitir escoger el mes, año y lugar (departamento) del mapa reciente a visualizar. Por otra parte, se empleó la librería Plotly para producir las series de tiempo.

3.2.1.1. Ipywidgets. Esta librería permitió interactuar con los mapas climáticos por medio de listas desplegables. Para ser más específicos, posibilita explorar los mapas obtenidos por medio de la selección del departamento (Magdalena o Santander), año (2011 a 2020), mes y el tipo de mapa reciente (valor absoluto o anomalía climática). De igual forma se habilitó una casilla de verificación para ver los valores exactos en los distintos municipios.

3.2.1.2. Plotly. Se generó todas las series de tiempo de VENICE usando la librería de Plotly en Python. Plotly es una librería que provee un amplio conjunto de funciones interactivas en sus gráficos que pueden usarse de forma “offline”. En específico, provee funciones que permiten desplazar el gráfico, hacer “zoom”, ver los valores de puntos que se encuentre debajo del cursor, entre otros. Por lo anterior, fue posible crear gráficos interactivos con datos del promedio nacional de temperatura y precipitación de los últimos 40 años. De igual forma, se representó la tendencia del nivel del mar en el departamento del Magdalena por medio de esta librería.

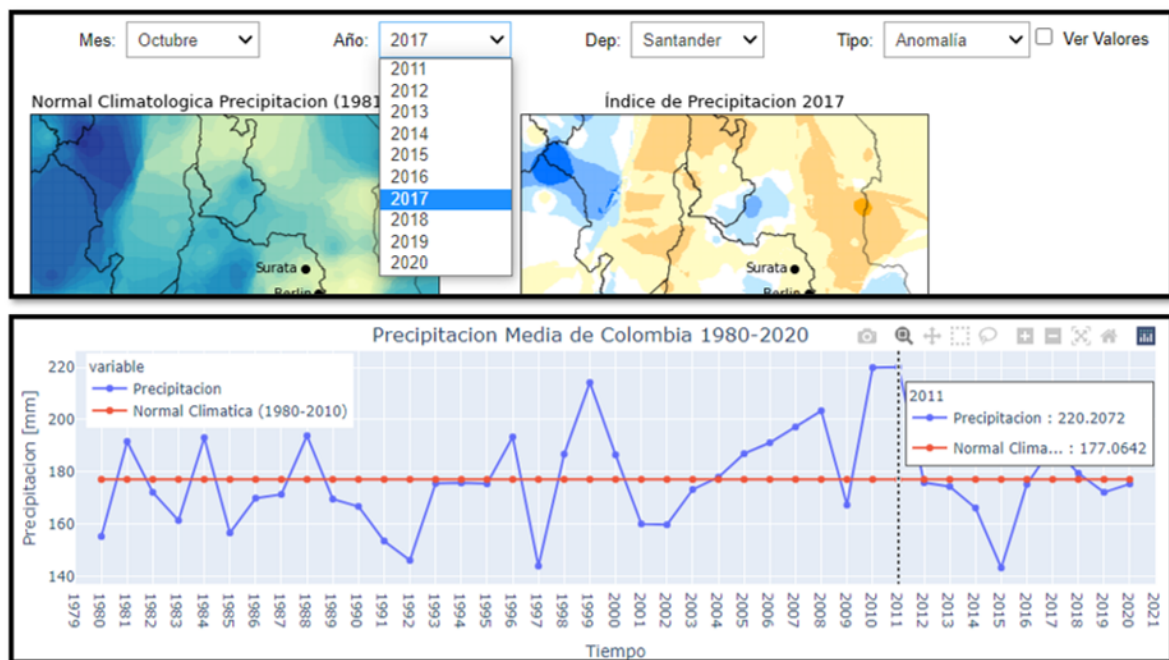


Figura 5. Captura de pantalla de implementación en VENICE de las librerías interactivas. Se usa Ipywidgets para explorar los mapas climáticos (arriba) y Plotly para generar una serie de tiempo que permita los inspeccionar los datos a lo largo del tiempo según el desplazamiento del cursor.

3.2.2. *Análisis para la corrección de efectos de la topografía en los mapas*

Ahora bien, es necesario corregir el efecto de la altitud en las variables para obtener mapas que puedan representar el cambio climático en Santander y Magdalena en la herramienta VENICE. Para lograr este objetivo, se adaptó el método seguido por el Atlas Climático Alemán para obtener mapas teniendo en cuenta la altitud topográfica.

En resumen, este método consiste en una reducción de los datos climatológicos a una misma altura, la cual se establece en el cero de referencia, es decir, el nivel del mar. Luego, se realiza

una interpolación IDW (distancia inversa ponderada) sobre el área definida. Por último, se reincorporan los valores obtenidos a sus alturas reales. Las reducciones y reincorporaciones mencionadas se realizan gracias a los gradientes de las variables climáticas con la altitud. Por esta razón, fue necesario realizar un análisis previo de la regresión entre estas variables para determinar si era factible aplicar esta metodología.

Por consiguiente, en este trabajo se aplicó el modelo de regresión lineal entre las variables climáticas y la elevación de las estaciones donde se recolectaron los datos. Luego, se evaluaron por medio del coeficiente de correlación de Pearson para cada conjunto de datos. Estos resultados se muestran en la figura 6 para el conjunto de datos de normal climática (1981-2011) estándar de cada mes y cada valor medio mensual entre 2011 y 2020.

Al final, se obtuvo que los conjuntos de datos de temperatura están altamente correlacionados con la elevación. No obstante, esta relación se muestra baja en Magdalena en el año 2020 y enero de 2019. Este comportamiento se debe a que, en este periodo, el número de estaciones con registro de datos de temperatura disminuye abruptamente (menor que cinco). Por lo anterior, se asignó el gradiente del año más reciente, esto es, el obtenido en 2019 y enero de 2018, respectivamente. De este forma, fue posible aplicar el método seguido por el Atlas Climático Alemán para obtener los mapas de la variable climática de temperatura.

Por lo que se refiere a los datos de precipitación, se encontró una correlación bastante baja

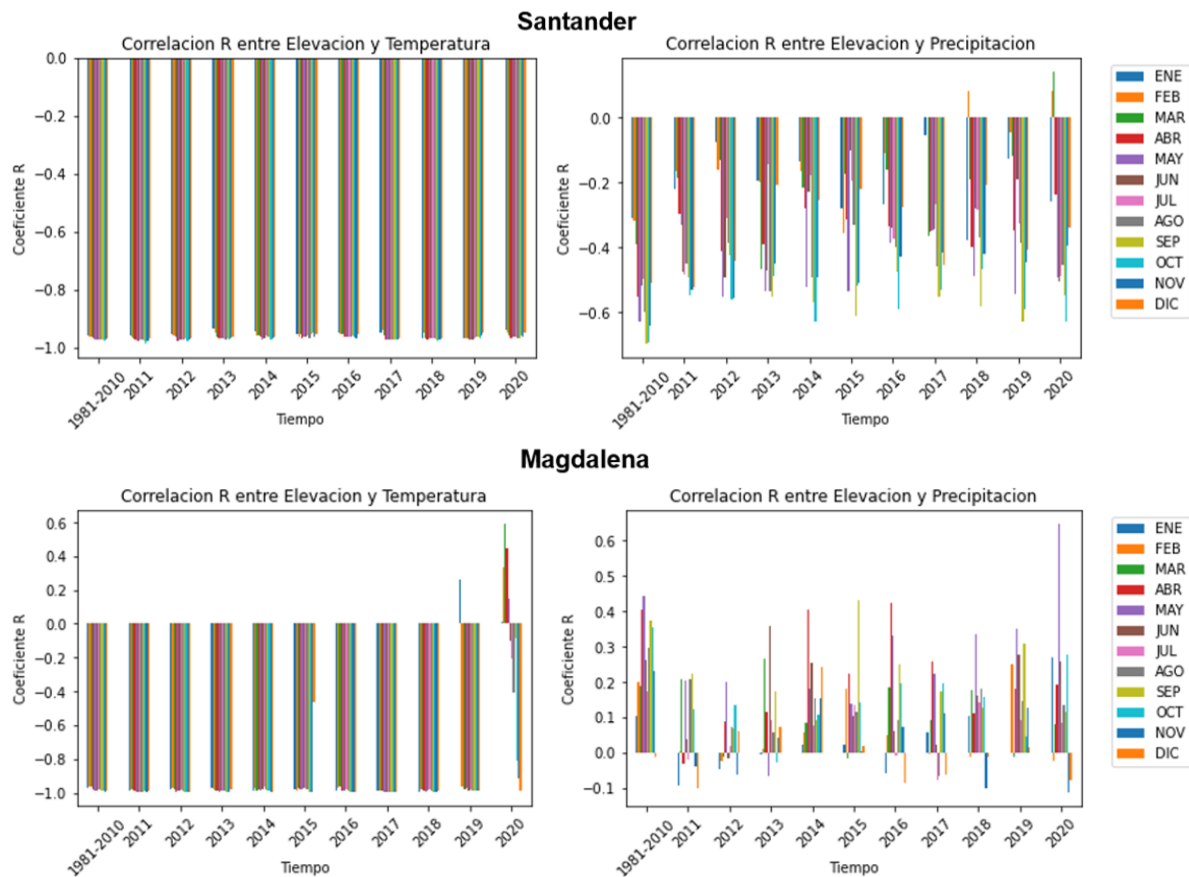


Figura 6. Coeficiente de correlación lineal (R) de Pearson entre las variables climáticas y altitud topográfica para el conjunto de datos recientes (2011-2020) y normal climática estándar (1981-2010) de cada mes. Es posible observar correlaciones altas entre el conjunto de datos de temperatura y la altitud de las estaciones.

basado en los resultados en la figura 6. En consecuencia, no se pudo seguir la metodología seguida por el Atlas Climático Alemán para generar los mapas de este parámetro. En cambio, se aplicó la metodología sin tener en cuenta la altitud. De esta manera, se aplicó solamente el proceso de interpolación IDW al conjunto de datos de precipitación para la obtención de los mapas.

3.2.3. *Mapas de Temperatura y Precipitación*

Examinaremos brevemente ahora, la metodología para la obtención de los mapas climáticos en VENICE. Los mapas de la variable precipitación se generan por medio de la interpolación IDW de los datos del conjunto de estaciones. Por otro lado, los mapas de la variable temperatura siguen la metodología para la corrección de efectos de topografía.

En primer lugar, se aplicó la ecuación (6) para reducir los datos de la variable climática proporcionada por cada estación usando el gradiente correspondiente y la altitud de cada estación. Entonces, se realizó el proceso de interpolación IDW al conjunto de valores reducidos. Así, se logró obtener una grilla o malla de 350×350 con datos de temperatura. Finalmente, se realizó la reincorporación de los valores en la grilla por medio de la ecuación (5) a partir del gradiente y la altitud de cada punto en la malla.

Cabe señalar que se adquirió los datos de elevación por medio de archivos del IDEAM y modelos de elevación digital (DEM) del satélite ALOS PALSAR. En el caso del primero, se obtuvo la altitud de cada estación por medio del archivo “catálogo de estaciones” ubicado en la sección “Recursos” del Dhime ⁷, la cual es la plataforma del IDEAM para la descarga de información meteorológica. En el caso del segundo, se consiguió la altitud para cada punto en la malla por medio

⁷ Dhime; <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>

de un Modelo de Elevación Digital (DEM) de las áreas de estudio. Este DEM se creó a partir de un conjunto de DEM recolectadas por el satélite Alos Palsar con resolución de 12.5m disponibles en la base de datos de “Alaska Satellite Facility”⁸.

Posteriormente, se generó los mapas de Anomalía Climática a partir de los mapas de normal climática (1981-2010) y de valor medio mensual (2011-2020) de cada mes. Para ello, se calculó el valor de anomalía de cada punto en el mapa de valor medio mensual (reciente) respecto al correspondiente en el mapa de normal climática (referencia). Por tanto, se aplicaron las ecuaciones 1 y 3 para hallar la Anomalía de Temperatura e Índice de Precipitación, respectivamente.

3.2.4. Serie de Tiempo del Nivel del Mar

En cuanto a la obtención de una representación en VENICE de la tendencia del nivel del mar, se estudió los datos de esta variable en Santa Marta (Magdalena) y Cartagena (Bolívar). Es importante señalar el hecho de que cada mareógrafo en el UHSLC posee un nivel de referencia cero relativo característico. Por tanto, fue necesario hallar la diferencia entre los ceros de ambos mareógrafos por medio de los datos registrados en días comunes. De modo que se realizó un gráfico de dispersión del nivel del mar en Santa Marta y Cartagena en el periodo 2013-2018, donde cada punto es un día común a ambos mareógrafos. Después, se aplicó un ajuste lineal (ver figura

⁸ Alaska Satellite Facility; <https://search.asf.alaska.edu/#/>

7) obteniendo una pendiente de 1.11 con coeficiente de correlación R^2 de 0.69 y un coeficiente de Pearson de 0.83. Esto nos indica que la constante 859.97 [mm] es la diferencia entre el nivel de referencia de las estaciones. En concreto, si establecemos un cero de referencia en la escala de medición en Cartagena, el cero de Santa Marta estaría a 859.97 mm de distancia de este punto.

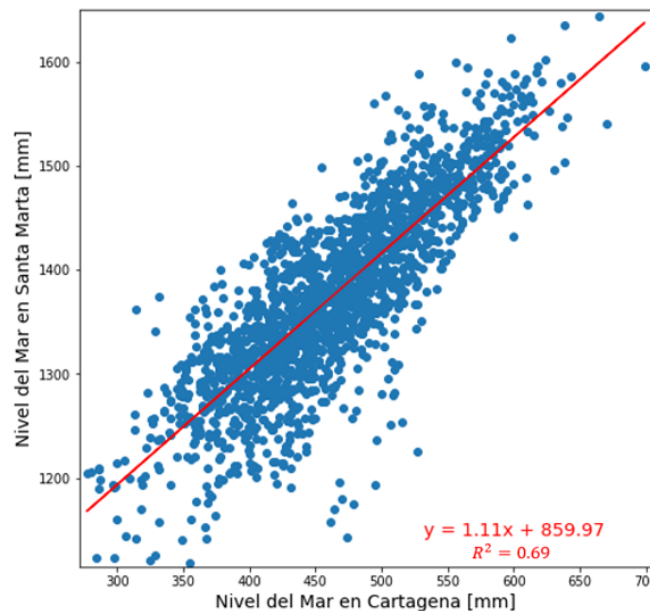


Figura 7. Nivel del Mar en Santa Marta (eje y) vs Cartagena (eje x) donde cada punto es un valor tomado en un día en común entre 2013-2018. La constante 859.97 mm se interpreta como la diferencia entre el nivel de referencia de ambas estaciones.

A partir de esto, se estableció un cero de referencia en común para ambas estaciones: el relativo a la estación en Santa Marta. Luego, se hizo una normalización de los datos con el fin de comparar en una escala en común (0 a 1) y reducir errores producidos por la escala de medición. Por último, se calcula la covarianza y el error cuadrático medio (RMSE) entre los datos de ambas

estaciones. De esta manera, se pudo evaluar si existe una dependencia entre la variación del nivel del mar en el periodo 2013-2018 en Santa Marta y Cartagena, y, por tanto, si es posible analizar el nivel del mar en Santa Marta a través de los datos más completos en Cartagena.

Posteriormente, se encontró que el comportamiento de los datos normalizados del nivel del mar en Santa Marta (rojo) y Cartagena (azul) es bastante similar, tal como se muestra en la figura 8. En concreto, se encontró una covarianza de 0.02 y error cuadrático medio (RMSE) de 0.11. Esto muestra que dichos mareógrafos registran una variación conjunta del nivel del mar bastante similar. Por lo tanto, fue posible analizar los datos de la tendencia del nivel del mar en el Magdalena a través de un registro más completo en Cartagena (1993-2019).

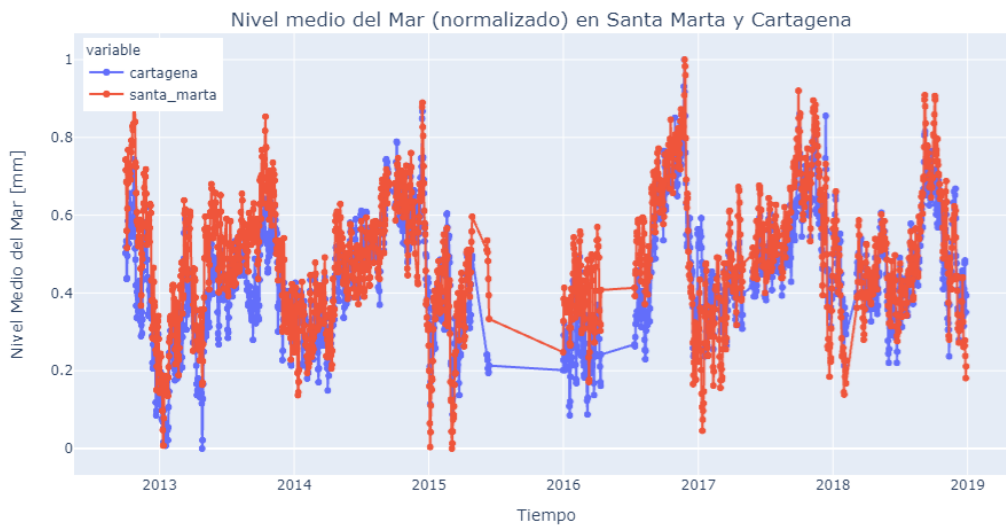


Figura 8. Nivel del Mar Diario en Santa Marta (rojo) y Cartagena (azul) en el periodo 2013-2018 donde punto representa el valor diario medido al cero relativo a Santa Marta. La variación del nivel del mar en ambas estaciones muestra un comportamiento similar.

3.3. Fase Final

En la fase final, se creó un libro de Jupyter Notebooks (VENICE) a partir de los mapas y series de tiempo interactivas. En primer lugar, se organizaron los gráficos en tres secciones correspondientes a cada variable climática: temperatura, precipitación y nivel del mar. Por lo cual, se creó un cuaderno de Jupyter Notebook para cada variable climática. Para ilustrar mejor, en la figura 9 se muestra el cuaderno de VENICE que representa la variable temperatura. Al mismo tiempo, se crearon secciones con información sobre la herramienta y conceptos básicos de cambio climático. Luego, se comprobó que las librerías usadas tanto para generar los mapas y series de tiempo pudiera ejecutarse de forma “offline”, es decir, sin ningún tipo de conexión a internet.

Finalmente, se comprobó la información obtenida en los gráficos implementados en VENICE. Para ello, se recopiló la bibliografía con la información de referencia correspondiente a cada gráfico obtenido. En el caso de los mapas climáticos, se recurrió al Atlas Climatológico de Colombia⁹ y a los Boletines Climatológicos Mensuales del IDEAM¹⁰ para obtener los mapas de normal climática (1981-2011) y anomalía climática de referencia, respectivamente. Debido a la gran cantidad de mapas para esta última variable (480 mapas entre 2011-2021), se decidió analizar solo los mapas mensuales de 2012, 2014 y 2016 para la Anomalía de Temperatura Media y el Índice de

⁹ Atlas Climatológico de Colombia; <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>

¹⁰ Boletines Climatológicos; <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/climatologico-mensual>

Precipitación de cada departamento.

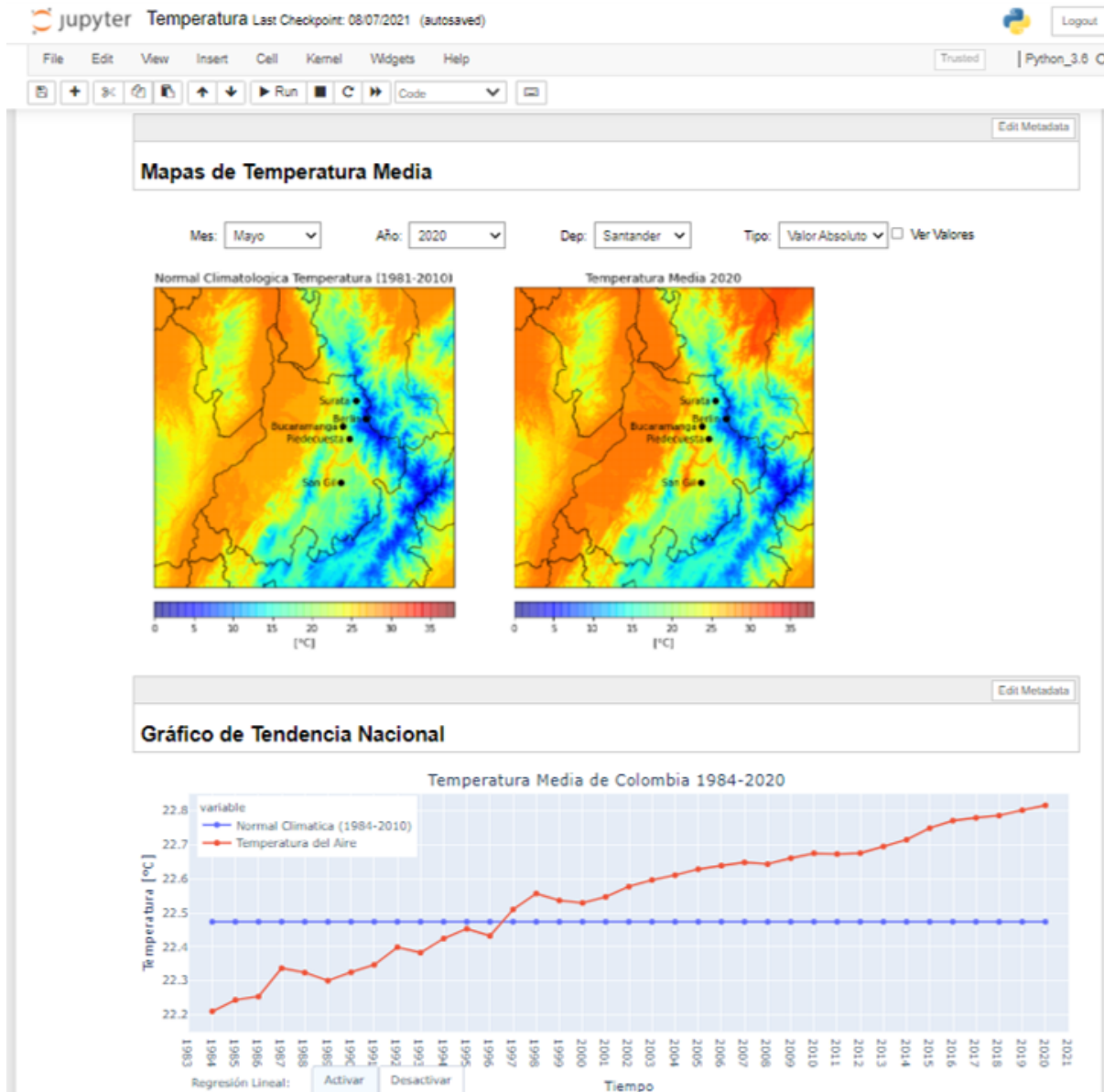


Figura 9. Captura de pantalla de la sección de VENICE correspondiente a la variable temperatura. Los mapas permiten comparar simultáneamente el clima en el pasado y el presente en ambos departamentos, mientras que las series de tiempo representan la tendencia del promedio nacional.

Posteriormente, se procesaron cada uno de estos mapas en MATLAB hasta obtener la correlación entre ambas imágenes. Por tal motivo, se modificó la escala de colores y la dimensión de los mapas obtenidos con el fin de que coincidieran con los de referencia. Por otra parte, para verificar los gráficos de tendencia del Promedio de Temperatura y Precipitación Media en Colombia se usó como referencia gráficas equivalentes publicados por el IDEAM para el periodo entre 1980-2011 (Benavides & Rocha, 2012) . En esta publicación, se incluyen cálculos de la tasa de aumento mediante el modelo lineal para cada una de estas variables. Por lo tanto, se realizó una regresión lineal a la gráfica obtenida para el periodo mencionado y se analizó la pendiente obtenida.

4. Resultados

Los resultados de este proyecto consisten en mapas climáticos de media mensual y anomalía climática de temperatura y precipitación en los años recientes (2011-2021) así como mapas de normal climática (1981-2010) de referencia para cada mes. Esto se realizó para dos regiones de Colombia: Magdalena y Santander. Por otro lado, se generó el gráfico de tendencia de temperatura y precipitación media nacional. Finalmente, se recopiló los gráficos obtenidos en un libro de Jupyter Notebook para desarrollar la herramienta VENICE: un Visualizador para la Enseñanza Interactiva del cambio climático en Escuelas.

4.1. Mapas Climáticos

Los mapas climáticos obtenidos se clasifican en mapas de normal climática del periodo de referencia 1981-2010 y mapas de años recientes 2010-2020. Estos últimos, para el valor absoluto mensual y la anomalía respecto a la normal climática 1981-2010 de cada variable. Un ejemplo de dichos mapas se muestra en las figuras 10 y 11 correspondientes al valor absoluto y Anomalía Climática, respectivamente, de temperatura en enero de 2019 en Santander.

A causa de la gran diversidad de climas característicos en la región de Santander y Magdalena es difícil visualizar el valor exacto en un punto de interés del mapa. Por tal motivo, se habilitó una opción para visualizar los valores de algunos municipios en el mapa (ver figura 10). Dicha

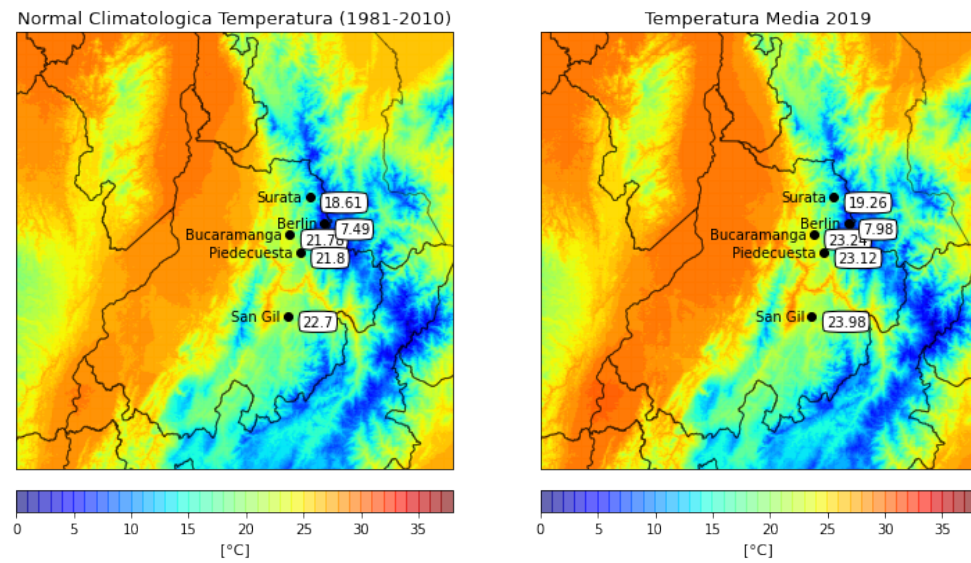


Figura 10. Mapas de Normal Climática de Temperatura (izquierda) y Valor Absoluto de Temperatura Media (derecha) de Santander en Enero 2019. Se puede visualizar los valores de temperatura en distintos municipios de Santander: Bucaramanga, Piedecuesta, San Gil, Berlin y Suratá.

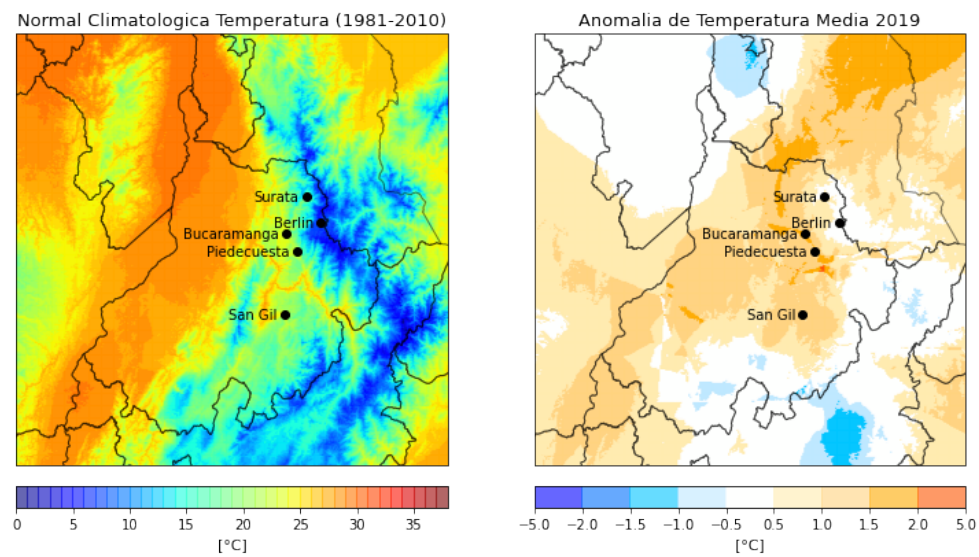


Figura 11. Mapas de Normal Climática de Temperatura (izquierda) y Anomalía de Temperatura Media (derecha) de Santander en Enero 2019. Se puede observar un aumento de la temperatura entre 0.5 a 2.0 °C en 2019 respecto al promedio 1981-2010 estándar de enero.

opción se muestra por medio de una casilla de verificación creada por medio de librería Ipywidget. Igualmente, se creó un widget de listas despegables para seleccionar el año, mes, lugar (departamento) y tipo de análisis (valor absoluto o anomalía) de preferencia. Así, se implementó funciones interactivas en los mapas climáticos obtenidos por medio de la librería Ipywidget de Python.

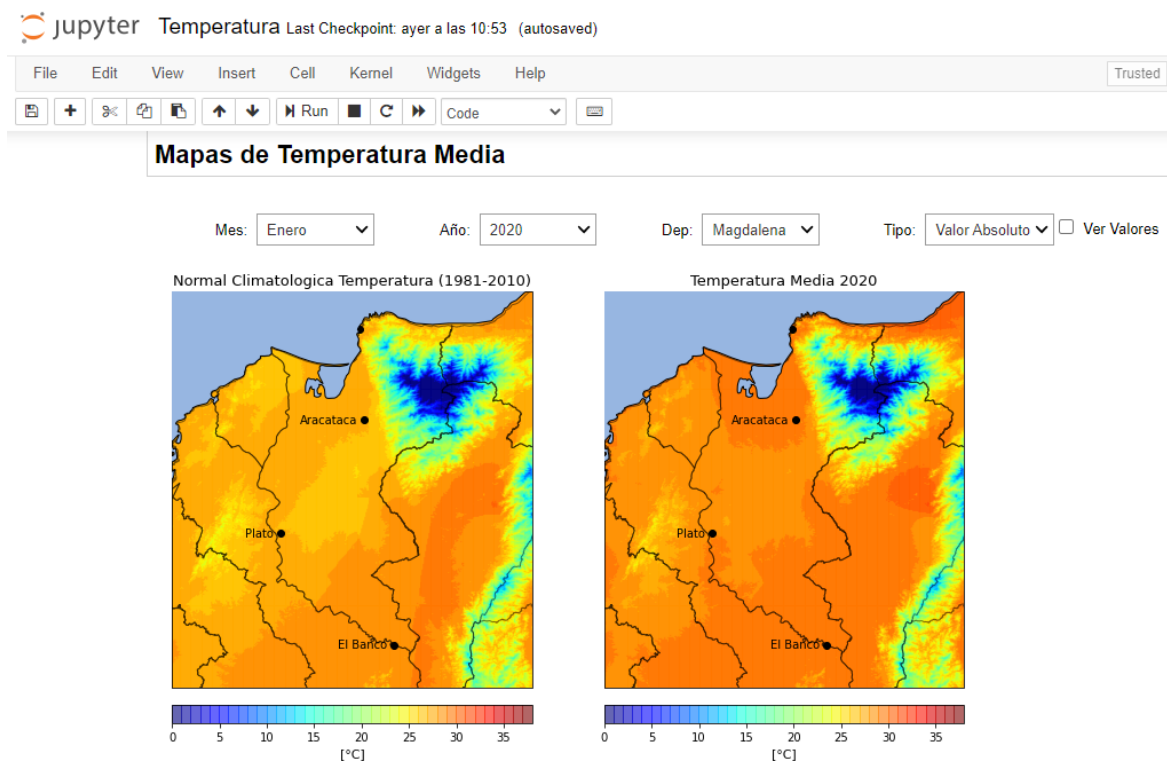


Figura 12. Captura de pantalla del mapa interactivo de Temperatura Media en Jupyter Notebook. El estudiante podrá observar simultáneamente tanto el mapa reciente como el histórico de referencia.

Con respecto a tendencias de cambio climático, es posible observar algunas evidencias generales al comparar entre sí los mapas de anomalía de temperatura entre 2011-2020. En general,

se evidencia un aumento de la temperatura en Magdalena y Santander. Además, se muestra la disminución de la precipitación total mensual en el Magdalena y Santander. Estas observaciones son conformes con los escenarios del cambio climático (IDEAM et al., 2015), donde se proyecta un aumento general de la temperatura y disminución de la precipitación en ambos departamentos.

Por otro lado, se realizó un análisis de los mapas obtenidos teniendo como referencia los mapas publicados en los boletines climatológicos mensuales del IDEAM. Para tal fin, se obtuvo la correlación entre los mapas de referencia y las imágenes obtenidas para la normal climática (1981-2010) como se evidencia en la tabla 2. De modo similar, se realizó este procedimiento para los mapas de años recientes (2012, 2014 y 2016), en concreto, los mapas de Anomalía de Temperatura (ver tabla 4) e Índice de Precipitación (ver tabla 3).

Ahora bien, se observa que el promedio de todos los valores de correlación obtenidos para la normal climática de temperatura (0.69 de correlación) es mayor que el calculado para los valores de Anomalía de Temperatura (0.5 de correlación). De igual modo, se obtuvo que el promedio de los valores de correlación de la normal climática de Precipitación (0.71) fue mayor que el obtenido para el Índice de Precipitación (0.47 de correlación). Esto se debe a que la metodología en la obtención de los mapas de Anomalía Climática por el IDEAM difiere de la seguida en este trabajo. En específico, en el primero se calcula el valor para cada estación y luego se interpola en toda la región (IDEAM, 2020, p. 1) mientras que, en el presente trabajo se calculó el valor para cada unidad de cuadrícula a partir de la correspondiente unidad en los mapas de valor absoluto mensual

Tabla 2

Correlación de Mapas de normal climática de MGN: Magdalena y SND: Santander.

Mes	Temperatura		Precipitación	
	MGM	SND	MGM	SND
Enero	0.73	0.71	0.90	0.81
Febrero	0.71	0.74	0.89	0.82
Marzo	0.73	0.75	0.75	0.66
Abril	0.76	0.68	0.69	0.81
Mayo	0.71	0.62	0.70	0.20
Junio	0.72	0.69	0.60	0.66
Julio	0.70	0.71	0.60	0.65
Agosto	0.72	0.70	0.61	0.74
Septiembre	0.66	0.63	0.73	0.80
Octubre	0.71	0.63	0.81	0.69
Noviembre	0.64	0.61	0.62	0.71
Diciembre	0.68	0.62	0.76	0.81
Promedio	0.71	0.67	0.72	0.70

y la normal de referencia.

Teniendo en cuenta que se obtuvo un valor aproximado de 0.7 de correlación para los mapas de normal climática y 0.5 para los mapas de Anomalía Climática se puede inferir que muestran una correlación moderada respecto a los mapas de referencia. En consecuencia, a pesar de que los mapas obtenidos para las normales y Anomalías Climatológicas no son muy precisos muestran ser aceptables para ilustrar cambio climático en estas regiones.

Tabla 3

Correlación de los mapas de Anomalía de Temperatura en Magdalena y Santander.

Mes	Magdalena			Santander		
	2012	2014	2016	2012	2014	2016
Enero	0.58	0.21	0.36	0.55	0.42	0.47
Febrero	0.48	0.30	0.49	0.37	0.39	0.54
Marzo	0.47	0.20	0.50	0.50	0.37	0.53
Abril	0.49	0.32	0.44	0.45	0.62	0.50
Mayo	0.46	0.35	0.41	0.72	0.40	0.56
Junio	0.55	0.61	0.44	0.68	0.55	0.35
Julio	0.62	0.72	0.59	0.65	0.52	0.53
Agosto	0.52	0.34	0.64	0.43	0.40	0.52
Septiembre	0.49	0.42	0.69	0.57	0.39	0.56
Octubre	0.56	0.46	0.56	0.63	0.66	0.62
Noviembre	0.47	0.55	0.62	0.64	0.51	0.63
Diciembre	0.44	0.42	0.61	0.62	0.40	0.55
Promedio	0.51	0.41	0.53	0.57	0.47	0.53

Tabla 4

Correlación de los mapas de Índice de Precipitación en Magdalena y Santander.

Mes	Magdalena			Santander		
	2012	2014	2016	2012	2014	2016
Enero	0.32	0.43	0.39	0.51	0.44	0.43
Febrero	0.36	0.30	0.35	0.51	0.47	0.41
Marzo	0.43	0.25	0.40	0.68	0.46	0.45
Abril	0.55	0.39	0.46	0.65	0.53	0.47
Mayo	0.52	0.43	0.46	0.55	0.48	0.47
Junio	0.50	0.49	0.36	0.47	0.52	0.45
Julio	0.42	0.60	0.58	0.11	0.26	0.50
Agosto	0.39	0.42	0.64	0.50	0.49	0.51
Septiembre	0.59	0.41	0.58	0.59	0.55	0.56
Octubre	0.43	0.45	0.44	0.48	0.54	0.46
Noviembre	0.49	0.42	0.60	0.53	0.46	0.52
Diciembre	0.48	0.32	0.44	0.57	0.39	0.45
Promedio	0.46	0.41	0.48	0.51	0.47	0.48

4.2. Gráficos de Tendencias

4.2.1. *Precipitación y Temperatura*

En este trabajo se generó dos gráficos de tendencias con datos de temperatura y precipitación media anual de Colombia en el periodo 1980-2021. Asimismo, se implementó la librería Plotly de Python con el objetivo de proveer interactividad a los gráficos. En particular, esta librería permite controlar el “zoom”, trasladarse por el eje, así como exportar y guardar el gráfico como imagen. De igual forma, se presenta los valores de cada punto en un cuadro según el modo del desplazamiento del cursor tal se observa en la figura 13.

Precisamente, esto es importante para que el estudiante compare el valor de temperatura y precipitación promedio de cada año con respecto a la normal climática, la cual es presentada para el periodo de referencia 1980-2010. Por otro parte, se agregaron botones de manera que permitieran mostrar y ocultar el modelo de regresión lineal del gráfico, lo cual posibilita el análisis del comportamiento de la variable climática a lo largo del tiempo. Por todo esto, se configuró el gráfico de manera que el estudiante sea capaz de establecer la diferencia entre el valor de referencia y el valor de cada año, así como identificar fácilmente la tendencia anual.

Ahora, para verificar los datos presentados en la gráfica se tuvo como referencia la temperatura media nacional entre 1980-2011 analizada en un estudio del IDEAM realizado por Benavides & Rocha (2012). En dicho estudio, se muestra una tendencia lineal de aumento de $0,198^{\circ}\text{C}$ por dé-

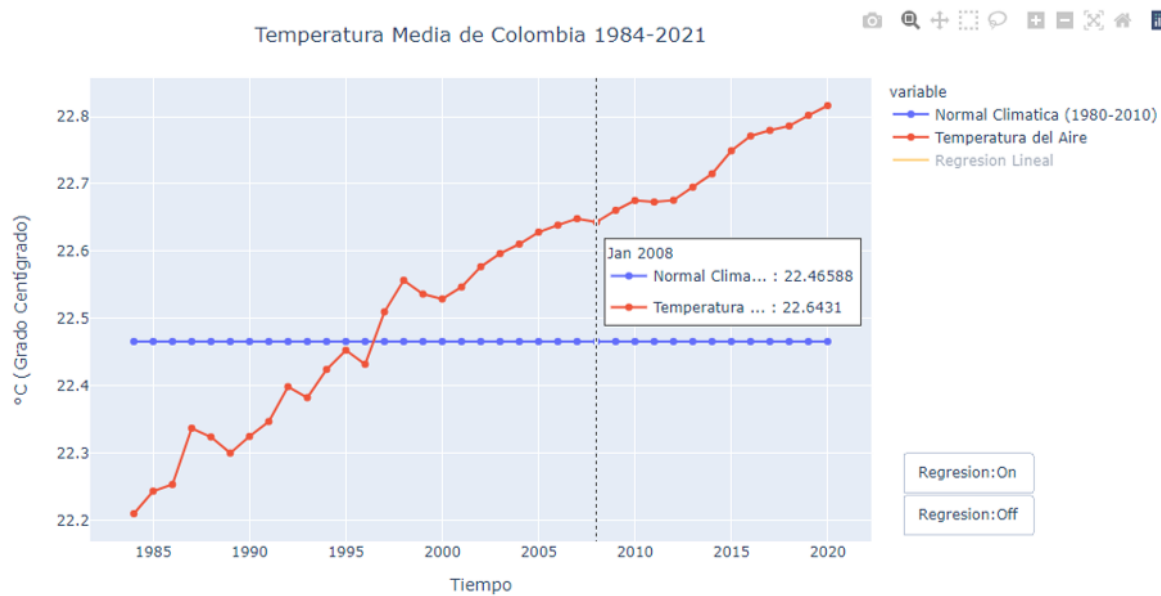


Figura 13. Gráfico de Tendencias de Temperatura Media de Colombia para cada año entre 1984-2020 (rojo) y el promedio de 1984-2010 como referencia (azul). Se evidencia un aumento del promedio de temperatura nacional de aproximadamente $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el periodo 1984-2020.

cada (ver Anexo A) mientras que la obtenida en el presente trabajo fue de $0.1804\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$ para el periodo 1984-2010 (ver figura 14). A partir de lo anterior, se puede calcular un error absoluto de $-0.0176\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{década}$ para la tasa de crecimiento obtenida. Adicionalmente, estas tasas coinciden en un aumento de la temperatura media nacional por lo que se determina que el gráfico obtenido es confiable para representar esta variable.

De la misma forma, se estudia la serie de tiempo de la precipitación promedio nacional de Colombia por medio de la gráfica equivalente presentada por el IDEAM en el periodo 1980-2011 (Benavides & Rocha, 2012, p. 10). En dicho estudio se calculó una tasa de crecimiento de $7,05\text{ mm}$

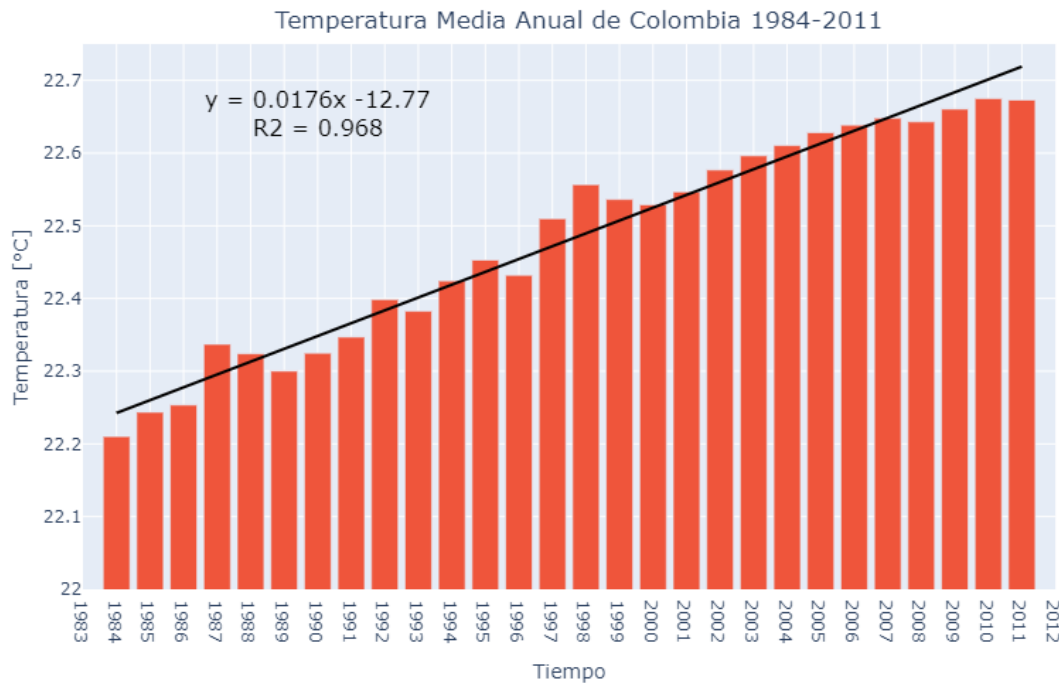


Figura 14. Regresión Lineal de la Temperatura Media de Colombia en el periodo 1984-2010. Es posible observar una tendencia de aumento de la temperatura 0.0176 °C/año en el periodo 1984-2011.

por década (ver Anexo A) mientras que al aplicar una regresión lineal en el mismo periodo con los datos obtenidos se obtiene una tasa de 9.64 mm/década (ver figura 15). Por tanto, se obtiene un error absoluto de 2.55 mm/década de la tendencia de aumento obtenida, lo cual indica que la tendencia de precipitación promedio nacional coincide con el de referencia. De igual forma, estas tasas coinciden en un aumento de la precipitación media nacional. Por este motivo, el gráfico de tendencias de precipitación obtenido es apropiado para representar esta variable.

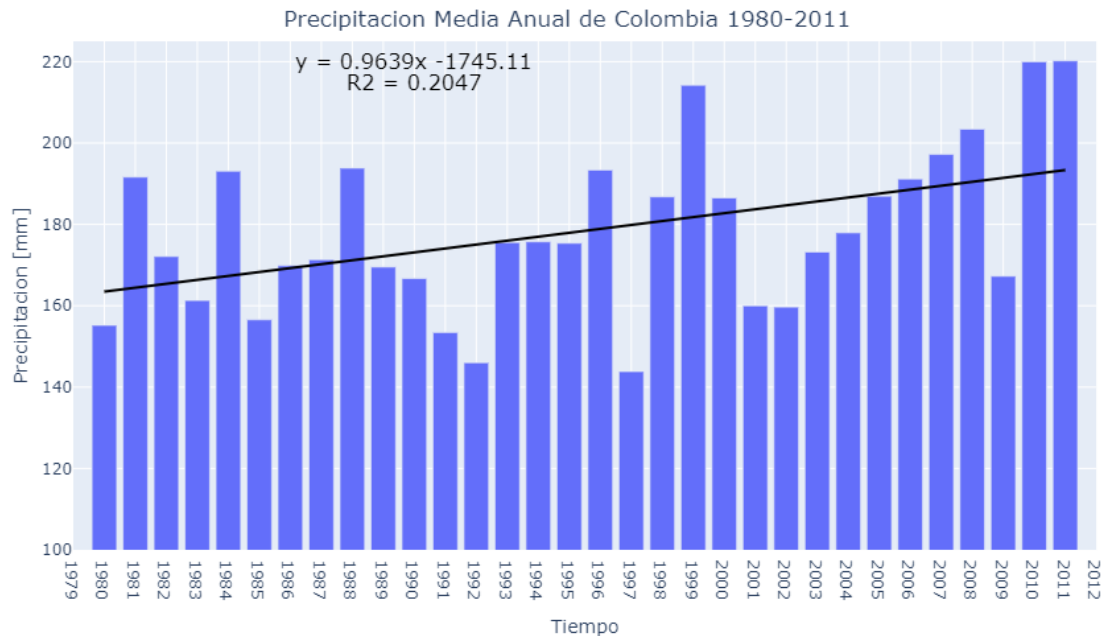


Figura 15. Regresión Lineal de la Precipitación Media de Colombia en el periodo 1980-2010. Es posible observar una tendencia de aumento de la temperatura 0.9639 mm/año en el periodo 1980-2011.

4.2.2. Nivel del Mar

Por otra parte, se generó los gráficos de tendencia para ilustrar el Nivel del Mar en el departamento del Magdalena. A continuación, se generó una serie de tiempo con los datos disponibles de nivel del mar diario en Santa Marta (Magdalena) como se muestra en la figura 16. Al realizar el ajuste lineal en estos datos, se obtuvo una pendiente de 6.32 mm/año, un coeficiente de determinación R^2 de 0.02 y un coeficiente de correlación de Pearson de 0.14. Este resultado se debe en gran parte a que este periodo (2013-2018) es muy corto para realizar un análisis climático preciso de esta variable. Como advierte la OMM (2018), generalmente es necesario contar con 10 años de

observaciones diarias para observar el cambio climático.

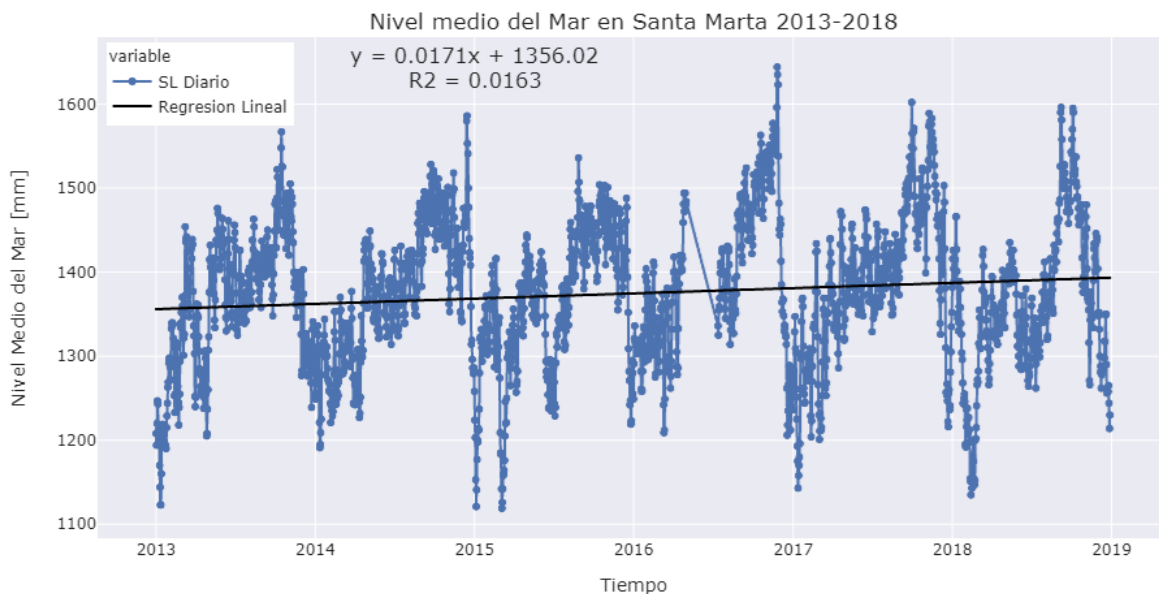


Figura 16. Regresión Lineal del Nivel del Mar Diario en Santa Marta en el periodo 2013-2018. Este periodo es muy corto para realizar un análisis climático preciso de esta variable.

En cambio, se contó con datos entre 1993 a 2019 para la estación en Cartagena, por lo que fue posible calcular el nivel medio del mar anual con la condición del mínimo 75 % de total de datos. El resultado se observa en la figura 17 para un ajuste lineal con pendiente de 7.31 mm/año y coeficiente de determinación y correlación de 0.801 y 0.897, respectivamente. Esto representa un buen ajuste al modelo, y por ende, el resultado es una tendencia confiable para representar el aumento del nivel del mar en este punto. Por lo anterior, se puede inferir un aumento del nivel del mar en Cartagena y, teniendo en cuenta la dependencia entre ambas estaciones (ver figura 8), se estima el mismo comportamiento en Santa Marta.

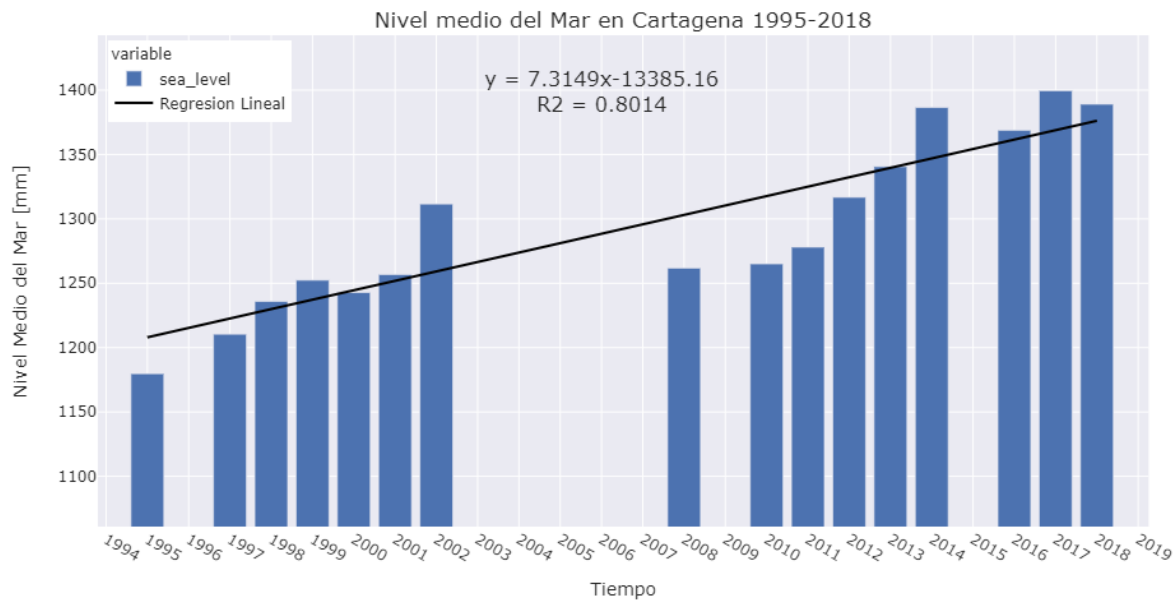


Figura 17. Regresión Lineal del Nivel Medio del Mar Anual en Cartagena en el periodo 1985-2018. Es posible observar una tendencia de aumento del nivel del mar de 7.315 mm/año en el periodo 1994-2018.

4.3. VENICE

Finalmente, se recopilieron todos los mapas y gráficos interactivos en un libro de Jupyter, el cual servirá como una herramienta para ilustrar el cambio climático a estudiantes de colegios. Este libro se encuentra organizado en tres principales notebooks correspondientes a las tres variables a estudiar: Temperatura, Precipitación y Nivel del Mar (ver figura 18). Además, cabe señalar que se configuró dichos notebooks para que de forma predeterminada no muestren los códigos que generan los gráficos, y así, se facilite la lectura del estudiante.

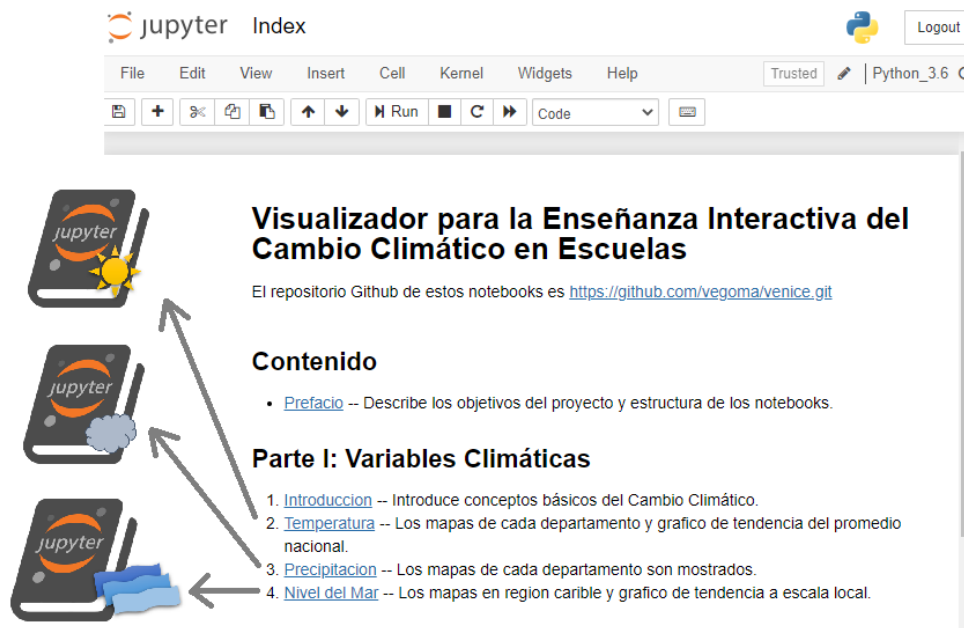


Figura 18. Captura de pantalla del Índice la herramienta VENICE en Jupyter Notebook. Se indican los notebooks correspondientes a las variables climáticas estudiadas: Temperatura, Precipitación y Nivel del Mar

Así mismo, se incluyó un prefacio con información general del libro, sus objetivos, el contenido de los notebooks y las fuentes de los datos mostrados. Por otro lado, también se añadió una sección de introducción con el fin de contextualizar al estudiante sobre los conceptos de cambio climático manejados en este libro. En específico, las variables temperatura, precipitación y nivel del mar y su relación con el problema del cambio climático. De igual forma, esta sección cubre los aspectos de mayor confusión, por ejemplo, los conceptos de “Tiempo” y “Clima” (Cruz, 2020, p. 481) como se ejemplifica en la figura 19. En último lugar, se complementa lo anterior con información de las acciones de mitigación y adaptación frente al cambio climático (ver figura 19).

jupyter Introduccion Last Checkpoint: 05/05/2021 (autosaved) Logout

File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help Trusted Python_3.6

Introducción

Es importante revisar algunos conceptos básicos sobre el Cambio Climático con el fin de entender y analizar su efecto en los últimos años. Por lo tanto, a continuación mostramos algunas preguntas clave sobre esta temática.

¿Cual es la diferencia entre Tiempo Atmosférico y Clima?

Es bastante común confundir el Tiempo Atmosférico con el Clima, por lo que mostramos sus principales diferencias.

Tiempo Atmosférico

Condición atmosférica durante un **periodo corto** de tiempo

Escala de Tiempo: **día a día**
Escala Espacial: **Municipio o Ciudad**




Martes Sábado

Clima

Tiempo atmosférico promedio durante un **periodo largo** de tiempo

Escala de Tiempo: **decadas a millones de años**
Escala Espacial: **Regional o Global**




Promedio 1981-2010

jupyter Introduccion Last Checkpoint: 05/05/2021 (autosaved) Logout

File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help Not Trusted Python_3.6

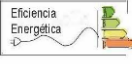
¿Que puedo hacer frente al Cambio Climático?

El Cambio Climático es inevitable, sin embargo, podemos reducir sus efectos adoptando medidas de Mitigación. Por el otro lado, también es necesario prepararnos para sus consecuencias por medio de las medidas de Adaptación.



MITIGACIÓN

Acciones para reducir y limitar las emisiones de gases de efecto invernadero



Eficiencia Energética



ADAPTACIÓN

Acciones para reducir la vulnerabilidad ante el cambio climático



Ubicaciones de Instalaciones y Obras de Infraestructuras mas seguras

Figura 19. Captura de pantalla de la Introducción del libro de Jupyter Notebook. En esta sección se incluyen las diferencias entre Clima y Tiempo Atmosférico, así como información sobre Mitigación y Adaptación del cambio climático.

5. Recomendaciones

Esta herramienta se enfoca en ilustrar el cambio climático histórico, por lo que es necesario complementar con los otros aspectos de este fenómeno. En particular, es importante que los estudiantes posean un contexto previo sobre los parámetros meteorológicos, efecto invernadero y otras bases teóricas para lograr un aprendizaje significativo. Por tal razón, esta herramienta es apropiada para estudiantes con suficiente nivel de formación y exposición a estos conceptos. De la misma forma, también se recomienda suplementar con la dimensión social y económica del cambio climático, las cuales aportan una visión más completa del problema.

En general, para el uso de la herramienta VENICE se debe contar con los siguientes requisitos: Un equipo de cómputo y conexión a internet durante la instalación del programa Anaconda y las librerías necesarias para ejecutar la herramienta. El documento del manual de instalación se encuentra en el repositorio del proyecto¹¹ y se puede descargar en el siguiente enlace: <https://github.com/vegoma/venice/blob/main/Manual%20de%20Instalaci%C3%B3n.pdf>. Una vez completa la instalación, esta herramienta puede funcionar en el equipo completamente en modalidad offline.

¹¹ Repositorio de VENICE; <https://github.com/vegoma/venice>

6. Trabajo futuro

A partir del desarrollo del trabajo de investigación, se generan algunas líneas de trabajo. Principalmente, se encuentra la aplicación de la herramienta VENICE en colegios cerca al páramo de Santurbán en Santander para apoyar la ejecución del proyecto Astropáramo. En específico, con el fin de contribuir a las actividades propuestas en torno al manejo de datos climáticos. En este orden de ideas, se espera obtener y analizar datos respecto a la experiencia de los estudiantes con la herramienta y cambio en la representación social frente al fenómeno del cambio climático a nivel local.

Además, se incluye la creación de un módulo en el que los estudiantes analicen por medio de VENICE los datos recolectados por las estaciones en cada colegio. Esto se realizaría en Jupyter Notebook, lo cual brindaría la posibilidad de explorar los códigos para generar los mapas y series de tiempo. De esta manera, los estudiantes podrán adquirir experiencia y habilidades en el manejo de programación en Python y el manejo de datos climáticos.

7. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten formular las siguientes conclusiones:

- Se adaptó la metodología presentada en el “Atlas Climático Alemán” para desarrollar la herramienta VENICE, un Visualizador para la Enseñanza Interactiva del Cambio Climático en Escuelas. Esta herramienta se desarrolló con el propósito de generar conciencia en estudiantes de colegios mediante la enseñanza del efecto del cambio climático en dos departamentos de Colombia: Magdalena y Santa Marta. En específico, VENICE consta de un libro de Jupyter Notebooks, el cual se basa principalmente en tres módulos correspondiente a variable climática: Temperatura, Precipitación y Nivel del Mar. Cada módulo contiene gráficos que permiten ilustrar el efecto del Cambio Climático en dichas variables. Así mismo, esta herramienta se configuró de manera que no necesitara ningún tipo de conexión a internet para su funcionamiento. Además, se implementaron funciones interactivas en los gráficos de la herramienta. En el caso de los mapas, se agregó listas desplegables mediante la librería Ipywidgets para seleccionar el lugar, el mes, la variable climática y el año para el cual se quiere generar los mapas actuales. Adicionalmente, la herramienta permite observar los mapas recientes e históricos de forma simultánea (ver figura 12). Por otro lado, se usó la librería Plotly de Python para crear series de tiempo interactivas. En último lugar, se agregó una sección para proveer información sobre algunos conceptos clave usados en el libro, aclarar la confusión recurrente entre Tiempo y Clima e informar sobre las acciones de mitigación y

adaptación que pueden llevar a cabo los estudiantes.

- Se ilustraron los efectos del cambio climático en los departamentos de Magdalena y Santander por medio de mapas climáticos y series de tiempo. Primero, se evaluó la posibilidad de aplicar el proceso seguido por el “Atlas Climático Alemán”, descrito en la sección 2.4, para generar mapas que tuvieran en cuenta la altitud. De esta manera, analizando la relación entre las variables climáticas y la altitud se determinó que era factible aplicar esta metodología para el conjunto de datos de temperatura de las estaciones. Por el contrario, se aplicó solamente una interpolación IDW para la variable de precipitación. Finalmente, se generó tres tipos de mapas: normal climática (1981-2010) estándar de cada mes, valor absoluto y anomalía climática mensual de los años recientes (2010-2021). Por otro lado, se crearon series de tiempo en el periodo 1980-2021 de la temperatura y precipitación media nacional anual a partir del promedio de temperatura de 228 y 1168 estaciones representativas de Colombia. Igualmente, se ilustró la tendencia de aumento del nivel del mar en Santa Marta (Magdalena) de forma indirecta, ya que se obtuvo muy poca información (periodo 2014-2018). Por ende, se analizó la estación más cercana con datos más completos (periodo 1993-2018) ubicada en Cartagena (Bolívar), con la cual se registró una covarianza de 0.02.
- Se verificaron los mapas climáticos y serie de tiempo obtenidos considerando como referencia la información de mapas y gráficos equivalentes publicados por el IDEAM. En general, los mapas obtenidos ilustran la tendencia de aumento de temperatura en Santander y Magda-

lena entre 2011 a 2020 así como cambios en las precipitaciones acordes con los escenarios de cambio climático en los departamentos. En el caso de los mapas, se halló la correlación cruzada normalizada entre las imágenes de los mapas obtenidos y las de referencia. De manera que para la normal climática (1981-2010) de temperatura y precipitación, se obtuvo un promedio de 0.69 y 0.71, respectivamente, de correlación respecto a los mapas de referencia. Mientras que, para los mapas de Anomalía de Temperatura e Índice de Precipitación, se obtuvo 0.5 y 0.47, respectivamente. Esto supone que los mapas no son muy precisos, sin embargo, son aceptables para ilustrar el cambio climático en las áreas de estudio. A continuación, se analizó la serie de tiempo de Temperatura Media Anual de Colombia entre 1984-2021. Así pues, se comprobó que la pendiente obtenida para el modelo lineal de la temperatura media nacional es consistente, teniendo un error absoluto de $-0.0176\text{ }^{\circ}\text{C/década}$. De la misma forma, se estudió la serie de tiempo de la Precipitación Media Anual de Colombia entre 1984-2021 con un error absoluto de 2.55 mm/década . Por otra parte, se comprobó la tendencia del Nivel del Mar en Santa Marta, Magdalena. A pesar de que no se pudo realizar un análisis climatológico debido a la poca información (periodo 2014-2018), si fue posible analizar la estación más cercana en Cartagena con datos más completos (periodo 1993-2018). Así, se encontró un aumento del nivel del mar de 7.32 mm/año con coeficiente de correlación y determinación de 0.8 y 0.9, respectivamente. Por lo anterior, se comprobó la tendencia de aumento del nivel del mar en Santa Marta (Magdalena).

Referencias Bibliográficas

- Asorey, H., Nuñez, L. A., Peña-Rodriguez, J., Salgado-Meza, P., & Suárez-Durán, M. (2017). Proyecto RACIMO: desarrollo de una propuesta en torno a uso de las TIC, e-ciencia ciudadana, cambio climático y ciencia de datos.
- Bello-Benavides, L., Cruz-Sánchez, G., Meira-Cardona, P., & González-Gaudiano, E. J. (2021). El cambio climático en el bachillerato: aportes pedagógicos para su abordaje. *Enseñanza de las ciencias*, 39(1), 0137–156.
- Benavides, H. & Rocha, C. (2012). *Indicadores que manifiestan cambios en el sistema climático de Colombia (Años y décadas más calientes y las más y menos lluviosas)*.
- Caldwell, P., Merrifield, M., & Thompson, P. (2015). Sea level measured by tide gauges from global oceans—the Joint Archive for Sea Level holdings (NCEI Accession 0019568), Version 5.5, NOAA National Centers for Environmental Information, Dataset. *Centers Environ. Information, Dataset*, 10, V5V40S47W.
- CMNUCC (1992). Marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. *Naciones Unidas*.
- Cruz, Norella y Páramo, P. (2020). Educación para la mitigación y adaptación al cambio climático en américa latina. *Educación y Educadores*, 23(3).
- Houghton, J. (2009). *Global warming: the complete briefing*. Cambridge university press.
- IDEAM (2018). *Metodología de la operación estadística de variables meteorológicas*.

IDEAM (2020). *Instructivo para la elaboración del mapa del Índice de la Precipitación.*

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLEÍA. (2015). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental.* Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.

IPCC (2018). *Global warming of 1.5° C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].* In Press.

Kaspar, F., Müller-Westermeier, G., Penda, E., Mächel, H., Zimmermann, K., Kaiser-Weiss, A., & Deutschländer, T. (2013). Monitoring of climate change in germany—data, products and services of germany’s national climate data centre. *Advances in Science and Research*, 10(1).

Mitas, Lubos y Mitsova, H. (1999). Spatial interpolation. *Geographical information systems: principles, techniques, management and applications*, 1(2).

Müller-Westermeier, G. (1995). Método numérico para la creación de mapas climatológicos. *Informes del Deutscher Wetterdienst*, (193).

OMM (2017a). Directrices de la organización meteorológica mundial sobre el cálculo de las normales climáticas (omm-n° 1203). *Boletín de la Organización Meteorológica Mundial (OMM)*.

OMM (2017b). Directrices de la organización meteorológica mundial sobre la generación de un conjunto definido de productos nacionales de vigilancia del clima. (omm-n° 1204). *Boletín de la Organización Meteorológica Mundial (OMM)*.

OMM (2018). Guía de prácticas climatológicas (omm-n° 100). *Boletín de la Organización Meteorológica Mundial (OMM)*.

Royal Society (2020). *Climate Change Q & A*. The National Academies Press.

Sampayo-Londoño, L., Camaño-Urango, E. D., Fierro-Echavarría, C. J., et al. (2018). CAMCLI una guía didáctica para la comprensión de cambio climático en básica primaria aplicada a estudiantes de grado 5° de la escuela normal superior del bajo cauca. *Tecné, Episteme y Didaxis: TED*, (pp. 1–8).

Scorza, C., Lesch, H., Strähle, M., Nielbock, M., & Danin, D. (2019). *Climate Change: Understanding and Acting*.

Apéndice A. Interpolación IDW (Inverse Distance Weighting).

Uno de los métodos para estimar promedios y comprender el comportamiento de las variables climáticas a nivel nacional y local, es el de interpolar espacialmente las medidas de cada estación (OMM, 2018, p. 91). Ahora bien, para entender la interpolación espacial primero considere N valores conocidos z_j , donde $j = 1, \dots, N$, distribuidos en puntos discretos $r_j = (x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^d)$ en un espacio $d - dimensional$. La interpolación espacial consiste en hallar una función tal que cumpla $F(\mathbf{r}_i) = z_i$ así como otras condiciones que definen el método de interpolación. (Mitas, 1999, p. 481). De esta manera, es posible hallar los valores de puntos desconocidos a partir de puntos cercanos con valores conocidos.

El método de interpolación de Ponderación de Distancia Inversa o “Inverse Distance Weighting (IDW)” se basa en la idea de que el valor en un punto desconocido puede aproximarse como un promedio ponderado de valores conocidos dentro de una distancia definida o desde un número m de los puntos más cercanos (Mitas, 1999, p. 482). En una ubicación $\mathbf{r}$ con valor desconocido, se puede definir una función para estimar dicho valor suponiendo que los pesos suelen ser inversamente proporcionales a la potencia de la distancia.

$$F(\mathbf{r}) = \frac{\sum_{i=1}^m z(\mathbf{r}_i) / |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^p}{\sum_{i=1}^m 1 / |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i|^p} \quad (7)$$

donde p es el parámetro para la potencia del inverso de la distancia, m el número de puntos usados para interpolar y $z(\mathbf{r}_i)$ es el valor conocido en el i -ésimo punto.

Apéndice B. Mapas de la distribución de estaciones representativas para el cálculo del promedio nacional.

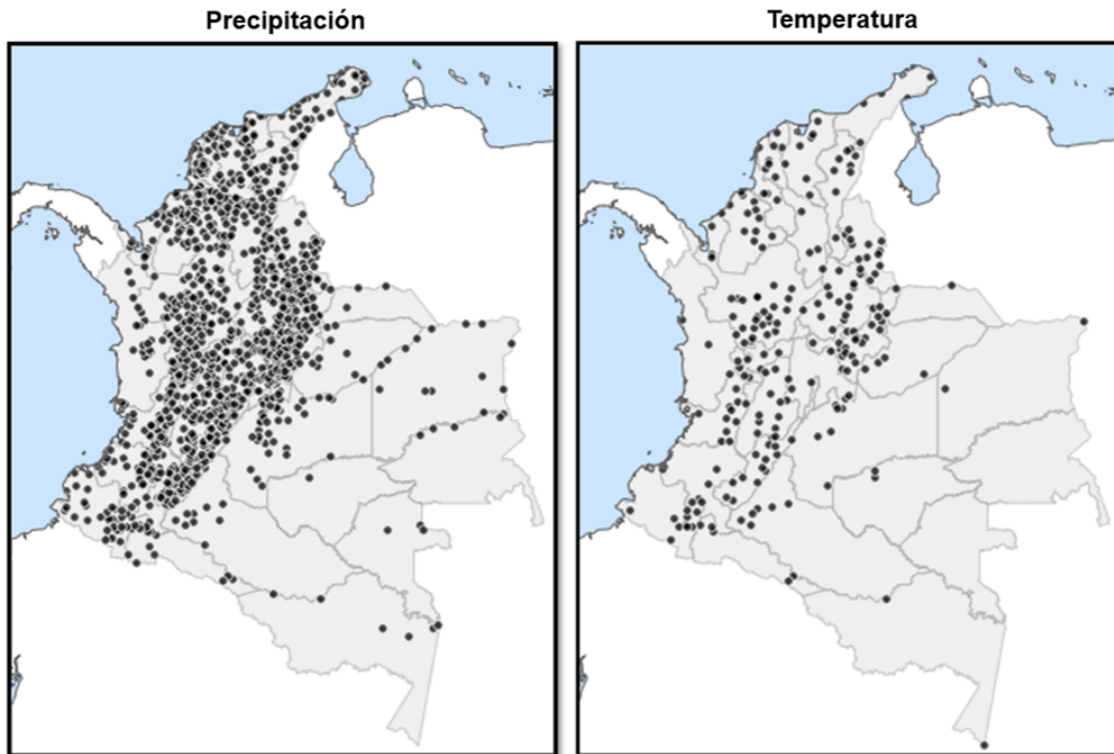


Figura 20. Distribución espacial de las 228 estaciones representativas de Colombia usadas para calcular la temperatura promedio nacional (derecha) y de las 1168 estaciones para la precipitación promedio nacional (izquierda).

Apéndices

Apéndice C. Indicadores de temperatura y precipitación anual de Colombia.

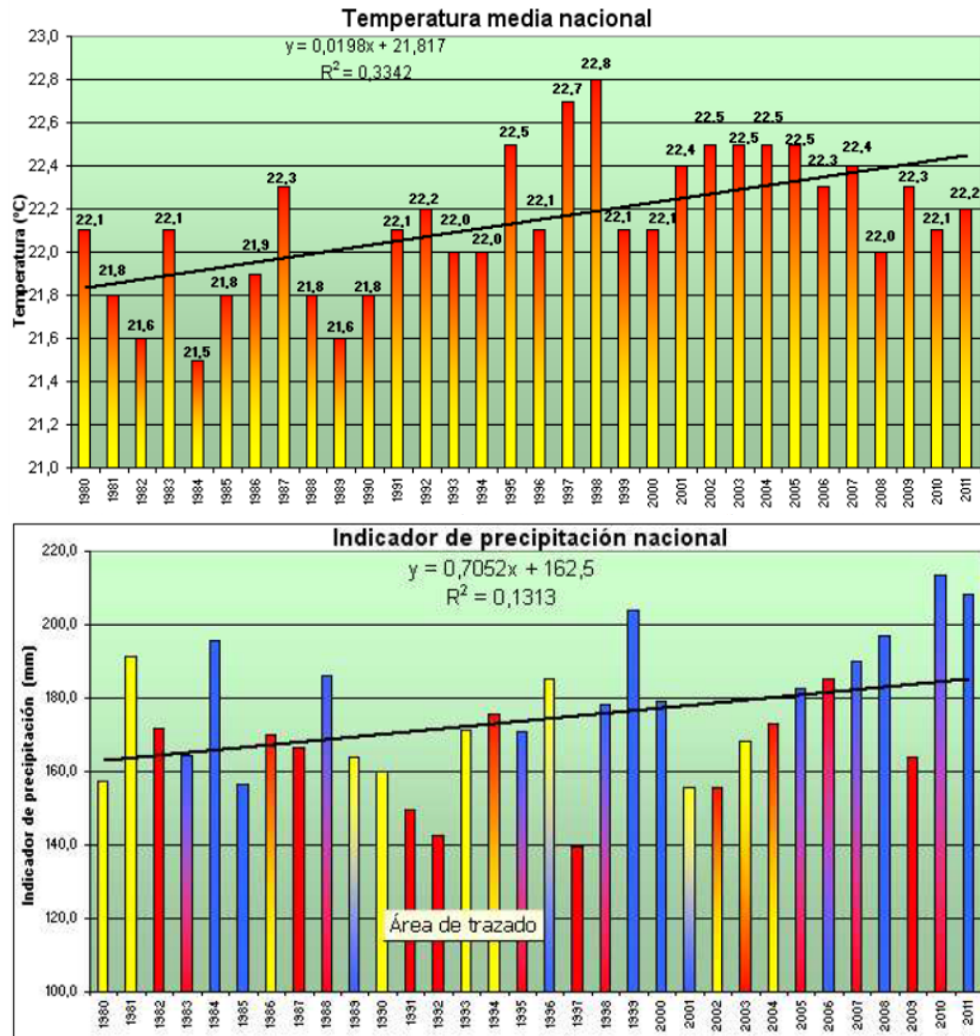


Figura 21. Tendencia de Temperatura Media Nacional (arriba) y Precipitación Media Nacional (abajo) en el periodo 1980-2011. Fuente: Benavides & Rocha (2012)