



Indicios de calentamiento global en temperatura media y mínima para la ciudad de Bogotá, Colombia 1981-2015

Signs of global warming in average and minimum temperatures for the city of Bogotá, Colombia. 1981-2015

Carvajal Téllez, Raúl A.

Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA). Bogotá. do_carvajal@hotmail.com

RESUMEN

Esta investigación pretende constituir una línea base para la comprensión de indicios de calentamiento global en la ciudad de Bogotá a través de datos meteorológicos. Aportando conocimiento de nivel local que puede ser utilizado para la gestión del cambio climático, en el que se responden las preguntas ¿existen indicios de calentamiento global en la ciudad de Bogotá –Colombia en el período 1981-2015? y ¿existen diferencias en las magnitudes de los indicios entre el medio urbano y rural?

La metodología se centra en el análisis de dos estaciones meteorológicas en entorno rural y urbano e indicadores provenientes de temperatura media y mínima. Las series son tratadas a través de herramientas estadísticas que aseguren coherencia de la serie y su homogeneidad, para la confirmación de tendencias se usa la prueba de tendencia estacional Mann-Kendall y curvas de densidad de probabilidad.

Las series climáticas indican una tasa lineal en el incremento de la temperatura media de 0,215 °C y en la mínima de 0,325 °C por década, resultado consistente por los reportados por la OMM. También, se encontraron diferencias entre las magnitudes del medio urbano y rural, como efecto de las propiedades radiativas de casa entorno que alteran el balance energético de cada zona climática. El estudio también relaciona las anomalías térmicas con los fenómenos niña y niño, encontrando que las fluctuaciones entorno a la media climática reportadas antes del año 2000 desaparecen como producto del calentamiento global.

ABSTRACT

This research aims to constitute a baseline for the understanding of signs of global warming in the city of Bogotá through meteorological data. Providing local level knowledge that can be used to manage climate change, in which the questions are answered: Are there signs of global warming in the city of Bogotá -Colombia in the period 1981-2015? And are there differences in the magnitudes of the evidence between urban and rural areas?

The methodology focuses on the analysis of two meteorological stations in rural and urban environments and indicators from average and minimum temperatures. The series are treated through statistical tools that ensure coherence of the series and its homogeneity, for trend confirmation the Mann-Kendall seasonal trend test and probability density curves are used.

The climatic series indicate a linear rate in the increase in mean temperature of 0.215 °C and a minimum of 0.325 °C per decade, a result consistent with those reported by the WMO. Also, differences were found between the magnitudes of the urban and rural environment, as an effect of the radiative properties of the house environment that alter the energy balance of each climatic zone. The study also relates the thermal anomalies with the girl and boy phenomena, finding that the fluctuations around the climatic average reported before the year 2000 disappear as a result of global warming.

Palabras Claves:

Calentamiento global
Cambio climático
Variabilidad climática

Keywords:

Global warming
Climate change
Climatic variability

Recibido: 15/07/2020

Aceptado: 20/09/2020

1. Introducción

El calentamiento global es uno de los principales retos que enfrentan los países del mundo. Este ocasiona enormes pérdidas en los ecosistemas y en la biodiversidad que generarán, hacia finales del presente siglo, innumerables problemas sin precedentes. Según Kahn *et al.*, (2019) se estima una reducción del PIB mundial del 7,22%, el equivalente al PIB de Australia, Bélgica, Canadá, Alemania y Sudáfrica juntas, si la tasa de calentamiento anual del escenario 8.5 del IPCC se mantiene en 0,04 °C. Por otro lado, las brechas de pobreza y desigualdad serán más amplias y multitudinarias migraciones climáticas se verán en todo el globo con una estimación de 1.000 millones de personas (Marotzke *et al.*, 2020; UN environment, 2017).

Según el Banco Mundial (2012), Colombia es el primer país de Latinoamérica con la mayor tasa de desastres naturales y el décimo a nivel mundial con el mayor riesgo económico, pues el 84,7 % de la población y el 86,6 % de los activos se localizan en zonas de amenaza natural. Este panorama, sumado al cambio climático, pone en riesgo al sector económico en perspectiva para el período 2006 a 2009 donde los desastres naturales pasaron de 4.286 a 8.504, llevando a que en este mismo período se pasara de tener 4,4 millones de familias afectadas a 6,4 millones (MADS, 2017). Otro punto es el posible aumento del desempleo en el sector agropecuario que genera el 30% de empleo en el país, a causa de los cambios en el régimen de precipitación (Gámez Gutiérrez, 2018).

Para las próximas décadas el calentamiento global es un hecho, por lo que las naciones han virado su enfoque desde el mero diagnóstico hacia la adaptación y mitigación al cambio climático, en el que los principales compromisos son la reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y la adopción de planes que permitan incrementar la resistencia y resiliencia de las poblaciones ante los posibles efectos del calentamiento global (IDEAM *et al.*, 2018); procurando que los riesgos sean mínimos y que la implementación permita garantizar cierta estabilidad en las dimensiones socioeconómicas de los estados.

A partir de la ratificación de los acuerdos de París por medio de la ley 1844 de 2017, Colombia materializa sus metas institucionales, como la reducción de Gases Efecto Invernadero (GEI) en un 30% para el año 2030 y así mantener la temperatura media global por debajo de 1,5 °C. A sí mismo, por medio de la ley 1831 del 2018 se establecen las directrices nacionales para la gestión del cambio climático con mira a la adaptación y mitigación, teniendo como ejes principales el ordenamiento territorial, el conocimiento científico, la prevención y las poblaciones (IDEAM *et al.*, 2018). Los actuales compromisos tales como la delimitación y protección de páramos, además de la implementación de planes de adaptación y mitigación al cambio climático transversales a los planes de ordenamiento territorial y de desarrollo, esperan lograr de Colombia un país que garantice un manejo efectivo de desastres y una reducción del riesgo frente al cambio climático (MADS, 2017).

El estudio de los indicios relacionados con el calentamiento global a nivel local es esencial, pues permite la caracterización de las condiciones actuales y predecir posibles escenarios de calentamiento global localmente, con lo que es posible adoptar medidas precisas para los territorios, además se les permite a los gobiernos una mayor capacidad de gestionar y minimizar los diferentes riesgos vinculados al fenómeno (Hobbie & Grimm, 2020).

En Colombia, según el IDEAM las evidencias del calentamiento global son asociadas a cambios en el sistema natural como el deshielo encontrado en los nevados, aumento del nivel del mar en las costas y acidificación de los mares entre otros (IDEAM *et al.*, 2018). Estas evidencias son indicadores de alta confiabilidad pues son el resultado directo de las alteraciones del clima. Sin embargo, existen regiones donde encontrar evidencia a partir del sistema natural resulta en una alta complejidad. Es aquí donde el análisis de información hidrometeorológica constituye una referencia en la búsqueda de indicios de calentamiento global.

La presente contribución pretende eruirse como un insumo para la comprensión histórica del calentamiento global en la ciudad de Bogotá, respondiendo las preguntas ¿existen indicios de calentamiento global en la ciudad de Bogotá –Colombia en el período 1981-2015? ¿existen diferencias en las magnitudes de los indicios entre el medio urbano y urbano? a través de una investigación cuantitativa por medio de estaciones meteorológicas, en el que se analizan las tasas de tendencia e incremento en la temperatura media y mínima.

2. Antecedentes

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático IPCC en su quinto informe del 2013 advierte que existe un aumento sin precedentes en los últimos 800 mil años de Gases de Efecto Invernadero (GEI) como el dióxido de carbono, metano y óxido nitroso entre otros que han originado un aumento positivo

de las tasas de forzamiento radiativo dando lugar a evidencias plausibles del calentamiento global, como aumento en el nivel del mar y el derretimiento de los polos (IPCC, 2013). Si bien el calentamiento global es un fenómeno natural caracterizado por épocas de glaciación (períodos fríos) e interglaciación (períodos cálidos) que se modulan por diversos factores como las variaciones de GEI o la extensión de los casquetes polares, el informe concluye con un alto nivel de confianza que el calentamiento evidenciado se atribuye a un aumento de los GEI por factores antrópicos.

En América del Sur, los efectos del calentamiento global que se prevén, afectarán a los sistemas físicos (Lopez *et al.*, 2010): retroceso de los glaciares, aumento en el riesgo de deslizamientos, erosión costera, sequías, etc.; a los sistemas biológicos (Leão *et al.*, 2016): decoloración de arrecifes, reducción de recursos pesqueros, degradación de bosques, etc. Y a los sistemas humanos (Moreno, 2006): desplazamiento de la frontera agrícola, aumento en enfermedades como el dengue y malaria etc. En Colombia los impactos del calentamiento global en el sector económico han sido bien documentados y reportados por DNP & BID (2014) que señalan afectaciones en el sector ganadero, agrícola, forestal, pesca y de transporte, con reducciones del 0,5% anual en el PIB hasta el año 2100. A lo que se refiere a aumento de amenazas naturales el Ministerio de Ambiente prevé afectaciones en los sistemas de saneamiento básico por aumento de precipitaciones en el Archipiélago de San Andrés, inundaciones sobre el 4,9% de las áreas cultivables en el Caribe, incremento en la frecuencia de incendios forestales y pérdida en biodiversidad y de los ecosistemas, como la potencial reducción del 33% o 43% en especies de aves (IDEAM *et al.*, 2017; Velásquez-Tibatá *et al.*, 2013)

La mayoría de los estudios colombianos que se enfocan en el calentamiento global emplean en su metodología, herramientas computacionales como R y sus bibliotecas enfocadas al clima que utilizan análisis exploratorios gráficos, además de la estadística descriptiva para el control de calidad de sus series climáticas y estimación de datos mediante modelos ARIMA o medias móviles. Para la coherencia de las series estadísticas suelen usarse pruebas de varianza y homogeneidad (Arango *et al.*, 2012; Boada Cuevas, 2011). Otros por el contrario estudian las alteraciones de los sistemas naturales, como el aumento del nivel del mar registrado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM a través de estaciones en las costas del Caribe y Pacífico que han evidenciado un aumento de 10 cm y 22 cm respectivamente desde el año de 1960, o el deshielo encontrado en los nevados colombianos en el que se estima una pérdida de 50 cm a 1 metro de profundidad anual que dejaría a Colombia sin ninguna cobertura nival para el año 2050 (Costa Posada, 2007; Pabón, 2003). Otras evidencias en el cambio de tendencia en temperatura y precipitación han sido registradas y monitoreadas por redes hidrometeorológicas: en el caso de la temperatura se registran noches más calientes y un aumento de la temperatura media nacional de 0,148 °C por década (Benavides & Rocha, 2012). Para Ruth Mayorga *et al.*, (2011) los efectos del calentamiento global son heterogéneos en el territorio colombiano, en el cual, el aumento o disminución de las precipitaciones y las temperaturas máximas y mínimas dependen de la región del país y la altura sobre el nivel del mar; conclusiones aceptadas parcialmente por Arango *et al.*, (2012) quienes han demostrado un aumento en todo el territorio colombiano pero con diferentes tasas y ritmo de incremento.

3. Marco teórico

El sistema climático del planeta está compuesto por la atmósfera, hidrósfera, criósfera, litósfera y biósfera subsistemas que están interrelacionados entre sí a través de intercambios de energía. Los elementos climáticos como la temperatura, humedad, precipitación, etc. caracterizan el clima permitiendo su estudio. Se sabe que la evolución del clima es moderada por factores internos como los mecanismos de retroalimentación, y externos como los naturales y antropogénicos, que ocasionan forzamiento radiativo negativo o positivo. Los positivos como el aumento del CO₂ o el vapor de agua, se asocian con una absorción mayor de energía radiativa de la que puede ser irradiada por el planeta, que termina elevando la temperatura y; el negativo, como el aumento del albedo o el almacenamiento del CO₂ en los mares, que se asocia a energía irradiada mayor a la que es absorbida por la tierra de los rayos del sol (Peixoto & Oort, 1992).

Es preciso indicar que el calentamiento global es un proceso natural que ha sucedido desde que la tierra cuenta con atmósfera. Sin embargo, esta ha atravesado por distintas etapas que la han llevado a que en los últimos miles de años, las grandes fluctuaciones del clima a causa de factores naturales, hayan concurrido en una variabilidad relativamente estable que dio lugar a períodos de importante desarrollo y riqueza para los pueblos humanos (Hecht, 2009). Evidencias muestran que parte importante de la variabilidad del clima se debe al aumento o disminución de los GEI, pues ante su incremento, la respuesta de la temperatura media del planeta es aumentar. El hecho es soportado por las evidencias paleoclimáticas de los períodos de glaciación e interglaciación que se asocian al almacenamiento o liberación de los GEI por

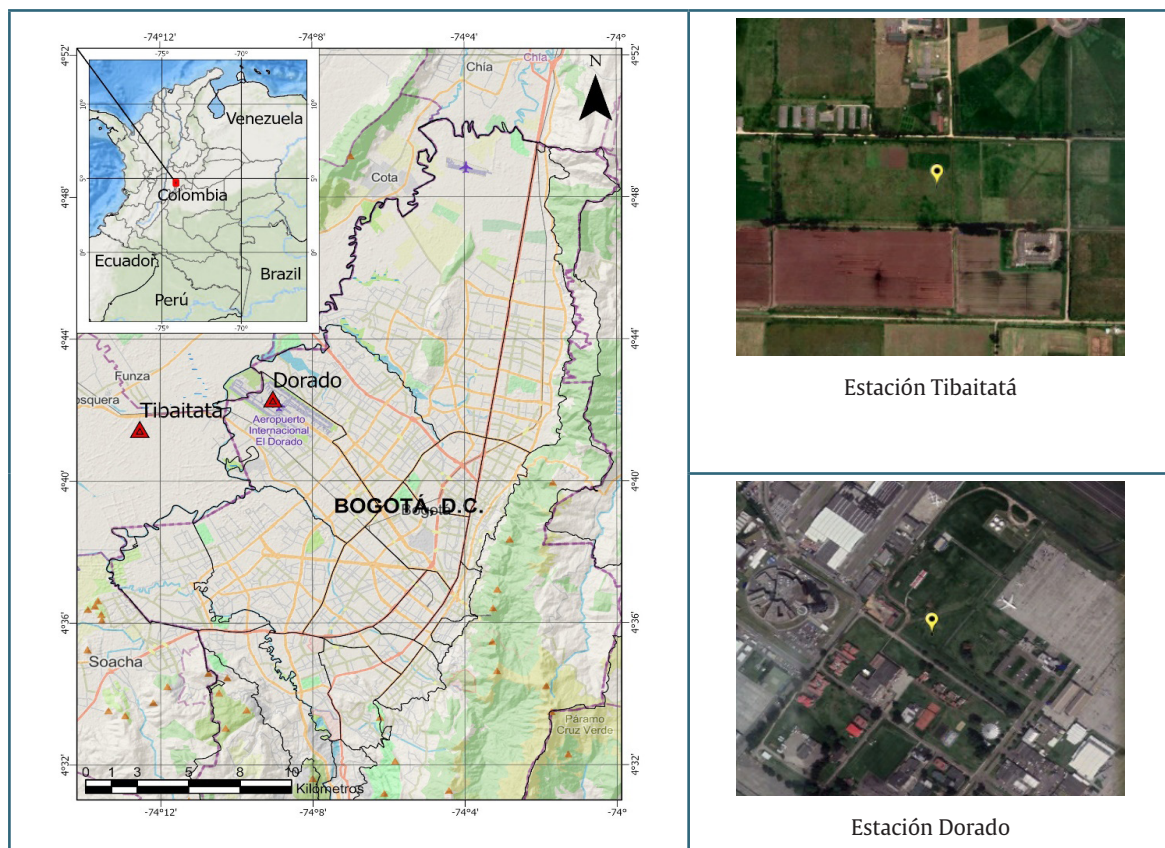
parte de las coberturas de hielo. Sin bien, la variabilidad glacial e interglacial es periódica y ha tenido lugar en los últimos miles de años, por procesos de retroalimentaciones positivas, como el aumento del vapor de agua que calienta la atmósfera y los mares, ocasionando más vapor que retroalimenta el proceso; se ha descubierto que desde principio de la revolución industrial las grandes cargas de emisión de GEI hacia la atmósfera producidos por actividades industriales ha terminado por elevar la temperatura media del planeta en 1 °C aproximadamente desde el año 1850 hasta el presente. A esto se le suma la deforestación, la ganadería intensiva y las actividades agrícolas que también contribuyen al fenómeno que ahora se le conoce como calentamiento global antropogénico (Jones & Mann, 2004).

El efecto del calentamiento global a largo plazo genera nuevas dinámicas climáticas fuera de las medias registradas por las observaciones paleoclimatológicas y meteorológicas. El incremento en la temperatura media ha alertado a los gobiernos locales que, ante los efectos y evidencias del calentamiento global, han organizado acuerdos y agendas para la mitigación y adaptación del cambio climático. El cambio climático es entonces, una alteración de las medias climáticas, que en el actual contexto ha sido producido por influencia antropogénica. La alteración acelerada del sistema climático termina por impedir que especies puedan adaptarse a estos cambios, llevando a la extinción especies y ecosistemas (Mark, 2015). Como si fuera poco, los múltiples desbalances producidos a los subsistemas causarían mayor recurrencia en fenómenos meteorológicos extremos, aumento del nivel del mar, cambios erráticos en oscilaciones climáticas, acidificación del océano, retroceso de glaciares y desertificación entre otros.

4. Materiales y métodos

La ciudad de Bogotá se asienta en el altiplano Cundiboyacense a una altura media de 2.600 m.s.n.m, entre los cerros orientales y la serranía del Majuy, catalogándose como ciudad de valle ancho. Según la clasificación orográfica para ciudades, elaborada por Wanner & Filliger (1989), las montañas que la flanquean propician vientos catabáticos y anabáticos así como de inversiones térmicas (Babativa, 2018). Para la selección de las estaciones meteorológicas (Figura 1) se han tomado las consideraciones de Oke et al., (2017) y OMM (2006) las cuales enfatizan en zonas con factores geográficos homogéneos, para que las variaciones de los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas sean representativas. El período de referencia se extiende desde 1981 hasta el año 2015, cumpliéndose con las instrucciones dadas por la OMM (2017) que define un período mínimo de 30 años de referencia para cualquier estudio climático.

Figura 1. Estaciones meteorológicas.



Fuente: elaboración propia.

Metodológicamente se han tomado dos estaciones meteorológicas bajo la administración del Instituto de Investigación Tibaitatá (rural) y la administración del Aeropuerto Internacional el Dorado (urbana); ambas pertenecientes a la red del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, que aseguran personal calificado en la toma de información meteorológica. Los indicadores climáticos seleccionados para el estudio que se presenta, han sido la temperatura media y mínima anuales pues son sensibles a las señales de calentamiento global. La metodología empleada asegura estimación de datos, coherencia en series climáticas y homogeneidad. Para la identificación de señales relacionadas al calentamiento global se usa estadística descriptiva, prueba de tendencia estacional Mann-Kendall, curvas de densidad de probabilidad, anomalías de temperatura y tasas quinquenales de calentamiento. Los resultados indican una tendencia positiva en el incremento de la temperatura, siendo la temperatura mínima el indicador que evidencia los mayores indicios de incremento de temperaturas.

4.1. Datos

Fueron analizadas un total de 67 estaciones meteorológicas; 61 del IDEAM y 6 de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR. En la selección de las estaciones meteorológicas se tuvo en cuenta la homogeneidad de los datos, parámetros estadístico descriptivos que evidenciaron coherencia en las series climáticas sin errores en saltos puntuales o discontinuidades, porcentaje de información superior al 90%, emplazamiento de la estación verificable en campo y una cota entre los 2.500 y 2.600 m s.n.m. (Tabla 1). De la validación las series de temperatura mínima y media para el período 1981 - 2015 se obtuvieron las estaciones meteorológicas 'Aeropuerto el Dorado' y 'Centro de investigación Tibaitatá' por ser las únicas estaciones en aprobar los criterios de selección.

Tabla 1. Porcentaje de datos completos.

| | T. Min | T. Med | Cota m s.n.m |
|-----------|--------|--------|--------------|
| Dorado | 97,01% | 97,86% | 2.551 |
| Tibaitatá | 92,74% | 93,38% | 2.545 |

Fuente: elaboración propia.

4.2. Técnicas de Análisis

4.2.1. Estimación de datos

El método usado fue el de Relación Normal propuesto por Paulhus & Kohler (1952) que permite una estimación de datos a través de una interpolación espacial por medio de los valores medios normalizados de las estaciones próximas a la estación objetivo, manteniendo la tendencia de las series climáticas en el tiempo. El método aunque simple, sigue siendo ampliamente utilizado por los resultados obtenidos en la predicción de medias y por su aproximación a varianzas (OMM, 2017); aunque los valores interpolados a nivel diario presenten menor correlación, su menor sesgo en la predicción de medias y varianzas resultan de mayor utilidad cuando se analizan series climáticas de períodos extensos (Young, 1992).

4.2.2. Cálculo de la media mensual y anual para series climáticas

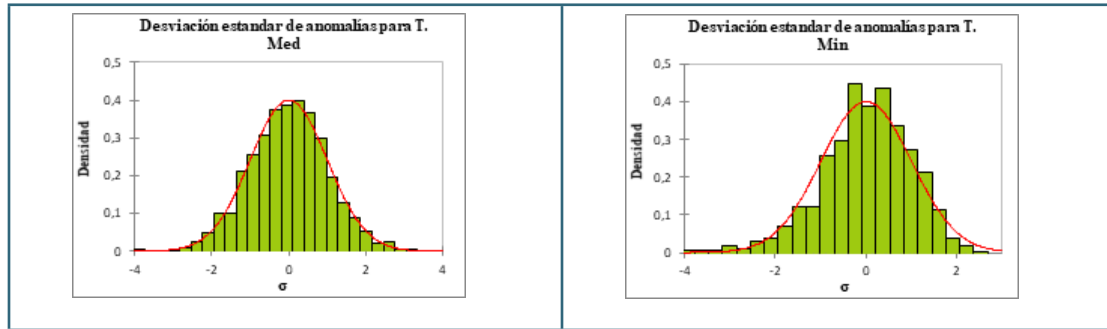
El cálculo de los valores de la norma mensual y anual de precipitación y temperatura se realizaron bajo la guía de la OMM (2017) que establece el estándar para la aceptación de series climáticas mensuales a partir de datos diarios. La metodología rechaza los meses en que los datos diarios superan los cinco días de ausencia o tres días consecutivos sin datos, el nombre bajo el cual se conoce esta regla es "3/5" y asegura que las series mensuales afectadas por valores extremos no generen saltos en la media de los datos al ajustar el umbral de aceptación de información faltante al 15%.

4.2.3. Análisis estadístico descriptivo

Parte del análisis estadístico de datos ha sido elaborado con el Software R y el paquete estadístico "CLIMATOL" (Guijarro, 2004), que contiene las funciones para la detección de cambios en la media y errores

puntuales para la homogeneización de las series climáticas, así como de inspección gráfica de los datos y anomalías bajo normalización, que evidenciaron desviaciones estándar menores a 4 sigmas con lo cual se aceptan todos los valores sin presencia de anomalías significativas (Figura 2). Se elaboró la prueba no paramétrica de Anderson-Darling para confirmar la hipótesis de normalidad con p-valor de 0,05, lo que presentó una distribución normal para las temperaturas medias, sin embargo, las temperaturas mínimas no presentaron normalidad a causa de los valores por debajo de los 0 °C procedentes de la temporada de heladas en los meses de enero y febrero (Edgar & Bocanegra, 2012).

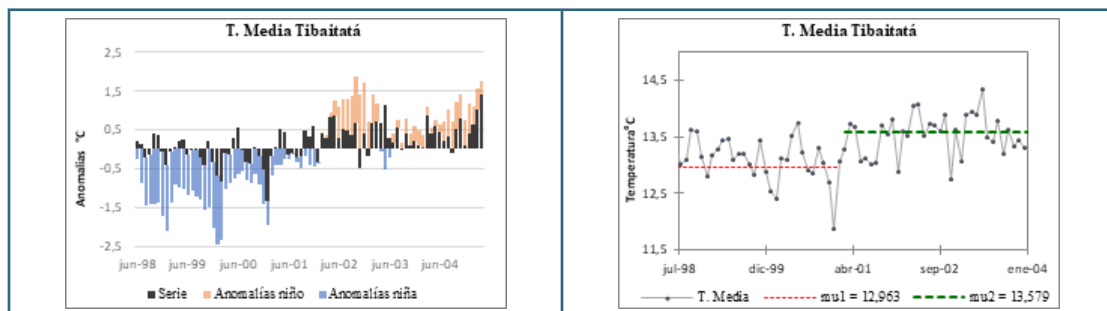
Figura 2. Desviación estándar con normalización para las series climáticas.



Fuente: elaboración propia.

Se empleó el test de homogeneidad SNHT para analizar cambios en la media y varianza (Mamara et al., 2013). Detectadas las inhomogeneidades se procedió hacer una revisión con respecto a su naturaleza, encontrando que las variaciones están asociados a cambios climáticos como el fenómeno de Niño y Niña que no superan los 0,6 °C de salto en la media y no a factores humanos (Figura 3).

Figura 3. Asociación de inhomogeneidades con fenómeno del niño y niña. Izquierda: anomalías de temperatura media. Derecha: Inhomogeneidad en temperatura media.



Fuente: elaboración propia.

4.2.4. Tendencia en series climáticas

Completados los procesos de calidad de las series climáticas, se dio paso al estudio exploratorio que evalúa la tendencia a partir de diagramas BoxPlot para los datos mensuales con segmentación quinquenal a partir del año 1981, adicional, se corroboran los resultados a partir de la prueba de tendencia estacional no paramétrica de Mann-Kendall con significancia de 0,05 y estacionalidad de 12 meses (Karmeshu, 2012).

4.2.5. Función de densidad de probabilidad normal

La probabilidad de recurrencia de un fenómeno puede estimarse a través de su función de densidad de probabilidad (W. Katz, 1993). En climatología, el uso de la densidad de probabilidad se ha usado como indicador del calentamiento global a través del cambio de tendencia y distribución de un elemento meteorológico como la temperatura o la precipitación (Hansen et al., 2012). Para el caso de estudio la función de probabilidad normal es creada a partir de los datos mensuales para períodos quinquenales entre el año 1981 -2015 (W. Katz, 2002).

5. Resultados

La norma climática para el período 1981-2015 en temperatura media se encuentra en los 13,22 °C y 13,77 °C valores que son excedidos por los últimos 3 quinquenios para ambas estaciones (Tabla 2), para la temperatura mínima la norma se establece en 6,88 °C y 8,04 °C valores también superados sucesivamente por los últimos 4 quinquenios.

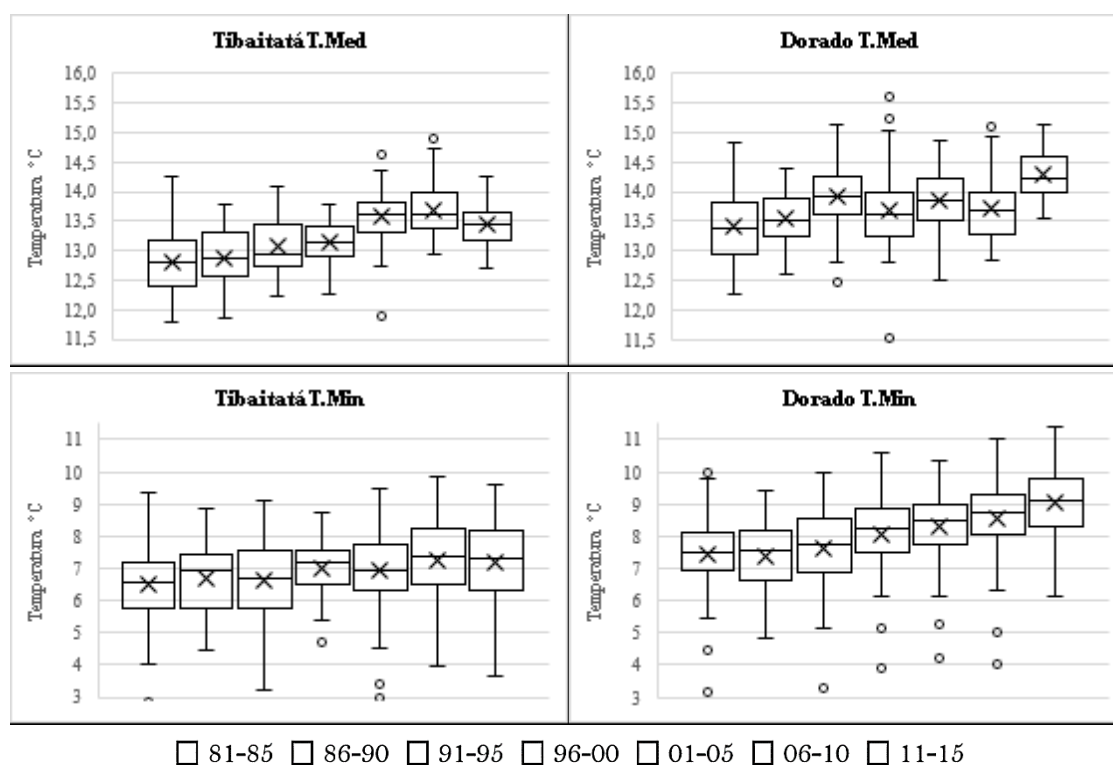
Tabla 2. Quinquenales de temperatura media y mínima para el periodo 1981-2015.

| Ventana de tiempo | Tibaitatá | | | | Dorado | | | |
|-------------------|-------------|------|--------------|------|-------------|------|--------------|------|
| | T. Media °C | SD | T. Mínima °C | SD | T. Media °C | SD | T. Mínima °C | SD |
| 81-85 | 12,81 | 0,54 | 6,51 | 1,36 | 13,41 | 0,58 | 7,41 | 1,36 |
| 86-90 | 12,87 | 0,49 | 6,67 | 1,16 | 13,54 | 0,45 | 7,35 | 1,14 |
| 91-95 | 13,06 | 0,46 | 6,62 | 1,42 | 13,91 | 0,56 | 7,61 | 1,36 |
| 96-00 | 13,12 | 0,31 | 7,03 | 0,90 | 13,68 | 0,66 | 8,04 | 1,21 |
| 01-05 | 13,57 | 0,44 | 6,94 | 1,28 | 13,84 | 0,48 | 8,30 | 1,13 |
| 06-10 | 13,69 | 0,44 | 7,23 | 1,42 | 13,73 | 0,56 | 8,56 | 1,15 |
| 11-15 | 13,44 | 0,34 | 7,17 | 1,30 | 14,29 | 0,38 | 9,02 | 1,06 |
| Norma climática | 13,22 | 0,43 | 6,88 | 1,26 | 13,77 | 0,53 | 8,04 | 1,20 |

Fuente: elaboración propia.

Las diferencias entre las temperaturas medias y mínimas de las estaciones Tibaitatá y Dorado señalan las condiciones heterogéneas del paisaje donde se emplazan. Tibaitatá siendo una estación rural con baja intervención urbana presenta valores más bajas del orden de 0,6 °C en temperatura media y de 1,2 °C en temperatura mínima (Figura 4), diferencia que es explicada por los distintos balances energéticos de cada estación en el que interviene el calor antropogénico, el calor sensible y latente como factores determinantes (Jiménez Mejía, 2016; Meneses & Fiquitiva, 2017). El desplazamiento positivo del rango intercuartílico y del cuartil 2, exponen la tendencia positiva de las series climáticas, hecho que es corroborado a partir de la prueba de Mann-Kendall para todas las series climáticas.

Figura 4. Boxplot de los datos mensuales para segmentación quinquenal.



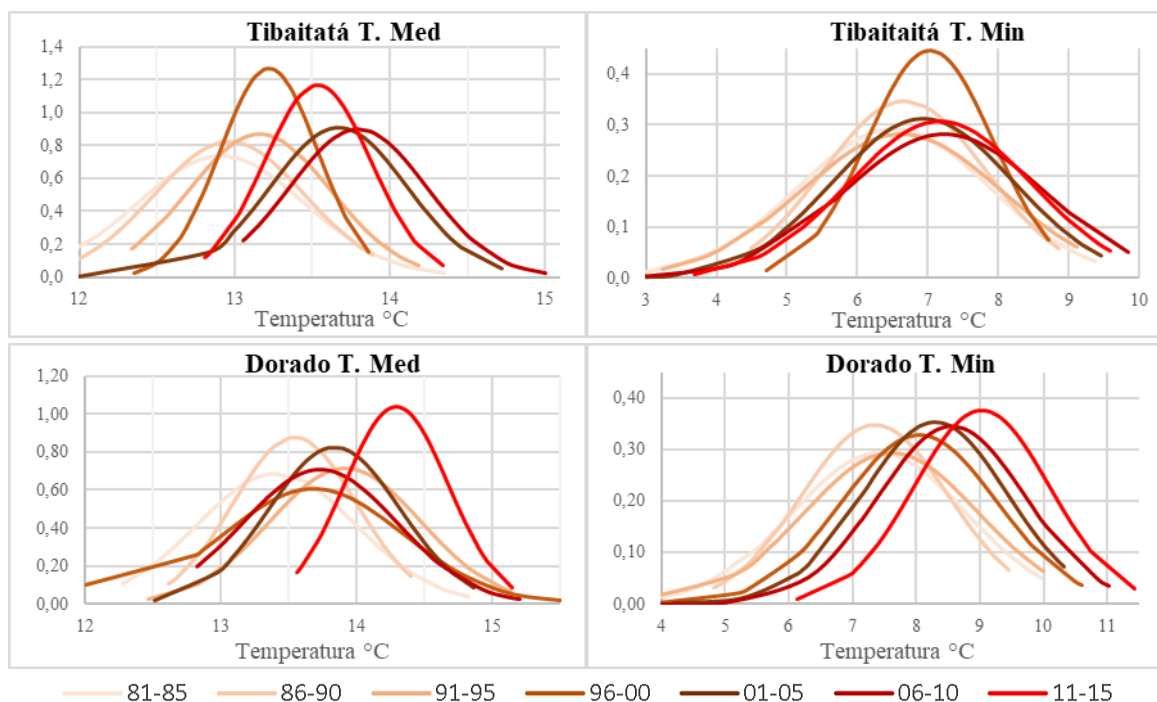
Fuente: elaboración propia.

La tasa lineal de las series climáticas de la estación Tibaitatá manifiestan un crecimiento de 0,089 °C por quinquenio para la temperatura media y de 0,094 °C para la temperatura mínima con un aumento en la media de 0,624 °C y 0,657 °C del quinquenio 2011-2015, con respecto a 1981-1985. En la estación El Dorado, el crecimiento es de 0,126 °C para temperatura media y de 0,230 °C para temperatura mínima, con aumento en la media de 0,88 °C para temperatura media y 1,6 °C para temperatura mínima. Las funciones de densidad de probabilidad normal cuentan con desplazamientos positivos en su distribución que sugieren cambios en el comportamiento climático de Bogotá y aumentos en la frecuencia de probabilidad de temperaturas que para el quinquenio 1981-1985 se consideraban extremas (Figura 5). En el quinquenio 2011-2015 la estación Tibaitatá muestra un desplazamiento negativo de su distribución que puede ser explicado por una mayor sensibilidad al fenómeno Niña en el año 2010-2011 (Euscategui & Hurtado, 2010).

Las anomalías anuales de temperatura media, también indican años más calientes que fluctúan con la presencia del fenómeno Niña-Niño, (Figura 6). Para la estación Tibaitatá, las anomalías positivas a partir del año 2000 indica que los promedios anuales superan la norma climática, sin embargo; esto no afecta la estacionalidad de las temperaturas ante los fenómenos Niña y Niño, como permite observar la figura 5 en el año 2008 y 2011, en el que la temperatura media disminuye ante fenómenos de niña fuerte. Hasta el año 2009, las anomalías de temperatura en la estación Dorado, registran movimientos oscilatorios relacionados al fenómeno Niño y Niña en torno a la media, hecho que cambia para los últimos siete años, en el que ante un fenómeno de niña fuerte como lo fue el año 2011 las anomalías no descienden por debajo de la norma climática.

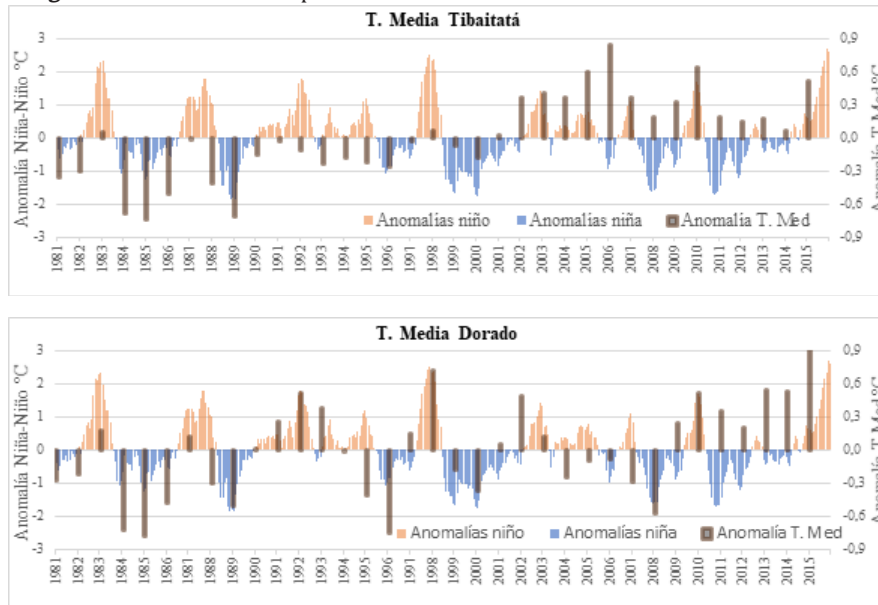
Las anomalías de temperatura mínima parecen no presentar dependencias marcadas con los fenómenos de Niño y Niña, como si se aprecia con la temperatura media. Esto es visible al observar que ante fenómenos de Niña fuertes como el del año 2011, las anomalías superaron los registros máximos, incluso superando valores presentados en el fenómeno de Niño fuerte ocurrido en el año 1998 (IDEAM, 2014) (Figura 7), una aproximación al entendimiento de este suceso puede darse por el aumento de la cobertura nubosa que impide que la radiación de onda larga sea retrodispersada hacia el espacio. También se observa una tendencia mayor de anomalías positivas a partir del año 2002 para ambas estaciones, que puede indicar un cambio en la variabilidad climática.

Figura 5. Función de densidad de probabilidad normal por quinquenios.



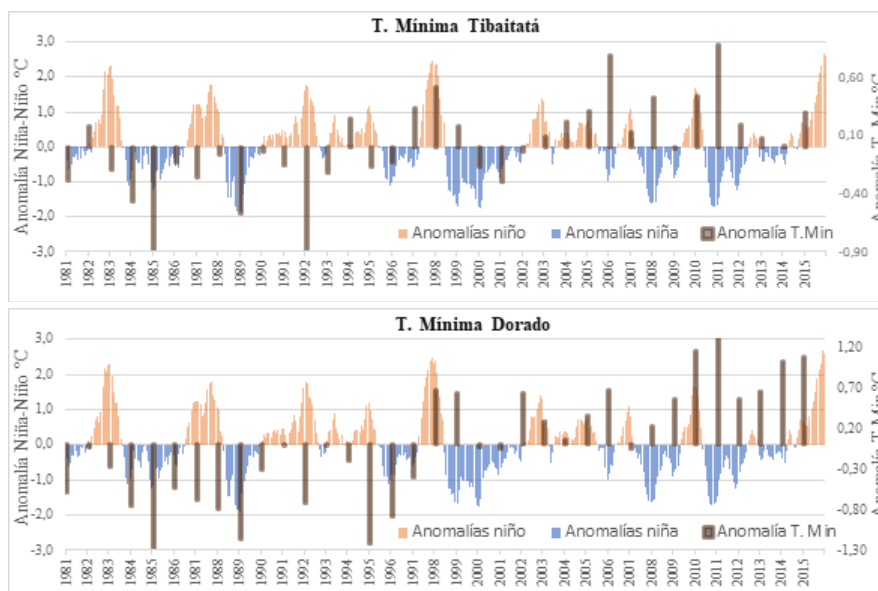
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Anomalías de temperatura media anual Vs Anomalías Fenómeno Niña-Niño.



Fuente: ????

Figura 7. Anomalías de temperatura media anual Vs Anomalías Fenómeno Niña-Niño.



Fuente: ????

Para los años anteriores a 1990, las anomalías de temperatura media entre ambas estaciones conservan relación entre su magnitud y orientación, posterior a este año las estaciones difieren en su comportamiento (Figura 6), como resultado de las alteraciones en las propiedades radiativas de cada zona climática local, lo que termina modificando el balance de energía.

La prueba de tendencia estacional de Mann-Kendall confirma, con una significancia de 0,05%, que las series climáticas poseen una tendencia positiva, hecho que es también confirmado por las funciones de densidad de probabilidad que destacan un desplazamiento positivo de la distribución. A ello se le añade que la tasa lineal de calentamiento por década de la estación Tibaitatá de 0,178 °C para la temperatura media se asocia con los reportes de OMM (2019) de 0,166 °C para el período 1971-2010 a nivel mundial y el incremento en la temperatura quinquenal fue de 0,62 °C desde el año 1981 al 2015, dato que guarda relación con los descritos por IPCC (2013), en el que la temperatura media global presenta un incremento de 0,5°C desde el año 1980 (Tabla 3).

Tabla 3. Tasa de calentamiento promedio por década e incremento de temperatura por quinquenio.

| | Tibaitatá | | Dorado | | Diferencia Tibaitatá Dorado | |
|---|-------------|--------------|-------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| | T. Media °C | T. Minina °C | T. Media °C | T. Minina °C | T. Media °C | T. Minina °C |
| Incremento promedio del quinquenio 11-15 con referencia 81-85 | 0,624 | 0,657 | 0,884 | 1,613 | 0,260 | 0,96 |
| Tasa lineal de calentamiento por década | 0,178 | 0,188 | 0,253 | 0,461 | 0,074 | 0,273 |

Fuente: elaboración propia.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos de la prueba Mann-Kendall y densidad de probabilidad revelan que existe una tendencia positiva de las temperaturas medias y mínimas asociadas a la señal de calentamiento global descrita por el IPCC (2013) y la OMM (2019), con lo que es posible afirmar que existen indicios de calentamiento global en la ciudad de Bogotá.

Si bien la OMM aconseja estaciones rurales para la medición del calentamiento global a consecuencia de las perturbaciones producidas por el calor antropogénico y la transformación del uso del suelo hacia entornos urbanos, el estudio propone una revisión de ambos entornos para señalar posibles diferencias entre las magnitudes de las tasas de calentamiento.

Las magnitudes urbano rurales, que constituyen las señales del calentamiento global en Bogotá difieren en ambos entornos. Las diferencias atribuibles a las propiedades térmicas de cada zona climática en la que la concentración y almacenamiento de energía, hacen de la estación El Dorado una zona más cálida al contar con coberturas de mayor admitancia. En tal sentido, advierten de una tasa lineal de calentamiento mayor en la zona urbana, situación que puede derivar en fenómenos de mayor amenaza dentro de la ciudad, dando paso a una nueva interrogante ¿son las coberturas urbanas un agravante a largo plazo para las tasas de calentamiento global o estas se estabilizan al consolidarse la ciudad?

Se concluye que existe una diferencia entre las magnitudes de calentamiento global debido a las condiciones especiales del espacio urbano, en el que este puede aumentar la tasa lineal de calentamiento en 0,07 °C para la temperatura media y en 0,273 °C para la temperatura mínima por década. Las tasas de calentamiento sugieren que la temperatura mínima es más sensible a las señales de cambio climático. Las contribuciones del espacio urbano al incremento de la temperatura para la ciudad de Bogotá, oscilan en 0,26 °C para la temperatura media y de 0,96 °C para la temperatura mínima, desde la media quinquenal del 81-85 (Tabla 3). En promedio la temperatura media urbana es 0,5 °C más caliente que la zona rural y la temperatura mínima rural 1,2 °C más fría que la urbana.

La probabilidad de recurrencia de temperaturas mayores a 3 sigmas que para el año 1985 eran poco usuales ha aumentado para el año 2015, lo que significa que en la actualidad contamos con temperaturas que en el pasado eran consideradas inusuales. Esto también es evidenciado por las anomalías de temperatura media y mínima relacionadas a fenómenos de Niño y Niña, que para años anteriores al 2009 fluctuaban en torno a la norma climática con alguna dependencia al fenómeno, pero que en la actualidad aún bajo condiciones de Niña fuerte no llegan a ser menores que la norma climática, lo que nos habla de mayor ocurrencia de temperaturas cálidas.

Referencias Bibliográficas

- Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D., & Ruiz, J. F. (2012). Cambio climático más probable para Colombia a lo largo del Siglo XXI respecto al clima presente. En Subdirección de Meteorología – IDEAM. pp. 1–38.
- Babativa, C. L. (2018). Exploración de perfiles verticales de humedad relativa, temperatura y concentraciones de pm 2.5 Y black carbon, en la localidad de Puente Aranda (Tesis de Pregrado). Universidad de la Salle. Colombia.
- Banco Mundial. (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia. Recuperado de: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/18426>
- Benavides, H., & Rocha, C. (2012). Indicadores que manifiestan cambios en el sistema climático de Colombia. En IDEAM-METEO/001-2012 Nota Técnica del IDEAM. pp. 1–26.

- Boada Cuevas, P. A. (2011). Caracterización climatológica de la cuenca alta del río bogotá. (Tesis de Pregrado). Universidad de la Salle. Colombia.
- Costa Posada, C. (2007). La adaptación al cambio climático en Colombia Adaptation to Climate Change in Colombia. *Revista de Ingeniería*, 26, 74–80. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/1210/121015050010.pdf>
- DNP, & BID. (2014). *Impactos económicos del cambio climático en Colombia - Síntesis*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Edgar, J., & Bocanegra, M. (2012). Análisis de la variabilidad climática inter-anual (El Niño y La Niña) en la Región Capital, Bogotá-Cundinamarca. En Plan Regional Integral de Cambio Climático. Recuperado de: <http://saga.cundinamarca.gov.co/apps/PRICC/resources/Informes/01.pdf>
- Euscategui, C., & Hurtado, G. (2010). Análisis del impacto del fenómeno “LANIÑA” 2010-2011 En la hidroclimatología del país. II Congreso Internacional Del Clima, 571, 3421586. Recuperado de: <https://bit.ly/2no145b>
- Gámez Gutiérrez, J. (2018). Cambio climático y sus efectos: una propuesta colombiana de mitigación. En *Agrociencias y cambio climático*. pp. 87–108. doi: <https://doi.org/10.19052/2382372010>
- Guijarro, J. (2004). Climatol: Software libre para la depuración y homogeneización. *Asociación Española de Climatología y Universidad de Cantabria*, 4(August), 493–502.
- Hansen, J., Sato, M., & Ruedy, R. (2012). Perception of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(37). doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1205276109>
- Hecht, J. (2009). Wet weather put early humans on Europe's doorstep. *New Scientist*, 204(2734), 16. doi: [https://doi.org/10.1016/s0262-4079\(09\)62975-4](https://doi.org/10.1016/s0262-4079(09)62975-4)
- Hobbie, S. E., & Grimm, N. B. (2020). Nature-based approaches to managing climate change impacts in cities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 375(1794). doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0124>
- IDEAM. (2014). *Evolución de precipitación y temperatura durante los fenómenos el niño y la niña en bogotá cundinamarca (1951 - 2012)*.
- IDEAM, PNUD, MADS, & DNP. (2018). *Segundo Reporte Bienal de Actualización de Colombia ante la CMNUCC*. 180. www.minambiente.gov.co; www.co.undp.org
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2017). *Tercera Comunicación Nacional De Colombia a La Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC)*. Recuperado de: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023731/TCNCC_COLOMBIA_CMNUCC_2017_2.pdf
- IPCC. (2013). Cambio climático 2013 Bases físicas. En *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf
- Jiménez Mejía, J. F. (2016). *Altura de la Capa de Mezcla en un área urbana, montañosa y tropical Caso de estudio: Valle de Aburrá (Colombia)*. (Tesis de Doctorado) Universidad de Antioquia. Colombia.
- Jones, P. D., & Mann, M. E. (2004). Climate over past millennia. *Reviews of Geophysics*, 42(2). doi: <https://doi.org/10.1029/2003RG000143>
- Kahn, M., Mohaddes, K., Ng, R., Pesaran, M., Raissi, M., & Yang, J.-C. (2019). Long-Term Macroeconomic Effects of Climate Change. *IMF Working Papers*, 19(19). doi: <https://doi.org/10.5089/9781513514598.001>
- Karmeshu, N. (2012). Trend Detection in Annual Temperature & Precipitation using the Mann Kendall Test – A Case Study to Assess Climate Change on Select States in the Northeastern United States [University of Pennsylvania]. Recuperado de: http://repository.upenn.edu/mes_capstones/47
- Katz, R. W. (1993). Towards a statistical paradigm for climate change. *Climate Research*, 2(3), 167–175. doi: <https://doi.org/10.3354/cr002167>
- Katz, R. W. (2002). Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies. *Climate Research*, 20(2), 167–185. doi: <https://doi.org/10.3354/cr020167>
- Leão, Z. M. A. N., Kikuchi, R. K. P., Ferreira, B. P., Neves, E. G., Sovierzoski, H. H., Olivseira, M. D. M., Maida, M., Correia, M. D., & Johnsson, R. (2016). Brazilian coral reefs in a period of global change: A synthesis. *Brazilian Journal of Oceanography*, 64(Special Issue 2), 97–116. doi: <https://doi.org/10.1590/S1679-875920160916064sp2>
- Lopez, P., Chevallier, P., Favier, V., Pouyaud, B., Ordenes, F., & Oerlemans, J. (2010). A regional view of fluctuations in glacier length in southern South America. *Global and Planetary Change*, 71(1–2),

85–108. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2009.12.009>

- Mamara, A., Argiriou, A., & Anadranistakis, M. (2013). Homogenization of mean monthly temperature time series of Greece. *International Journal of Climatology*, 33(12), 2649–2666. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.3614>
- Mark, U. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, 348(6234). doi: <https://doi.org/10.1126/science.aaa4984>
- Marotzke, J., Semmann, D., & Milinski, M. (2020). The economic interaction between climate change mitigation, climate migration and poverty. *Nature Climate Change*, 10(6), 518–525. doi: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0783-3>
- Meneses, Z., & Fiquitiva, P. (2017). Análisis espacio-temporal de variables que inciden en la generación de isla de calor urbana en la localidad de Kennedy. Universidad Santo Tomás. Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2017). *Política Nacional de Cambio Climático*. Recuperado de: https://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/Política_Nacional_de_Cambio_Climático_-_PNCC/PNCC_Políticas_Publicas_LIBRO_Final_Web_01.pdf
- Moreno, A. R. (2006). Climate change and human health in Latin America: Drivers, effects, and policies. *Regional Environmental Change*, 6(3), 157–164. doi: <https://doi.org/10.1007/s10113-006-0015-z>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- OMM. (2017). Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el cálculo de las normales climáticas. Organización Meteorológica Mundial, 21. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4167
- OMM. (2019). Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2018. http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1119_es.pdf
- Pabón, J. D. (2003). El cambio climático global y su manifestación en Colombia. Cuadernos de Geografía. *Revista Colombiana de Geografía*, 11–119.
- Paulhus, J. L. H., & Kohler, M. A. (1952). Interpolation of Missing Precipitation Records. *Monthly Weather Review*, 80(8), 129–133. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1952\)080<0129:iompr>2.0.co](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1952)080<0129:iompr>2.0.co)
- Peixoto, J., & Oort, A. (1992). *Physics of Climate*. Springer. Recuperado de: <https://www.springer.com/gp/book/9780883187128>
- Mayorga Ruth, M., Hurtado Gonzalo, M., & Benavides, H. (2011). Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística. IDEAM-METEO/001-2011 Nota Técnica Del IDEAM, 47. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Evidencias+de+Cambio+Climático+en+Colombia+con+base+en+información+estadística.pdf/1170efb4-65f7-4a12-8903-b3614351423f>
- UN environment. (2017). *Status of Climate Change Litigation: A Global Review*.
- Velásquez-Tibatá, J., Salaman, P., & Graham, C. H. (2013). Effects of climate change on species distribution, community structure, and conservation of birds in protected areas in Colombia. *Regional Environmental Change*, 13(2), 235–248. doi: <https://doi.org/10.1007/s10113-012-0329-y>
- Wanner, & Filliger. (1989). Orographic Influence on Urban Climate. *Weather and Climate*, 9(1), 22. doi: <https://doi.org/10.2307/44279768>
- WMO. (2006). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites (Issue 81, p. 51). doi: <https://doi.org/10.1007/s12028-011-9538-3>
- WMO. (2017). Ninth seminar for homogenization and quality control in climatological databases (Issue 85).
- Young, K. C. (1992). A three-way model for interpolating for monthly precipitation values. *Monthly Weather Review*, 120(11), 2561–2569. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120<2561:ATWMFI>2.0.CO](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120<2561:ATWMFI>2.0.CO)