

Dependencia de la variabilidad hidrológica de los fenómenos macroclimáticos. Caso de estudio: análisis de la relación entre el evento del ocb y el régimen hídrico del sistema norte de abastecimiento de Bogotá

Dependence on the hydrological variability of macroclimatic phenomena. Case study: analysis of the relationship between the ocb event and the water regime of the northern supply system of Bogotá

Dependência da variabilidade hidrológica dos fenômenos macroclimáticos. Caso de estudo: análise da relação entre o evento de ocb e o regime hídrico do sistema de abastecimento norte de Bogotá

Lina Betulia Arteaga-Ávila¹
Lina Fernanda Delgado-Peña²
Yulia Ivanova³

Recibido: septiembre 15 del 2018

Aprobado: diciembre 10 del 2018

Disponible en línea: enero 15 del 2019

Cómo citar este artículo:

L. B. Arteaga-Avila, L. F. Delgado-Peña y Y. Ivanova, "Dependencia de la variabilidad hidrológica de los fenómenos macroclimáticos. Caso de estudio: análisis de la relación entre el evento del ocb y el régimen hídrico del sistema norte de abastecimiento de Bogotá", *Revista Ingeniería Solidaria*, vol. 25, n.º 1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.16925/2382-4220.2019.01.09>

Artículo de investigación. <https://doi.org/10.16925/2382-4220.2019.01.09>

¹ Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7923-6937>

Correo electrónico: u1101963@unimilitar.edu.co

² Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9015-1520>

Correo electrónico: u1102073@unimilitar.edu.co

³ Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

Correo electrónico: yulia.ivanova@unimilitar.edu.co

Resumen

Introducción: este artículo es producto de la investigación de la incidencia del fenómeno de oscilación cuasi-bienal sobre el comportamiento hídrico en el norte de abastecimiento de Bogotá realizado en la Universidad Militar Nueva Granada en el año 2017.

Problema: en la última década, en Colombia, se han presentado años de muy alta y de muy baja humedad relativa [1], los cuales se asocian con los fenómenos macroclimatológicos que tienen repercusión sobre el régimen hidrológico regional y local, y generan variabilidad de la oferta hídrica.

Metodología: en este estudio se presenta un análisis estadístico proclive a determinar la influencia de la oscilación cuasi-bienal sobre los caudales medios mensuales de los embalses de Sisga, Tominé y Neusa del sistema de abastecimiento norte de Bogotá, a partir de correlaciones lineales entre las dos variables.

Resultado: se evidenció una incidencia del fenómeno de oscilación cuasi-bienal sobre los afluentes a los embalses entre un 2,7% y 4,0% que tarda en reflejarse en un periodo de nueve meses.

Conclusión: el fenómeno de oscilación cuasi-bienal no aporta de manera significativa la escorrentía superficial de las cuencas estudiadas.

Limitaciones: aunque en el estudio no se ha podido demostrar la incidencia del fenómeno natural, en otras zonas del país este efecto es demostrado. A manera de hipótesis, se puede suponer que la aplicación de otros métodos estadísticos diferentes al aplicado, posibilitará un análisis más profundo de los resultados.

Originalidad: en el marco nacional son pocos los estudios realizados acerca del fenómeno de oscilación cuasi-bienal y su influencia sobre la variabilidad hídrica interanual.

Palabras clave: fenómeno de oscilación cuasi-bienal, variabilidad hídrica, oferta hídrica, eventos macroclimáticos.

Abstract

Introduction: This article is the result of the investigation of the incidence of the quasi-global oscillation phenomenon on the water behavior in the north of Bogota supply carried out at the New Granada Military University in the year 2017.

Problem: In the last decade in Colombia, years have been presented by very high and of very low relative humidity [1], which are associated with macroclimatological phenomena that have repercussions on the regional and local hydrological regime, generating variability of the water supply.

Methodology: This study presents a statistical analysis that is prone to determine the influence of the quasi-biennial oscillation on the average monthly flows of the Sisga, Tominé and Neusa reservoirs of the north Bogotá supply system, based on linear correlations. between the two variables.

Result: an incidence of the quasi-biennial oscillation phenomenon was observed on the tributaries to the reservoirs between 2.7% and 4.0%, which takes a nine-month period to reflect.

Conclusion: The phenomenon of quasi-biennial oscillation does not significantly contribute to the surface runoff of the studied basins.

Limitations: Although the study has not been able to demonstrate the incidence of the natural phenomenon, in other areas of the country this effect is demonstrated. As a hypothesis, it can be assumed that the application of other statistical methods different from the one applied, would allow a deeper analysis of the results.

Originality: in the national framework, few studies have been carried out on the phenomenon of quasi-biennial oscillation and its influence on interannual water variability.

Keywords: quasi-biennial oscillation phenomenon, water variability, water supply, macroclimatic events.

Resumo

Introdução: Este artigo é produto da pesquisa da incidência do fenômeno de oscilação quase-bienal (OQB) sobre o comportamento hídrico no abastecimento norte de Bogotá realizado na Universidad Militar Nueva Granada, em 2017.

Problema: na última década, na Colômbia, ocorreram anos de umidade relativa muito alta e muito baixa, que estão associados com os fenômenos macroclimáticos que repercutem sobre o regime hidrológico regional e local e geram variabilidade da oferta hídrica.

Metodologia: neste estudo, apresenta-se uma análise estatística propensa a determinar a influência da oscilação quase-bienal sobre os fluxos médios mensais das represas de Sisga, Tominé e Neusa do sistema de abastecimento norte de Bogotá, a partir de correlações lineares entre as duas variáveis.

Resultado: evidenciou-se uma incidência do fenômeno de oscilação quase-bienal sobre os afluentes das represas entre 2,7% e 4,0% que demora em refletir-se em um período de nove meses.

Conclusão: o fenômeno de oscilação quase-bienal não colabora de maneira significativa com o escoamento superficial das bacias estudadas.

Limitações: ainda que o estudo não tenha demonstrado a incidência do fenômeno natural, em outras áreas do país esse efeito é demonstrado. A título de hipótese, pode-se supor que a aplicação de outros métodos estatísticos diferentes ao aplicado possibilitará uma análise mais profunda dos resultados.

Originalidade: no contexto nacional são poucos os estudos realizados sobre o fenômeno de oscilação quase-bienal e sua influência sobre a variabilidade hídrica anual.

Palavras-chave: Fenômeno de oscilação quase-bienal, variabilidade hídrica, oferta hídrica, eventos macroclimáticos.

1. Introducción

Colombia es un país con una alta variabilidad espacio-temporal climática. Esto debido a un abanico de factores entre los que se destacan: la cercanía con el océano Pacífico, el mar Caribe, la selva amazónica y la presencia de la cordillera de los Andes [2]. Además, la variabilidad hidroclimatológica se ve afectada por la ubicación del país sobre el ecuador geográfico, zona donde confluyen los vientos alisios y la oscilación meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) [3]. Al localizarse en la zona ecuatorial, estos fenómenos influyen en el clima del país a diferentes escalas de tiempo; ejemplos de estos son: el Niño-Oscilación del Sur (ENSO), la oscilación del Atlántico de norte, la oscilación del Pacífico y la oscilación meridional, que ejercen un efecto no despreciable y los cuales dominan la hidroclimatología de Colombia.

La OCB fue descubierta por Reed *et al.* y Veryard y Ebdon quienes se basaron en los registros de radiosonda de Canton Island de 1953 a 1967, Gan (Maldivas) de 1967 a 1975 y Singapur desde 1976, donde se observaron operativamente vientos estratosféricos en la región ecuatorial [4].

La oscilación cuasi-bienal (OCB) es una variabilidad de la estratosfera ecuatorial de propagación descendente de los regímenes de viento del este y del oeste, con un período promedio de aproximadamente de 28 meses, medido entre 10 hPa y 100 hPa [5]. En cuanto a los vientos zonales de la OCB, presentan un patrón alternante entre dirección oeste y este, con una periodicidad alrededor de 24-30 meses. Se ha evidenciado que los regímenes sucesivos aparecen primero por encima de los 30 km (~10 hPa) sobre el nivel del mar propagándose hacia niveles inferiores de la atmósfera con una velocidad de 1 km/mes y la propagación hacia niveles bajos con una amplitud entre los 30 y 23 km, decreciendo por debajo de los 23 km. [5]

La OCB no solo afecta al viento zonal, sino que también modula la temperatura y el transporte de constituyentes atmosféricos a través de la circulación meridional secundaria (CMS) [6]. Una de las fases de las oscilaciones consiste en el arrastre de vientos en dirección este que induce una circulación a través de la estratosfera; mientras que durante la otra fase de la oscilación, la circulación invierte su orden en dirección oeste, cabe aclarar que el movimiento se da entre las zonas del extra trópico y el trópico. Con estos dos tipos de circulación, el aire es transportado entre las dos regiones y por lo tanto las masas de aire transportadas tienen concentraciones diferentes de ozono; las oscilaciones no solo cambian la circulación en los trópicos, sino también indirectamente causan cambios en las latitudes medias y altas del planeta, repercutiendo en la variación de las precipitaciones.

Teniendo en cuenta que se conoce detalladamente la incidencia del fenómeno ENSO al régimen hidroclimatológico, pero se desconoce la influencia del fenómeno de la OCB sobre este, en este trabajo se analizó el impacto de la oscilación cuasi-bienal sobre el régimen hídrico de los afluentes de los embalses que conforman el sistema hídrico de abastecimiento norte de Bogotá, el cual es la segunda red de distribución de acueducto más importante del centro del país y se compone por los embalses de Sisga, Tominé y Neusa. El sistema es de gran importancia dado que permite la regulación del caudal del río Bogotá, la generación de energía eléctrica, y también por que abastece el 30% de la demanda total de agua en Bogotá, y a los municipios de la Sabana de Bogotá [7].

El embalse del Sisga se encuentra localizado en el municipio de Chocontá en el departamento de Cundinamarca; tiene una capacidad máxima de 102 millones de metros cúbicos y cubre un área de 15.682 ha. Sus principales afluentes los constituyen el río San Francisco y la Quebrada Granadilla; este embalse fue construido con el propósito de captar las aguas del invierno necesarias para abastecer la planta de Tibitoc.

Por su parte, el embalse de Tominé está ubicado a 50 km, al noreste de la ciudad de Bogotá, es el proyecto más importante de mejoramiento de la calidad del agua y del uso del recurso hídrico, ya que es la reserva hídrica de la Sabana de Bogotá con una capacidad total de 690 millones de metros cúbicos y cubre un área de 4.323 ha; el cual controla el caudal del río Bogotá en temporada de lluvias, también supe las diferentes demandas ambientales de los ecosistemas del sector agropecuario, energético e incluso de saneamiento básico de la población.

La cuenca del embalse de Tominé se ubica sobre los municipios de Guasca, Guatavita y Sesquilé, y es alimentado por los afluentes de Aves, Chipatá y Siecha y sobre la cuenca del embalse se desarrollan actividades de agricultura y ganadería.

Por otro lado, el embalse del Neusa comprende un área de 13,500 ha, con una capacidad máxima de 102 millones de metros cúbicos, sus principales afluentes son el río Cubillos y el río Siguatoque; el objeto del embalse es servir como fuente de abastecimiento para consumo humano, en el acueducto Cogua-Zipacquirá, y suplir un porcentaje de la demanda en la planta Tibitoc, también cumple la función de controlar las inundaciones en la Sabana de Bogotá, mediante el control de los caudales máximos en la cuenca del río Neusa y regularlos durante la temporada seca [7].

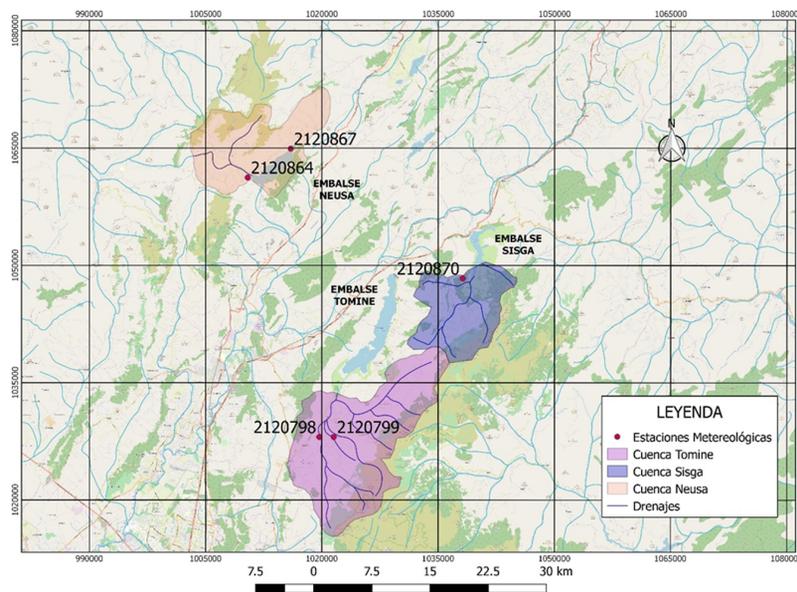


Figura 1. Mapa de delimitación de cuenca hidrográfica, sistema de abastecimiento hídrico norte de Bogotá y ubicación de estaciones meteorológicas

Fuente: elaboración propia basada en cartografía del IGAC- sistema de georeferenciación MAGNA SIRGAS 3116

2. Antecedentes

Existen diferentes autores que han realizado estudios relacionados con la oscilación cuasi-bienal, entre ellos está el estudio internacional realizado en Costa Rica donde se estudia la oscilación cuasi-bienal, el fenómeno ENOS y el acoplamiento de algunos parámetros superficiales y estratosféricos [4], donde se encontró un acople entre la OCB y ENOS, que produce una disminución en la frecuencia de ciclones tropicales en el Atlántico por una incidencia de la oscilación cuasi-bienal en la estratosfera baja a 50 hPa. Este estudio permite evidenciar que la OCB repercute sobre la hidroclimatología en la región ecuatorial.

Se ha evidenciado que la OCB puede, no solo afectar la circulación atmosférica ecuatorial, sino también la circulación atmosférica de latitudes más altas y formación de anomalías meteorológicas duraderas [8].

También se ha considerado que la OCB puede incidir el vórtice del ártico polar, para lo cual distintos investigadores han estudiado a partir de funciones empíricas la variabilidad de la estratosfera con las fases este y oeste de la OCB, encontrando que el vórtice del ártico polar se hace más débil durante la fase del este que durante la fase del oeste [9].

Además se tiene el estudio realizado en Suiza por Stefan Brönnimann, Abdul Malik, Alexander Stickler, Martin Wegmann, Christoph C. Raible, Stefan Muthers, Julien Anet, Eugene Rozanov y Werner Schmutz, en el 2016, donde por medio de una serie histórica de la OCB, analizaron diferentes conjuntos de datos atmosféricos, encontrando que la OCB tiene una influencia con el invierno boreal y el vórtice polar estratosférico, y que esta relación es débil en promedio pero se puede identificar con fluctuaciones multidecenales [10].

Por otra parte, está el trabajo realizado por Hashim y Smyshlyaev de San Petersburgo, Rusia; en el cual, se busca a partir de la información de las fases de la oscilación cuasi-bienal hacer una predicción estadística de las precipitaciones de África oriental. Por último, como estudios internacionales están los estudios realizados por Trenberth y Shin, Klein y Bloom, Kiladis y Díaz, Cayan y Peterson, Leathers et al., Lins, Martelo y Hansen y Matthes, que comprueban que las condiciones atmosféricas y oceánicas que se presentan a gran escala, como el fenómeno macroclimático de la OCB, ejercen una influencia relevante sobre los patrones de frecuencia baja de la variabilidad climática e hidrológica de América del Norte [11], [12].

Ahora, dentro del marco nacional, G. Poveda presenta un análisis estadístico tendiente a cuantificar la posible relación entre los registros de precipitación en varias estaciones colombianas, y la serie de la QBO discretizada en sus fases este y oeste, de lo que obtiene que las correlaciones entre la QBO y los registros de lluvia en Colombia

son muy bajas, lo que identifica que la señal de la oscilación cuasi-bienal de los vientos estratosféricos no parece estar incidiendo de manera simple ni lineal sobre los eventos de precipitación en Colombia [1]. Sin embargo, a partir de un estudio realizado en la zona del Amazonas y del Pacífico realizado por Zea, León y Eslava y Cortés, se encontró que la OCB presenta una ciclicidad que influencia la intensidad y magnitud de los eventos cálidos y fríos del ENOS en el océano Pacífico tropical [13], [4].

Un último estudio, realizado en el año 2017, evidencia la incidencia de la OCB sobre los afluentes del sistema de abastecimiento del sur de Bogotá (embalses de la Regadera y Chisacá), donde el régimen hídrico de esta zona depende entre un 10% y 14% de la OCB, estos tipos de estudios son usados para predecir las condiciones de caudal siendo el fenómeno de OCB una de las variables predictivas [15].

Lo mencionado anteriormente permite ver que la alta variabilidad hidrológica presentada en el país es producto de la variabilidad climática, donde se incluyen fenómenos macroclimáticos como la OCB, por lo que se hace notario la necesidad de definir el comportamiento de este fenómeno sobre diferentes zonas del territorio colombiano, que son importantes para el desarrollo social y económico del país, que para el caso de estudio es el sistema hídrico de abastecimiento norte de Bogotá.

3. Metodología

Las etapas de la metodología empleada para el desarrollo del presente estudio se resumen gráficamente a continuación (figura 2):

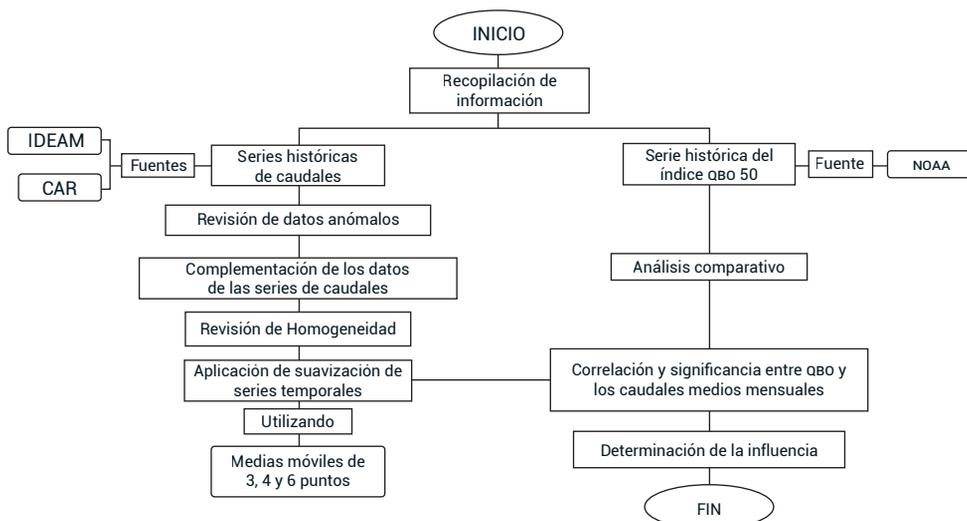


Figura 2. Mapa metodológico del estudio

Fuente: elaboración propia

El estudio inicio con la recopilación de información obtenida del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), de donde se obtuvieron series históricas de caudales promedios mensuales de las estaciones ubicadas aguas arriba de los embalses estudiados, generalmente este tipo de estudios deben realizarse usando series de datos con un periodo de tiempo de 30 años, pero debido a que algunas de las estaciones ubicadas en las zonas de estudio no contaban con series con el periodo de tiempo requerido, se trabajaron registros que contaran con un periodo mayor de 20 años, buscando que estos reflejaran el comportamiento de la variable en el tiempo y que a su vez fuesen representativos para poder determinar un patrón de comportamiento; y de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) donde se obtuvieron las series históricas de la oscilación cuasi-bienal (OCB 50 hPa) [16].

Se realizó un control de calidad de datos, donde se identificaron los valores atípicos del registro de datos a través de la prueba de Grubb's, [17] la cual permite detectar estos valores con el supuesto de normalidad, aproximando los datos a una distribución normal; y los valores atípicos detectados se eliminaron de la serie de registros. El criterio de Grubb's se puede expresar a través de la siguiente:

$$T = \frac{\bar{x} - x_1}{s} \quad (1)$$

Dónde:

" \bar{x} = Promedio multianual"

" x_1 = Dato caudal mensual medio"

" s = Desviación Estándar"

El test de Grubb's fue aplicado para las series mensuales de caudales promedios, considerando a parte las series de cada mes del año. Se realizó la comparación entre el T empírico calculado, y el T Critico para un nivel de significancia del 5%, donde si se tiene que el valor empírico es mayor al crítico, es un dato atípico por lo tanto se considera como un dato faltante. Este dato fue eliminado del registro histórico.

Ante la ausencia de datos se hizo necesario emplear técnicas estadísticas para complementar los datos faltantes, por lo que se realizó un análisis de regresión lineal. Este método permite complementar los registros históricos bajo el supuesto, que el comportamiento hidroclimático en una estación es similar al de la estación más cercana geográficamente, cumpliendo que el coeficiente de correlación sea mayor de 0,7 y estadísticamente significativo.

El coeficiente de correlación lineal simple se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$\Gamma = \frac{\sum Y_1 Y_2 - \sum Y_1 \sum Y_2 / n}{\sqrt{(\sum Y_1^2 - n \bar{Y}_1^2)(\sum Y_2^2 - n \bar{Y}_2^2)}} \quad (20)$$

Dónde:

Γ = Coeficiente de correlación lineal

n = número de datos

Y_1 = caudales estación 1

Y_2 = caudales estación 2

Posteriormente se realizó una revisión de la homogeneidad de los registros, utilizando los criterios de Student y Fisher [18] para detectar que los datos históricos pertenecen al mismo conjunto de datos, sin alteraciones de su valor promedio y su varianza y así, garantizar que las estaciones sean estacionarias; estas alteraciones se pueden presentar si la estación de medición ha sufrido cambios de observador o entorno, cambios de instrumento, o si hay interferencia de factores antrópicos sobre la zona de medición [19].

El criterio Student, verifica la homogeneidad usando los promedios de las series y evaluando si han sufrido modificaciones. Este criterio se determina con la siguiente fórmula:

$$t = \frac{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2}{\sqrt{n_{y2} \sigma_{y2}^2 + n_{y1} \sigma_{y1}^2}} * \sqrt{\frac{n_{y2} n_{y1} (n_{y2} + n_{y1} - 2)}{n_{y2} + n_{y1}}} \quad (20)$$

Dónde:

\bar{Y}_1 = Promedio serie 1 = Promedio serie 1

\bar{Y}_2 = Promedio serie 2 = Promedio serie 2

n_{y2} = Numero de datos serie 2 = Numero de datos serie 2

n_{y1} = Numero de datos serie 1 = Numero de datos serie 1

σ_{y2} = Desviación estándar serie 2 = Desviación estándar serie 2

σ_{y1} = Desviación estándar serie 1 = Desviación estándar serie 1

El criterio de Fisher describe la homogeneidad de la serie mediante la desviación estándar, su fórmula es la siguiente:

$$F = \frac{\sigma_{y1}^2}{\sigma_{y2}^2} \quad (20)$$

Dónde:

σ_{y1} = Desviación estándar serie 1 = Desviación estándar serie 1

σ_{y2} = Desviación estándar serie 2 = Desviación estándar serie 2

Este criterio depende de los grados de libertad y se usan las tablas estadísticas de Fisher para establecer los valores críticos. Se evalúa la homogeneidad de la serie de acuerdo al siguiente el criterio:

A continuación de esto se realizó una suavización de las series de caudales mediante la utilización de medias móviles de tres, cuatro y seis puntos, con el fin de mejorar la correlación entre las series de caudales medios y las series del índice OCB. La media móvil es un proceso estadístico que, mediante el promedio de los valores, permite la suavización de los picos en la serie de datos y de esta forma lograr una mejor correlación entre las series de caudales y el índice OCB. [20]

Estas medias móviles se pueden describir a través de las siguientes dos ecuaciones, respectivamente:

$$Z_t = \frac{\frac{1}{2}(Z_{t-2}) + (Z_{t-1}) + Z_t + (Z_{t+1}) + \frac{1}{2}(Z_{t+2})}{4} \quad (2); \text{ (Aguirre, 1994) [20]}$$

$$Z_t = \frac{\frac{1}{2}(Z_{t-3}) + (Z_{t-2}) + (Z_{t-1}) + Z_t + (Z_{t+1}) + (Z_{t+2}) + \frac{1}{2}(Z_{t+3})}{4} \quad (3); \text{ (Aguirre, 1994) [20]}$$

Con cada uno de los datos suavizados de las tres medias móviles se realizó un desfase con el índice OCB 50 para cada estación de la zona de estudio, este desfase se realizó mes a mes hasta por 12 meses, puesto que se considera que los fenómenos macroclimáticos demoran en reflejarse debido a su intensidad y a las características del territorio; una vez realizado esto, se verificó la correlación y su significancia a partir de una regresión lineal, y se logró identificar los meses en que se refleja la oscilación cuasi-bienal sobre los cuerpos hídricos de la zona de estudio.

4. Resultados

Como primer resultado, se encuentra la obtención de las series históricas de caudales de cinco estaciones que se muestran en la tabla 1, y los datos históricos del índice de oscilación cuasi-bienal.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas de la zona de estudio

Código estación	Nombre de la estación	Entidad responsable	Periodo de registro
2120798	SAN ISIDRO	CAR	(1979-2013)
2120799	Santo Domingo	CAR	(1973-2013)
2120870	Iberia La	IDEAM	(1973-2014)
2120864	Volador El	CAR	(1993-2013)
2120867	Guanquica	CAR	(1993-2013)

Fuente: elaboración propia

Se logró obtener un registro continuo de 34 años para las estaciones de Santo Domingo, San Isidro y La Iberia, y de 20 años para las estaciones de El Volador y Guanquica. Continuando con la metodología, al realizar los diferentes procesos de revisión de calidad de los datos de caudales se encontraron los resultados que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de datos anómalos y homogeneidad de las series de caudales medios

Código estación	Nombre de la estación	Datos anómalos	Homogeneidad	
			Prueba Student	Prueba Fisher
2120799	Santo Domingo	14	Heterogénea	Homogénea
2120798	San Isidro	12	Homogénea	Homogénea
2120870	Iberia La	10	Homogénea	Homogénea
2120864	Volador El	7	Homogénea	Homogénea
2120867	Guanquica	3	Homogénea	Homogénea

Fuente: elaboración propia

Se trabajó con cinco estaciones (figura 1), donde se identificaron 46 datos atípicos que se eliminaron y posteriormente se complementaron a través de un análisis de regresión lineal con las estaciones cercanas.

En la revisión de la homogeneidad de las series, se encontró que mediante la prueba de Student los caudales medios mensuales son homogéneos por su valor promedio, excepto para la estación 2120799 Santo Domingo, la cual manifestó un cambio en su variabilidad por su promedio, y presentó un régimen no estacionario. Esta heterogeneidad se puede dar debido a diversos factores climáticos y por la posible incidencia del factor humano, puesto que sobre el río Chipatá, en el cual se encuentra la estación, se realizan actividades agropecuarias, especialmente en la vereda El Santuario del municipio de Guasca. Mediante el test de Fisher se evidenció que las series mensuales de caudales son todas homogéneas por la varianza, lo que manifiesta que no hubo cambio en el patrón de variabilidad.

Continuando con la metodología, al realizar la correlación de la serie OCB con los datos suavizados con las medias de 3,4 y 6 puntos, y al determinar su significancia, se encontró que las mejores correlaciones se presentan con la utilización de la media móvil de seis puntos.

En la tabla 3 se muestran los coeficientes de correlación entre las series suavizadas de los caudales mensuales y los índices de OCB50, donde se observan los valores de correlación y su significancia entre las dos variables de estudio.

Tabla 3. Correlaciones OCB50 y series de caudales suavizadas, sistema norte de Bogotá

ESTACIÓN: 2120799-STO. DOMINGO												
	Ene	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Correlación	0,009	0,011	0,014	0,014	0,014	0,013	0,013	0,016	0,024	0,036	0,049	0,053
Significancia	Sí	No	No	No								
ESTACIÓN: 2120798-SAN ISIDRO												
Correlación	0,008	0,014	0,034	0,049	0,056	0,053	0,035	0,005	0,027	0,058	0,085	0,104
Significancia	Sí	Sí	No	No	No	No	No	Sí	Sí	No	No	No
ESTACIÓN: 2120870-IBERIA LA												
Correlación	0,017	0,041	0,064	0,085	0,104	0,115	0,115	0,103	0,078	0,043	0,000	0,045
Significancia	Sí	No	Sí	No								
ESTACIÓN: 2120864-VOLADOR EL												
	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene	Feb.	Mar.	Abr.
Correlación	0,010	0,017	0,047	0,074	0,098	0,115	0,121	0,117	0,06	0,078	0,036	0,013
Significancia	Sí	Sí	No	Sí	Sí							
ESTACIÓN: 2120867-GUANQUICA												
Correlación	0,083	0,074	0,065	0,054	0,040	0,025	0,007	0,012	0,031	0,049	0,064	0,075
Significancia	No	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No	No

Fuente: elaboración propia

Además, se logra establecer que estas correlaciones son estadísticamente significativas, aunque el coeficiente de correlación no sea numéricamente alto. Las correlaciones obtenidas para el embalse de Tominé están entre un intervalo del 2,4 % y 2,7 %, para el embalse de Sisga entre 0,2% y 1,7% y para el embalse de Neusa se encuentra entre 3,1% y 4%, con un retardo de 9 meses, periodo en cual demora en reflejarse este fenómeno.

En las siguientes figuras se presenta las relaciones entre las variables de manera gráfica:

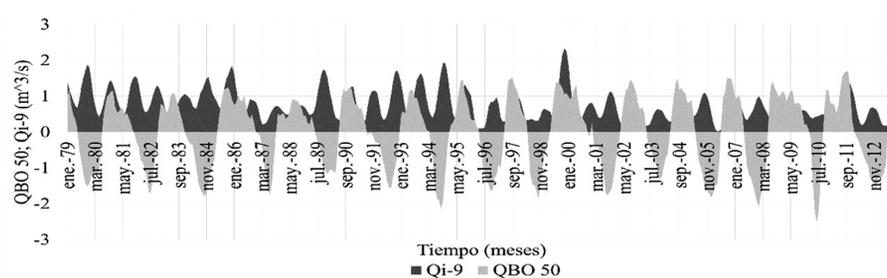


Figura 3. Variación de las series suavizadas de caudales medios mensuales y la del índice OCB50 (Desfase 9 meses), Estación 2120799

Fuente: elaboración propia

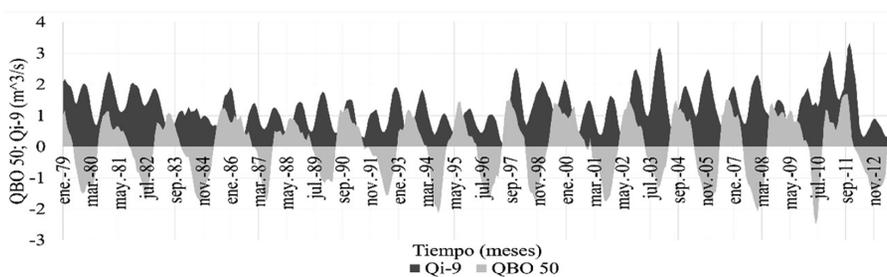


Figura 4. Variación de las series suavizadas de caudales medios mensuales y la del índice OCB50 (Desfase 9 meses), Estación 2120798

Fuente: elaboración propia

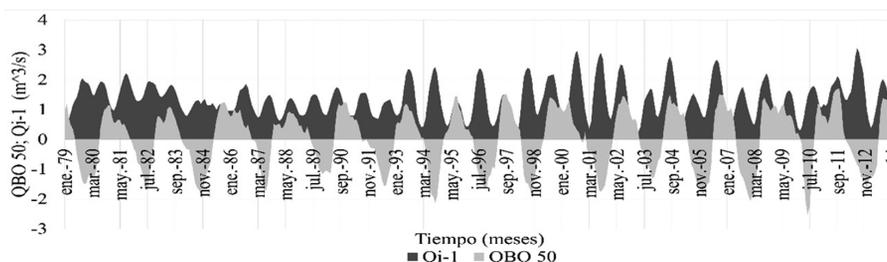


Figura 5. Variación de las series suavizadas de caudales medios mensuales y la del índice OCB50 (Desfase 1 mes), Estación 2120870

Fuente: elaboración propia

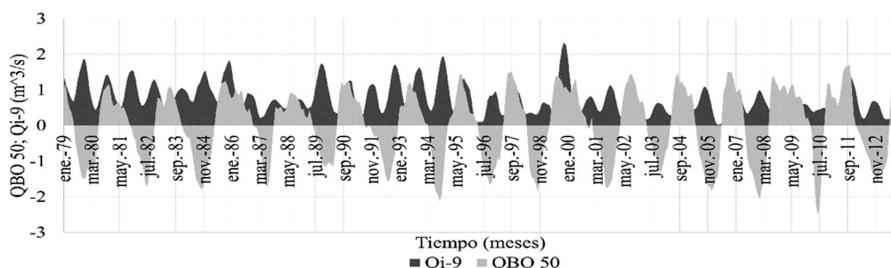


Figura 6. Variación de las series suavizadas de caudales medios mensuales y la del índice OCB50 (Desfase 3 meses), Estación 2120864

Fuente: elaboración propia

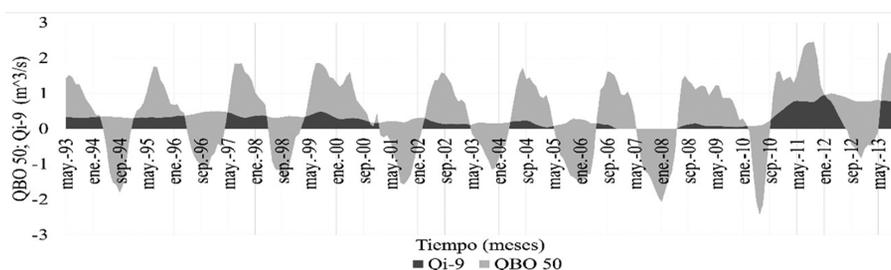


Figura 7. Variación de las series suavizadas de caudales medios mensuales y la del índice OCB50 (Desfase 9 meses), Estación 2120867

Fuente: elaboración propia

Mediante un análisis gráfico, se identifica que algunas fases de los ciclos de la OCB coinciden con las fluctuaciones de los ciclos de los caudales medios mensuales, por lo que permite reiterar la incidencia del fenómeno de oscilación cuasi-bienal sobre los caudales medios mensuales de los afluentes de los embalses de Sisga, Tominé y Neusa.

5. Discusión

La variabilidad hidrológica en Colombia depende de varios factores de origen macroclimático que se pueden presentar en mayor o menor medida. Las manifestaciones de estos factores macro climáticos se pueden modificar por los factores endógenos del territorio, caso es la orografía, que puede servir como barrera para la señal macro climática, o por el contrario, permite que una vertiente esté más expuesta que otras. En Colombia el ENSO es uno de los factores con mayor relevancia en la definición de la variación interanual de los caudales, y en menor medida se encuentran otros fenómenos macroclimáticos, y en esta investigación se ha podido demostrar que el peso

de la OCB en la variabilidad interanual hidrológica de Colombia es despreciable en la zona de estudio, pero no significa que en otras partes del país se presente el mismo comportamiento.

En cuanto a la metodología utilizada en la investigación, es importante resaltar que la metodología utilizada no es la única posible, por lo que se pueden revisar otros procedimientos estadísticos como los son las correlaciones no lineales y el método de los componentes principales, que permitan revisar la correlación entre las variables de estudio y definir la mejor metodología, que sirvan como referencia a estudios posteriores enfocados en el mismo tema.

6. Conclusiones

Uno de los fenómenos macroclimáticos con mayor influencia sobre la variabilidad interanual del clima y del recurso hídrico en Colombia es el ENSO y en una gran parte del país el recurso hídrico disminuye o aumenta en función de la presencia de este. A partir del estudio se evidenció que es el ENSO el que, en mayor medida, repercute en el comportamiento de los caudales de los afluentes del sistema de abastecimiento norte de Bogotá, y que otros factores como lo es la OCB no es relevante en el comportamiento de los mismos.

A partir del estudio se pudo evidenciar que las correlaciones entre los caudales medios mensuales y el índice OCB 50 se presentan entre un 2,7% y 4,0%, y aunque esta relación es estadísticamente significativa, en función a lo estipulado que con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), que el error típico para un nivel de confianza del 95% en la medición de caudales en condiciones normales, es alrededor de un 5%, al estar los valores hallados dentro de este rango, se encuentra que el aporte del OCB a la variabilidad hidroclimatológica en esta parte del país no es relevante.

Referencias

- [1] G. Poveda, J. Vélez, O. Mesa, C. Hoyos, L. Salazar, J. Mejía, O. Barco y P. Correa, "Influencia de fenómenos macroclimáticos sobre el ciclo anual de la hidrología colombiana: cuantificación lineal, no lineal y percentiles probabilísticos", *Meteorol. Colomb*, vol. 6, pp. 121-130, oct. 2002. [En línea] Disponible en: http://www.matematicas.unal.edu.co/unciencias/data-file/user_23/file/METEOROLOGIA/13Poveda%20Clima%20Nuevo.pdf

- [2] W. Buytaert, R. Celleri, P. Willems, B. De Bièvre y G. Wyseure, "Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: a case study from the south Ecuadorian Andes", *Journal of Hydrology*, vol. 329, pp. 413-421, oct. 2006. [En línea] Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- [3] M. Zuluaga, J. Posada y G. Poveda, "Relación entre las fases de la oscilación cuasi-bienal, la precipitación mensual y la radiación de onda larga emergente en Colombia". Memorias IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología, Buenos Aires Argentina, pp.1-2. 2001. [En línea] Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4416/1/AA3318.pdf>
- [4] J. Amador, "La oscilación cuasi-bienal, ENOS y acoplamiento de algunos parámetros superficiales y estratosféricos sobre Costa Rica", *Topografía y Meteorología Oceanográfica*, vol. 3, pp. 45-53, 1996. [En línea] Disponible en: <http://65.182.2.246/docum/crid/Abril2006/CD1/pdf/spa/doc8710/doc8710-contenido.pdf>
- [5] M. Baldwin, L. Gray, T. Dunkerton, K. Hamilton, P. Haynes, W. Randel, J. Holton, M. Alexander, I. Hirota, T. Horinouchi, D. Jones, J. Kinnarsley, C. Marquardt, K. Santo y M. Takahashi, "The Quasi-biennial Oscillation", *Reviews of Geophysics*, vol.39, pp.179-229, 2001. [En línea] Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/1999RG000073/epdf>
- [6] M. Giorgetta, E. Manzini y E. Roeckner, "Forcing of the quasi-biennial oscillation from a broad spectrum of atmospheric waves", *Geophysical Research Letters*, vol. 29, pp. 86-1-86-4, abr. 2002. [En línea] Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002GL014756/full>
- [7] E. Torres, "Diagnóstico ambiental de las cuencas hidrográficas de embalses en Colombia", *Avances. Investigación en Ingeniería*, vol.10, pp. 66-68, 2009. [En línea] Disponible en: <http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/index.php/2-uncategorised/216-revista-avances-volumen-10.html>
- [8] B. Naujokat, "An update of the observed Quasi- Biennial Oscillation of stratospheric winds over the 27 tropics", *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 43, no. 17, pp. 1873-1877, 1986. . [En línea] Disponible en: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043<1873:AUOT OQ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043<1873:AUOT OQ>2.0.CO;2)
- [9] C. I. Garfinkel, T. A. Shaw, D. L. Hartmann y D. W. Waugh, "Does the Holton-Tan mechanism explain how the quasi-biennial oscillation modulates the Arctic Polar vortex?" *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 69, no. 5, pp. 1713-1733, 2012. [En línea] Disponible en: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-096.1>

- [10] S. Brönnimann, A. Malik, A. Stickler, M. Wegmann, C. Raible, S. Muthers, J. Anet, E. Rozanov, W. y Schmutz. “Multidecadal variations of the effects of the Quasi-Biennial Oscillation on the climate system”, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 16, pp. 15529-15543, 2016. [En línea] Disponible en: <https://www.atmos-chem-phys.net/16/15529/2016/>
- [11] F. Hansen y K. Matthes, “Tropospheric QBO–ENSO interactions and differences between the Atlantic and Pacific”, *Journal of Climate*, vol. 29 no. 4, pp. 1353-1368, 2016. [En línea] Disponible en: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-15-0164.1>
- [12] M. Martelo, O. Moreno y C. Mendoza, “Estudio del impacto del cambio climático sobre la agricultura y la seguridad alimentaria en la República Bolivariana de Venezuela”, Dirección de Hidrología y Meteorología, Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales, Venezuela, 2010, pp. 38-40. [En línea] Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-ax365s.pdf>
- [13] B. Hernández, “Variabilidad interanual de las anomalías de la temperatura superficial del mar en aguas cubanas y su relación con eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENSO)”. *Latin American Journal of Aquatic Research*, vol. 30, no. 2, pp. 21-31, nov. 2002. [En línea] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-7178200200020000>
- [14] M. Cortés, “Análisis de variables de caudal y precipitación de sectores en los departamentos de Boyacá y Casanare y su alteración por fenómenos macroclimáticos y de cambio global”, *L'esprit Ingénieux*, vol. 3, no. 1, pp. 115-116, 2012. [En línea] Disponible en: <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/129>
- [15] A.D. Aguirre-Cárdenas, S. Almanza-Velazco y Y. Ivanova. “Influencia del fenómeno de oscilación cuasi-bienal en las afluencias del sistema sur de abastecimiento de Bogotá”, *Rev. Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 18, no.1, pp. 16-24, 2018. [En línea] Disponible en: <https://doi.org/10.19053/1900771X.v18.n1.2018.7822>
- [16] J. R. Holton y H. C. Tan-Tan, “The Influence of the equatorial quasi-bienal oscillation on the global circulation at 50 mb”, *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 37, pp. 2200-2208, 1980. [En línea] Disponible en: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1980\)037<2200:TIOTEQ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<2200:TIOTEQ>2.0.CO;2)
- [17] C. Wang, K. Viswanathan, L. Choudur, V. Talwar, W. Satterfield y K. Schwan. “Statistical techniques for online anomaly detection in data centers”, en *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (1M)*, my. 2011. [En línea] Disponible en: <http://www.hpl.hp.com/techreports/2011/HPL-2011-8.pdf>
- [18] M. DeGroot y M. Schervish, *Probability and Statistics*, vol. 4m, pp.514-517, 2012. [En línea] Disponible en: <http://lib.hpu.edu.vn/handle/123456789/28621>

- [19] L. Guenni, E. Degryze y K. Alvarado, "Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela", *Revista Colombiana de Estadística*, vol. 31, pp. 41-61, jun. 2008. [En línea] Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rce/v31n1/v31n1a03.pdf>
- [20] J. L. Devore, *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*, 7ª ed., México, D. F.: Cengage Learning, 2008, pp 485-487.