

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD CLIMÁTICA Y SU APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO BOLO EN COLOMBIA

Viviana VARGAS FRANCO¹

¹Facultad de Ingeniería y Administración. Grupo monitoreo, modelación y gestión de cuencas hidrográficas. GECH. Universidad Nacional de Colombia-Sede Palmira.

vvargasf@unal.edu.co

RESUMEN

El cambio y la variabilidad climática son fenómenos que están impactando fuertemente la humanidad, los ecosistemas y la biodiversidad a nivel mundial. Los países en vía de desarrollo no son generadores de grandes volúmenes de gases efecto invernadero (GEI), sin embargo, sufren de manera dramática los efectos e impactos de los cambios extremos del clima. Entre los impactos se encuentran: olas de calor, inundaciones, sequías y deslizamientos, los cuales generan pérdidas materiales, en vidas humanas y ecosistemas. La vulnerabilidad climática (VC) definida como la propensión o predisposición de seres humanos, ecosistemas y biodiversidad a verse perjudicados en cualquier extensión, como resultado de algún evento peligroso. Medir la VC no es un proceso sencillo, pues es un concepto integrado, complejo y múltiple. Así mismo, la escala general de medición es a nivel de país. Este estudio aplicó y analizó un índice para evaluar la vulnerabilidad climática (ICC) a nivel de cuencas hidrográficas de la región andina tropical. El índice fue desarrollado a través de indicadores Presión-Estado-Respuesta (PER) y lógica difusa de la inteligencia artificial. El índice se aplicó en la cuenca hidrográfica del río Bolo, ubicada en la región andina del departamento del Valle del Cauca en Colombia. Los datos para utilizar el índice ICC se obtuvieron a través de información secundaria de instituciones públicas. Los resultados indican que el nivel de vulnerabilidad en la cuenca del río Bolo presenta valores de malo, en la zona baja, regular en la zona media y malo en la zona alta.

Palabras clave: vulnerabilidad climática, cuenca hidrográfica, río Bolo, índice de vulnerabilidad climática, indicadores Presión-Estado-Respuesta.

ABSTRACT

Climate change and variability are phenomena that are strongly impacting humanity, ecosystems and biodiversity worldwide. Developing countries are not generators of large volumes of greenhouse gases (GHG), however, they suffer dramatically from the effects and impacts of extreme climate changes. Among the impacts are: heat waves, floods, droughts and landslides, which generate material losses, in human lives and ecosystems. Climate vulnerability (CV) defined as the propensity or predisposition of humans, ecosystems and biodiversity to be harmed to any extent as a result of some hazardous event. Measuring CV is not a simple process, as it is an

integrated, complex and multiple concept. Likewise, the general scale of measurement is at the country level. This study applied and analyzed an index to assess climate vulnerability (CCI) at the level of hydrographic basins in the tropical Andean region. The applied index was developed through Pressure-State-Response (PER) indicators and fuzzy logic of artificial intelligence. The index was applied in the hydrographic basin of the Bolo River, located in the Andean region of the department of Valle del Cauca in Colombia. The data to use the CCI index was obtained through secondary information from public institutions. The results indicate that the level of vulnerability in the Bolo river basin presents values of bad, in the low zone, regular in the middle zone, and bad in the high zone.

Key words: climate vulnerability, hydrographic basin, Bolo river, climate change index, Pressure-State-Response indicators.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio y variabilidad climática son fenómenos que están afectando fuertemente a diversos países, con fenómenos naturales extremos como sequías, inundaciones, ciclones y deslaves, entre otros (IPCC, 2014). Uno de los países que ha sufrido eventos extremos es Colombia, con impacto en pérdidas de vidas humanas, ecosistemas, biodiversidad y pérdidas económicas considerables (Vargas-Franco & Restrepo-Tarquino, 2018). A pesar de que el país cuenta con estudios sobre cambio climático (CC), estos han sido desarrollados a escala de país o por departamentos administrativos, más que a nivel local, microcuencas o cuencas hidrográficas. Así mismo, el énfasis de los estudios ha sido enfocado en la variabilidad de la temperatura y precipitación. Generalmente, a escala local no se dispone de datos ni información suficiente, ni con el nivel de certidumbre necesario para tomar decisiones de planificación. La vulnerabilidad debe analizarse como una condición multisectorial, sistémica, multifactorial, dinámica, multiescalar y multitemporal.

La vulnerabilidad climática (VC) se define como la predisposición de los seres vivos a ser afectados negativamente, como resultado de algún evento riesgoso y en función de su perfil y entorno (Singh, *et al.* 2019; IPCC, 2014; Chow, Andrásik, Fisher & Keiler, 2019). En la VC, diversos componentes pueden interrelacionarse como: la marginalidad, interacciones sociales, organización y acceso a recursos, que pueden magnificar el riesgo de los individuos a cualquier peligro (Singh, *et al.* 2019, Bankoff, 2004).

Conocer la vulnerabilidad al impacto de variabilidad y cambio climático a nivel de microcuencas hidrográficas permitirá generar políticas específicas con impacto local. Por lo anterior, este estudio tiene como objetivo aplicar un índice de evaluación de la vulnerabilidad al CC en microcuencas andinas tropicales. El índice se llama ICC y fue desarrollado aplicando una combinación de indicadores Presión-Estado-Respuesta y lógica difusa, de la inteligencia artificial. El índice se aplicó a la microcuenca del río Bolo, ubicada en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. Esta microcuenca es estratégica pues provee de servicios ecosistémicos a alrededor de 15.000 habitantes y presenta serios problemas a nivel socio-ambiental, entre los que se encuentran

erosión, expansión de la frontera pecuaria, tala y quema de bosques y disminución de la biodiversidad.

2. MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

La microcuenca hidrográfica del río Bolo se ubica al suroccidente de la Cordillera Central en la Región Fisiográfica Andina de Colombia, tiene una extensión de 39.868 ha con altitudes entre 850 y 3.800 msnm, cubriendo los municipios de Pradera (27.050 ha), Candelaria (5.281 ha) y Palmira (7.537 ha) al sur-oriente del departamento del Valle del Cauca (CVC, 2015). En términos de planificación hídrica, esta cuenca puede ser dividida en zona productora de agua o parte alta que tiene un área de 16.274 ha (40,7%) y que va desde el nacimiento hasta el piedemonte, en un rango entre 1.100 y 3.900 msnm. Por su parte, la zona consumidora de agua o parte plana corresponde a 23.707 ha (59,3%), que va desde el piedemonte hasta la desembocadura a una altitud entre 820 y 1100 msnm (figura 1).

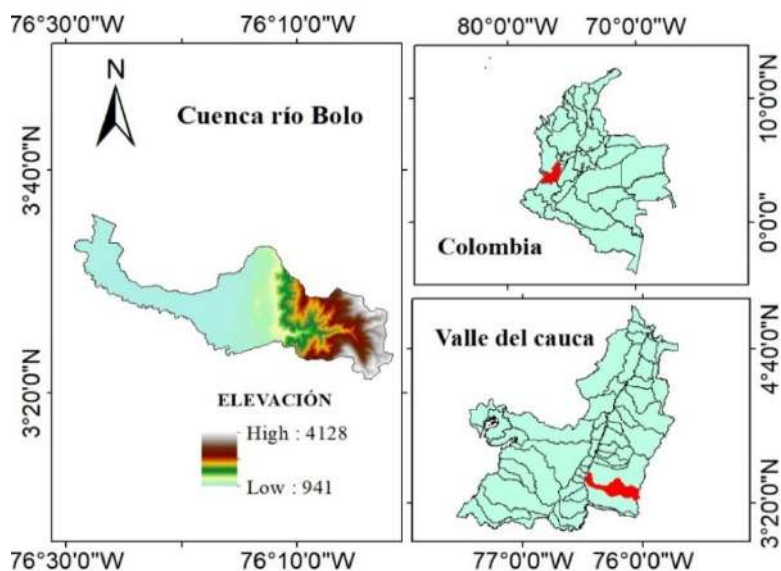


Fig. 1: Ubicación geográfica de la cuenca hidrográfica del río Bolo en el Valle del Cauca- Colombia-Sur América. Fuente: elaboración propia.

Los actores locales, a través de talleres comunitarios, evidenciaron los principales problemas socio ambientales del río Bolo (CVC-Consorcio Bolo-Frayle, 2015) (figura 2). Con una ponderación cercana al 100%, los principales problemas detectados fueron: cultura del manejo del agua, mantenimiento de canales y contaminación por vertimientos. Y con menor ponderación, cercana al 30%, erosión, conflicto armado, cantidad de agua que toma cada usuario, entre otros. Como se puede observar, de

forma evidente no aparece tipificado el problema de cambio y variación climática, a pesar que esta microcuenca presenta fuertes impactos por variación y cambio climático, entre los que se encuentran inundaciones, sequías y deslizamientos.

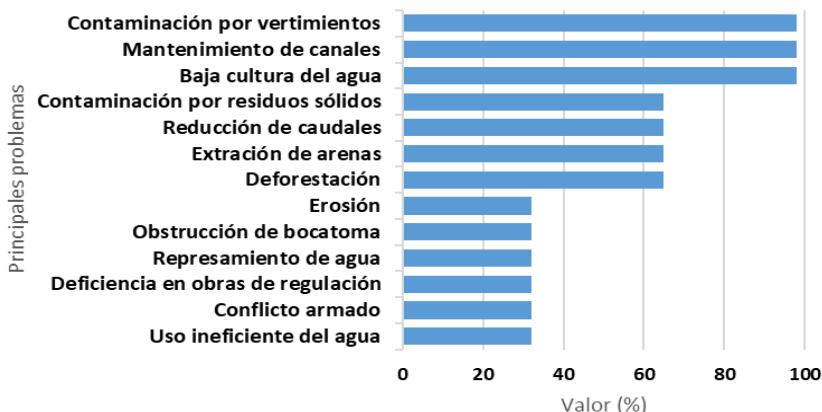


Fig. 2: Principales problemas socio ambientales en la cuenca hidrográfica del río Bolo – Valle del Cauca-Colombia. Fuente: CVC-Consortio Bolo-Frayle, 2015.

2.2. Esquema metodológico del índice ICC

El esquema metodológico del índice ICC aplicado a la cuenca hidrográfica del río Bolo se presenta en la Fig 3, este índice utilizó indicadores Presión-Estado-Respuesta (PER) y para operarlos, utilizó funciones de lógica difusa de la inteligencia artificial.



Fig. 3: Esquema metodológico para la construcción del índice de vulnerabilidad al cambio climático ICC. Fuente: Vargas-Franco, 2018.

Los indicadores PER que utiliza el ICC, se presentan en la Tabla 1. El análisis de la Variabilidad y el Cambio Climático de la precipitación y temperatura en la cuenca hidrográfica del río Bolo se desarrolló con los datos históricos de 6 estaciones

meteorológicas desde enero de 1990 hasta diciembre de 2020 suministrados por la Corporación Autónoma del Valle del Cauca (CVC) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Se realizó un análisis estadístico bajo los indicadores descriptivos como la media, mediana, coeficiente de variación, desviación estándar y rango. A cada indicador se le asoció una función de pertenencia de la lógica difusa, rama de la inteligencia artificial. En la figura 4 se presentan las funciones de los indicadores de Estado. En la Tabla 2, algunas reglas de decisión para el indicador de Estado (E).

Presión (P)	Estado (E)	Respuesta (R)
Incremento de actividades que generen emisiones de dióxido de carbono (ICO ₂)	Variación anual de precipitación (VPA)	Estrategias de adaptación al cambio climático (EACC)
	Variación anual de temperatura máxima (VTA)	
	Incremento anual de eventos naturales extremos (Sequías, inundaciones, deslizamientos de tierra, etc.) (IENE)	Estrategias de control para la contaminación de aire (ECA)

Tabla 1: Indicadores Presión-Estado-Respuesta (PER) para evaluar vulnerabilidad al cambio climático (CC) en una cuenca hidrográfica-andina. Fuente: Vargas, 2018.

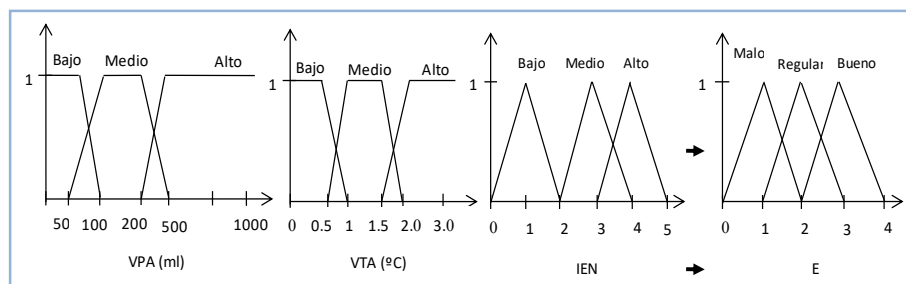


Fig. 4: Funciones de pertenencia de la lógica difusa para los indicadores de Estado (E) para el ICC. Fuente: Vargas-Franco, 2018.

2.3. Recolección y análisis de datos

Para estimar los diversos indicadores del índice de vulnerabilidad de cambio climático (ICC) en la cuenca hidrográfica del río Bolo se utilizaron y procesaron datos secundarios de diversas instituciones de carácter local y nacional. Para estimar la variación anual de la precipitación y la temperatura se tomó la desviación estándar de los últimos 30 años (1990-2020), de seis estaciones de monitoreo de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), simultáneamente se aplicaron estadísticos descriptivos como la media aritmética, la mediana, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Así mismo, los valores de eventos extremos asociados a

sequías, inundaciones y deslizamientos, la aplicación de estrategias de adaptación y el abatimiento de la calidad de aire, fueron suministrados por la Unidad Municipal de Asistencia Técnica Agropecuaria, UMATA. Los valores de los indicadores fueron ingresados al programa MATLAB, donde se han sistematizado las funciones de pertenencia y las reglas de decisión del indicador ICC.

No.	REGLAS
1	IF (VPA IS BAJO) AND (VTA IS BAJO) AND (IEN IS BAJO) THEN ESTADO IS BUENO
2	IF (VPA IS BAJO) AND (VTA IS MEDIO) AND (IEN IS BAJO) THEN ESTADO IS BUENO
3	IF (VPA IS BAJO) AND (VTA IS ALTO) AND (IEN IS BAJO) THEN ESTADO IS BUENO
:	::
:	::
26	IF (VPA IS ALTO) AND (VTA IS MEDIO) AND (IEN IS ALTO) THEN ESTADO IS MALO
27	IF (VPA IS ALTO) AND (VTA IS ALTO) AND (IEN IS ALTO) THEN ESTADO IS MALO

Tabla 2: Algunas reglas de decisión para el Indicador de Estado para el indicador ICC. Fuente: Vargas-Franco, 2018.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El procesamiento de los estadísticos descriptivos para la precipitación en 6 estaciones durante 30 años en la microcuenca del río Bolo se presenta en la Tabla 3 y en la Tabla 4 se presentan los estadísticos para los valores de temperatura máxima.

Nombre de Estación	Media (mm)	Mediana (mm)	Desviación estándar (mm)	Coefficiente de variación (%)	Número de datos
Bella vista	106,7	92	75,3	71%	370
Planta Nima	121,5	108	85,3	70%	371
La Soledad	164,5	142	131,3	80%	369
Ing la Quinta	84,2	74	66,7	79%	366
Guachazambolo	79,0	64	63,3	80%	371
Bolo Blanco	127,5	103	104,4	82%	367

Tabla 3: Estadísticos descriptivos de la precipitación (mm) media anual en las estaciones pluviométricas de la cuenca hidrográfica del río Bolo. Fuente: elaboración propia

Estación	Media (°C)	Mediana (°C)	Desviación estándar (°C)	Coefficiente de variación (%)	Número de datos
Aeropuerto Bonilla	30,1	30,0	1,1	4%	332
Ingenio Manuelita	29,1	29,0	0,9	3%	206
Palmira ICA	29,5	29,4	1,0	3%	278
Cenicaña	29,6	29,6	0,9	3%	181
Ingenio Cauca	29,8	29,6	1,0	3%	225
Miranda	29,3	28,9	1,1	4%	283

Tabla 4: Estadísticos descriptivos de la temperatura (°C) máxima mensual en estaciones analizadas en la cuenca hidrográfica del río Bolo. Fuente: elaboración propia

En la Tabla 5 se presentan los valores requeridos para el cálculo del índice de vulnerabilidad climática para microcuencas andinas tropicales, ICC. Estos valores fueron estimados por visitas y estimados a partir de información secundaria de instituciones nacionales y locales como son Corporación Autónoma del Valle del Cauca, CVC, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM y la Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria, UMATA.

No.	Nombre del Indicador	Zona de la cuenca hidrográfica del río Bolo			Fuente de información
		Cuenca alta	Cuenca media	Cuenca Baja	
1	ICO ₂	10%	40%	60%	Visitas
2	VPA	309 mm	332mm	355 mm	CVC, 2021
3	VTA	0,3°C	0,3°C	0,3°C	IDEAM, 2021
4	IENE	Bajo	Medio	Alto	UMATA. 2021
5	EACC	No	No	No	UMATA, 2021
6	ECA	No	No	No	UMATA, 2021

Tabla 5: Valores de los indicadores en cada zona de la microcuenca el Chocho. Fuente: elaboración propia

Los valores de los indicadores fueron ingresados al programa MATLAB, donde ya se tenían sistematizadas tanto las funciones de pertenencia como las reglas de decisión. Los indicadores se procesaron para cada una de las zonas de la microcuenca: zona baja, zona media y zona alta. En la Fig. 5 se presenta el proceso para el indicador de estado en la zona media y en la Figura 6 el proceso integrado del ICC para la microcuenca del río Bolo. En la Figura 7 se resumen los valores del ICC para cada una de las zonas de la microcuenca del río Bolo. Los mayores valores promedios de precipitación se presentaron en las estaciones La Soledad, Bolo Blanco y Planta Nima, y mayores valores de variación a través de la desviación estándar.

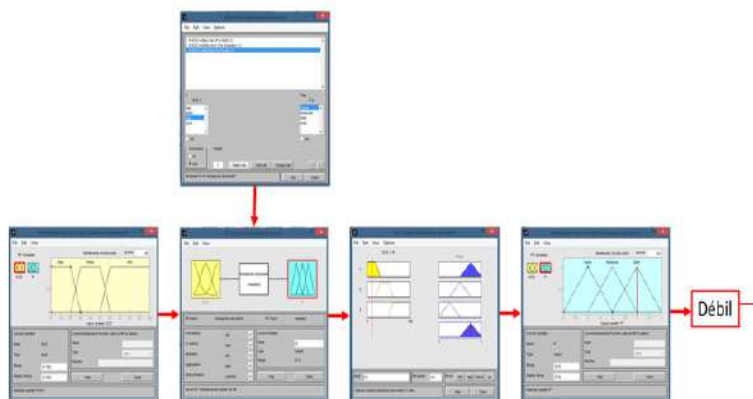


Fig. 5: Proceso del indicador de Estado para la zona media de la microcuenca del río Bolo. Fuente: elaboración propia.

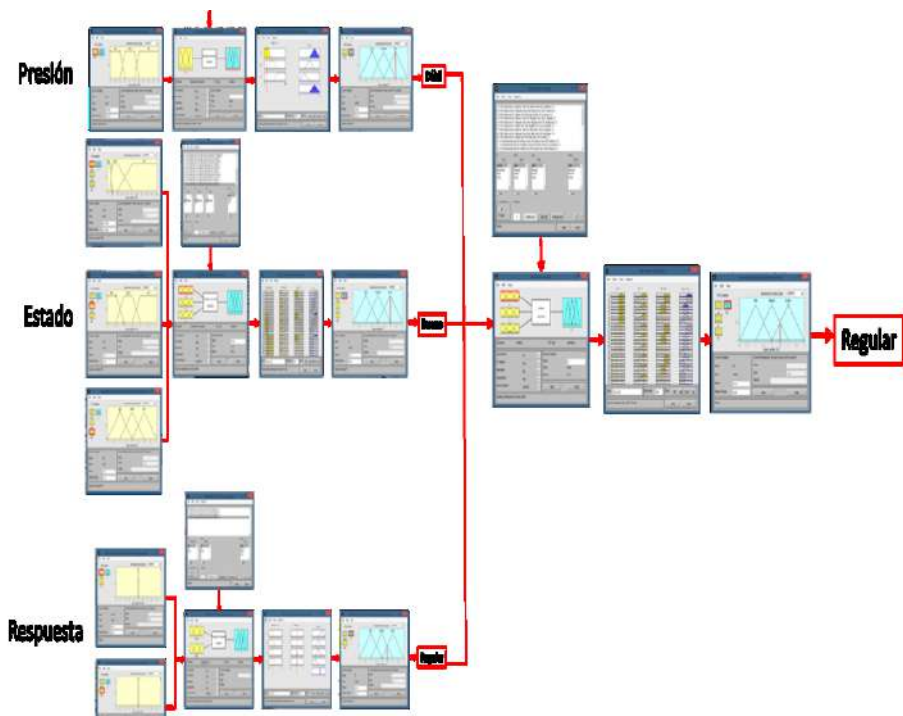


Fig. 6: Proceso de los indicadores Presión-Estado-Respuesta (PER) para el índice ICC en la zona media de la microcuenca del río Bolo. Fuente: Elaboración propia.

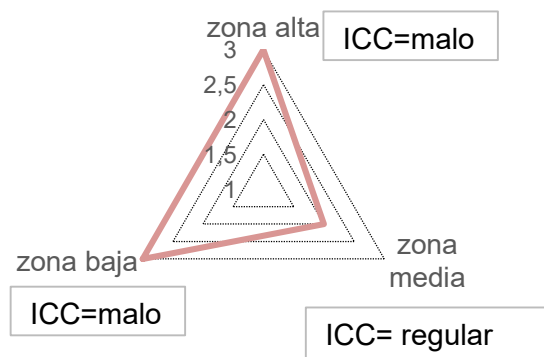


Fig. 7: Resultados del índice ICC en las tres zonas de la microcuenca del río Bolo. Fuente: Elaboración propia.

Se identificó que a lo largo de los años analizados las precipitaciones han disminuido en cuanto a su duración y magnitud, similar a lo que encontró Pabón (2003), que evidencia los cambios en la distribución de la precipitación en el alto y medio Magdalena, así como el sector nororiental del país donde la precipitación podría tener una marcada disminución (-30% del volumen anual) entre 2011-2040. Para el caso de la cuenca del río Bolo la distribución de las precipitaciones se concentra en la parte alta donde al verse afectada por la disminución en la cantidad de precipitación puede impactar las zonas bajas y medias de la cuenca (Puertas Orozco & Quintero Angel, 2011). Los estadísticos descriptivos de los datos de temperatura máxima medidas en las estaciones analizadas muestran un promedio de temperatura máxima muy homogéneo en las estaciones, con valores medios de temperatura máxima entre los 29,1 y 30,1 °C. La estación donde se registró la mayor temperatura media máxima fue Aeropuerto A. Bonilla con un valor de 33,3 °C. Así mismo, los indicadores de dispersión muestran que las estaciones presentan un coeficiente de variación menor al 5% mostrando así una homogeneidad en los datos de temperatura máxima.

Para el indicador de incremento de actividades o valores que incrementen el CO₂ denominado ICO₂, se analizó que en la zona alta no existen ni industrias ni parque automotor y no se han incrementado en los últimos años, sin embargo, existen algunos problemas de deforestación no muy marcados, por tal razón se le asignó un valor de 10%, pero en la zona media, se presenta mayor tránsito de vehículos por el desarrollo vial, por lo cual se atribuye un incremento del 40%. En la zona baja, el valor asignado fue de 60%, considerando que se identifica crecimiento poblacional y un incremento de actividades industriales, así como uso intensivo del cultivo de caña con procesos de corte y quema de caña de azúcar. Los indicadores de respuesta presentaron valores de No, que significa que no existen al momento ni estrategias para la adaptación climática ni proyectos para la reducción de la contaminación atmosférica en esta cuenca hidrográfica.

Los resultados de la aplicación del índice ICC en la microcuenca del río Bolo mostraron un nivel de vulnerabilidad malo en la zona alta y baja de la cuenca y un valor de regular en la zona media. Este conocimiento deberá apoyar la toma de decisiones con el fin de prevenir desastres de orden natural con implicaciones en vidas

humanas y daño a ecosistemas y biodiversidad. Estos resultados deben permitir de la definición de intervenciones de adaptación en el corto, mediano y largo plazo, para disminuir los niveles de vulnerabilidad al cambio y la variabilidad climática en cada zona de esta microcuenca andina tropical. Aunque algunos valores de los indicadores fueron medidos de manera indirecta, se espera que en el futuro se pueda contar con datos más confiables.

4. CONCLUSIONES

Se aplicó un índice de vulnerabilidad climática (ICC) en la microcuenca andina tropical del río Bolo localizada en el departamento del Valle del Cauca en Colombia, Suramérica. El índice fue desarrollado a través de indicadores Presión-Estado-Respuesta (PER) y lógica difusa de la inteligencia artificial. Los datos para utilizar el índice ICC se obtuvieron a través de información secundaria de instituciones públicas. Los resultados indican que el nivel de vulnerabilidad climática en la cuenca del río Bolo presenta valores de malo, en la zona baja, regular en la zona media y malo en la zona alta. Estos valores implican que se deben realizar acciones de corto, mediano y largo plazo que permitan elevar los valores de vulnerabilidad climática a valores de bueno.

REFERENCIAS

- Bankoff, G. (2004). *The Historical Geography of Disaster: "Vulnerability" and "Local Knowledge" in Western Discourse. Mapping vulnerability: disasters, development, and people.* EarthScan. London - Sterling, England - United States. 150 p.
- Chow, C., Andrásik, R., Fisher, B. y Keiler, M. (2019). Application of statistical techniques to proportional loss data: Evaluating the predictive accuracy of physical vulnerability to hazardous hydrometeorological events. *Journal of Environment Management*, 246, pp. 85-100. doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.084.
- CVC. (2015). Balance Oferta-Demanda De Agua Cuenca Del Río Bolo (p. 11) https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2018-09/Balance_Bolo_0.pdf
- CVC-Consorcio Bolo-Frayle. (2015). Fortalecimiento técnico y social de las organizaciones de usuarios del agua en siete (7) acueductos priorizados en la cuenca del río bolo. Cali- Colombia. 264 p.
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014. Mitigación del cambio climático. Resumen para responsables de políticas. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático. Suiza, 40 p.
- Pabón, J. D. (2003). El cambio climático global y su manifestación en Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 10(12), pp. 111-119. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/10277>
- Puertas Orozco, O. L., & Quintero Angel, M. (2011). Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta-media del río Cauca, Colombia. 78, pp. 112-120.
- Singh, C., Solomon, D., Bendapudi, R., Kuchimanchi, B., Iyer, S. y Bazaz, A. (2019). What shapes vulnerability and risk management in semi-arid India? Moving towards

an agenda of sustainable agenda. Environmental development, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.04.007>.

Vargas-Franco, V y Restrepo-Tarquino, I. (2018). Construcción de índice con inteligencia artificial para evaluar vulnerabilidad al cambio climático en microcuencas andinas tropicales. Caso de estudio en Colombia. DYNA, 85(204), pp. 194-203. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v85n204.67048>.