

# *Vulnerabilidad hídrica y los efectos desencadenantes en las amenazas socio naturales: una evaluación en la cuenca del Rio Totare en departamento del Tolima*

*Water vulnerability and the triggering effects on socio-natural hazards: an assessment in the Totare River basin in the department of Tolima*

William Edison Valenzuela Valenzuela<sup>1</sup>, Juan Carlos Alarcón Hincapié<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Magister Gestión del Riesgo y Desarrollo, Escuela de Ingenieros Militares, Bogotá, Colombia. william.valenzuela@esing.edu.co

<sup>2</sup>Grupo de Investigación en Ingeniería Ambiental, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C. Colombia, jcalarconh@udistrital.edu.co, Profesor Maestría en Gestión del Riesgo y Desarrollo, Escuela de Ingenieros Militares, Bogotá, Colombia.

Página  
50

FECHA DE RECEPCIÓN: 10/08/2020

FECHA DE ACEPTACIÓN: 14/09/2020

ESING

## RESUMEN

El presente artículo expone una propuesta metodológica para evaluar la vulnerabilidad hídrica generada por factores sociales, económicos y climáticos, y correlaciona dichas transformaciones con eventos de amenaza socio natural detonados directa e indirectamente por la dinámica hídrica, los cuales a su vez son analizados en aspectos de simultaneidad geográfica, coexistencia y concatenación entre los fenómenos. Se realiza la aplicación de la metodología en un área de estudio demarcada por la extensión de la cuenca del río Totare en el departamento del Tolima. La investigación se centró en los métodos cualitativos, basado en un análisis inductivo y de tipo sistémico, desde el enfoque de las ciencias de la geomática, buscando a partir de las partes o factores examinados desde los componentes físico - naturales, encontrar la fragilidad holística de la cuenca sobre los ecosistémicas hídricos y también su carácter amenazante para los procesos antropogénicos que se desarrollan allí. En los resultados se identifican patrones y tendencias de cambio la matriz del paisaje natural, variaciones de los parámetros de temperatura y precipitación, el estado actual de la cuenca frente a la oferta y demanda del agua, que luego son sintetizadas a través de un modelo heurístico que determina el nivel de vulnerabilidad hídrica de la cuenca. Como conclusiones principales se encontraron variaciones leves en la precipitación y temperatura, una alta transformación del paisaje natural por deforestación, fuertes presiones en la cuenca baja

por el recurso hídrico y correlación con eventos de amenaza por movimientos en masa e incendios forestales.

## PALABRAS CLAVE

Vulnerabilidad, amenazas múltiples, recurso hídrico, clima, oferta del agua, demanda del agua, cobertura y uso de la tierra.

## ABSTRACT

This article presents a methodological proposal to assess the water vulnerability generated by social, economic and climatic factors, and correlate the transformations with socio-natural threat events triggered directly and indirectly by water dynamics, which in turn are analyzed in aspects of geographic simultaneity, coexistence and concatenation between phenomena. The methodology is applied in a study area demarcated by the extension of the Totare river basin in the department of Tolima. The research focused on qualitative methods, based on inductive and systemic analysis, from the geomatics sciences approach, seeking from the parts or factors examined from the physical-natural components, to find the holistic fragility of The basin on the hydric ecosystems and also its threatening character for the anthropogenic processes that take place there. The results identify patterns and trends of change in the matrix of the natural landscape, variations in temperature parameters and modifications, the current state of the basin compared to water supply and demand, which are

then synthesized through a heuristic model that determines the level of water vulnerability of the basin. The main conclusions found were slight variations in precipitation and temperature, a high transformation of the natural landscape due to deforestation, strong pressures in the lower basin due to water resources, and correlation with threat events due to mass movements and forest fires.

## KEYWORDS

Vulnerability, multihazard, water resources, climate, water supply, water demand, coverage and land use.

## INTRODUCCIÓN

El agua, es uno de los elementos fundamentales en todos los procesos físicos, biológicos y sociales del planeta. Hoy es afectada por cambios vertiginosos de las acciones antrópicas, que inciden directamente en la fragilidad ambiental de las fuentes hídricas a través de alteraciones en la cantidad y calidad del recurso agua. El ciclo hidrológico amenazado por el cambio climático ha sido desbalanceado con evidencias en las transiciones bruscas de temperatura y pluviosidad que genera respuestas extremas (máximos y mínimos) del equilibrio hídrico; al respecto el IDEAM entorno al cambio climático señala que “la estacionalidad del flujo de aquellas cuencas influenciadas por la precipitación incrementará, es decir, los caudales máximos serán más pronunciados en épocas húmedas y los mínimos serán más bajos durante periodos secos [1].

De esta manera, el agua es un recurso que, como consecuencia de las transformaciones humanas sobre los ecosistemas, puede considerarse tanto amenazante como amenazada. Influye en los eventos de amenaza, en tanto que, el hombre al modificar los patrones de drenaje, desviar cauces, remover la protección forestal, e incrementar la temperatura con su actividad industrial propicia que el agua a través de momentos extremos de precipitación detone procesos de remoción en masa, avenidas torrenciales e inundaciones. Es vulnerable

en tanto que, por los procesos socioeconómicos, el agua se capta y usa, alterando su disponibilidad, pero también se vierte, ocasionando una modificación en la calidad física y química respecto de las condiciones originales.

El presente artículo muestra un análisis de la fragilidad del agua, frente a las formas en cómo el ser humano usa y se relaciona con la naturaleza, que a su vez genera nuevos riesgos para la sociedad al alterar el equilibrio y regulación de los ecosistemas. Presenta recomendaciones, para fortalecer las políticas nacionales orientadas hacia la conservación y preservación de espacios vitales en beneficio igualitario de las presentes y futuras generaciones.

Se expone como principal resultado un índice de vulnerabilidad hídrica, basado en factores climáticos, económicos, sociales y ambientales. Se analiza en primer lugar los cambios espacio – temporales del clima en las variables precipitación y temperatura, seguidamente se demuestra la alteración del paisaje natural, y se complementa con la determinación del índice espacial de escasez en el cual se obtiene realidades contrastantes al interior de la cuenca dada las actividades tensionantes de la sociedad con los servicios ecosistémicos.

La investigación desarrollada es de tipo cualitativo y semi cuantitativo, con aplicación de métodos inductivos y correlacionales desde una perspectiva sistémica y holística. La población objetivo correspondió a las variables físico – naturales en la cuenca del río Totare y los sistemas de organización social y productiva de la comunidad asentada en el área de estudio. Se aplicaron técnicas de las ciencias geomática a través de la teledetección y los sistemas de información geográfica, complementados con instrumentos estadísticos y técnicas de decisiones multicriterio.

## Desarrollo teórico

La premisa general sobre la cual se fundamenta la presente investigación corresponde a que los cambios de la oferta y la demanda por el recurso hídrico, propiciada por procesos antropogénicos

locales (actividades productivas) y globales (incidencia en el efecto invernadero y cambio climático) alteran la cantidad y disponibilidad de agua dentro del área hidrográfica. Estos cambios en grandes magnitudes pueden ser factores desencadenantes de amenazas sicionaturales, ya sea por el exceso de agua que motiva la generación de eventos subitos como deslizamientos, avenidas torrenciales; o por la escasez del agua que conlleva a eventos lentos como las sequías, e incendios forestales.

Por tal efecto es importante revalidar la relación estrecha entre el cambio climático y la variabilidad del agua, (entendida como el desbalance hídrico) y así mismo es pertinente considerar la incidencia y correlación del desbalance hídrico en la propensión a generar amenazas socio-naturales.

El ciclo hidrológico está gobernado por el clima, de tal manera que un cambio en este último provoca cambios en los distintos elementos del ciclo agua, así, cambios en las precipitaciones determinan cambios en las características de la escorrentía y en los eventos extremos de las mismas modificando su intensidad y la frecuencia de estos. Los cambios en la temperatura modificaran los balances de evapotranspiración, humedad en el suelo e infiltración de capas [2].

La modificación a largo plazo de las condiciones meteorológicas puede tener variaciones en múltiples escalas temporales (días, meses, años, etc.) y espaciales (regional o local), y pueden representar una amenaza natural, como inundaciones, sequías, olas de frío o de calor, tormentas, etc. [3]. Los estudios y proyecciones climáticas de las últimas décadas indican un aumento de temperaturas extremas en la región, un incremento en la intensidad y frecuencia de eventos naturales extremos, aumento del nivel del mar y la alteración del patrón de lluvias [4].

La comprensión de la dinámica de la variabilidad climática, en tanto que afectan el suministro y la demanda de agua en todos los sectores que hacen uso del recurso, y una mayor capacidad

para responder a la misma, permiten lograr una mejor gestión de los recursos hídricos y constituye medidas de adaptación [5]

## Materiales y Métodos

La investigación se basó en dos de los componentes centrales de la gestión del riesgo de desastres: la amenaza y la vulnerabilidad. Éstos, fueron evaluados a partir de sus características y atributos obtenidos de datos primarios y secundarios, entre los que se resaltan los siguientes:

- Imágenes satelitales Landsat de los instrumentos MSS, TM, ETM+, OLI, en los años 1985, 1987, 2001, 2013, 2018.
- Imágenes satelitales Sentinel 2A y 2B año 2018.
- Modelo de Elevación sensor ALOS instrumento PALSAR.
- Datos climáticos e hidrometeorológicos
- Geodatos institucionales de amenazas sicionaturales por incendios forestales inundación, movimientos en masa, sequía.
- Indicadores regionales de demanda de agua en las principales cuencas del país.

El tratamiento y procesamiento de la información, se realizó principalmente mediante la aplicación de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica SIG, para ello se empleó el software de uso libre Qgis 3.4 con el complemento SCP (Semi-automatic Classification Plugin), y el software de teledetección de la Agencia Espacial Europea – ESA, Snap 7.0 con uso del complemento Sen2Cor.

## Área de Estudio

La cuenca del río Totare, se ubica en jurisdicción de los municipios de Anzoátegui, Santa Isabel, Alvarado, Venadillo e Ibagué en el departamento del Tolima. Su cauce principal nace en el relieve montañoso del volcán del Tolima a una altura

aproximada de 4000 msnm.

Sus aguas confluyen en el río Magdalena, por lo que, la hoya del río Totare corresponde a una cuenca mayor o subzona hidrográfica de acuerdo con la jerarquización y zonificación establecida por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM [6].

## ANÁLISIS Y PROCESOS

En la Figura 2 presenta el flujo de proceso general abordado en la investigación. Contempla los factores mencionados y su interacción sistémica que de forma integrada permiten obtener los gradientes de fragilidad asociados al agua en la cuenca hidrográfica.

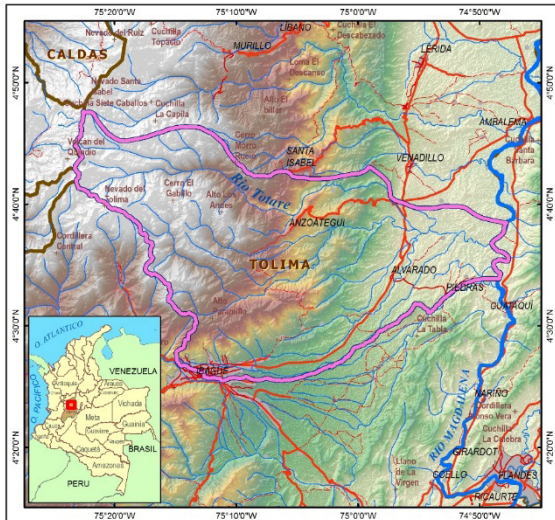


Figura 1. Ubicación de la Cuenca del río Totare  
Fuente: Adaptado SIAC, 2019

El primer factor analizado, correspondió con el patrón de variación del clima desde los cambios de la temperatura y la precipitación. Para el cálculo de la variable temperatura se aplicó un proceso alternativo al tradicional uso de los registros de estaciones climatológicas dado al revisar la información disponible no se encontraron datos con una cantidad suficiente de mediciones que abarcaran por lo menos 3 o 4 décadas, siendo esto indispensable para lograr identificar las tendencias de cambio de la temperatura en la cuenca. El procedimiento consistió en el uso de imágenes

satelitales de libre acceso.

La valoración se realizó a través de la banda espectral en el infrarojo térmico disponible en los instrumentos MSS (Landsat 4), TM (Landsat 5), ETM+ (Landsat 7) y TIRS (Landsat 8). Las bandas térmicas fueron diseñadas para captar la radiación emitida de los objetos sobre la superficie terrestre en una porción o rango del espectro electromagnético [7].

Los valores de temperatura se obtuvieron a partir de las siguientes expresiones:

- Temperatura de brillo, a tope de la atmósfera. Ecuación de intensidad de radiación [8]:

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)}$$

Donde,  $T_b$  es la temperatura de brillo,  $L$  es la radiancia,  $K_1$  y  $K_2$  son constantes de calibración de la banda térmica de Landsat,  $C$  constante de Planck,  $k$  constante de Boltzmann y  $c$  velocidad de la luz.

- Temperatura en superficie en la expresión presentada por Frank [9] citando a Weng, L & Shungring [10]:

$$T_s = \frac{T_b}{1 + \left(\lambda \times \frac{T_b}{\rho}\right) \times \ln(\varepsilon)} - 273$$

Donde,  $\lambda$  es la longitud de onda central de la banda térmica,  $\rho$  constante igual a  $1.4388 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$  y  $\varepsilon$  que representa la emisividad. Para establecer el grado de variabilidad de la temperatura, se estandarizó el valor de cada píxel en rangos de temperatura basado en la amplitud de los pisos térmicos [11] buscando hacer más eficiente la identificación de los cambios entre las superficies calculadas.

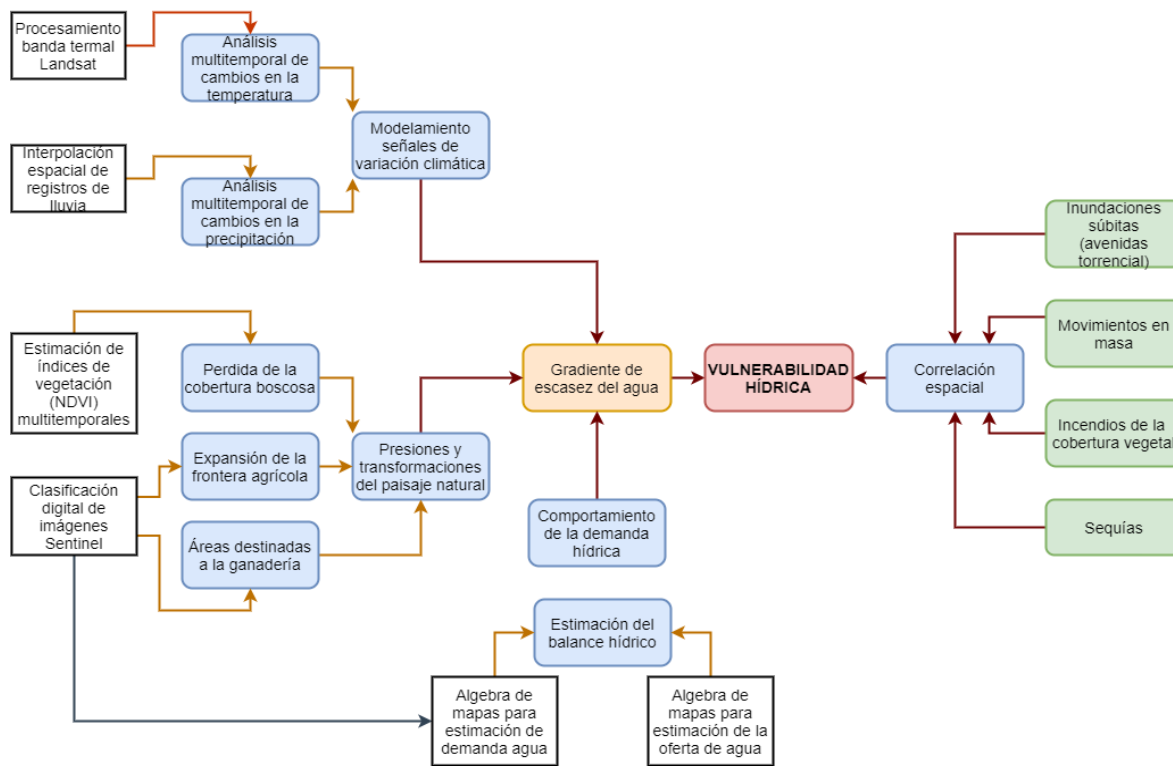


Figura 2. Esquema metodológico con los procesos desarrollados  
Fuente: Elaboración propia

en disminución y en aumento de la cantidad de lluvia. Se consultaron los datos de precipitación media mensual en un periodo comprendido entre 1970 a 2019, de las 16 estaciones climatológicas e hidrológicas más cercanas a la cuenca.

Con los registros se estimó un promedio multianual para las décadas del 80, 90, 2000, y 2010, y ese valor se procesaron superficies ráster continuas. Para la interpolación espacial se seleccionó la función de la Distancia Inversa Ponderada (IDW), la cual asume que “cada punto medido tiene una influencia local que disminuye con la distancia. Les asigna una ponderación mayor a los puntos más cercanos a la posición por predecir, que a aquellos que se encuentran más alejados” [12]. La siguiente expresión define la ejecución matemática de la función IDW:

$$\hat{Z}_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} \cdot z_i$$

En esta expresión,  $\hat{Z}_j$  representa el valor estimado para el punto  $j$ ,  $n$  es el número de puntos usados en la interpolación,  $Z_i$  es el valor del punto  $i$ -ésimo, y es el peso asociado al dato  $i$  en el cálculo del nodo  $j$  [13]. Posteriormente, cada superficie interpolada fue superpuesta y contrastada entre años, mediante el cálculo de la tasa de variación, con la siguiente expresión:

$$V_p = \frac{PP_n - PP_{n-1}}{PP_{n-1}} \times 100$$

Donde,  $V_p$  es la Tasa o porcentaje de variación de la precipitación entre dos periodos consecutivos.  $PP_{n-1}$  es la superficie de interpolación de la precipitación del periodo  $n$ , o de referencia.  $PP_n$  es la superficie de interpolación de la precipitación del periodo  $n-1$ , es decir el periodo anterior. El resultado arrojado se reclasificó en rangos de porcentajes según la intensidad de la variación.

El análisis de las tensiones humanas sobre

la cuenca se realizó a partir de las prácticas socioeconómicas dominantes en la región Andina. Desde esta perspectiva, se analizó el tercer factor, correspondiente al uso del suelo, y el avance de la frontera agrícola y pecuaria como motor transformador del paisaje natural en la cuenca. Para tener una referencia reciente de dichos usos del suelo se realizó una clasificación digital de coberturas a través de sensores remotos.

En la técnica de clasificación digital de imágenes, existen dos tipos, a saber, supervisada y no supervisada. Para la investigación se asumió que ambas técnicas son complementarias, por lo tanto, se aplicaron los siguientes procesos [14]:

- Selección de imágenes satelitales de resolución media a alta con cubrimiento total de la cuenca. Imágenes que correspondieron a la misión Sentinel.
- Preprocesamiento de las imágenes, mosaico, composición de bandas, conversión a reflectancia.
- Reducción de datos redundantes en las imágenes, con aplicación de análisis de componentes principales (ACP).
- Clasificación no supervisada, mediante el método de Isodata, con 30 clases de salida, 10 píxeles de distancia de umbral y 5 iteraciones.
- Revisión de resultados con información secundaria del Sistema Información Ambiental de Colombia (SIAC) y el Sistema de Información para el Ordenamiento Territorial (SIGOT).
- Clasificación supervisada, en la fase de entrenamiento. Definición de 20 categorías de cobertura y selección de 185 muestras espectrales.
- Fase de asignación en la clasificación mediante el método de Máxima Probabilidad y un nivel de confianza del

90%.

La identificación de las expresiones de cambio del paisaje natural en la cuenca se realizó en un periodo de 30 años. En esencia el análisis consistió en la determinación de la evolución de la cobertura boscosa. El monitoreo espacial de la vegetación se realizó mediante el procesamiento multitemporal del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI). El NDVI es un parámetro calculado a partir de los valores de reflectancia a distintas longitudes de onda principalmente en los rangos donde la cubierta vegetal es más sensible y contrastante [15]. Se aplicó la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Así, tomando una imagen satelital multi espectral, la variable NIR corresponde a los datos del Infrarojo cercano, y RED son los datos del rango del rojo en el espectro visible. Para los periodos del 80, y primera década del 2000 se utilizaron imágenes del sensor Landsat.

Los resultados del NDVI fueron reclasificados en dos rangos buscando separar los bosques propios de la geografía andina de los demás tipos de coberturas con poca o sin presencia de vegetación. El umbral de corte osciló entre 0,6 a 0,7. La combinación espacial de los 3 periodos procesados permitieron encontrar los siguientes patrones: matriz original antropizada, deforestación, recuperación vegetal, conservación del páramo, conservación del bosque andino.

El cuarto factor analizado fue el balance hídrico y la síntesis en el índice de escasez. Con esta variable se buscó también demostrar las tensiones socioeconómicas sobre la cuenca del río Totare. A través del balance hídrico se identificaron los excesos y déficit multi anuales del recurso hídrico. En el balance, dado que es un cálculo de entradas y salidas, se aplica el principio de conservación de la masa [16]. Se empleó para ello la siguiente expresión:

$$PP = ETR + ES + I$$

El agua se precipita en un determinado sitio de la cuenca (PP = Precipitación), de la cual, una parte vuelve a la atmósfera ya sea por evaporación directa o por transpiración de la vegetación (ETR = Evapotranspiración), y otra parte escurre por la superficie terrestre (ES = Escorrentía superficial). Mientras ocurre el flujo a través de la red de drenajes y encuentra su destino final, ocurre infiltración en el terreno haciendo parte del sistema de aguas subterráneas o acuíferos (I = Infiltración) [17].

Adicionalmente, se estimó el índice de escasez, el cual está basado en el cociente entre la oferta y la demanda de agua en la cuenca. La oferta hídrica se refiere al volumen de agua continental, almacenada en los cuerpos de agua superficiales, y puede ser de dos tipos: total y neta [18]. La primera cuantifica el volumen sin discriminación de todos los cuerpos de agua, mientras la segunda corresponde a la aplicación de factores de reducción de agua por fragilidad de los ecosistemas asociados al ciclo hídrico y por el régimen de estiaje o de caudales mínimos. Para su estimación se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$OH_T = PP \times A_{CH}$$

$$OH_N = OH_T - (OH_T \times (R_{FF} + R_{RE}))$$

Donde,  $OH_T$  corresponde a la oferta hídrica total; PP representa la precipitación total anual y es el área de la cuenca.  $OH_N$  representa la oferta hídrica neta,  $R_{FF}$  es el factor de reducción por fuentes frágiles y  $R_{RE}$  el factor de reducción por régimen de estiaje. Ambos factores fueron asumidos en una tasa del 25% de acuerdo con las recomendaciones del IDEAM [19].

La demanda hídrica en la cuenca del Totare, está determinada por los usos y destinaciones socio económicas que desarrolla la población en el territorio y en los que ya sea directa o indirectamente hacen un consumo del agua para tales fines. El cálculo de la demanda se realiza por sectores económicos, entre los que se destacan agrícola,

pecuario, industrial, piscícola, construcción, energía, minería, hidrocarburos, entre otros.

Frente al cálculo de la cantidad de agua usada en la cuenca se asumió en la investigación una correlación a partir de los resultados del más reciente Estudio Nacional de Agua (ENA) correspondiente al año 2018 [20]. En este estudio se desarrolla un estimativo de la demanda hídrica sectorial a nivel de áreas hidrográficas o cuencas de superior jerarquía que en el caso del río Totare corresponde al área Magdalena – Cauca. Según el ENA 2018, la demanda hídrica total para la subzona hidrográfica del río Totare corresponde a un total de 285,9 millones de m<sup>3</sup>. Basado en este total y en la distribución porcentual del consumo de agua por sectores se obtuvo los valores de demanda para los sectores identificados en la cuenca, tomando como referencia la clasificación de cobertura y uso del suelo del paso anterior.

Con los datos de oferta y demanda hídrica se procedió a establecer el índice de escasez que corresponde a la proporción del agua demandada para las actividades socio económicas frente a la disponibilidad natural del recurso aplicando los factores de reducción ambiental. La estimación se realizó mediante la siguiente expresión:

$$I_e = \frac{D_{HS}}{O_{HN}} \times 100$$

En donde,  $I_e$  representa el Índice de Escasez,  $D_{HS}$  indica la demanda hídrica sectorial, y  $O_{HN}$  es la Oferta Hídrica Neta. Este índice se ubica en una escala entre 0 a 100, siendo los valores mayores al 40% los que demuestran un alto consumo y conflictos por el abastecimiento de agua. Por el contrario, los valores por debajo de 10%, dan cuenta de unas mínimas presiones sobre el recurso hídrico que al mismo tiempo demuestra ser abundante en la cuenca. Los valores intermedios, esto es 10 – 40% indican una condición moderada frente a la presión social sobre recurso hídrico por lo que desde este punto es indispensable establecer una gestión rigurosa sobre el agua y su uso.

Una vez obtenidos los factores anteriores se planteó la estructuración del índice de la vulnerabilidad ambiental e hídrica de la cuenca. A través de este cálculo se busca identificar el estado de fragilidad del territorio y los servicios ecosistémicos vinculados con el recurso hídrico. Para la estimación se desarrolló un cálculo aditivo en una evaluación multivariada aplicando una correlación de pesos ponderados basados en la técnica de comparación denominada Proceso Analítico Jerárquico – AHP [21], [22] y [23].

El índice de vulnerabilidad constituye una suma multivariada, que tiene como resultado un valor numérico en una escala que estará entre 1 y 5, donde 1 muestra las condiciones de menor vulnerabilidad del recurso hídrico mientras 5 define las situaciones de mayor fragilidad del agua en el contexto de los cambios del clima e intervenciones humanas sobre el área de la cuenca del río Totare.

Como complemento al cálculo del índice de vulnerabilidad, se realizó una contrastación geográfica de las condiciones peligrosas o amenazantes de la cuenca integrados a través de la simultaneidad, coexistencia y concatenación de eventos en un escenario denominado como amenazas múltiples o multiamenaza. El riesgo para este caso se define y determina a partir de la convergencia espacial de áreas de alta amenaza y de alta vulnerabilidad.

La correlación entre la multiamenaza y los factores de vulnerabilidad consideró las combinaciones más críticas. Es decir, niveles de amenaza alta frente a categorías extremas o críticas de las variables hídricas climáticas, ambientales, sociales y económicas. La identificación espacial de estos sectores de la cuenca es una señal de alerta sobre las vinculaciones causales y detonantes entre los fenómenos analizados que de alguna manera son indicativos de baja resiliencia frente a las tendencias de cambio climático en el largo plazo.

## DISCUSIÓN RESULTADOS

En el esquema que se presenta en la Figura 3 se expone las variables de las cuales se obtuvieron

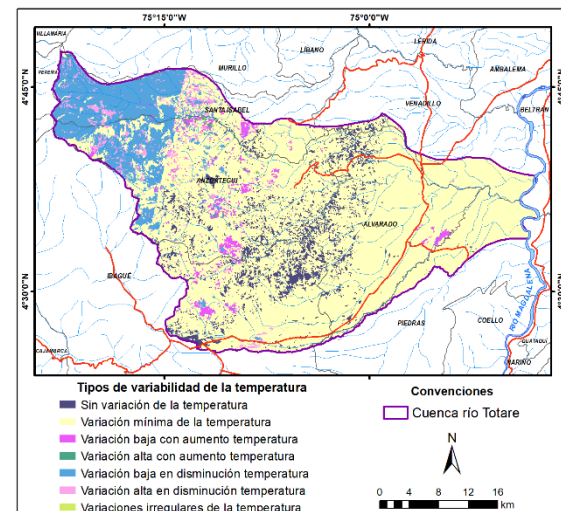
resultados semi cuantitativos en la investigación.

Como se mencionó anteriormente, el primer factor o variable fue la temperatura. De las superficies obtenidas a través de la banda térmica del satélite Landsat se encontró que la mayoría de los sectores de la cuenca presenta variaciones mínimas de la temperatura o sin tendencia sostenida de cambio a lo largo del tiempo.



Figura 3. Variables estimadas en los resultados  
Fuente: Elaboración propia

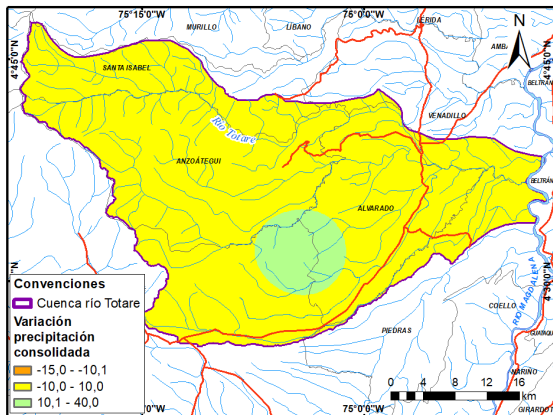
Sin embargo, se evidencia una variación baja en disminución de la temperatura, localizada principalmente en la zona más alta de la cuenca. Los restantes tipos de variación en la temperatura, principalmente con propensión a la disminución se presentan de forma dispersa en la cuenca. La Figura 4 muestra la distribución espacial de la variación de la temperatura en el área analizada.



**Figura 4** Variación espacial de la temperatura  
Fuente: Elaboración propia

Respecto a la precipitación, los resultados muestran que la mayoría de la superficie de la cuenca presenta variaciones en el rango de -10% a 10%, es decir, tanto en disminución como en incremento de las lluvias de forma incipiente. Asimismo, se localiza un sector de la cuenca, hacia el centro sur del polígono, con tendencia al aumento sostenido de la precipitación. Este escenario muestra de alguna manera la tendencia a futuro en el contexto del actual cambio climático que experimenta la región.

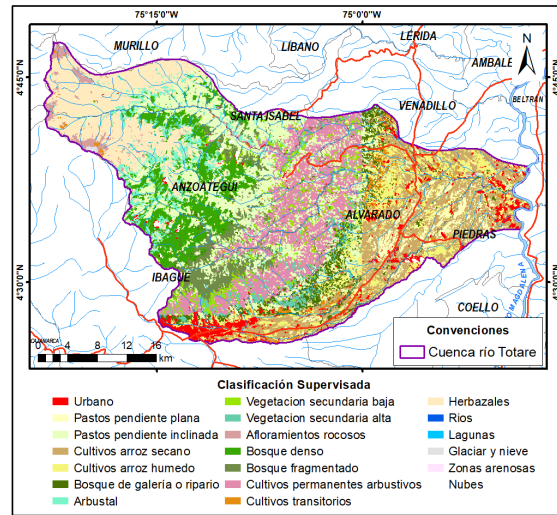
El incremento identificado de la lluvia también es el producto de la variabilidad climática que ha ocurrido de forma casi cíclica en la cuenca relacionados principalmente con el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS), que de manera particular ha resultado muy afectada cuando se manifiesta el ciclo de altas lluvias, La Niña en la zona ecuatorial.



**Figura 5** Variación espacial de la precipitación  
Fuente: Elaboración propia

de herbazales (vegetación de páramo - frailejones), nieve, glaciares y afloramientos rocosos se presentan exclusivamente en la parte más alta de la cuenca. Las coberturas heterogéneas asociadas a los pastos de relieve inclinado, cultivos permanentes arbóreos y los arbustales, prevalecen en la parte media de la cuenca.

Las cubiertas de pastos son las que más participación tienen en la cuenca con una ocupación superior al 20%. Le siguen los cultivos de arroz con un porcentaje cercano al 20%, y con un grado intermedio de ocupación se encuentran los cultivos arbóreos que representan la economía cafetera de la cuenca media. Las coberturas vegetales agrupadas constituyen alrededor del 28% de la cuenca. La Figura 6 muestra la distribución espacial de la cobertura y uso de la tierra.



**Figura 6** Resultado de la clasificación digital de coberturas de la tierra  
Fuente: Elaboración propia

Por su parte, la clasificación de cobertura y uso de la tierra permitió identificar una amplia variedad de elementos sobre la superficie de la cuenca, producto de la intensa presión antrópica sobre los servicios ecosistémicos y los recursos naturales por parte de los actores sociales que intervienen en el territorio.

En general se encontró correspondencia con las muestras generadas. Las coberturas de cultivos de arroz y pastos de clima cálido se localizan sobre la parte baja de la cuenca. Mientras las coberturas

La investigación de los cambios multi temporales respecto del estado actual de las coberturas arrojó importantes avances de la frontera agrícola y pecuaria que de alguna manera determinan el grado de fragilidad que tienen los ecosistemas para resistir a los cambios o variaciones del clima, y también a los patrones socioeconómicos de uso y dependencia del agua por parte de la población.

Los resultados más relevantes indican que la extensión del bosque y vegetación natural en la

década de 80-90 abarcaba el 38% de la cuenca. En el 2001 ésta paso a representar el 27% de la cuenca. En años recientes (2018) se presentó una leve recuperación de la vegetación ocupando el 28% de la cuenca. En general, la matriz antrópica ha generado grandes transformaciones ocupando siempre la mayor parte de la cuenca, el 40% en la década del 80, y mayor al 50% en la década del 2000.

La deforestación creció entre los tres periodos cerca de 15 puntos porcentuales, lo que indica que la situación en los municipios que hacen parte de la cuenca obedece a una sobre explotación constante de los recursos maderables y secundarios de bosque, así como también y quizá de forma más influyente a la presión de las actividades agropecuario ante la necesidad de incrementar las superficies de cultivos y cría de animales. La Figura 7 muestra la ubicación de los patrones de cambio del entorno natural de la cuenca.

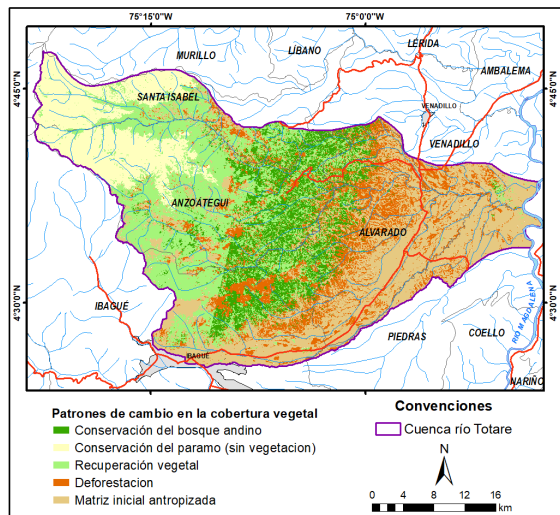


Figura 7 Transformación de la cobertura vegetal  
Fuente: Elaboración propia

El balance hídrico para la cuenca del río Totare muestran en términos generales un abastecimiento de agua en cantidades suficientes para suplir la demanda hídrica que principalmente se inclina hacia los sectores agrícola por cultivos como el arroz, y el sector pecuario donde destaca un consumo para la cría de ganadería de leche y carne y en una menor proporción la porcicultura y la

piscicultura.

La Oferta río Hídrica Total de la cuenca del Totare fue de 2.576 millones de m<sup>3</sup> mientras la Oferta Hídrica Neta representa un total de 1.288 millones de m<sup>3</sup>. La parte media de la cuenca, es decir el centro y el sur del área hidrográfica, es donde ocurre la mayor cantidad de oferta de agua, mientras el sector bajo, nororiente de la cuenca, registra los valores más bajos.

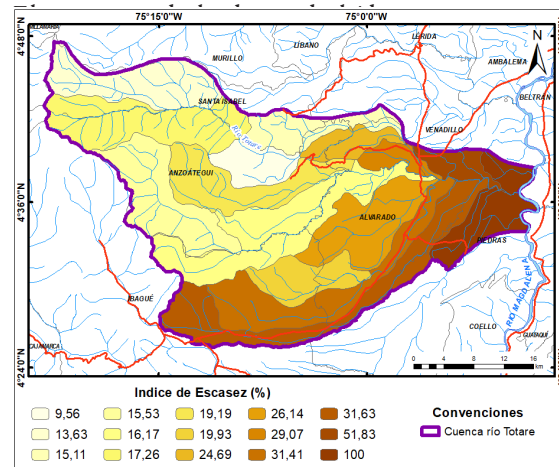


Figura 8 Índice de escasez en las microcuencas  
Fuente: Elaboración propia

El indicador empleado para medir el grado de conflicto y dependencia por parte de la sociedad de los servicios ecosistémicos del agua fue el Índice de Escasez. El resultado a nivel de microcuencas se observa en la Figura 8.

En la figura se observan diferencias acentuadas. Por un lado, el índice muestra una presión superior al 50% en la mayoría de las microcuencas de la parte baja, algunas incluso con un valor en el índice igual al 100%, es decir donde la demanda está igualada o posiblemente supera las capacidades naturales de la cuenca de oferta hídrica.

De otro lado, se encuentra que las microcuencas ubicadas en la parte alta de la cuenca, sector noroccidental y central, presentan los valores del índice de escasez más bajos, inferiores al 20% lo que indica una aceptable disponibilidad de agua y un bajo conflicto entre las actividades humanas

y los ecosistemas relacionados con el ciclo hídrico.

La siguiente condición analizada fue la relación de simultaneidad y codependencia entre los eventos de amenaza socio natural que históricamente han afectado el espacio geográfico que constituye la cuenca. Se encontró que los fenómenos que han impactado con cierta severidad en años anteriores son los movimientos en masa, inundaciones (lentas y súbitas), incendios forestales y la sequía. El proceso de integración fue a través de un análisis espacial de superposición, mediante la síntesis multivariada por ponderaciones a los niveles de amenaza de cada evento, agrupados mediante el estadístico del máximo, que puede ser interpretado como un indicador de alerta sobre una condición peligrosa en el espacio.

El resultado del análisis multiamenaza se muestra en la Figura 9, en la cual se observan los sectores que denotan alarma, representados en rojo, dado su potencial daño por la acumulación de múltiples eventos, siendo los incendios de la cobertura vegetal y los movimientos en masa los que más aportan en la definición de estas zonas. Los sectores con amenaza muy alta abarcan cerca del 25% de la cuenca, mientras la categoría alta es la más extensa con el 48% del territorio de la subzona, quedando un 27% para la amenaza de categoría moderada que se distribuye principalmente en los sectores medio y bajo al costado sur occidental de la cuenca.

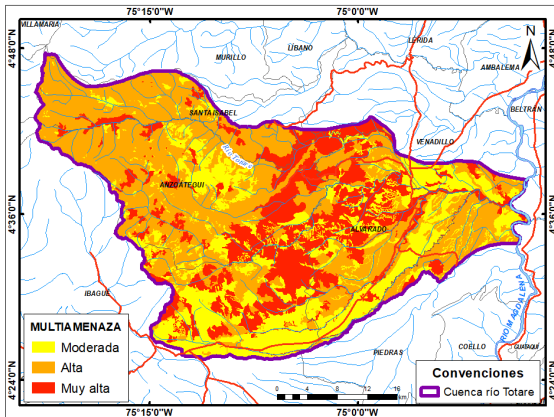


Figura 9 Integración multiamenaza en la cuenca  
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, los resultados de los factores anteriormente explicados fueron integrados a través de un indicador comparativo que permitió reconocer el grado de fragilidad que tienen las comunidades y el ambiente en el territorio en relación con el recurso hídrico. Se desarrolló un modelo heurístico de correlación entre los factores, sintetizados a través de una suma de pesos o ponderaciones para cada variable según su nivel de influencia en la generación de condiciones de vulnerabilidad ambiental. Esta influencia fue terminada a través del Proceso Analítico Jerárquico el cual es un método de selección multicriterio. Con esto se buscó que el peso fuera el más objetivo posible. La expresión resultante fue:

$$IV_H = 0.046 \cdot T + 0.113 \cdot P + 0.566 \cdot C + 0.274 \cdot E$$

En la que,  $IV_H$  corresponde al índice de vulnerabilidad hídrica

$T$  es la variable derivada de la estimación del cambio de temperatura,

$P$  es la variable derivada de la estimación del cambio de la precipitación,

$C$  es la variable que indica la evolución y modificación del paisaje natural,

$E$  es la variable obtenida del cálculo del índice de escasez.

En la Figura 10 se presenta el resultado espacial del índice  $IV_H$ . En esta figura se puede observar que, la vulnerabilidad con los valores más altos se ubica hacia los sectores occidentales o cuenca baja, siendo estos lugares los que presentan altos impactos por transformación y pérdida de la base natural expresada en ecosistemas de bosques y vegetación natural, y en los que en simultaneo se presentan problemas de escasez hídrica y precipitaciones bajas.

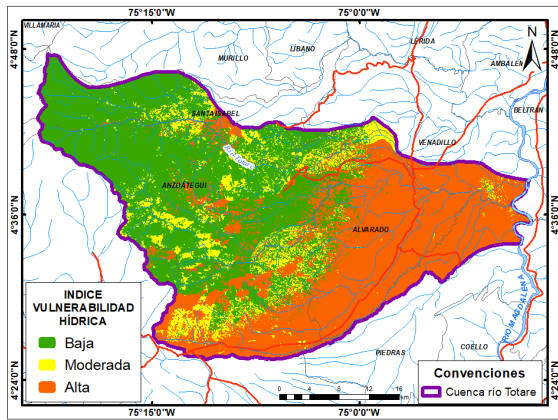


Figura 10 Índice espacial de vulnerabilidad  
Fuente: Elaboración propia

En una escala moderada, que agrupa valores intermedios del índice  $IV_H$  con color amarillo en la figura, se muestran las zonas que de a poco vienen perdiendo su condición natural y que por el momento presentan destinaciones de uso y producción que no impactan de forma grave la estructura y composición de elementos biofísicos. El balance hídrico es estable con tendencia a ser presionado por la demanda creciente del agua.

Se evidencia en color verde en la figura, la vulnerabilidad baja. Estas zonas, se caracterizan por mantener en la actualidad la cobertura natural, contar una oferta hídrica alta y mostrar estabilidad en el comportamiento de la temperatura y la precipitación a través del tiempo. Son zonas en donde aún no se desarrollan sistemas socio productivos de alta intensidad y especialización. Estos espacios representan un equilibrio con la oferta ambiental y de recursos ecológicos, no obstante, no significa que cuenten con altas capacidades y resiliencia para lograr ajustes tempranos frente al cambio climático y las tensiones antrópicas por lo que, deben ser al igual que las demás categorías de vulnerabilidad, consideradas como prioritarias para implementar practicas socio-ecológicas sostenibles.

La vulnerabilidad baja ocupa el 46% de la cuenca, seguido por la vulnerabilidad alta en un 43% presencia, y finalmente la vulnerabilidad moderada que tiene la menor extensión con cerca al 10% del área de la cuenca.

El último paso, consistió en la correlación espacial entre la vulnerabilidad y amenaza. La Figura 11 muestra la geografía de los sectores más críticos por riesgo en la cuenca. Esto es, donde se conjugan eventos altamente peligrosos y condiciones de alta vulnerabilidad.

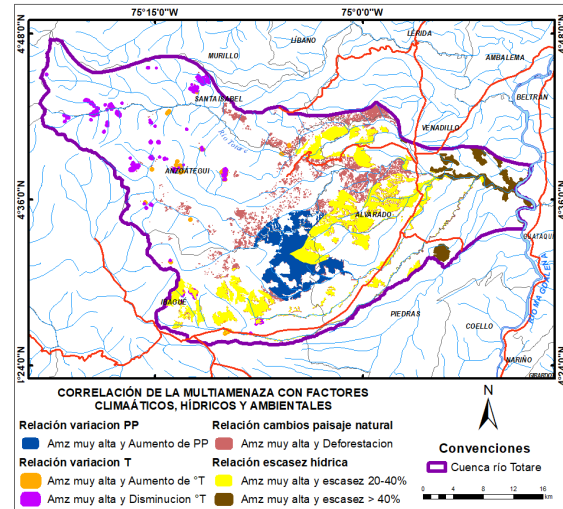


Figura 11 Correlación de los fenómenos amenazantes con los factores de vulnerabilidad  
Fuente: Elaboración propia

De la Figura 11 se puede colegir que en particular las correlaciones de la multiamenaza con las variables de temperatura y precipitación son mínimas obteniéndose áreas de muy poca extensión en la cuenca. La variabilidad de la temperatura frente a amenazas muy altas ocurre principalmente en la cuenca alta, zona de páramo, en proximidades al nevado volcán del Tolima. La variabilidad de la lluvia en zonas de amenaza muy alta ocurre por el contrario en la cuenca media a baja, entre las microcuencas río La China y quebrada La Caima, donde se registraron porcentajes de aumento entre 10 a 40% de la precipitación, frente a fenómenos de amenaza asociados a eventos de inundación y movimientos en masa.

Por otro lado, existe correspondencia espacial entre la modificación al paisaje natural por deforestación y la escasez hídrica de la cuenca en zonas de amenaza muy alta. Esta correlación se manifiesta principalmente en la parte media de la cuenca, en el relieve estructural montañoso, y donde se desarrollan actividades agrícolas y

ganaderas con incorporación constante de nuevos potreros al pastoreo, lo cual es indicador de las tensiones antropogénicas en el territorio en primer lugar sobre los ecosistemas boscosos y de forma encadenada se altera la disponibilidad del recurso hídrico e incentiva la generación o potenciación de las amenazas que en este sector se vinculan con fenómenos de deslizamientos y remoción en masa.

La ocupación territorial de estas correlaciones permite corroborar que la relación amenaza – escasez de agua es la de mayor presencia en la cuenca ocupando cerca del 10%, seguido por la deforestación y avance de la frontera agropecuaria con una ocupación superior al 5%, mientras la variación de la precipitación hacia el aumento de las lluvias se presenta en el 4% de la cuenca, y por último los cambios de aumento y disminución de la temperatura que tienen una presencia reducida ocupando menos del 1% de la cuenca.

## CONCLUSIONES

El resultado de los anteriores análisis demuestra en primer lugar el potencial de las ciencias Geomáticas en la Gestión del Riesgo de Desastres, en especial en el proceso de conocimiento de riesgo donde aporta en la identificación de patrones, tendencias y dinámicas asociadas a la vulnerabilidad hídrica y ambiental.

La geografía de las amenazas múltiples y la vulnerabilidad permite indicar de forma más clara las potenciales afectaciones y pérdidas tanto en términos sociales y económicos como en alteración de los servicios ambientales en los diferentes lugares que conforman la cuenca del río Totare.

Respecto a los factores que inciden en la fragilidad socio ambiental del recurso hídrico, se resalta en primer lugar, la variación de la temperatura en los ecosistemas de páramo y del nevado volcán, mientras los sectores medio y bajo de la cuenca muestran una tendencia a mantener la temperatura sin variaciones significativas. En segundo lugar, sobre la variación de la precipitación se presentaron pocos cambios con oscilaciones que no superaron el 10%. Se identificó un sector en el centro y sur

de la cuenca con tendencia al aumento de lluvias entre el 10 y el 40%. La década actual muestra una tendencia al descenso de la lluvia, mientras las décadas del 90 y 80 mostraron una tendencia al incremento.

En el tercer factor o variable, sobresale las transformaciones encontradas en el entorno natural o con vegetación producto de la constante deforestación de la cobertura boscosa. Se evidencia la consolidación de la matriz antropizada en la parte baja de la cuenca. Sin embargo, se resalta las expresiones espaciales de recuperación del bosque, algunos con una tendencia sostenida de restauración en más de 1 década.

La cuarta condición de fragilidad analizada mostró que el balance hídrico en la totalidad de las microcuencas presenta excesos de agua, situación favorable a la sociedad y los ecosistemas. La cuenca baja, cerca al río Magdalena, muestra propensión al déficit, allí la demanda de agua por las actividades agrícolas (arroz) genera un panorama de escasez.

La modelación del escenario multiamenaza en la cuenca permitió reconocer extensas superficies en categorías alta y muy alta, principalmente en la parte media. Los fenómenos que más aportan son incendios forestales y movimientos en masa, y en menor proporción en la parte baja de la cuenca los eventos de inundación.

Finalmente, la relación multiamenaza con los factores de vulnerabilidad demostró una intensa vinculación de la deforestación con las categorías muy altas de amenaza. Se evidencia igual correlación alta entre la escasez hídrica, la actividad antrópica de monocultivos de arroz y amenaza de tipo muy alto en la parte baja de la cuenca, y refleja la baja adaptación y capacidades de resistir a fenómenos de cambio y variabilidad climática.

## REFERENCIAS

- [1] F. Bernal, M. García, A. Piñeros y E. Ardila, “Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia”, Revista de Ingeniería, Universidad de Los Andes. No.

- 36, pp. 60-64, 2012.
- [2] P. Carrasco, "Estudio del impacto del cambio climático sobre los recursos. aplicación en diecinueve pequeñas cuencas de España", tesis doctoral, Univ. Pol. Madrid, 2002.
- [3] IDEAM, Estudio Nacional del Agua, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá D.C., Colombia, 2010 [En línea]. Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP2.pdf>
- [4] M. Gutiérrez y T. Espinosa, "Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático", Banco Interamericano de desarrollo, New York, 2010.
- [5] C. Sadoff y M. Muller, "La gestión del agua, la seguridad hídrica y la adaptación al cambio climático". Global Water Partnership, 2010.
- [6] IDEAM, "Mapa de Zonificación Hidrográfica", Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Grupo Evaluación Hidrológica, Bogotá D.C., Colombia, 2013.
- [7] M. Cook, "Atmospheric Compensation for a Landsat Land Surface Temperature Product", Rochester Institute of Technology, Oct. 2014 [En línea]. Disponible en: <http://scholarworks.rit.edu/theses/8513>
- [8] A. F. Sarria, "Cálculo de la temperatura de superficie a partir de imágenes NOAA, Landsat y Sentinel-3. Valencia", ETS ingeniería geodésica, cartográfica y topográfica, España, 2018 [En línea] Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/103166>
- [9] N. Frank, Teoría Teledetección Espacial: Landsat, Sentinel-2, Aster LIT y Modis, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Huánuco, Perú, 2017.
- [10] Q. Weng, D. Lu, y J. Schunring, "Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies", Remote Sensing of Environment, no. 22, 22 p, 2004.
- [11] IDEAM, Metodología de la operación estadística para variables meteorológicas, Subdirección de Meteorología, Bogotá, Colombia, 2018.
- [12] G. Toro y C. Melo, "Aplicación de métodos de interpolación geoestadísticos para la predicción de niveles digitales de una imagen satelital con líneas perdidas y efecto sal y pimienta", Tecnura, Tecnología y cultura afirmando el conocimiento, vol. 12, no. 24, 2009
- [13] A. Felicísimo, "Modelos digitales de terreno: curso de introducción", Momentos digitales biología 1974-79 [En línea] Disponible en: <http://www6.uniovi.es/~feli/CursoMDT/Tema1/Page16.html>. [Accedido: 22 de 11 de 2019].
- [14] E. Chuvieco, Teledetección Ambiental: la observación de la tierra desde el espacio, Editorial Ariel S.A. Barcelona, España, 2008.
- [15] P. Muñoz, "Apuntes de teledetección: índice de vegetación", Centro de Información de Recursos Naturales, Santiago de Chile, 2013.
- [16] L. Díaz y J. Alarcón, "Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y demanda de agua de la cuenca de la quebrada Niscota para un acueducto interveredal en Nunchía, Casanare", Universidad Católica de Colombia, Programa Especialización Recursos Hídricos, Bogotá D.C., Colombia, 2018.

- [17] J. Ordoñez, “Cartilla técnica: Balance hídrico superficial”, Sociedad Geográfica de Lima - Global Water Partnership South America, Lima, Perú, 2011.
- [18] SIAC, “Sistema de Información Ambiental de Colombia”, Visor geográfico sobre biodiversidad, 2019 [En línea] Disponible en: <http://www.siac.gov.co/geovisorconsultas>
- [19] Corponariño, “Ordenamiento del recurso hídrico de la quebrada Miraflores”, La Corporación, Nariño, Colombia, 2015.
- [20] IDEAM, Estudio Nacional del Agua 2018, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá D.C., Colombia, 2019.
- [21] T. Saaty, “Decision making with the analytic hierarchy process”, Services Sciences, pp. 83-98, 2008.
- [22] A.C. Robles, A. Polo y C.A. Ospino, “International Journal of Energy Economics and Policy”, pp. 38-47, 2017.
- [23] M. Rajabi, E. Chang y M. Saberi, “Are MCDM methods useful? A critical review of Analytic Hierarchy Process (AHP) and Analytic Network Process (ANP)”, Cogent Engineering, pp. 1 -12, 2019.