



Revista EIA  
ISSN 1794-1237  
e-ISSN 2463-0950  
Año XVIII/ Volumen 18/ Edición N.35  
Enero-Junio de 2021  
Reia35004 pp. 1-11

Publicación científica semestral  
Universidad EIA, Envigado, Colombia

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /  
TO REFERENCE THIS ARTICLE /**

Álvarez Pulido, A.J.; Yustres Quintero L.F.; Ivanova Y. (2021). Estimación del cambio de la capacidad de regulación hídrica como respuesta a los cambios de coberturas de la tierra (Caso de estudio: Cuenca alta del río Chinchiná, Caldas, Colombia). Revista EIA, 18(35), Reia35004. pp. 1-11.  
<https://doi.org/10.24050/reia.v18i35.1465>

 *Autor de correspondencia:*

Yustres Quintero L.F. (Luisa Fernanda):  
Universidad Militar Nueva Granada  
Correo electrónico:  
luisafyustres@gmail.com

**Recibido:** 20-08-2020  
**Aceptado:** 21-08-2020  
**Disponible online:** 01-01-2021

# Estimación del cambio de la capacidad de regulación hídrica como respuesta a los cambios de coberturas de la tierra (Caso de estudio: Cuenca alta del río Chinchiná, Caldas, Colombia)

ALAN JOSUÉ ÁLVAREZ PULIDO<sup>1</sup>

 LUISA FERNANDA YUSTRES QUINTERO<sup>1</sup>

YULIA IVANOVA<sup>1</sup>

1. Universidad Militar Nueva Granada

## Resumen

La ocupación humana y sus actividades productivas dan lugar a los cambios de las coberturas naturales de la Tierra que afectan los servicios ecosistémicos y, específicamente, el de regulación hídrica. Según el análisis integrado multitemporal de las coberturas e hidrológico se logró demostrar que la cuenca alta del río Chinchiná, que tiene importancia estratégica para la ciudad de Manizales, por sus condiciones naturales de suelos y coberturas naturales no tiene una buena capacidad de regulación hídrica que se desmejora con la expansión de coberturas de pasto y vegetación herbácea. La importancia del estudio radica en que el conocimiento de la relación entre la capacidad de regulación hídrica versus coberturas vegetales permite proyectar el uso adecuado de la tierra con el propósito de no afectar aún más la capacidad de regulación de la escorrentía superficial que sirve como fundamento de la biodiversidad y del abastecimiento de la ciudad de Manizales.

**Palabras Claves:** servicio ecosistémico de regulación hídrica, coberturas de la tierra, análisis multitemporal.

---

## Estimation of the change in water regulation capacity in response to changes in land cover (Case study:

# Upper Chinchiná river basin, Caldas, Colombia)

## Abstract

Human occupation and its productive activities give rise to changes in the Earth's natural covers that affect ecosystem services and, specifically, water regulation. According to the multi-temporal integrated analysis of the coverage and hydrological, it was possible to demonstrate that the upper basin of the Chinchiná River, which is of strategic importance for the city of Manizales, due to its natural conditions of soils and natural coverage, does not have a good capacity for water regulation that is it deteriorates with the expansion of grass covers and herbaceous vegetation. The importance of the study lies in the fact that the knowledge of the relationship between the water regulation capacity versus vegetation cover allows projecting the adequate use of the land in order not to further affect the regulation capacity of the surface runoff that serves as the basis of the biodiversity and supply of the city of Manizales.

**Key Words:** ecosystem service of water regulation, land cover, multitemporal analysis.

## 1. Introducción

El crecimiento de la población y sus patrones de consumo tienen un efecto directo sobre la biodiversidad de un país y Colombia no es la excepción, pues la ocupación humana y sus actividades productivas tienen una influencia adversa en las condiciones ambientales lo que trae consigo un efecto negativo en la biodiversidad del país, a causa de la degradación de los ecosistemas (Chevallier Et Al., 2019). La riqueza en biodiversidad que tiene el país solo es superada por Brasil, lo que quiere decir que Colombia es el segundo país en el mundo en términos de diversidad biológica, pero también tiene un problema importante en número de especie en peligro, debido a la destrucción de hábitat asociado al cambio de las coberturas de la tierra, con cerca de 1200 especies amenazadas y cerca de 300 de ellas están en riesgo crítico (Instituto Humboldt, 2017).

El principal cambio de coberturas vegetales se encuentra afectado por la expansión de las fronteras agrícolas y ganaderas. Debido a esto se ha observado que en las cuencas hidrográficas la frontera de cobertura boscosa se ha remplazado para dar lugar a campos agrícolas y ganaderos, estos cambios afectan directamente la regulación de la escorrentía superficial la cual es de suma importancia para la preservación del recurso hídrico del que dispone Colombia (Marín, 2003).

La cuenca alta del río Chinchiná en el departamento de Caldas es la principal fuente de abastecimiento de la ciudad de Manizales y no está exenta a estas dinámicas, presentado la expansión de coberturas de herbáceas y pasto, asociados a la actividad ganadera y agrícola.

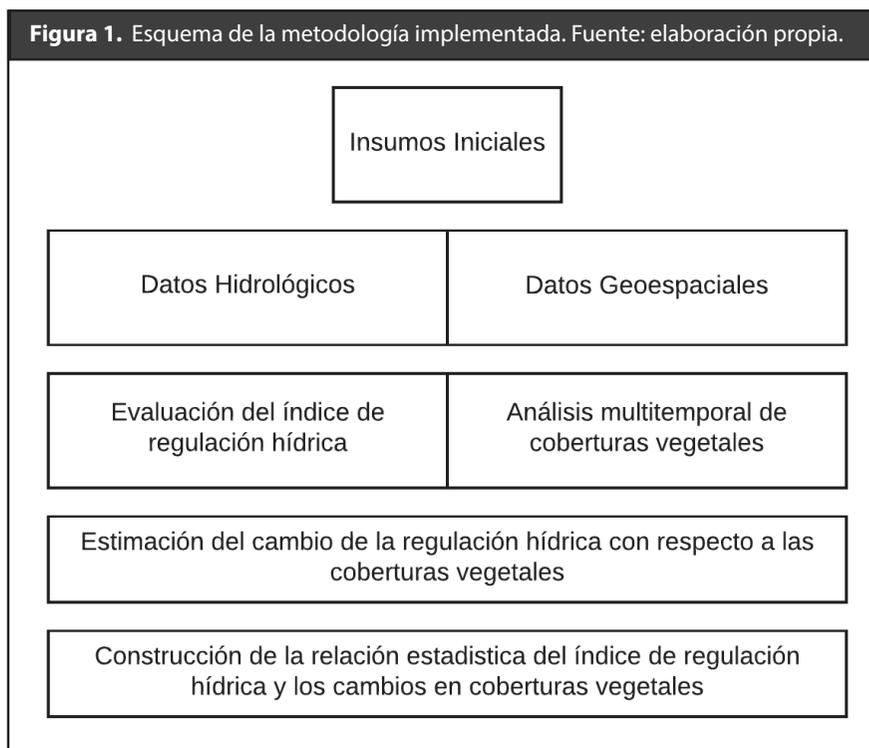
La cuenca analizada es un sistema ecológico complejo, conformado por ecosistemas de páramo, selva andina, especies herbáceas nativas, además del importante recurso hídrico del que dispone la cuenca. El 70 % del abastecimiento de agua potable de la ciudad de Manizales, proviene de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná, a través de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) "Luis Prieto Gómez", el 30 % restante lo suministra la PTAP "Niza", ubicada sobre el río Blanco (Aguas de Manizales S.A., 2019). En el 2017 la empresa Aguas de Manizales

S.A., identificó la oportunidad de generar energía hidráulica haciendo uso de sus estructuras de captación en la PTAP “Niza”, dando lugar al montaje piloto de una central hidroeléctrica capaz de generar hasta 45 KW, para autoconsumo de la PTAP, lo cual representa una reducción de 114 t CO<sub>2</sub> / año. Según un estudio realizado por la empresa que administra el acueducto y la alcaldía municipal, la cuenca tiene la capacidad de generar los 4.000 KW que se requieren para el funcionamiento del total del alumbrado público de la ciudad, para lo cual requiere la instalación de cerca de 20 estaciones hidroeléctricas, el estudio identificó puntos estratégicos capaces de generar 300 KW (ElTiempo, 2017).

De todo lo mencionado anteriormente se concluye que la cuenca alta del río Chinchiná tiene importancia local estratégica desde el punto de vista de biodiversidad, abastecimiento del agua y potencial hidroeléctrico. Todos estos servicios dependen directamente del recurso hídrico, cuya regulación se ve afectada por el cambio de coberturas naturales y que debe ser evaluada para generar estrategias de conservación de coberturas para la restauración de la capacidad natural de regulación hídrica.

## 2. Materiales y Métodos

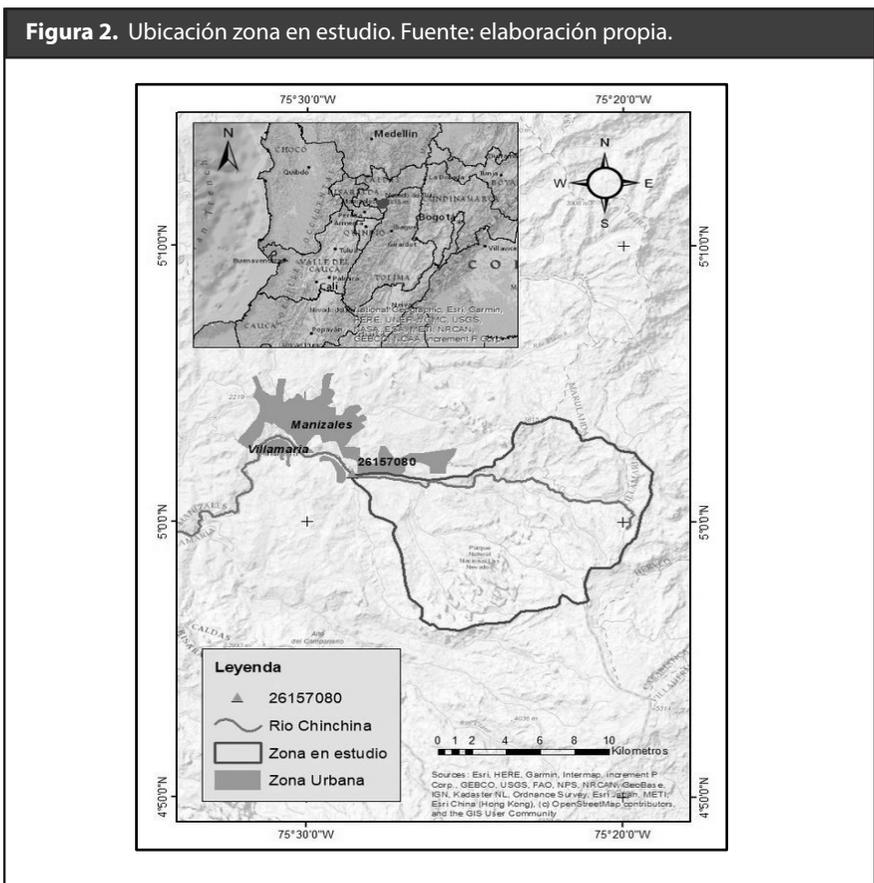
Para identificar cómo los cambios de las coberturas de la tierra han afectado la capacidad de regulación hídrica de la cuenca del río Chinchiná, se implementó una metodología cuyo marco conceptual se presenta en la figura 1.



La primera etapa consistió en la consulta y recopilación de los insumos iniciales. Estos constan de la información geoespacial e hidrológica.

La información de caudales medios diarios se consulta en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en su Sistema de información ambiental de Colombia (SIAC), mediante el visor de datos Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH). La cuenca del río Chinchiná cuenta con mediciones hidrológicas a través de la estación Chupaderos (cód. 26157080) que se localiza en la parte alta de la cuenca, pero aguas debajo de la bocatoma del sistema de acueducto que lleva sus aguas a la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) “Luis Prieto Gómez”. La cuenca del río Chinchiná hasta el punto de la bocatoma tiene un área aferente de aproximadamente, 14.500 hectáreas. Los caudales medidos en la estación a través de relación de áreas se traspasan al punto de la bocatoma que surte a la PTAP “Luis Prieto Gómez”.

En la figura 2, se presenta la ubicación de la zona en estudio con la localización de la estación hidrológica mencionada anteriormente.



La información geoespacial se relaciona con las imágenes satelitales que se consultan con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), por sus siglas en inglés, mediante los Geo-Visores “GloVis” y “EarthExplorer”, del sensor “Thematic Mapper” (TM) del sistema Landsat 5, con características presentadas en la tabla 1.

**Tabla 1. Características imágenes Landsat 5. Fuente: elaboración propia.**

Años en servicio	Sensor	Resolución espacial	Resolución radiométrica
1984 - 2013	TM	30 metros	8 bits

La segunda etapa está en el análisis multitemporal de los datos espaciales y en la interpretación de capacidad regulativa de la cuenca del río Chinchiná.

La capacidad de regulación de la cuenca se analiza año tras año a través de la construcción de curva de regulación hídrica y su respectivo valor del Índice de Regulación Hídrica (IRH) (ENA, 2018). La regulación hídrica en cuencas hidrográficas se da por las características de suelo y de las coberturas vegetales (Lazo Et Al., 2019). Suponiendo las condiciones del suelo invariables, en el estudio se maneja la hipótesis de que el cambio de regulación hídrica en la cuenca está asociado al cambio en las características de coberturas vegetales.

El IRH resulta de la relación entre la sumatoria de los caudales medios diarios por debajo del caudal medio y la sumatoria de la totalidad de los caudales medios diaria para la estación en estudio, a continuación, se presenta la expresión matemática que define al IRH.

$$IRH = V_p / V_t$$

(Ecuación 1, ENA 2018)

Dónde:

V<sub>p</sub> - Volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio

V<sub>t</sub> - Volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diarios

El índice tiene rango de variación de 0 a 1, siendo los valores más bajos indicadores de una pobre retención de humedad o regulación hídrica para una cuenca, se puede clasificar mediante una serie de indicadores descritos en la tabla 2.

**Tabla 2. Clasificación IRH. Fuente: ENA 2018, IDEAM**

Indicador	Clasificación	Descripción
Muy Baja	< 0.50	Muy baja retención y regulación de humedad
Baja	0.50 - 0.65	Baja retención y regulación de humedad
Moderada	0.65 - 0.75	Media retención y regulación de humedad
Alta	0.75 - 0.85	Alta retención y regulación de humedad
Muy Alta	> 0.85	Muy alta retención y regulación de humedad

El análisis geoespacial consiste en la clasificación supervisada de las coberturas vegetales que tienen mayor incidencia sobre la regulación hídrica. Se realizó la composición de imagen RGB (5, 4, 3), combinación de bandas, que permite analizar coberturas vegetales basados en el sistema Landsat 5. Para la clasificación supervisada de coberturas se aplica el algoritmo de máxima verosimilitud, el cual se basa en un archivo de firmas (.gsg), contando con un mínimo de 75 puntos de entrenamiento para cada una de las clases clasificadas para la zona en estudio, para luego asignar una etiqueta a cada píxel en el ráster y agruparlo en una clase (Camacho-Sanabria Et Al., 2015).

Finalmente, en la tercera etapa, se integran los resultados obtenidos en la estimación del índice de regulación hídrica y el análisis multitemporal de coberturas de la tierra para los años conjuntos de observación. Esta integración consiste en la construcción del análisis de regresión lineal múltiple, entre los valores del IRH y de las áreas de coberturas de la tierra. La decisión de integrar una u otra cobertura al análisis estadístico se toma con base en su peso al valor del coeficiente de correlación evaluado a través del valor del parámetro de Fisher (F) (Martínez, 2011). En la construcción de regresión se utiliza el nivel de significancia de 0.05 y el valor del coeficiente de regresión se considera significativo siempre cuando este esté encima de 0.7. El valor final del coeficiente de correlación indica en que porcentaje el valor de IRH depende del cambio conjunto de coberturas de tierra.

### 3. Resultados y Discusiones

La zona en estudio contó con una disponibilidad total de 4 imágenes satelitales, con características descritas en la tabla 3.

**Tabla 3. Características imágenes disponibles Landsat 5. Fuente: elaboración propia.**

Año	Sensor	Resolución espacial	Resolución radiométrica
1989	TM	30 metros	8 bits
1992	TM	30 metros	8 bits
1996	TM	30 metros	8 bits
2002	TM	30 metros	8 bits

Se construyeron las curvas de duración de caudales a partir de las series de datos hidrológicos de caudales medios diarios para los años con información espacial, y se calcularon los índices de retención hidráulica para los mismos años (Véase tabla 4).

**Tabla 4. Estimación IRH, Años con información geoespacial.**

**Fuente: elaboración propia.**

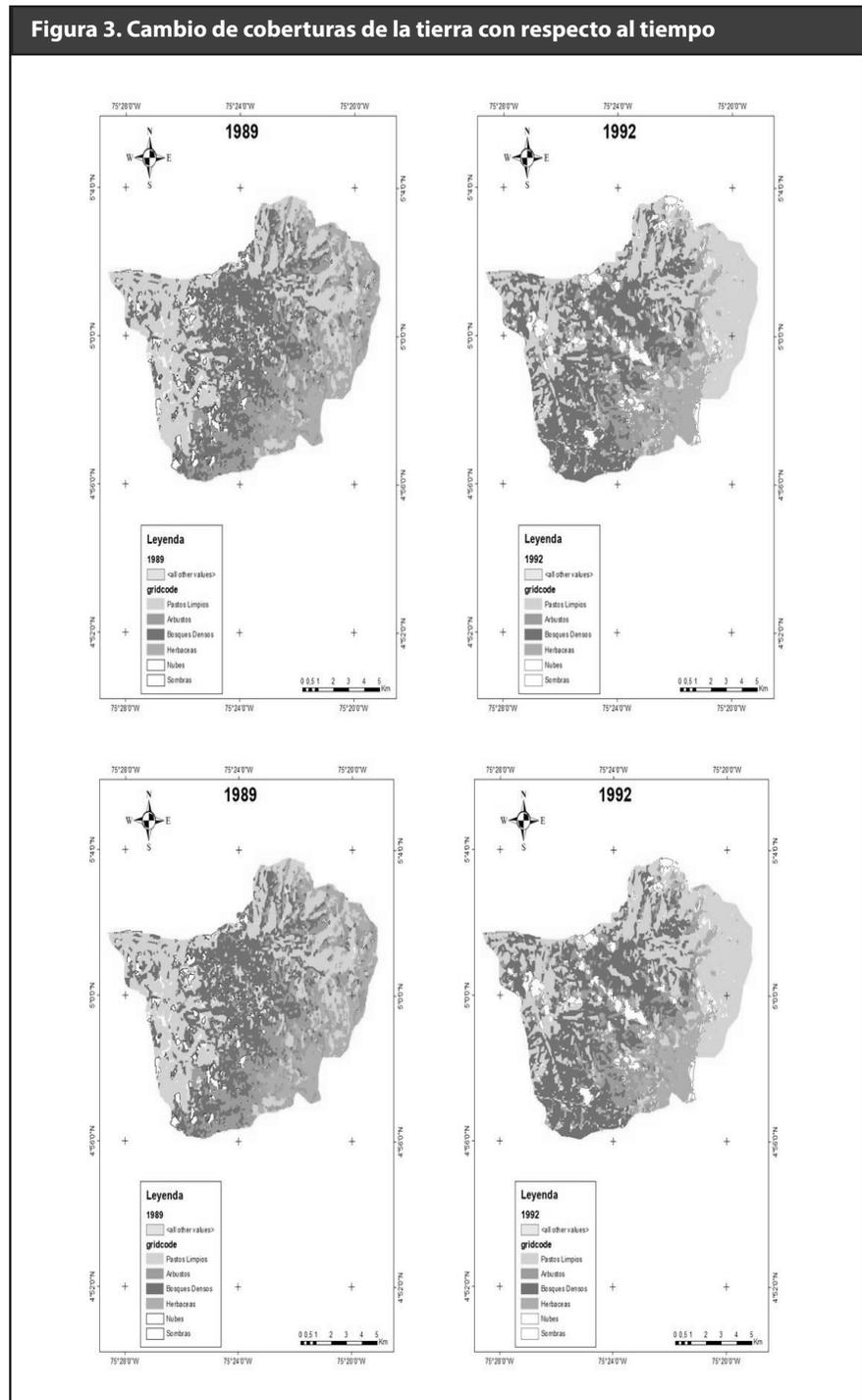
Año	IRH [-]	Indicador ENA 2018
1989	0,29	Muy baja
1992	0,28	Muy baja
1996	0,27	Muy baja
2002	0,12	Muy baja

La cuenca alta del río Chinchiná se compone de un relieve montañoso con fuertes pendientes a lo largo y ancho de su extensión, sus suelos tienen una formación de origen volcánico compuestos principalmente por capas de suelos de origen vegetal y material piroclástico, además de depósitos de andisoles (Moreno-Sánchez Et Al., 2016). La cuenca en su condición inicial presenta una muy baja regulación de la escorrentía superficial, regulación que se relaciona directamente con el relieve y condición geológica.

Se aprecia que la cuenca alta del río Chinchiná durante el período 1989 – 2002, ha experimentado cambios su regulación hídrica, presentando una disminución del 56,92 %. Según los indicadores propuestos en el ENA 2018 (Véase tabla 2), la cuenca presenta una muy baja retención de humedad.

Mediante la aplicación del algoritmo de ArcGIS de máxima verosimilitud, se determinaron las áreas de coberturas de la tierra presentes en la zona de estudio.

En la figura 3, se muestran gráficamente los cambios sufridos por las coberturas de la tierra en el período comprendido entre 1989 y 2002.



Se aprecia como las coberturas de la tierra en la cuenca hidrográfica cambian con respecto al tiempo, en la tabla 5 se muestra la clasificación de coberturas de la tierra para cada uno de los años con información geoespacial, la clasificación se presenta en hectáreas [ha].

**Tabla 5. Resumen clasificación coberturas de la tierra.**  
**Fuente: elaboración propia.**

Coberturas Cuenca Alta Río Chinchiná						
Años	Pasto [ha]	Herbácea [ha]	Arbusto [ha]	Bosque [ha]	Cultivo [ha]	Urbano [ha]
1989	4912	1889	2871	4182	0	0
1992	5390	1769	1902	4521	0	0
1996	3815	2284	2624	5043	670	0
2002	4838	2218	1253	5227	869	191

Como se apreció en los resultados hidrológicos, el índice de regulación hídrica ha disminuido en el período considerado dentro de este estudio. Teniendo en cuenta que en el estudio se maneja la hipótesis de que los cambios de algunas coberturas de la tierra afectan la capacidad regulativa de una cuenca hidrográfica, para el caso en estudio debieron expandirse algunas coberturas que como resultado ocasionaron la disminución de la capacidad de regulación hídrica. Las coberturas boscosas han tenido un crecimiento poco significativo, del mismo modo su dinámica contradice al índice de regulación hídrica, puesto que este último ha visto una disminución. Las áreas de cultivos y los tejidos urbanos representan menos del 7,5 % de la cuenca y su aporte a la capacidad regulativa de la cuenca no es alto estadísticamente. Finalmente, de todas las coberturas que se eligieron, las coberturas de pastos y herbáceas son las que tuvieron un crecimiento más alto en el período considerado.

En la tabla 6, se presenta un resumen del modelo estadístico aplicado a partir del análisis de regresión múltiple, que se llevó a cabo sobre las coberturas vegetales de pastos y coberturas herbáceas.

**Tabla 6. Resumen modelo estadístico aplicado . Fuente: Elaboración propia**

Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,9977
Intercepción	2,214
Variable Pastos	-0,00018
Variable Herbácea	-0,00055
P - Value Pastos	0,03591
P - Value Herbácea	0,03083

Teniendo en cuenta el modelo estadístico aplicado, se estimó la relación matemática entre las coberturas de la tierra y el IRH, se identificó que la regulación de la escorrentía superficial es dependiente en un 99,77 % a los cambios de coberturas de pastos y coberturas herbáceas. El análisis estadístico de la significancia de los parámetros de la ecuación de regresión lineal múltiple indica que estos son significativos en el intervalo de confianza del 95 %. Los valores de probabilidad (P - Value) se usaron para verificar la importancia de cada coeficiente, esto es necesario para comprender el patrón de interacciones mutuas entre las variables analizadas. Los parámetros con valores de (P -Value) menores al 5 % ( $P < 0,05$ ) se consideraron significativos. A continuación, se presenta el modelo polinomial de primer orden que define la afectación que tienen los cambios de coberturas de la tierra sobre el índice de regulación hídrica.

$$\text{IRH} = 2.2145 - 0.00018 \times A_{\text{pastos}} - 0.00055 \times A_{\text{herbácea}}$$

Dónde:

- IRH - Índice de regulación hídrica, (adimensional)
- $A_{\text{pastos}}$  - Área de coberturas de pastos, (ha)
- $A_{\text{herbácea}}$  - Áreas de coberturas herbáceas, (ha)

Los objetivos de acciones de restauración de cuencas hidrográficas consisten en llevar sus características hacia los valores naturales. Según los registros hidrológicos históricos, en el año 1989 el índice de regulación hídrica ha estado cercano al valor de 0,30 que, aunque caracteriza una capacidad muy baja de regulación hídrica, representa sus condiciones originales. Utilizando la ecuación 2, se puede solucionar el modelo estadístico como tarea inversa, buscando tal disminución conjunta de áreas de coberturas herbáceas y pastos que lleven al índice de regulación hídrica a su valor natural. Los resultados obtenidos indican que un área de cobertura de pastos de, 2500 [ha] y un área de coberturas herbáceas de, 3000 [ha], restaurarían el índice de regulación hídrica de la cuenca hidrográfica a su estado natural de 0,30.

### 3. Conclusiones

La dinámica de las coberturas de la tierra afecta directamente la capacidad de regulación hídrica de cuenca hidrográfica en este estudio, como resultado la cuenca ha presentado una disminución de la regulación hídrica, producto de la expansión de coberturas herbáceas y de pastos, y el crecimiento de la cobertura boscosa no compensa la expansión de las primera dos coberturas.

La expansión de coberturas, asociadas directamente a las actividades humanas, como, por ejemplo, la expansión de las fronteras agrícolas y tejido urbanos, no afectan de manera significativa la capacidad de regulación hídrica de cuenca del río Chinchiná.

La relación de regresión lineal múltiple entre las coberturas herbáceas y pastos versus índice de regulación hídrica, puede servir como instrumento para el ordenamiento de la cuenca hidrográfica con fines de restauración de la capacidad de regulación de la escorrentía superficial, identificando qué disminución de dichas coberturas produciría la restauración de la capacidad regulativa de la escorrentía superficial hasta sus valores naturales.

El estudio realizado, recomienda complementar este estudio con un mayor número de imágenes satelitales, imágenes necesarias para tener una muestra estadísticamente significativa, y que no fueron disponibles en este caso.

## 6. Referencias

- Adrien Chevallier, Fernando González-Roca, Matías Portflitt-Toro, Jonathan A. Fortt, Nicolás Luna, Osvaldo Cerda, Daniela M. Carranza, Francisco A. Squeo, Carlos F. Gaymer, National trends in the biodiversity interest in digital media, *Environmental Science & Policy*, Volume 101, 2019, Pages 106-115, ISSN 1462-9011.
- Instituto Humboldt, (2017). Biodiversidad colombiana: números para tener en cuenta.
- The Nature Conservancy, (2019). Proteger la diversidad biológica de Colombia con políticas públicas.
- Marín Ramírez, R. (2003). III SEMINARIO DE ACTUALIZACION EN INGENIERIA AMBIENTAL, "GESTION DEL RECURSO HIDRICO EN COLOMBIA". Bogotá, Colombia.
- Aguas de Manizales S.A. E.S.P., (2019). Presentación Aguas de Manizales abril 2019, Manizales. Colombia.
- Periódico El Tiempo, (2017). Planta de agua de Niza, en Manizales, ya genera su propia electricidad. Colombia., <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/aguas-de-manizales-ya-genera-energia-electrica-con-turbina-en-planta-de-niza-141040>
- Lazo, P. X., Mosquera, G. M., McDonnell, J. J., & Crespo, P. (2019). The role of vegetation, soils, and precipitation on water storage and hydrological service in Andean Páramo catchment. *Journal of Hydrology*, 805 - 819.
- José Manuel Camacho-Sanabria, José Isabel Juan Pérez, Noel Bonfilio Pineda Jaimes, Edel Gilberto Cadena Vargas, Luis Carlos Bravo Peña y Marcela Sánchez López, Coverage/land use changes in a portion of the Mountainous Mexican Transition Zone, *Madera y Bosques* vol. 21, núm. 1: 93-112 Primavera 2015.
- Martínez, C. (2011). Estadística aplicada. Pearson Educación. Tomado de <http://www.ebooks7-24.com.ezproxy.umng.edu.co/?il=8866>
- Moreno-Sánchez, M., Hincapié, G., Ossa, C.A., y Toro-Toro, L.M. 2016. Caracterización geológico-estructural de algunas zonas de cizalla en el Complejo Quebrada grande en los alrededores de Manizales y Villamaría. *Boletín de Geología*, 38(4): 15-27.
- Corporación Autónoma Regional de Caldas, (2020). Catálogo de especies de flora y fauna: sub-region occidente prospero del departamento de Caldas. Colombia.
- M.C. Otalora, J.S. Hernández, (2018). Estimación de los índices hídricos (IUA, IRH, IVH) y formulación de medidas para la mitigación del desabastecimiento en la subcuenca arroyo grande corozal (2502- 01-07) de la cuenca río bajo san Jorge. Universidad Católica de Colombia, Facultad de ingeniería, Bogotá D.C., Colombia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, (2018). Estudio Nacional de Agua 2018, Colombia.
- Javier Sánchez, (2013). Curva de caudales clasificados, Universidad de Salamanca, España., [http://hidrologia.usal.es/Complementos/Curvas\\_de\\_Q\\_clasificados.pdf](http://hidrologia.usal.es/Complementos/Curvas_de_Q_clasificados.pdf)
- Juan Salazar, (2016). Una metodología para la estimación de curvas de duración de caudales (CDC) en cuencas no instrumentadas. caso de aplicación para Colombia en los departamentos de Santander y norte de Santander, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Martha García Herrán, (2013). Seminario - taller Uso de las cuentas de capital natural en la política pública WAVES. Bogotá. Colombia., [https://www.wavespartnership.org/sites/waves/files/documents/WAVES-Presentaci%C3%B3n-ENA2010\\_sep\\_26\\_2013.pdf](https://www.wavespartnership.org/sites/waves/files/documents/WAVES-Presentaci%C3%B3n-ENA2010_sep_26_2013.pdf)
- Rafael Antonio Becerra Rodríguez, (2017). Balance hídrico de la cuenca abastecedora de la planta de tratamiento de agua potable "Luis Prieto Gómez" en la vereda gallinazo de Villamaría caldas, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Medellín. Colombia.