

**ESTADO DEL ARTE DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE TENDENCIA DE  
CAUDALES DEL RÍO CAUCA.**

**ALEJANDRO ESTEBAN GONZÁLEZ GÓMEZ**

**ARIX MALLERLY MONTENEGRO PORRAS**

**JORGE EDUARDO SÁNCHEZ HERRERA**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIPLOMADO DE HIDROTECNIA**

**BOGOTÁ**

**2016**

**ESTADO DEL ARTE DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE TENDENCIA DE  
CAUDALES DEL RÍO CAUCA.**

**ALEJANDRO ESTEBAN GONZÁLEZ GÓMEZ**

**ARIX MALLERLY MONTENEGRO PORRAS**

**JORGE EDUARDO SÁNCHEZ HERRERA**

**ASESOR:**

**ROY WALDHIERSEN MORALES PÉREZ**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIPLOMADO DE HIDROTECNIA**

**BOGOTÁ**

**2016**

Nota de aceptación

---

---

---

---

\_\_\_\_\_  
Firma Director Trabajo de Grado

\_\_\_\_\_  
Firma del presidente jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del jurado

Bogotá, septiembre de 2016

## CONTENIDO

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| INTRODUCCIÓN.....                  | 7  |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 8  |
| 2. OBJETIVOS.....                  | 10 |
| 3. JUSTIFICACIÓN.....              | 11 |
| 4. METODOLOGÍA.....                | 13 |
| 5. DESARROLLO.....                 | 18 |
| 6. CONCLUSIONES.....               | 24 |
| BIBLIOGRAFÍA.....                  | 26 |
| LISTA DE TABLAS.....               | 6  |
| LISTA DE FIGURAS.....              | 6  |
| LISTA DE ANEXOS.....               | 6  |

## **LISTA DE FIGURAS**

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Mapa de la Cuenca de tercer orden.....                                | 15 |
| Figura 2 Localización de las estaciones hidrométricas de medición de Caudal...  | 20 |
| Figura 3 Criterio Grafico de ajuste a los datos de validación.....              | 21 |
| Figura 4 Criterio Error Final de Predicción (FPE).....                          | 22 |
| Figura 5 Diagrama de entradas y salidas en la identificación de un sistema..... | 23 |

## **LISTA DE TABLAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Estaciones hidrométricas seleccionadas para el estudio..... | 18 |
|---|----|

## INTRODUCCIÓN

La medida de caudal en una sección de control dada, consiste en la determinación de la cantidad de masa o volumen que circula por dicha sección en la unidad de tiempo. Las diferentes investigaciones realizadas acerca de los cauces de ríos tienen como interrogante si las fuentes fluviales pueden retomar importancia en el comercio del país. El análisis de la tendencia de los diferentes caudales del río Cauca arrojan información precisa sobre la factibilidad que puede resultar el aumento o disminución del caudal para generar inversiones económicas e ingresos a las zonas que circundan el mismo.

A través de los estudios encontrados se muestra la tendencia de los caudales máximos, medios, mínimos mensuales y anuales en la cuenca hidrográfica Cauca desde su nacimiento hasta su desembocadura; todo esto a partir de los datos obtenidos en el IDEAM de ocho (8) estaciones hidrométricas, ubicadas estratégicamente a lo largo de esta cuenca hidrográfica.

Se realizó una investigación de tipo analítico situacional de la oferta del recurso hídrico en la cuenca del río Cauca a partir de la obtención de la información hidrológica, en donde se hace un análisis de usos actuales y potenciales del suelo, permitiendo evaluar los usos sostenibles del recurso hídrico.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los pocos estudios realizados en la actualidad sobre los cambios volumétricos de los caudales del río Cauca están limitados por los análisis desarrollados a lo largo del tiempo, las obras hidráulicas no cumplen con el crecimiento adecuado y en varios de los casos se han cometido errores.

La poca presencia gubernamental en la falta de soluciones para afrontar la problemática de crecidas e inundaciones que se presentan en las épocas de invierno en nuestro país a causa de los fenómenos naturales; esto es debido, en gran parte, a la falta de estudios detallados de los principales cuerpos de agua del país, como lo es el río Cauca, el cual genera gran impacto, ya que atraviesa una amplia zona del territorio nacional, y un pertinente estudio indicaría soluciones para mitigar los problemas que conlleva esto.

Como se comentó anteriormente, Colombia no tiene un registro detallado de las problemáticas que conlleva las épocas de retorno de los fenómenos naturales de la actualidad, como consecuencia las inundaciones y otros eventos hidrometeorológicos extremos. La cuenca del río Cauca y Magdalena son las más vulnerables del país, contando el 90% de los daños y el 70% de pérdida de vidas humanas por los asentamientos a las riveras del río. Adicionalmente, la actividad industrial, el aprovechamiento de recursos y la producción agrícola, generan grandes pérdidas materiales y territorio.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> IDEAM. Estudio Nacional del Agua ENA: Bogotá, 2010., s.f.

## **PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Cómo es el comportamiento de los caudales en la cuenca hidrográfica del Río Cauca?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO**

Analizar el estado de las metodologías empleadas para la investigación de las tendencias de los caudales del río Cauca.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar bibliografía sobre las condiciones hídricas de los caudales del río Cauca.
- Establecer la metodología de análisis de la información recopilada sobre las condiciones del río Cauca.
- Analizar la información recolectada para determinar una postura argumentativa sobre las condiciones del río Cauca.

### 3. JUSTIFICACIÓN

El río Cauca está constituido por una gran extensión de tierra comprendiendo departamentos como Cauca, Valle del Cauca, Caldas, Córdoba, Risaralda, Bolívar, Sucre y Antioquia, dentro de ellos más de 190 municipios. Las necesidades hídricas no solo de la población ya mencionada, sino que junto con la cuenca hidrográfica del Magdalena cubren más del 50% de la población colombiana, que precisamente se haya asentada en las riveras de estas cuencas. El río Cauca acompañado de su cuenca tiene una superficie aproximada de 63.000 km<sup>2</sup> y equivalente al 6% del territorio nacional.<sup>2</sup>

Debido a la gran importancia de esta cuenca hidrográfica para el país, es preciso conocer el comportamiento o cambios que pueda tener su flujo, ya que se denota que éste podría reducir, lo que causaría significativos inconvenientes para la población que se beneficia. La cuenca hidrográfica Cauca ocupa dentro del contexto nacional un lugar importante, puesto que en ella se centra la industria manufacturera, la mayoría de la zona minera, agropecuaria y cafetera se sitúan al sur de Cauca. Por la importancia de la zona, las proyecciones de infraestructura cuentan con varios estudios en busca de compensar las necesidades de los diferentes sectores.

Agregando a lo antes mencionado la ingeniería civil genera gran apoyo técnico para la determinación de la tendencia de los caudales, por medio de esta investigación se busca dar una postura en el estado del recurso hídrico de la

---

<sup>2</sup> IDEAM. Estudio Nacional: 2008, s.f. del Agua, ENA, Bogotá, 2010.

cuenca hidrográfica Cauca en caso de que se planifique alguna obra hidráulica en este territorio. Con ello se busca determinar si es factible la ejecución de proyectos de infraestructura hidráulica, o por el contrario sería perjudicial en términos ambientales, económicos, sociales, entre otros, lo que permitiría optar por una alternativa que se ajuste al equilibrio entre las diferentes partes involucradas. Como resultado del estudio se determinarán acciones correctivas para impactar de la menor manera la fuente hídrica.

La cuenca hidrográfica del río Cauca, opta por realizar una verificación que muestre el comportamiento de su caudal ya que está muy bien sustentado por estudios previos. Cabe anotar que los distintos datos encontrados no han sido sometidos a un riguroso análisis que permita determinar el comportamiento de su caudal. Luego, estas investigaciones se podrán trasladar a otros cuerpos de agua, y de esta forma establecer parámetros ambientales, económicos y sociales.

## 4. METODOLOGÍA

### DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Línea de investigación: Hidrotecnia

Tipo de investigación: Documental

Debido a que nos apoyamos de investigaciones científicas reportadas en fuentes documentales verídicas de forma organizada, con la finalidad de hacer una recopilación adecuada de datos de los caudales (medios anuales, medios mensuales y medios diarios mínimos), vs la variable de tiempo ya que su comportamiento depende de este.

Se utilizaron diferentes técnicas de localización y fijación de datos, análisis de documentos y de contenidos.

Enfoque: Cuantitativo y cualitativo.

Cuantifica la cantidad del caudal que se presenta en la cuenca del río y se analiza la tendencia que esta toma.

Se presenta un enfoque cualitativo ya que con la interpretación de los resultados podemos dar una hipótesis de la zona geográfica de la cuenca en cuanto a capacidad de almacenar aguas características hidráulicas, etc.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> SIERRA CORTES, Joselin. Tendencias de los caudales de la cuenca hidrográfica del Rio Magdalena. Bogotá: Tesis p. 40

Población referente: Cuenca hidrográfica del Río Cauca desde su nacimiento hasta su desembocadura.

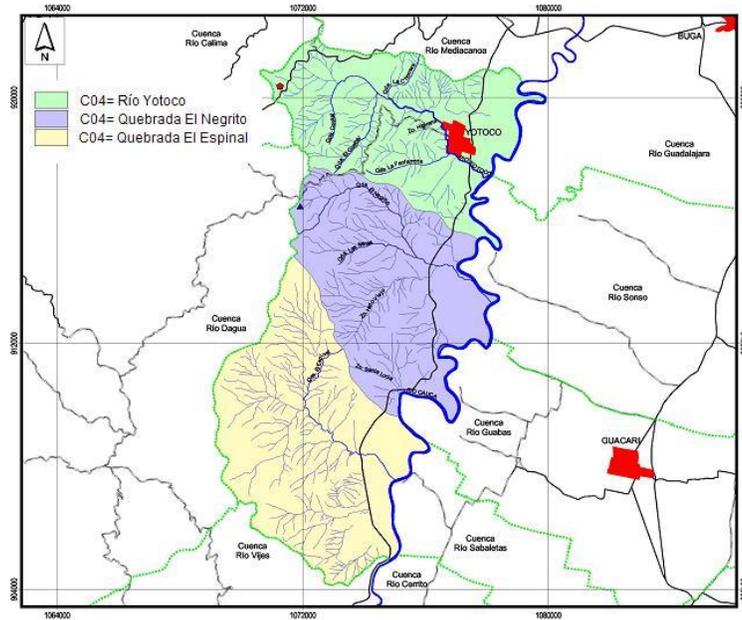
Muestra: Ocho (8) estaciones hidrográficas de medición de caudales.

Para este estudio se tuvieron en cuenta dos investigaciones, los cuales serán la base en modelos de predicción específicos de caudales para las cuencas en el Valle del río Cauca. Con lo anterior se determinó una zona de estudio comprendida entre las cordilleras Occidental y Central de los Andes donde presentan una variabilidad climática, debido a sus pisos térmicos, conformado por 35 cuencas que poseen un drenaje principal que desemboca directamente al río Cauca.

Para efectos académicos y datos principales sobre la cuenca hidrográfica se mencionan los siguientes; “(i) el caudal promedio multianual del río Cauca es de 279 m<sup>3</sup>/s, (ii) el aporte total promedio de los ríos provenientes de las cordilleras Central y Occidental es de 277m<sup>3</sup>/s y su recorrido total en el departamento del Valle del Cauca tiene una longitud de 340 km, (iii) el aporte en la Zona Andina presenta una precipitación relativamente baja de 1500 mm/año comparada con la costa pacífica que es conocida como la región más lluviosa del mundo”, donde se presentan dos periodos lluviosos marzo-mayo y septiembre-noviembre, mientras

que diciembre-febrero y junio-agosto son menos lluviosos o secos. (Modelos multivariados)<sup>4</sup>

**Figura 1:** Mapa de la Cuenca de tercer orden



Recuperado de: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/2591/1/paginas%2067-81volumen%206.pdf>

---

<sup>4</sup> CARVAJAL ESCOBAR, Yesid. Modelos de Predicción de Caudal Utilizando Variables Macroclimáticas y Técnicas Estadísticas Multivariadas en el Valle del Río Cauca. Universidad del Valle: Editorial Eidenar, 2007. 68 p

## **METODOLOGÍAS HIDROLÓGICAS**

El proceso metodológico se basará en llevar a cabo una investigación de tipo analítico situacional de la oferta del recurso hídrico en la cuenca del río Cauca a partir de la obtención de la información hidrológica de la cuenca acompañada del análisis de usos actuales y potenciales del suelo, bajo una visión interdisciplinar en la evaluación del recurso hídrico, el proyecto de investigación pretende con base en los resultados de la evaluación plantear usos sostenibles del recurso hídrico y de los tipos de suelo existentes en la cuenca.

“Dentro de las investigaciones encontradas la metodología de la información hidrológica se considera una de las más importantes para la recolección de datos mediante la utilización de estaciones hidrométricas con base en los diferentes criterios tales como: cobertura, periodo de registro y calidad de la información”.<sup>5</sup>

Permitiendo estimaciones rápidas de los caudales ambientales utilizando índices hidrológicos sencillos, percentiles fijos de la curva de duración de caudales, medias móviles o puntos fijos de probabilidad o período de retorno.

Las etapas de la investigación que se utilizaran son las siguientes:

- Delimitación espacial
- Recopilación de la información
- Delimitación temporal

---

<sup>5</sup> CARVAJAL ESCOBAR, Yesid. Modelos de Predicción de Caudal Utilizando Variables Macroclimáticas y Técnicas Estadísticas Multivariadas en el Valle del Río Cauca. Universidad del Valle: Editorial Eidenar, 2007. 68 p

- Análisis de la información existente
- Conclusiones

## **ANÁLISIS DE DATOS**

El análisis fue aplicado a los caudales medios mensuales de las estaciones seleccionadas con el objeto de evaluar su estructura, consistencia, presencia de valores atípicos y relaciones entre las variables analizadas, como incrementar el entendimiento sobre los datos y disminuir los grados de incertidumbre al evaluar la validez de los resultados obtenidos en los modelos de predicción.

## 5. DESARROLLO

**Tabla 1** Estaciones hidrométricas seleccionadas para el estudio5

| Río      | Estación    | Área (km <sup>2</sup> ) | Caudal Promedio multianual (m <sup>3</sup> /s) | Caudal Máximo promedio multianual (m <sup>3</sup> /s) | Caudal Mínimo promedio multianual (m <sup>3</sup> /s) |
|----------|-------------|-------------------------|--|---|---|
| Cauca    | La Balsa    | 5.156                   | 196  | 301   | 111   |
| Cauca    | Hormiguero  | 8.018                   | 267  | 404   | 151   |
| Cauca    | Juanchito   | 8.584                   | 279  | 434   | 150   |
| Cauca    | Mediacanoa  | 12.186                  | 322  | 514   | 171   |
| Cauca    | Guayabal    | 16.036                  | 385  | 625   | 181   |
| Cauca    | La Victoria | 16.284                  | 386  | 638   | 189   |
| Cauca    | Anacaro     | 17.234                  | 409  | 673   | 197   |
| La Vieja | Cartago     | 2.852                   | 97   | 287   | 88  |

Para el análisis exploratorio de los datos se tomaron en cuenta 8 estaciones hidrométricas especificadas en el siguiente cuadro 1 donde se observan las características hidrológicas del río Cauca a su paso por el Valle, y la figura 2 presenta la localización de las estaciones hidrométricas que se utilizaron en el presente estudio.

En los modelos escogidos se trabajó con las series mensuales de caudal de 8 estaciones, 7 ubicadas sobre el Río Cauca y 1 sobre el río La Vieja, su principal afluente en la región. Los registros de los afluentes restantes se descartaron por presentar series muy cortas o varios años sin registro. La información histórica de los registros no presentó inconsistencias, pero fue restituida a régimen natural a partir de 1985, cuando entró en operación el embalse de La Salvajina (1000 hm<sup>3</sup>). Los datos faltantes fueron estimados aplicando un análisis multivariado con una subrutina de componentes principales, y utilizando la información de todo el conjunto de estaciones.

Se consideraron 7 variables macro climáticas del océano para analizar las correlaciones cruzadas con la hidrología de la región; dichas variables fueron: el índice de oscilación del sur (SOI) y las temperaturas superficiales del océano Pacífico (°C) en las regiones como son, Niño 1-2 (0° - 10° S, 90° - 80° W), Niño 3 (5° N – 5° S, 150° O-90° W), Niño 4 (5° N- 5° S, 160° E 150° O), Niño 3-4, Hawai (THAWAI) y costa oeste de América (TCOAS). El grupo de variables de base para el estudio se caracteriza por presentar correlaciones significativas entre sí, por lo cual es necesario un posterior análisis de Componentes principales para estudiar su variabilidad conjunta y las relaciones que tienen con la hidrometeorología de la región.

Los componentes principales han sido tomados de registros que se obtuvieron del proyecto COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y de JISAO, instituto adjunto

de la NOAA y la universidad de Washington de Washington, para el estudio conjunto del Océano y la Atmosfera<sup>6</sup>

**Figura 2** Localización de las estaciones hidrométricas de medición de Caudal



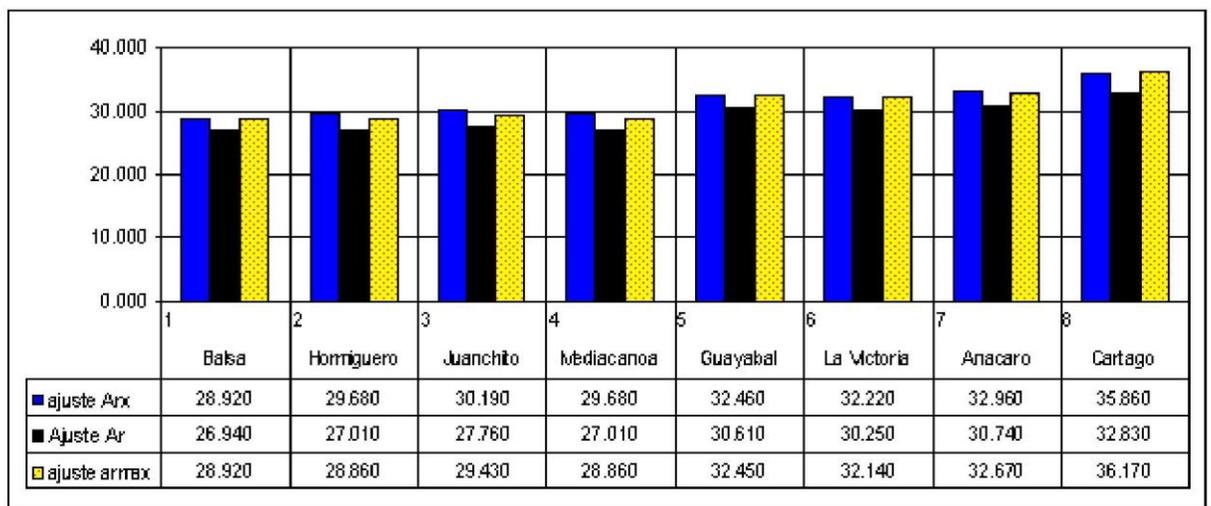
Para el ajuste de los modelos paramétricos multivariados y cada una de las series de caudal se ajustaron modelos paramétricos AR, ARX y ARMAX. El criterio para establecer el orden de los modelos se basó en los resultados obtenidos por las funciones de auto correlación presentadas, lo cual indica que este tipo de series ajustan modelos con un rezago de 1 mes. Las ventanas de predicción a largo plazo

---

<sup>6</sup> GARZÓN RINCÓN, Dayana Catalina; MASMELA BEDOYA, Fabian Camilo; RODRÍGUEZ CASTAÑEDA, Juan Manuel, Tendencias de los caudales de la cuenca hidrográfica Cauca (Tesis de pregrado) Bogotá : Universidad La Gran Colombia Facultad de Ingeniería Civil, 2013.

no dan resultados satisfactorios porque la función de auto correlación es muy débil. En las Figuras 3 y 4 se presentan la comparación del ajuste de modelos a los datos de validación el error final de predicción (FPE), ajustado a las series de caudal en cada estación: (a) sin variables exógenas, Modelos AR, (b) con la primera CP como variable exógena, Modelos ARX y ARMAX.<sup>7</sup>

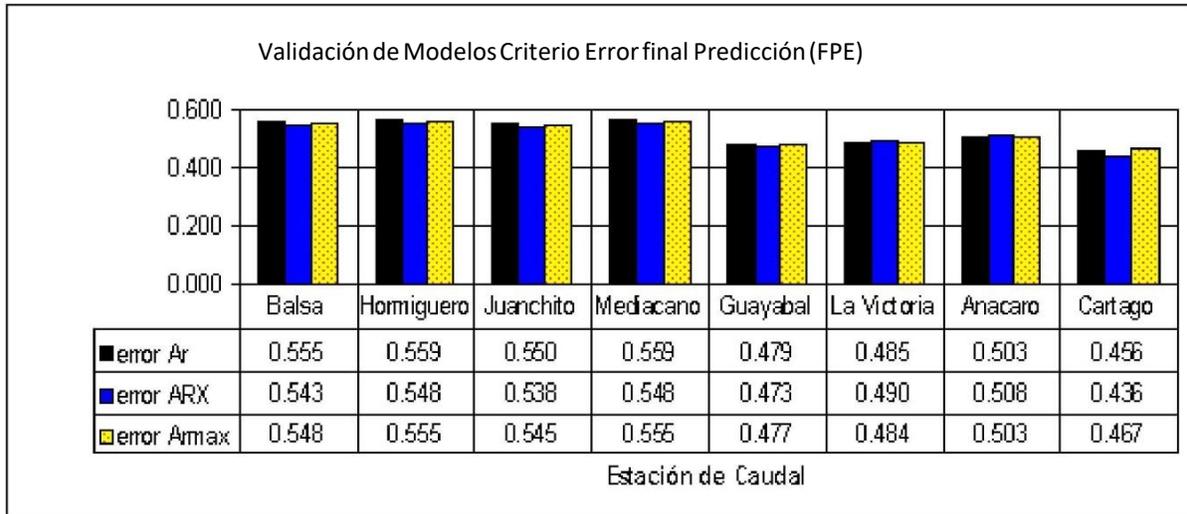
**Figura 3** Criterio Grafico de ajuste a los datos de validación



**Fuente:** Sierra, J. (2012). Tendencias de los caudales en la cuenca hidrográfica del río Cauca periodo 1981-2010. [Figura3]. Recuperado de Tesis de Pregrado, Universidad La Gran Colombia Facultad Ingeniería Civil.

<sup>7</sup> GARZÓN RINCÓN, Dayana Catalina; MASMELA BEDOYA, Fabian Camilo; RODRÍGUEZ CASTAÑEDA, Juan Manuel. Tendencias de los caudales de la cuenca hidrográfica Cauca (Tesis de pregrado). Bogotá: Universidad La Gran Colombia Facultad de Ingeniería Civil, 2013.

**Figura 4** Criterio Error Final de Predicción (FPE)

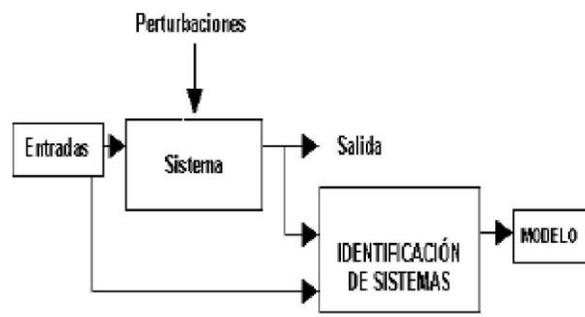


Para el ajuste de estos modelos se utilizaron como variables auxiliares los coeficientes canónicos (CC) y las componentes principales (CP) de las variables macro climáticas, para ello, se utilizó el módulo de identificación de sistemas matlab desarrollado por Ljung (1999b) dicha herramienta, permite construir modelos matemáticos precisos y simplificados de sistemas dinámicos basándose en los datos observados del sistema, y es especial para sistemas complejos de series de tiempo con ruido. La identificación de sistemas se define como el área de la teoría de sistemas. La identificación de sistemas puede definirse como el área de la teoría de sistemas que estudia las metodologías para la obtención de

modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de mediciones sobre el sistema (ver Figura 5).<sup>8</sup>

En la modelación es conveniente distinguir entre las señales de entrada (independientes) y las de salidas (dependientes) teniendo en cuenta que las salidas son parcialmente determinadas por las entradas.<sup>9</sup>

Para este caso, las variables hidrológicas corresponden a las salidas y las (CP) de las variables macro climáticas corresponden a las entradas (variables exógenas).



**Figura 5** Diagrama de entradas y salidas en la identificación de un sistema

---

<sup>8</sup> SIERRA CORTÉS, Joselin. Tendencias de los caudales en la cuenca hidrográfica del río Magdalena periodo 1981-2010. (Tesis de pregrado). Bogotá: Universidad La Gran Colombia Facultad de Ingeniería Civil 2012.

<sup>9</sup> CARVAJAL ESCOBAR, Yesid, MARCO SEGURA, Juan B. Modelos Multivariados de Predicción de Caudal Mensual utilizando Variables Macroclimáticas. Caso de estudio Río Cauca. Cali Valle: Editorial EIDENAR, 2005.

## 6. CONCLUSIONES

- La estimación de los recursos hídricos como instrumento de valoración de los recursos naturales del agua en el país con respecto a la influencia y relación a los impactos de la población o de la demanda, a medida que ha transcurrido el tiempo estos impactos han tomado un papel muy importante en el desarrollo de una óptima gestión de los recursos hídricos, ya que normalmente determina los criterios e índices a tener en cuenta para que se permitan diseñar las obras civiles, mecánicas y eléctricas que conformen la infraestructura necesaria para cumplir con el suministro y así suplir el abastecimiento de acuerdo a las necesidades previstas; teniendo en cuenta que la dinámica de las poblaciones cambian las condiciones constantemente exigiendo que la evaluación de los recursos ha tenido que incorporar factores que han aumentado su complejidad.
- Se debe tener en cuenta que a nivel mundial los ciclos climáticos cambian constantemente, por lo tanto es necesario implementar nuevos aparatos tecnológicos y utilización de herramientas para la toma de datos, entre estos equipos satelitales, entre otros.
- Según el estudio Nacional del Agua 2010 - ENA 2010, considera que el uso de información de precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudales es fundamental, así como la recolección de esta información que cada vez sea más precisa, confiable y actualizada. Que permita tomar decisiones acordes y

en tiempos cortos, para así garantizar que los diseños sean consecuentes con la realidad. Esto para el aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos.<sup>10</sup>

- Con respecto a la información encontrada se tiene que la tendencia a la disminución del recurso hídrico presente en las cuencas del país, principalmente la zona de estudio la cuenca del Cauca y siendo conscientes del papel que juega el calentamiento global, consideramos que se debe implementar planes y procesos de seguimiento y control a las estaciones de medición instaladas en la zona, esto con el fin de minimizar el margen de error en las mediciones realizadas, obteniendo así información confiable que provea los datos a analizar y con los cuales se deba trabajar.

---

<sup>10</sup> IDEAM. Estudio Nacional (2008, s.f.) del Agua, ENA, Bogotá, 2010.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- IDEAM. Estudio Nacional (2008, s.f.) del Agua, ENA, Bogotá, 2010.
- IDEAM. Lista de estaciones hidrométricas, Bogotá, 2008.
- HERRERA José Alejandro, CORTÉS Mauricio y TORRES Joselín. Proyectos de Grado de Ingenieros Civiles FIC, ULGC, Bogotá, 2012, dirigidos por los Ingenieros Alfonso Estrada Sánchez y Alberto Sánchez de la Calle.
- IGAC. Cartografía en escala 1:1 500 000, Bogotá.
- INTEGRAL LTDA. Hidroeléctrica Pescadero – Ituango, Medellín, 2007, p 1.1.
- SÁNCHEZ DE LA CALLE Alberto y ESTRADA SÁNCHEZ Alfonso. Hidrología en Colombia, capítulo Caudales, en proceso de edición para 2013, FIC, Universidad La Gran Colombia.
- SIERRA CORTÉS, Joselin. Tendencias de los caudales en la cuenca hidrográfica del río Magdalena periodo 1981-2010. (Tesis de pregrado). Bogotá: Universidad La Gran Colombia Facultad de Ingeniería Civil 2012.