

**ESTADO DEL ARTE SOBRE CONVALIDACIÓN DE LOS MODELOS
HIDROLÓGICOS DE MONTE CARLO Y THOMAS-FIERING PARA EXTENDER
SERIES DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES DEL RÍO MAGDALENA**

**LADY CAROLINA RUIZ CASTRO
ANDRÉS LEONARDO ROMERO URREGO**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA D. C
2016**

**ESTADO DEL ARTE SOBRE CONVALIDACIÓN DE LOS MODELOS
HIDROLÓGICOS DE MONTE CARLO Y THOMAS-FIERING PARA EXTENDER
SERIES DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES DEL RÍO MAGDALENA**

**LADY CAROLINA RUIZ CASTRO
ANDRÉS LEONARDO ROMERO URREGO**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
ingeniero civil**

**I.C,MSc ALBERTO SÁNCHEZ DE LA CALLE
Asesor Disciplinar**

**Lic. ROY W. MORALES PÉREZ
Asesor Metodológico**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA D. C
2016**

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

CONTENIDO

	Pag.
LISTA DE ILUSTRACIONES	6
LISTA DE ECUACIONES	6
LISTA DE TABLAS	6
INTRODUCCIÓN	7
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
2. OBJETIVOS	9
2.1 OBJETIVO GENERAL	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3. JUSTIFICACIÓN	10
4. METODOLOGÍA	11
5. DESARROLLO	13
5.1 MARCO CONCEPTUAL	13
5.1.1 Modelo de Monte Carlo	13
5.1.2 Modelo de Thomas y Fiering	13
5.2 MARCO GEOGRÁFICO	15
5.3 REVISIÓN DE LA LITERATURA	16
5.4 HIPÓTESIS DE TRABAJOS	22

5.5 CONTEXTUALIZACION GENERAL DE LOS TRABAJOS DE GRADO PRESENTADOS EN LA MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.	22
12 ANALISIS DE RESULTADOS	31
13. CONCLUSIONES	32
14. REFERENCIAS	34

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Mapa Ubicación Río Magdalena.....	16
---	----

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 De Thomas y Fiering	14
--------------------------------------	----

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Relación de las tesis encontradas en el catálogo de la UGC.....	21
Tabla 2 Estaciones de donde se tomó la información hidrológica- Periodo 1972-2001	24
Tabla 3 Estaciones de donde se tomó la información hidrológica- Periodo 1972-2001	26
Tabla 4 Estaciones de donde se tomó la información hidrológica- Periodo 1972-2001	28

INTRODUCCIÓN

Este documento desarrolla el estado del arte de las investigaciones sobre convalidación de modelos hidrológicos para emplear en la hidrología colombiana, de manera que se describirá de manera breve la información correspondiente a los modelos de convalidación que adopta y utiliza el territorio colombiano para la extensión de las series de caudales medios mensuales y anuales, principalmente el modelo de Monte Carlo y Thomas-Fiering.

En tal sentido, se analizará la información correspondiente a las investigaciones realizadas por parte de la Universidad la Gran Colombia respecto al tema y en específico a la información que abarque el río Magdalena, adjuntando información externa sobre el tema de convalidación de modelos hidrológicos, con el propósito de conocer los resultados de cada una de las investigaciones recopiladas, sus avances y cronología, para luego desarrollar una crítica argumentativa que permita expresar el progreso, acierto, beneficio y resultado de las investigaciones en la convalidación de modelos hidrológicos para sistemas hidrológicos colombianos.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Siendo Colombia uno de los cuatro países más ricos en recursos hídricos, se encuentra en la obligación de conocer, medir, cuidar y utilizar este recurso, porque el agua es fuente de vida para todos los seres vivos que habitan en un territorio. De esta forma la ingeniería civil construye las estructuras hidráulicas para el aprovechamiento y manejo del agua con el propósito de explotar esa riqueza natural en beneficio general de las comunidades.

Por tal razón, la proyección y construcción de las obras hidráulicas necesita de un registro significativo del comportamiento del agua en una fuente hídrica, como es el caso del río Magdalena, sin embargo, el país no cuenta con los registros suficientes en la mayoría de los casos, por lo que se acuden a los modelos matemáticos que generan series sintéticas con base a un conjunto de valores reales aledaños o del mismo lugar en que se pretende obtener una serie de caudales.

No obstante, entre algunos de los modelos utilizados en Colombia para la generación de series de caudales medios mensuales o anuales está el de Thomas y Fiering y Monte Carlo, los cuales fueron desarrollados en América del Norte de acuerdo con unas condiciones climatológicas y geográficas específicas. Por lo tanto, su metodología fue adoptada y convalidada de igual forma para el territorio europeo, por lo que en Colombia se pretendió y se está utilizando este mismo método, sin haberle realizado una convalidación rigurosa, en relación a las diferentes y bastante particulares condiciones climáticas y geográficas con las que cuenta el territorio colombiano.

De esta manera el documento presentará algunos de los avances, las investigaciones, las limitaciones, las conclusiones y el actual progreso de los trabajos hechos en Colombia, en busca de convalidar los modelos hidrológicos que se utilizan en el país, además de las reflexiones que pueden concluirse en relación a la indagación de información pertinente al tema.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el estado del arte sobre convalidación de los modelos hidrológicos de Monte-Carlo y Thomas-Fiering para series de caudales medios mensuales del río Magdalena

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información acerca de investigaciones de la convalidación de los modelos hidrológicos, realizadas por de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad La Gran Colombia.
- Evaluar el avance en las investigaciones halladas y posteriormente exponer un panorama general de la problemática.

3. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años las tendencias en los caudales de los ríos colombianos han presentado una variabilidad por acciones naturales y antrópicas. Se puede observar como el país ha pasado por épocas de verano intenso que han provocado la disminución notoria de este recurso, y es evidente que debido al aumento de la población colombiana es perentorio la necesidad de aprovechar el recurso hídrico. A partir de esto surge la necesidad de conservar este recurso teniendo en cuenta la incidencia económica del país en aspectos como hidroeléctrico, agrícola, suministro de agua potable, industrial y minero.

De manera que mientras se cuenten con datos históricos suficientes y confiables de los aspectos relevantes a los estudios hidráulicos, la ingeniería civil podrá aportar en la solución a los problemas o necesidades que puede afrontar cualquier población en relación con la cuenca hidrográfica en la que se encuentre, para posteriormente modelar los datos recopilados y por medio del modelo hidrológico establecido desarrollar, interpretar y representar las condiciones reales que pueden ocurrir a futuro. En Colombia se implementan con frecuencia los modelos de Monte-Carlo y Thomas-Fiering que son investigaciones y metodologías utilizadas en otros países y adaptadas para su aplicación en el país, pero que aún no han sido convalidados de forma rigurosa.

En este documento se sintetizan los resultados obtenidos por los investigadores de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad La Gran Colombia en la convalidación de modelos matemáticos aplicados al río Magdalena y se pretende brindar un panorama general de la problemática para futuras investigaciones.

4. METODOLOGÍA

Con el fin de desarrollar un buen proceso para llegar a sistematizar la información sobre el estado del arte de la convalidación de los modelos hidrológicos de Monte-Carlo y Thomas-Fiering para series de caudales medios mensuales del río Magdalena se implementó la siguiente metodología:

Metodología de tipo investigación documental Fernando Reza argumenta que la investigación documental, se refiere al hecho de que el investigador adquiere la información que necesita por medio de documentos principalmente. Estos documentos ya existen y son: los libros, periódicos, revistas, estadísticas, tesis, investigaciones publicadas, etcétera. Es decir, el investigador no va a generar la información sino que la toma de varios lugares. Su labor consiste en ordenar y analizar esa información ya registrada, ya documentada.¹

Etapas de la investigación

Se procedió a la búsqueda de los trabajos tipo tesis y libros, con los que la Universidad La Gran Colombia, cuenta en los temas relacionados con la Convalidación de los modelos de Tomas y Fiering y Monte Carlo, por lo que fue de vital ayuda el servicio de catálogo que presta la biblioteca de la Universidad La Gran Colombia, ya que se pudo conocer los trabajos que se encontraban en la Biblioteca central y en la biblioteca de la sede de Ingeniería Civil.

Una vez conocido el material sobre el tema de los Modelos de Thomas y Fiering y Monte-Carlo, se redujo toda la información a cuatro tesis y algunos documentos de fuente primaria.

Con el material específico de trabajo, empezó la contextualización del tema, de tal forma que se reconocieron las metodologías, las áreas de estudio, la problemática, el modelo de aplicación y el contenido en general de cada una de los documentos escogidos.

Hecha la indagación y contextualización a cada una de las tesis y documentos que sustentaban los métodos de generación sintética de caudales medios mensuales, el paso siguiente fue hallar la correlación entra cada una de los trabajos, para luego poder concluir, opinar y organizar cada aporte, recomendación y restricción de las tesis estudiadas.

¹ REZA BECERRIL, Fernando. Ciencia, metodología e investigación. México: Longman de México Editores S.A., 1997. p. 237.

Criterios de inclusión y exclusión

Se incluyó todo material que pudiera acercar el entendimiento de los modelos de Thomas y Fiering y Monte-Carlo, con una obvia razón de conocer el trabajo hecho por cada uno de los autores de las respectivas tesis estudiadas, por otra parte los documentos que trabajaron el río Magdalena sin importar que no estudiaran únicamente este río se incluyeron como fue el caso de dos de las cuatro tesis escogidas, donde en río Magdalena no fue el único río de estudio, el río Suaza y el río Cauca.

La exclusión se encargó de no abordar ninguna convalidación que no abarcara específicamente el modelo Thomas y Fiering y Monte-Carlo o los, siempre y cuando el estudio abarcara el río Magdalena.

Criterios de inclusión y exclusión documental:

- Tipo documentales: tesis
- Idioma: español
- Localización: Colombia
- Periodo: Desde el 2008 hasta el presente año
- Descriptores: Modelo Thomas y Fiering, Modelo Monte-Carlo, Caudales Mensuales, Caudales Anuales, Convalidación, Magdalena, Colombia.

5. DESARROLLO

5.1 MARCO CONCEPTUAL

5.1.1 Modelo de Monte Carlo

El análisis de incertidumbre de HEC - HMS se basa en el método de Monte Carlo. Que es una técnica estocástica basada en el uso de números al azar y las estadísticas de probabilidad para investigar los problemas matemáticos. Se utiliza para combinar la función de probabilidad de cada contribuyente obteniendo la incertidumbre por la generación de números aleatorios con la distribución de probabilidad correspondiente, simulando los valores de cada variable aleatoria del modelo. Al igual que en el método clásico, el analista debe encontrar cada parámetro de incertidumbre del modelo matemático del ensayo. Finalmente, utilizando un software adecuado, un gran número de muestras (100 000 o más) se realizan con el modelo simulado, para obtener resultados con una distribución particular y desconocida².

El modelo de Monte-Carlo puede ser aplicado si los valores en las series de datos son independientes, como lluvias anuales, en algunos casos, caudales anuales. La independencia entre eventos hidrológicos consecutivos puede ser incluida por medio del coeficiente de correlación serial.

5.1.2 Modelo de Thomas y Fiering

Un modelo para la generación de series temporales estocásticas fue desarrollado por Thomas y Fiering³. Este modelo además de la media y la varianza, usa el coeficiente de correlación, pues se considera que los registros históricos de procesos hidrológicos presentan un fenómeno de persistencia observable⁴

El modelo de Thomas Fiering. Cuya validez y confiabilidad para el caso de los ríos colombianos se ha estudiado, alude, implícitamente, a la estacionalidad observada en las descargas mensuales de un río. La semilla para la construcción de las mencionadas ecuaciones lineales de regresión, según los

² García, J. R. (2012). Cálculo de la incertidumbre estándar mediante. México: Revista Electrónica Nova Scientia.

³ Thomas, H., y Fiering, M. (1962). Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulation. *Design of water resource systems*, 459–493

⁴ Cadavid, J., y Salazar, J. (2008). Generación de series sintéticas de caudales usando un modelo mátalas con medias condicionadas. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 17–24.

autores del método, no deben ser inferior a diez años para que los parámetros que se calculen a partir de ella sean representativos.

La ecuación general del modelo de Thomas y Fiering se puede expresar de la siguiente manera⁵

$$Q_{j+1} = \bar{Q}_{j+1} + b_j(Q_j - \bar{Q}_j) + t_j * s_{j+1} \sqrt{(1 - r_j^2)}$$

Ecuación 1

\bar{Q}_j es el caudal en el mes j

Q_j es el caudal promedio en el mes j

b_j es la pendiente de la recta de regresión entre el mes j y j+1

s_{j+1} es la varianza de la distribución de los caudales en el mes j

r_j es el coeficiente de correlación entre el mes j y j+1

t_j es un número aleatorio que viene de una distribución normal de media nula y de varianza igual a uno.

La versión aritmética del modelo descrito solo se acepta la variable en su forma original es decir expresada en las unidades que le son propias. En el caso de los caudales medios se expresan en m^3/s o en l/s , si se trata de corrientes menores. La versión logarítmica es aquella en la cual la variable se sustituye por logaritmo. Así, todos los cálculos se hacen con los logaritmos de los datos. se halla calculando Finalmente, los caudales se hallan calculando los antilogaritmos correspondientes.

La formulación de este modelo abrió un campo enorme de posibilidades en la generación sintética de caudales. Sin embargo, la generación individual de cada estación sin nexos con otras estaciones impide que se preserve la estructura de correlación espacial, lo que implica que no se pueda producir la tendencia a la que están sometidos los eventos extremos, tales las sequías, y no se puede garantizar que dichos eventos tengan una naturaleza regional, es decir, que estos ocurran de forma simultánea en la mayoría de estaciones cercanas. Igualmente, este tipo de modelación

⁵ FAO irrigation and drainage papers. Mathematical models in hydrology. The united Nations. Roma. 1973

podría crear sesgos de importancia en los eventos externos a mayores lapsos de tiempo, donde se preservan las características de alta frecuencia del sistema hidrológico pero no de las de baja frecuencia⁶

5.2 MARCO GEOGRÁFICO

El río Magdalena nace en el extremo suroccidental del país (Ilustración 1), a 3.685 metros de elevación, en la laguna de la Magdalena, localizada a los 01° 55' 40" de latitud norte y 76° 35' 08" de longitud oeste, ubicada en una pequeña planicie del Páramo de las Papas, correspondiente al Macizo colombiano, en el Departamento del Huila. Su longitud, según la fuente, varía de 1.528 a 1.600 km, de los cuales 886 son navegables. En el Estrecho, el lugar donde el río es más angosto, mide 2.20 metros de ancho y en el municipio de Plato, Magdalena, tiene una anchura de 1.073 metros. Vierte sus aguas en el mar Caribe, en el sitio conocido como Bocas de Ceniza, a los 11° 06' de latitud norte y 74° 51' de longitud oeste. El canal del Dique también le sirve como tributario de sus aguas, que llegan al mar en la bahía de Cartagena. En su trascurso recibe más de 500 ríos y numerosas quebradas. Su caudal promedio registra entre pocos metros cúbicos por segundo al comienzo, hasta 6.700 en su desembocadura.

Después de su nacimiento, el río Magdalena fluye de sur a norte por un valle interandino ubicado entre las cordilleras Central y Oriental de los Andes. El nivel de las aguas del Magdalena y del Cauca, su principal afluente –y en general de todos los ríos– presenta variaciones a causa de las fuertes precipitaciones locales y en áreas de sus afluentes, más evidentes en sus sectores alto y medio. En la parte baja se reduce el volumen de lluvia y, como corresponde a una zona cenagosa con poder de regulación y amortización, la variación de niveles y caudales es menor.

En una gráfica del caudal medio contra el área de la cuenca, se aprecia el ascenso continuo desde pocos litros en su desembocadura hasta 7.100 m³/s a la altura de Calamar, en donde se desprende el canal del Dique y aún más en su desembocadura.⁷

⁶ Sánchez, A., Estrada, A. (2010) Cuadernos de ingeniería No. 1. *Modelos matemáticos aplicados a la cuenca Magdalena-Cauca* 47-48

⁷ IDEAM-Cormagdalena. Estudio Ambiental de la Cuenca Magdalena-Cauca y elementos para su ordenamiento territorial, Bogotá, D. C., Gráficas, 2001.



Ilustración 1 Mapa Ubicación Río Magdalena

5.3 REVISIÓN DE LA LITERATURA

La búsqueda de literatura se realizó en los trabajos realizados por investigadores de la Universidad La Gran Colombia. La recopilación de información documental tuvo en cuenta los proyectos de investigación presentados como opción de grado y publicaciones de la Universidad.

En síntesis, la revisión de la literatura compilo tres tesis sobre el tema de modelos hidrológicos en el río Magdalena con serie de datos para caudales medios mensuales de más de 30 años de registro, siendo la fuente para estos el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Por otro lado, se debe mencionar como fuente importante la recopilación de información que proporciono al Ingeniero Alberto Sánchez De La Calle investigador quien realizó un trabajo en convalidación del modelo matemático de Thomas y Fiering en la cuenca Magdalena Cauca junto al Ingeniero Alfonso Estrada.

5.3.1. Investigaciones de convalidación de modelos hidrológicos realizados para la Universidad La Gran Colombia

- I. Convalidación del modelo matemático de Thomas y Fiering para las estaciones de aforos colorados y puerto libre pertenecientes a la corriente del río Negro en el Departamento de Cundinamarca Colombia**
Por Benavides Rueda, Camilo Andrés; Estrada Sánchez, Alfonso. -- Universidad La Gran Colombia Facultad ingeniería Civil
Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia
2008
- II. Convalidación del modelo matemático de Thomas y Fiering, para extender las series de caudales medios mensuales del río Atrato, por medio de datos de las estaciones de aforos de Bellavista, Belén y San Antonio de Padua**
Por Mosquera Mosquera, Carlos Humberto; Estrada Sánchez Alfonso. -- Universidad La Gran Colombia Facultad Ingeniería Civil

Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia

2009
- III. Convalidación del modelo de Thomas y Fiering para extender las series de caudales medios mensuales de los Ríos Magdalena y Cauca**
Por Sánchez de la Calle, Alberto; Estrada Sánchez, Alfonso. -- Facultad de Postgrados y Formación Continuada

Tesis (Especialista en Pedagogía y Docencia Universitaria) -- Universidad La Gran Colombia

2008
- IV. Convalidación del modelo matemático de Thomas y Fiering en las estaciones de aforos: Guaduro, Tobia y Charco Largo; en la corriente del río Negro en el departamento de Cundinamarca**
Por Cárdenas Álvarez, Marlón Arley; Estrada Sánchez, Alfonso. -- Universidad La Gran Colombia Facultad Ingeniería Civil

Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia

2008

- V. **Convalidación del modelo matemático de Thomas y Fiering para las estaciones de aforos el salado y noanamá del río San Juan en Colombia**
Por González Peña, Carlos Edison; Estrada Sánchez, Alfonso. -- Universidad La Gran Colombia Facultad Ingeniería Civil
Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia
2008
- VI. **Convalidación del modelo matemático de Thomas y Fiering, para los caudales medios mensuales del río Atrato, en Colombia por medio de datos de las estaciones de aforos de Puente las Sánchez y el Siete**
Por Rengifo Ovalle, Mónica Andrea; Estrada Sánchez, Alfonso. -- Universidad La Gran Colombia Facultad Ingeniería Civil
Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia
2008
- VII. **Convalidación del modelo Montecarlo para la generación de caudales medios anuales mensuales para el río ranchería en el departamento de la Guajira**
Por Olaya Rubio José David; Alfonso Estrada Sánchez. -- Universidad La Gran Colombia Facultad Ingeniería Civil
Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia.
2011
- VIII. **Convalidación del modelo Monte-Carlo para la generación sintética de caudales medios anuales y mensuales; parte alta de la cuenca del Río Magdalena**
Por Ayala Duarte, Weimar; Estrada Sánchez, Alfonso; Novoa, Martha Alix. - Universidad La Gran Colombia Facultad Ingeniería Civil
Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia.
2011
- IX. **Convalidación del modelo de Monte-Carlo para extender series de caudales mensuales y anuales de los ríos Magdalena y Suaza**
Por Acosta Pimentel, Juan Carlos; Estrada Sánchez, Alfonso. -- Universidad La Gran Colombia Facultad ingeniería Civil
Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia.
2011

- X. **Convalidación del modelo de Monte–Carlo para extender series de caudales anuales de los Ríos Sinú y Atrato**
Por Herreño Español, Mayerly; Estrada, Alfonso; Novoa, Martha Alix. --
Universidad La Gran Colombia Facultad ingeniería Civil

Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia.

2010
- XI. **Convalidación de los modelos matemáticos de Thomas–Fiering y Montecarlo para la generación de caudales medios en el río Guejar, departamento del Meta**
Por Salcedo Valencia, Leydy Aurora; Estrada Sánchez, Alfonso. --
Universidad La Gran Colombia Facultad Ingeniería Civil

Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia.

2011
- XII. **Convalidación del modelo de Montecarlo para generación de caudales medios anuales y mensuales en el río Cauca**
Por Bonilla Castro, Silvio Alejandro; Sánchez, Alfonso Estrada. --
Universidad La Gran Colombia Facultad Ingeniería Civil

Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia.

2011
- XIII. **Convalidación de los modelos de Monte Carlo y Thomas Fiering para la determinación de caudales medios anuales y mensuales para el Río Meta**
Por Guzmán Melo, Eliana Liseth; Sánchez, Alfonso Estrada; Novoa Galeano, Martha Alix. -- Universidad La Gran Colombia Facultad Ingeniería Civil

Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia.

2010

- XIV. **Convalidación de los modelos de monte Carló y Thomas Fiering para la determinación de caudales medios anuales y mensuales para el río meta, estaciones puerto Texas, Aguaverde y Aceitico**
Por Reina López, Jeiny Julieth; Estrada Sánchez, Alfonso. -- Universidad La Gran Colombia Facultad Ingeniería Civil
Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia.
2011
- XV. **Convalidación y análisis del modelo Montecarlo en el Río Sumapaz**
Por Castillo Acosta, Wilson Andrés; Estrada, Alfonso; Ortiz, Alba Cristina. -- Universidad La Gran Colombia Facultad Ingeniería Civil
Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia.
2011
- XVI. **Estudio de convalidación del modelo Montecarlo para generar caudales medios mensuales y anuales en la cuenca media del Río Magdalena**
Por Ortiz Forero, Wilington Jovanny; Estrada Sánchez, Alfonso; Ortiz, Alba Cristina. -- Universidad La Gran Colombia Facultad Ingeniería Civil
Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia.
2010
- XVII. **Convalidación de los modelos matemáticos de Montecarlo y Thomas-Fiering para la determinación de caudales medios, anuales y mensuales para el Río Upia del departamento del Casanare**
Por Bravo Jiménez, Suly Marcela; Sánchez de la Calle, Alberto. -- Universidad La Gran Colombia Facultad de Ingeniería Civil
Tesis (Ingeniero Civil) -- Universidad La Gran Colombia.
2012
- XVIII. **Convalidación de los modelos Monte - Carlo y Thomas - Fiering para le determinación de caudales medios anuales y mensuales para los ríos Aracataca y Fundación**

Por Mejía Peña, Andrea Yinet; Estrada Sánchez, Alfonso. -- Universidad La Gran Colombia Facultad de Ingeniería Civil

Tesis (Ingeniería Civil) -- Universidad La Gran Colombia.

2011

Es de notar que las investigaciones referentes a la convalidación de modelos matemáticos para la generación sintética de registros hidrológicos, dentro de la Universidad La Gran Colombia vino a presentar importancia desde el año 2008 con un límite de estudio hasta el año 2012 según el siguiente conteo en relación a la extracción de información anterior, fuente del catálogo de la biblioteca de la Universidad la Gran Colombia:

Tabla 1 Relación de las tesis encontradas en el catálogo de la UGC

CANTIDAD	AÑO
Cinco [5]	2008
Una [1]	2009
Tres [3]	2010
Ocho [8]	2011
Una [1]	2012

Anotaciones importantes:

- Siete de todas las tesis no integraban el modelo de Thomas y Fiering
- Once de las dieciocho tesis abarcaron el tema de Monte Carlo
- Cinco de las dieciocho tesis combinaron los modelos para el estudio de su respectivo tema.

De esta manera una vez se encontrada toda la información correspondiente al tema, de convalidación de los modelos Monte-Carlo y Thomas y Fiering, producidos dentro de la Universidad La Gran Colombia, se apartaron los trabajos que analizaron el río Magdalena, resumiendo la información a un total de cuatro trabajos tipo tesis, expuestas anteriormente y que correspondientes a los números III, VII, IX y XV.

5.4 HIPÓTESIS DE TRABAJOS

5.4.1 Hipótesis General

Los modelos hidrológicos de Thomas y Fiering y Monte-Carlo son idóneos para generar caudales medios mensuales del río Magdalena, para niveles de confianza de un 95%

5.4.2 Hipótesis de trabajo No. 1

El modelo matemático de Thomas y Fiering genera series confiables de caudales medios mensuales a en los ríos Magdalena y Cauca, teniendo en cuenta niveles de confianza de 90% y del 95%

5.4.3 Hipótesis de trabajo No. 2

El modelo Monte-Carlo obtiene series sintéticas confiables de caudales medios mensuales y anuales en la parte alta de la cuenca del río Magdalena, con un nivel de confianza del 95%

5.4.4 Hipótesis de trabajo No. 3

El modelo Montecarlo es confiable para generar caudales medios mensuales en el río Magdalena tomando las estaciones hidrométricas de: Puerto salgar, Puerto Berrio, Banco, Calamar, afluente del río Saldaña, afluente río Amoyá.

5.4.5 Hipótesis de trabajo No. 4

El modelo Montecarlo genera series de caudales mensuales y anuales en los ríos Magdalena y Suaza con un nivel de confianza del 90%.

5.5 CONTEXTUALIZACION GENERAL DE LOS TRABAJOS DE GRADO PRESENTADOS EN LA MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.

Las investigaciones realizadas por los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad La Gran Colombia, dirigidas por los especialistas en el área de Hidrotecnia de la Universidad en un tema

relevante como lo es la convalidación de modelos hidrológicos que se muestran a continuación:

5.5.1 Nombre de la investigación: Estudio de convalidación del modelo Monte-Carlo para generar caudales medios mensuales y anuales en la cuenca media del río Magdalena.

Autor: Wilington Jovanny Ortiz Forero

Año: 2011

Conclusiones:

Las series históricas anuales de las estaciones analizadas, ilustran que los ríos Magdalena, Saldaña y Amoya, no presentan ningún tipo de intervención o fenómeno diferente a su comportamiento natural.

Como resultado de la modelación se generaron las series sin técticas anuales para las estaciones de los ríos Magdalena, Saldaña, Amoya, ilustrando que las gráficas del modelo se ajustan tanto cuando se aplican mensualmente como cuando se generan anualmente con una confiabilidad del 95%.

En las estaciones del modelo logarítmico generado mensual y anual, se ajusta mejor que el modelo generado aritméticamente, también en las curvas de frecuencia acumulada y en las curvas de duración de caudales.

En los diagramas de barras mensuales según el comportamiento del modelo aplicado en las estaciones, se muestra que el modelo logarítmico se ajusta muy bien a los caudales históricos por el IDEAM, también ilustra que existe una diferencia muy pequeña entre las alturas de los caudales registrados y los caudales generados.

El modelo de Monte-Carlo obtuvo mejores resultados comparándolo con el modelo Tomas y Fiering en los porcentajes y calificación de las estaciones del río Magdalena como lo son: Puerto salgar, Puerto Berrio, Banco, Calamar, afluente del río Saldaña (Piedras de Cobre9, afluente río Amoyá (Queso el Hda.)

Recomendaciones:

La entidad encargada de la recolección de las series históricas, tenga en una continuidad permanente en este registro, pues aún se evidencia y esto se ve reflejado en la búsqueda de las estaciones óptimas que

cumplan con los requisitos necesarios para llevar a cabo una investigación y más alternativas de búsqueda de información.

Se recomienda el modelo de Monte-Carlo para emplearse anualmente y mensualmente, ya que al modelarse arroja buenos ajustes estadísticos y gráficos.

La ejecución y el desarrollo del proyecto deben ampliarse en el tiempo, ya que se evidencio falta del mismo para un mejor análisis y desarrollo de imprevistos.

Cada proceso de investigación debe afianzarse con bases para así tener una buena ejecución y desarrollo del proyecto final.

Tabla 2 Estaciones de donde se tomó la información hidrológica- Periodo 1972-2001

Estaciones Analizadas	
Piedras de cobre	[Tolima]
Queso el HDA	[Tolima]
Arranca plumas	[Honda-Tolima]
Puerto Salgar	[Cundinamarca]
Puerto Berrio	[Antioquia]
El Banco	[Magdalena]
Calamar	[Bolívar]

5.5.2 **Nombre de la investigación:** Convalidación del modelo Monte-Carlo para la generación sintética de caudales medios anuales y mensuales; parte alta de la cuenca del rio magdalena

Autor: Weimar Alaya Duarte

Año: 2011

Conclusiones:

Las seis estaciones seleccionadas para la presente investigación, ubicadas en la parte alta de la cuenca del río Magdalena presentaron las siguientes características hidrológicas: los regímenes típicamente un-modales su dieron las estaciones de Salado Blanco y Pericongo, en la estación de Puente Santander se comienza a marcar la transición de un-modal a bimodal pero es preciso indicar que esta estación de aforo recibe caudales intervenidos por el embalse de Betania. Por último las estaciones de Angostura, Purificación y Arrancaplumas presentan regímenes bimodales.

En el anexo B del presente trabajo de investigación se puede constatar los valores anómalos de la serie original que presentaron algunas estaciones, tales como Salado Blanco y Purificación que sugieren más atención por parte de la entidad encargada de la toma de los registros para certificar la veracidad de los mismos.

La caracterización estadística de desviación estándar y promedio aplicada en semilla de registros históricos, fue lo bastante adecuada en la introducción del modelo para generar caudales medios mensuales y anuales. Pero específicamente para caudales medios evaluados mes a mes no indico representatividad en los meses de febrero, abril, septiembre, octubre y noviembre en algunas de las seis estaciones estudiadas.

En el anexo B, se consolida la obtención del objetivo específico que busca generar las series sintéticas de caudales medios mensuales y anuales para las estaciones de aforo seleccionadas, por medio del modelo de Monte-Carlo en las versiones aritmética y logarítmica.

Las curvas de duración de caudales en todas las estaciones estudiadas presentan gran similitud entre históricas y generadas por el modelo Monte-Carlo en sus dos versiones se consideran instrumentos adecuados para los análisis sobre la necesidad de estudios de obras hidráulicas, así como para el posible potencial hídrico del río.

En el presente trabajo se desarrolló un modelo hidrológico que permite aplicar a Monte-Carlo a una serie de datos de entrada (semilla) con una salida que son valores de caudales sintéticos y se evaluó satisfactoriamente la bondad de ajuste de esta metodología en las estaciones de la parte alta de la cuenca del río Magdalena. De esta manera, puede concluirse que los objetivos definidos al inicio de la investigación se cumplieron a cabalidad.

El modelo de Monte-Carlo con una confiabilidad del 95%, genera caudales medios mensuales para una distribución específica de los caudales medios mensuales históricos, en cuanto a las dos versiones del modelo aritmética y logarítmica; la primera genera mejores resultados para estaciones con regímenes típicamente un-modales, la segunda versión del modelo lo hacen los regímenes unimodales. Para los caudales medios anuales sintéticos no sigue la premisa mencionada anteriormente, ha ello es importante resaltar que el tamaño de la muestra contrasta es de 20 valores anuales.

Recomendaciones:

En general, los resultados obtenidos señalan la conveniencia de investigaciones más profundas y detalladas, especialmente para la generación de caudales medios analizando mes por mes para tipificar los regímenes (caudales mínimos – máximos) de las estaciones, que determinan un trabajo más exacto de registros de cada mes del año.

También es importante el grado de compromiso en la toma adecuada y precisa de los registros de caudales medio diario; por parte de la entidad encargada que en este caso es el IDEAM; dado que en la investigación se encontraron bastantes datos anómalos que van en detrimento de la calidad de los resultados y posterior análisis.

La premisa anterior sugiere la implementación de tecnología de punta en las estaciones de aforo; tales como lectores automatizados que facilitan la actividad de toma de los registros del nivel del río Magdalena. De tal forma se disminuyen los costos operativos y se favorecen la autenticidad de los caudales del río.

Tabla 3 Estaciones de donde se tomó la información hidrológica- Periodo 1972-2001

Estaciones Analizadas	
Salado Blanco	[Huila]
Pericongo	[Huila]
Puente Santander	[Huila]
Angostura	[Tolima]
Purificación	[Tolima]
Arranca plumas	[Honda-Tolima]

5.5.3 Nombre de la investigación: Convalidación del modelo de Thomas y Fiering para extender las series de caudales medios mensuales de los Ríos Magdalena y Cauca.

Planteamiento del problema:

¿Es idóneo el modelo Thomas-Fiering para generar, dentro de intervalos de confianza de 90% y 95%, los caudales medios mensuales de los ríos Magdalena y Cauca?

Se propone investigar el grado de confiabilidad y precisión con que el modelo propuesto por Thomas y Fiering genera valores de caudales medios mensuales de los ríos Magdalena y Cauca. Este modelo se utiliza con frecuencia en todo el país a pesar de no haber sido convalidado aún, en forma rigurosa, para ninguna región colombiana con el propósito de extender series hidrológicas cortas o relativamente cortas, y así disponer de información ampliada en el momento de diseñar sistemas de conservación, manejo y aprovechamiento del agua.

Autor: Por Sánchez de la Calle, Alberto; Estrada Sánchez, Alfonso.

Año: 2008

Conclusiones:

El modelo de Thomas y Fiering, produce resultados aceptables para la generación de caudales medios mensuales en la mayoría de las estaciones del río Magdalena y Cauca que fueron analizadas

La versión logarítmica del modelo arroja mejores resultados en todos los casos, que la versión aritmética

Las estaciones situadas en las partes bajas de los ríos no representan resultados plenamente satisfactorios, a causa de las características morfológicas e hidrológicas de la zona. La presencia de ciénagas y extensas áreas de inundación son posiblemente, las causas que afecten este ajuste.

Las curvas de duración de caudales en la mayoría de las estaciones estudiadas presenta gran similitud entre las históricas y generadas por el método de Thomas y Fiering en su versión logarítmica, se consideran instrumentos adecuados para los análisis sobre las necesidades de embalses ante una determinada demanda, así como para el estudio del potencial hídrico de un río.

En general los resultados obtenidos señalan la conveniencia de investigaciones más profundas y detalladas especialmente en aquellas estaciones donde el caudal presenta comportamientos atípicos, como son el caso de El Barco Cauca, donde también hay fenómenos de inundaciones frecuentes.

Recomendaciones:

Investigaciones más profundas y detalladas especialmente en aquellas estaciones donde el caudal presenta comportamientos atípicos, como son el caso de El Barco Cauca, donde también hay fenómenos de inundaciones frecuentes.

Tabla 4 Estaciones de donde se tomó la información hidrológica- Periodo 1972-2001

Estaciones Analizadas	
Angostura	[Tolima]
Purificación	[Tolima]
Arranca plumas	[Honda-Tolima]
Puerto Salgar	[Cundinamarca]
Puerto Berrio	[Antioquia]
El Banco	[Magdalena]
Calamar	[Bolívar]

5.5.4 **Nombre de la investigación:** Convalidación del modelo Montecarlo para extender las series de caudales medios mensuales de los Ríos Magdalena y Suaza

Autor: Juan Carlos Acosta Pimentel

Año: 2011

Planteamiento del problema:

La importancia de los ríos Magdalena y Suaza consiste en que mantienen un crecimiento hidroeléctrico y agropecuario continuo que son factores de desarrollo para amplias zonas de los departamentos del Huila y Tolima.

El modelo de Montecarlo se utiliza para generar caudales medios mensuales y anuales en algunos ríos del país sin ser convalidados en forma rigurosa. Se pretende a través de la aplicación de este modelo generar una serie de caudales y de esta manera compararlos con los caudales registrados por la entidad a cargo, que es el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia). La comparación de las series generadas con las series registradas será la base para juzgar la idoneidad del modelo.

Conclusiones:

Se realizó la compilación de las series históricas de caudales para análisis con respecto a las estaciones seleccionadas en los ríos

Magdalena y Suaza, para luego crear los archivos magnéticos en formato Excel y de esta manera se corrió el modelo.

El comportamiento del río Suaza es típicamente unimodal, esto nos indica que solo presenta un punto alto en los registros de los caudales; por lo contrario en río Magdalena se muestra bimodal, esto se debe a que los caudales registrados son muy variados.

Cuando se aplicó el modelo de Montecarlo a los ríos Magdalena y Suaza tomando de las series mensualmente, los ajustes gráficos producto de la modelación ilustran una buena tendencia entre caudales y a nivel estadístico los porcentajes de error son muy pequeños para el río Suaza, pero en el río Magdalena me muestran unos errores de ajuste gráfico muy altos, indicando así que el ajuste gráfico aplica para el río Suaza mas no para el río Magdalena.

Como resultado de la modelación se generaron las series sintéticas anuales y mensuales para estaciones de ríos Magdalena y Suaza, ilustrando así que las gráficas del modelo se ajustan en un 95% cuando se tendencia entre los caudales registrados y los generados , aunque estadísticamente los porcentajes de error sean permitidos, indican que el modelo obtiene n mejor ajuste estadístico que gráfico, y la versión que mejor se ajusta para los dos ríos es la logarítmica, pues los caudales generados presentan tendencias superiores a los generados y eso es lo que se requiere para este modelo.

En general el nivel de confiabilidad para la modelación de os ríos Magdalena y Suaza son buenas en el ajuste anual y mensualmente son aceptables; de acuerdo a los resultados obtenidos, el nivel de confianza es del 95% para el río Magdalena y 97% para el río Suaza.

Recomendaciones:

Es necesario que la entidad encargada de la recolección de series históricas tenga una continuidad en el registro, pues aún se observa deficiencias y esto se ve reflejado en la búsqueda de las estaciones que cumplan con los requisitos necesarios para llevar a cabo una investigación de este tipo.

Se recomienda utilizar el modelo de Montecarlo sobre los ríos donde su comportamiento natural no haya sido afectado por obras de infraestructura, como presas y embalses, que puedan afectar el régimen natural.

Se recomienda el modelo de Montecarlo para emplearse mensualmente, luego arroja datos no favorables para los ajustes estadísticos y gráficos, se podría recomendar anualmente teniendo en cuenta que solo revela buenos indicadores estadísticos y gráficos; también es necesario saber que el modelo se ajusta para los meses húmedos, es decir, en Noviembre y Julio se presentaron niveles de confianza más altos, cosa contraria de los meses Enero y Septiembre donde su ajuste es aceptable.

Tabla 4 Estaciones de donde se tomó la información hidrológica- Periodo 1964-1998

Estaciones Analizadas	
Pericongo	[Huila]
San Marco	[Huila]
Puente Santander Automática	[Palermo- Huila]
Purificación	[Tolima]

12 ANALISIS DE RESULTADOS

En la compilación de la información se observó que las cuatro tesis coincidían en que los modelos son idóneos y tienen un porcentaje mayor al 90% de confiabilidad para ser utilizados en los ríos colombianos, y que la versión logarítmica del modelo arroja mejores resultados en comparación con la versión aritmética. Las curvas de duración de caudales en la mayoría de estaciones de las cuatro tesis presentan mayor similitud entre las históricas y generadas en su versión logarítmica, por esta razón los modelos hidrológicos en su versión logarítmica se consideran más adecuados para el análisis para el estudio de potencial hidráulico.

Así mismo, se encontró que las estaciones situadas en las partes altas de los ríos presentan mejores resultados que las bajas, dadas las características morfológicas e hidrográficas de la zona.

Es de recomendar que los datos proporcionados por el IDEAM sean más precisos y confiables ya que se encontraron anomalías y esta incurre en la precisión de los resultados; sin embargo, puede pasar que estos datos considerados anómalos sean reales y si este es el caso lo que se debe conseguir es completa confianza de los registros. En general las deficiencias en los resultados se encuentran entre un rango aceptable para los requerimientos en la práctica.

Se pudo apreciar que en la mayoría de las estaciones estudiadas los datos registrados son de un promedio de 35 a 40 años de datos aproximados, lo que implica que muchos registros extremos no se van a ver reflejados, por lo que es conveniente aplicar un factor de seguridad en las obras que se necesiten realizar.

Las tesis halladas en total dieciocho hablan en su mayoría del modelo de Montecarlo y muy pocas combinaron los modelos para el estudio de su respectivo tema. Se observó que variables importantes que afectan el comportamiento de los caudales no están incluidas, como la precipitación, la evaporación y la temperatura, estas podrían establecer si los caudales registrados por las estaciones del IDEAM son los correctos y es necesario que todos los modelos hidrológicos se sometieran a convalidación.

Los investigadores en ingeniería de recursos hídricos de la Universidad La Gran Colombia han hecho un arduo trabajo sobre el tema y ha tenido en cuenta uno de los ríos más importantes del país para sus estudios en este caso el río Magdalena.

13. CONCLUSIONES

La convalidación de los métodos, arrojan datos satisfactorios para la extensión de los valores del caudal medio mensual, dentro de las estaciones analizadas, lo que deja por hacer seguimiento a todas las estaciones de aforo posibles con el fin de validar el método para la totalidad del cauce del río Magdalena.

El avance de la investigación por parte de la Universidad La Gran Colombia, acerca de la convalidación de modelos hidrológicos dentro de los ríos colombianos para la extensión de los valores de caudal medio mensual y anual, tiene un considerable progreso con alrededor de 18 tesis sobre el tema entre los años de 2008-20112.

Es necesario que el tema de convalidación de los modelos Thomas y Fiering y Monte-Carlo, se desarrolle en las asignaturas de probabilidad y estadística o en el de hidrología dentro del programa de ingeniería civil de la Universidad La Gran Colombia, con el fin de que los estudiantes puedan entrar en este tema de investigación, y dado que la Universidad alberga estudiantes de todas las partes de Colombia pueda convalidarse los modelos en esa misma medida.

Puede apreciarse que las tesis desarrolladas en la Universidad La Gran Colombia, en relación a la convalidación de los modelos de Thomas y Fiering y Monte-Carlo, empezaron y aumentaron, a la vez que los ingenieros Alfonso Estrada y Alberto Sánchez de la Calle expusieron este tema en su tesis para conseguir el título de Especialista en Pedagogía y Docencia Universitaria en la Facultad de Postgrados y formación continuada de la Universidad la Gran Colombia, de esta manera puede inferirse que el conocimiento de los mismos profesores de la Facultad acerca del tema impulsa y abre las opciones a los estudiantes para investigar un tema tan importante como lo es convalidar estos modelos para Colombia.

La resolución de los modelos de Thomas y Fiering y Monte-Carlo, requieren que se haga en su versión aritmética y logarítmica, para posteriormente apreciar la más adecuada, a través de una prueba de bondad de ajuste y una corroboración gráfica como lo son las gráficas de las curvas de duración de caudales, de esta manera pueden obtenerse datos confiables y más precisos y completos.

Es necesario aplicar todos los métodos de generación sintética que sea posible, para las cuencas y áreas del territorio colombiano que se esté analizando, de manera que se pueda corroborarse su idoneidad para las implementaciones futuras, en razón a que el territorio colombiano presenta unas características climáticas, higrológicas, geográficas y ambientales muy particulares, lo que posiblemente haga que rechace los modelos de Thomas y Fiering y Monte-Carlo.

La búsqueda de un modelo base y estándar para la generación de caudales mensuales y anuales que satisfaga las condiciones del territorio colombiano está en marcha y su camino empieza en la convalidación y descarte de los modelos que actualmente se utilizan como los son Thomas y Fiering y Monte-Carlo.

14. REFERENCIAS

- ATALA DUARTE, Weimar. Convalidación. Trabajo de Grado Ingeniero civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2011.
- BUENDÍA, L., COLÁS, P. Y HERNÁNDEZ, Métodos de investigación en Psicopedagogía. Madrid: McGraw-Hill.1997.
- CADAVID, J., Y SALAZAR, J. Generación de series sintéticas de caudales usando un modelo mátalas con medias condicionadas. Avances en Recursos Hidráulicos. 2008.
- FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPERS. Mathematical models in hydrology. The united Mations. Roma.1973.
- GARCÍA, J. R. Cálculo de la incertidumbre estándar mediante. México: Revista Electrónica Nova Scientia.2012.
- IDEAM-Cormagdalena. Estudio Ambiental de la Cuenca Magdalena-Cauca y elementos para su ordenamiento territorial, Bogotá, D. C., Gráficas. 2001.
- MONSALVE SÁENZ, German. *Hidrología en la ingeniería*. Bogotá. Escuela Colombiana de Ingeniería.1995.
- SÁNCHEZ DE LA CALLE, Alberto; ESTRADA SÁNCHEZ, Alfonso. Convalidación del modelo de Thomas y Fiering para extender las series de caudales medios mensuales de los Ríos Magdalena y Cauca. Trabajo de Grado Especialista en Pedagogía y Docencia Universitaria. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Postgrados y Formación Continuada.2008.
- SÁNCHEZ, Alberto, ESTRADA, Alfonso. Cuadernos de ingeniería No. 1. Modelos matemáticos aplicados a la cuenca Magdalena-Cauca. 2010.
- THOMAS, H., Y FIERING, M. Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulation. Design of water resource systems. 1962.
- BENAVIDES RUEDA, Camilo. Convalidación del modelo matemático de Thomas y Fiering para las estaciones de aforos colorados y puerto libre pertenecientes a la corriente del río Negro en el Departamento de Cundinamarca Colombia. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2008.

MOSQUERA MOSQUERA, Carlos. Convalidación del modelo matemático de Thomas y Fiering, para extender las series de caudales medios mensuales del río Atrato, por medio de datos de las estaciones de aforos de Bellavista, Belén y San Antonio de Padua. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2009.

CÁRDENAS ÁLVAREZ, Marlón. Convalidación del modelo matemático de Thomas y Fiering en las estaciones de aforos: Guaduro, Tobia y Charco Largo; en la corriente del río Negro en el departamento de Cundinamarca. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2008.

GONZÁLEZ PEÑA, Carlos. Convalidación del modelo matemático de Thomas y Fiering para las estaciones de aforos el salado y noanamá del río San Juan en Colombia. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2008.

RENGIFO OVALLE, Mónica. Convalidación del modelo matemático de Thomas y Fiering, para los caudales medios mensuales del río Atrato, en Colombia por medio de datos de las estaciones de aforos de Puente las Sánchez y el Siete. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2008.

OLAYA RUBIO, José. Convalidación del modelo Montecarlo para la generación de caudales medios anuales mensuales para el río ranchería en el departamento de la Guajira. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2011.

AYALA DUARTE, Weimar. Convalidación del modelo Monte-Carlo para la generación sintética de caudales medios anuales y mensuales; parte alta de la cuenca del Río Magdalena. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2011.

ACOSTA PIMENTEL, Juan Carlos. Convalidación del modelo de Monte-Carlo para extender series de caudales mensuales y anuales de los ríos Magdalena y Suaza. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2011.

HERREÑO ESPAÑOL, Mayerly. Convalidación del modelo de Monte–Carlo para extender series de caudales anuales de los Ríos Sinú y Atrato.Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2010.

SALCEDO VALENCIA, Leydy. Convalidación de los modelos matemáticos de Thomas–Fiering y Montecarlo para la generación de caudales medios en el río Guejar, departamento del Meta.Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2011.

BONILLA CASTRO, Silvio. Convalidación del modelo de Montecarlo para generación de caudales medios anuales y mensuales en el rio Cauca.Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2011.

GUZMAN MELO, Eliana. Convalidación de los modelos de Monte Carlo y Thomas Fiering para la determinación de caudales medios anuales y mensuales para el Río Meta.Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2010.

REINA LOPEZ, Jeiny. Convalidación de los modelos de monte Carló y Thomas Fiering para la determinación de caudales medios anuales y mensuales para el río meta, estaciones puerto Texas, Aguaverde y Aceitico.Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2011.

CASTILLO ACOSTA, Wilson. Convalidación y análisis del modelo Montecarlo en el Río Sumapaz.Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2011.

ORTIZ FORERO, Wilington. Estudio de convalidación del modelo Montecarlo para generar caudales medios mensuales y anuales en la cuenca media del Río Magdalena.Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2010.

BRAVO JIMÉNEZ, Suly. Convalidación de los modelos matemáticos de Montecarlo y Thomas-Fiering para la determinación de caudales medios, anuales y mensuales para el Río Upia del departamento del Casanare. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2012

MEJÍA PEÑA, Andrea. Convalidación de los modelos Monte - Carlo y Thomas - Fiering para le determinación de caudales medios anuales y mensuales para los ríos Aracataca y Fundación. Trabajo de Grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C: Universidad la Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2011