

Modelación Hidrológica para Pronósticos de Niveles de Agua Diarios en la Ciudad de Quibdó-Chocó-Colombia

Autor: Ing. Darwin Mena Renteria

E-mail: ingemena2@hotmail.com

Asesores:

SENAMHI: Ing. Miguel Ontiveros Ph.D.

IDEAM-Colombia: Ing. Hebert Rivera Ph.D

RESUMEN

El departamento del Choco es una de las zonas más afectadas por inundaciones en Colombia, debido a su cercanía a la costa del Pacífico donde se presentan continuas lluvias torrenciales que superan los 9.000mm anuales y por su vecindad con la cordillera de los Andes, la cual constituye una barrera que impide que las nubes que se forman en el océano se trasladen hacia el interior del país.

Con el fin de mejorar las herramientas existentes en el país para la toma de decisiones frente a la presencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos, desde hace muchos años tanto instituciones públicas como privadas, han creado, aplicado y validado diferentes modelos que permitan predecir la dinámica de los niveles de agua en diferentes sitios.

En este trabajo se aplicó un modelo hidrológico basado en Ecuaciones Diferenciales Determinísticas, para pronosticar la dinámica de los niveles de agua diarios en el Río Atrato en el sector de la ciudad de Quibdó-Chocó-Colombia, con el objeto de proveer a los diferentes usuarios de estos pronósticos de la región, de herramientas técnicas para la toma de decisiones frente a estos fenómenos.

La performance del modelo aplicado resulta No Satisfactoria, según los diferentes criterios de evaluación de la calidad de su funcionamiento. Por lo que se requiere de un riguroso proceso de calibración del modelo para las condiciones de la zona y la aplicación de variables exógenas como la precipitación que tiene gran influencia en esta cuenca, con el fin de mejorar los pronósticos emitidos.

Palabras clave: Pronósticos hidrológicos, Río Atrato, Ecuaciones Diferenciales Determinísticas.

1. Introducción

Los fundamentos teóricos y las herramientas prácticas del análisis, los pronósticos y la toma de decisiones en hidrología, son los modelos matemáticos que permiten simular las pérdidas y la amenaza. En materia de herramientas para abordar la teoría de toma de decisiones se tienen métodos diversos, tales como la teoría de juegos estratégicos, teoría de las probabilidades, estadística matemática, teoría de las decisiones estocásticas, programación matemática, etc.

A continuación se señalan algunos estudios desarrollados en Colombia y que sirven de soporte y referencia para el desarrollo del presente trabajo de investigación. Un primer

aporte conceptual sobre el desarrollo de los modelos de simulación en tiempo real del riesgo por desabastecimiento de agua para riego fue realizado por Rivera (2001), en el cual plantea la estimación del riesgo para sembrar papa en determinada área para la cosecha en época de verano.

Una segunda experiencia nacional en este tema, la realizó el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, con el "Protocolo para la emisión de los pronósticos hidrológicos" (IDEAM, 2005), en el cual se desarrolla varias aproximaciones de modelación para la emisión de los pronósticos hidrológicos.

Estos esfuerzos y los realizados por otros investigadores en materia de modelación hidrológica en tiempo real (Segura, 2005, Rivera, 2004 y Rivera, 2002), permiten asegurar que en la actualidad es posible aplicar una metodología de pronóstico de amenaza por inundaciones en tiempo real basado en la dinámica de los niveles del agua en los ríos de Colombia. (Rivera, 2006).

El territorio departamental del Chocó se halla dentro de la zona de calmas ecuatoriales, caracterizada por la alta pluviosidad, con registros superiores a los 9.000 mm de precipitación anual. Las lluvias fuertes con grandes tormentas hacen que los ríos y quebradas se desborden dejando como resultado la pérdida de vivienda, vidas humanas, cosechas y animales, incidiendo en la salud y el bajo nivel de vida de la población.

El río Atrato se constituye en la principal vía de transporte tanto de pasajeros como de productos hacia dentro y fuera del departamento, la mayor parte de la población de la zona se encuentra asentada a orillas de este río y es aquí donde desarrollan todas sus actividades. Por esta razón es imprescindible contar con pronósticos en tiempo real de la dinámica de los niveles de agua del río, centrando la necesidad en la predicción del riesgo, asociada a la amenaza hidrológica (nivel de agua) y las pérdidas asociadas por ausencia de estos pronósticos.

El objetivo de esta investigación es proveer herramientas para prevenir sobre la evolución de niveles diarios en el río, que permitan alertar a la población en caso de inundaciones.

2. Marco metodológico

En este trabajo se realizó una combinación de análisis históricos, la aplicación de procesos analíticos - matemáticos para facilitar el análisis, tratamiento e interpretación de los datos hidrometeorológicos de entrada y salida.

2.1. Descripción del área de estudio

Según el Plan de Ordenamiento Territorial Municipal 2005, Quibdó está ubicada a 43 m.s.n.m y con una temperatura promedio de 28 grados centígrados, es la capital del Departamento del Chocó situado en el occidente del país, en la región de la llanura del Pacífico.

El municipio de Quibdó limita por el norte con el municipio de Medio Atrato, por el sur con los municipios de Río Quito y Lloró, por el oriente con el municipio de El Carmen de Atrato, por el nororiental con el departamento de Antioquia, por el occidente con el municipio de Alto Baudó (Figura 1) Tiene un área de 3337.5 km² y una población de

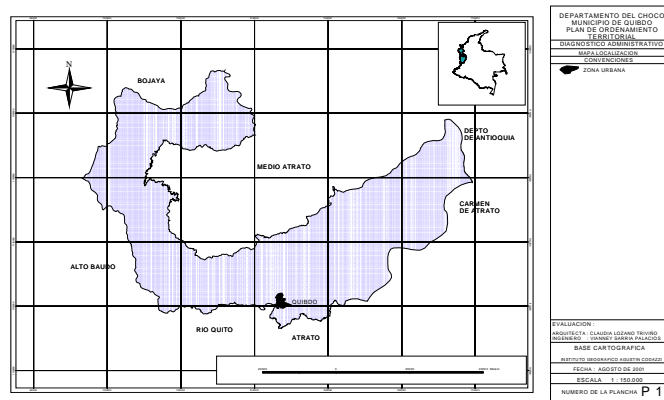
97.714 habitantes, la cual representa el 32% del total del departamento. El 65% se encuentran en el área urbana.

Clima

El clima de la región del Pacífico colombiano es de tendencia más caliente que el resto del país, superhúmedo y con relativa, alta variabilidad de las lluvias mensuales. El régimen normal de variación temporal de los elementos climatográficos se caracteriza por una distribución bimodal, con dos periodos de valores máximos relativos y dos de mínimos relativos, influenciado ese tipo de distribución por los desplazamientos de la zona de Confluencia Intertropical.

La precipitación comienza a disminuir de 9.000 mm a 5.000 mm en los sentidos sur Nor-Oeste y sur Nor-Este.

Figura 1. Ubicación geográfica del Municipio de Quibdó.



Fuente: Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Quibdó, 2005.

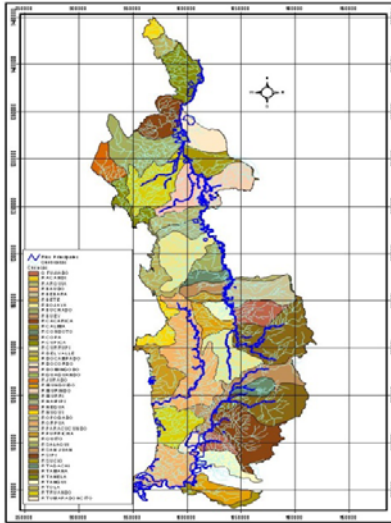
Hidrología

La cuenca del río Atrato se considera como una de las cuencas de mayor rendimiento del mundo, Si se compara su caudal promedio en relación con su área de captación, se obtiene 161 litros/seg./Km². Siendo este un dato muy alto comparado con el del resto del país que está en 53 litros/seg./Km² Los volúmenes de agua del río, a la altura de la ciudad de Quibdó, son de 1.022 m³/seg.

2.2. Información Hidrometeorológica

Los datos hidrometeorológicos que se utilizaran fueron suministrados por la oficina de Archivo técnico del IDEAM, estos son datos diarios de los niveles registrados en la estación limnimétrica Quibdó con código No. 1104702 de todos los años disponibles (1974-2002), los cuales fueron compilados en un formato tabular para posteriores procesamientos e interpretaciones.

Figura 2. Principales cuencas del Departamento del Chocó.



Fuente: Corporación Autónoma para el desarrollo del Chocó.

2.3. Aplicación de la Ecuación Determinista

Es bien sabido, que las ecuaciones diferenciales deterministas (EDD) son herramientas matemáticas que permiten simular la dinámica de procesos naturales y por ello son básicas y primordiales en el desarrollo de modelos dinámicos.

En este sentido aplicara una ecuación diferencial lineal y ordinaria que permita pronosticar los niveles diarios del agua.

El modelo determinista a través de una Ecuación Diferencial Determinista (EDD) es de la forma:

$$\frac{dH}{dt} = f(\tau, k, \xi, H)$$

En donde físicamente,

- H - Representa al nivel del agua en determinado sitio y lugar,
- t - representa al tiempo (día),
- τ - es un parámetro que representa a la propiedad de inercia de cualquier sistema ante la influencia de algún factor externo,
- k - es un parámetro que representa a las propiedades del sistema,
- ξ - son un conjunto de factores externos que ejercen influencia sobre el sistema;

En forma matemática, tenemos que

H - representa a la variable dependiente en la ecuación diferencial,

t - representa a la variable independiente,

τ - es un parámetro,

k - es un parámetro,

ξ - representa a la variable externa.

El modelo determinista que simula la dinámica de los niveles del agua toma la siguiente expresión:

$$\frac{dH}{dt} = \gamma h$$

Con $h=h_0$

La solución analítica de la EDD, es la siguiente:

$$h = h_0 e^{\gamma t}$$

h =nivel estimado (nivel de mañana)

h_0 =nivel de hoy (condición inicial)

γ =parámetro que se calcula con los datos históricos

t =tiempo (como los pronósticos tiene un horizonte diario, entonces $t=1$)

Esta solución analítica de la EDD permite obtener como resultado el pronóstico un valor concreto del nivel del agua en el sitio señalado y a nivel diario.

2.3.1. Parametrización del modelo

En este proceso se trató de encontrar los valores de los parámetros de la ecuación que ofrecían mejores posibilidades para la respuesta de la simulación hidrológica, teniendo en cuenta los datos históricos de la estación hidrométrica de Quibdó.

La parametrización se realizó con los datos de niveles diarios de la serie correspondientes a los años entre 1975-1993.

El objetivo de la parametrización fue estimar el valor del γ de la ecuación diferencial que mejor se ajustara a los valores de la serie, haciendo variar este en valores comprendidos entre -1 a 1, rango que fue recomendado por los expertos del IDEAM, escogiendo el γ que menos errores produjo, a partir de la siguiente ecuación:

$$P_{\%} = \frac{H_{med} - H_{pron}}{H_{med}} * 100$$

2.3.2. Validación del modelo

La validación del modelo se realizó con los datos de niveles diarios de la serie correspondiente a los años entre 1994-2002.

Para este proceso se aplicó la ecuación diferencial determinista, utilizando el valor del parámetro γ escogido en el proceso de parametrización.

El proceso de validación nos da el valor del nivel pronosticado para el día siguiente, tomando como referencia el nivel registrado el día anterior.

2.3.3. Evaluación del funcionamiento del modelo

La calidad de los pronósticos hidrológicos es *cualquier* medida que evalúe el error de las predicciones cuando se las compara con las observaciones y mediciones. :

El valor del pronóstico, es una medida del beneficio que se alcanza al usar los pronósticos para tomar decisiones relacionadas a las alertas hidrológicas: si un valor predictivo (cualitativo o cuantitativo) no se usa para tomar decisiones, entonces no tiene ningún beneficio (Rivera 2002).

Existen diversos criterios para evaluar la calidad del funcionamiento de un modelo. Uno de ellos, consiste en establecer de manera preliminar algunos “intervalos de confianza” que debe cumplir la metodología de pronósticos:

- 1) los pronósticos que se den con un margen de error menor al 5% con respecto al valor del nivel registrado se consideran muy buenos;
- 2) los pronósticos que se den con un margen de error entre el 5% y el 10% con respecto al valor del nivel registrado se consideran buenos;
- 3) los pronósticos que se den con un margen de error entre el 10% y el 15% con respecto al valor del nivel registrado se consideran satisfactorios;
- 4) los pronósticos que se den con un margen de error superior al 15% con respecto al valor del nivel registrado se consideran no satisfactorios.

Se considera que un pronóstico es acertado si se ubica en la categoría de muy buenos y buenos; es decir, es acertado el pronóstico siempre y cuando el margen de error no supere el 10%.

Este criterio tiene la siguiente aproximación matemática:

$$P_{\%} = \frac{H_{med} - H_{pron}}{H_{med}} * 100$$

En donde tenemos que,

$P_{\%}$ - Porcentaje de aciertos de cada pronóstico;

H_{med} - Nivel diario del agua medido

H_{pron} - Nivel diario agua pronosticado,

El segundo criterio, es denominado “porcentaje de pronósticos acertados”, se soporta en la siguiente metodología.

- 1) se define el período de la edición de los pronósticos hidrológicos, en nuestro caso, corresponde al período comprendido 1 enero de 1994y el 31 de diciembre de 2002, es decir, se tiene una cantidad total de 3272 pronósticos emitidos;

P total= 3272

- 2) se define el primer momento estadístico de la serie de valores de niveles registrados, en nuestro caso, este momento estadístico se estima mediante la fórmula del promedio aritmético:

$$\bar{H} = \frac{\sum_{1}^n H_{regist}}{n}$$

- 3) se estima la desviación estándar de los valores predictivos de niveles con respecto al primer momento estadístico de los niveles registrados, mediante la expresión matemática:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{1}^n (H_{pred} - H_{regist})^2}{n}}$$

- 4) se estima el “nivel de certeza permisible”, mediante la relación porcentual:

$$\Delta_{permis} = 0.674 \delta$$

5) se define la “condición de pronóstico acertado”, si se cumple la relación:

$$\left| H_{regis} - H_{predict} \right| \leq \Delta_{permis}$$

6) finalmente, se estima el porcentaje de pronósticos acertados, mediante la fórmula:

$$P_{\%} = \frac{P_{acertados}}{P_{total}} 100\%$$

3. Resultados y discusión

3.1. Parametrización del modelo

Como se explico anteriormente este proceso consiste en encontrar el parámetro (γ) del modelo que mejor se ajuste a la serie de datos histórica de niveles diarios para la estación Quibdó, cuyos resultados se pueden apreciar a continuación:

Tabla No 1. Ejemplo de la realización de la parametrización del modelo en la estación hidrométrica Quibdó.

FECHA	NIVEL MEDIDO	NIVEL PRONOSTICADO	ERROR
01/01/1980	315		
02/01/1980	270	285.0	5.5
03/01/1980	330	244.3	25.9
04/01/1980	413	298.5	27.7
05/01/1980	313	373.6	19.3
06/01/1980	275	283.2	2.9
02/03/1980	125	280.4	124.3
03/03/1980	178	113.1	36.4
04/03/1980	175	161.0	7.96
05/03/1980	110	158.3	43.9
06/03/1980	95	99.5	4.7
07/03/1980	68	85.9	26.4
08/03/1980	115	61.5	46.4
21/04/1980	228	153.8	32.5

Tabla No 2. Resultados Parametrización del modelo

GAMMA	ERROR (%)	GAMMA	ERROR (%)
1	199.44	-1	60.3
0.9	171.1	-0.9	56.2
0.8	145.5	-0.8	51.8
0.7	122.5	-0.7	47.0
0.6	101.8	-0.6	42.0
0.5	83.3	-0.5	37.0
0.4	66.9	-0.4	32.3
0.3	52.7	-0.3	27.9
0.2	41.0	-0.2	24.8
0.1	32.2	-0.1	24.1

El valor del (γ) que obtuvo un mejor resultado fue **-0.1**, con un error promedio para toda la serie de **24.1 %**.

3.2. Validación del modelo

Una vez obtenida la ecuación determinista en su solución analítica y con los datos registrados de los niveles diarios se procedió a su aplicación.

Como se puede apreciar (Tabla No 3), estos cálculos se pueden realizar de manera ágil y fácil en una tabla de Excel o con una calculadora sencilla, sin exigir para ello la existencia de programas especiales.

Tabla No 3. Ejemplo de la realización del pronóstico de niveles diarios promedios en la estación hidrométrica Quibdó.

FECHA	NIVEL MEDIDO	MARGEN MAS 10%	MARGEN MENOS 10%	NIVEL PRONOSTICADO
01/01/1994	505			
02/01/1994	594	653.4	534.6	456.9
03/01/1994	434	477.4	390.6	537.4
04/01/1994	369	405.9	332.1	392.6
05/01/1994	360	396	324	333.8
06/01/1994	352	387.2	316.8	325.7
07/01/1994	364	400.4	327.6	318.5
08/01/1994	542	596.2	487.8	329.3
09/01/1994	579	636.9	521.1	490.4
10/01/1994	581	639.1	522.9	523.9
11/01/1994	528	580.8	475.2	525.7
12/01/1994	511	562.1	459.9	477.7

13/01/1994	428	470.8	385.2	462.3
14/01/1994	307	337.7	276.3	387.2
15/01/1994	298	327.8	268.2	277.7
16/01/1994	220	242	198	269.6
17/01/1994	360	396	324	199.0
18/01/1994	386	424.6	347.4	325.7
19/01/1994	322	354.2	289.8	349.2
20/01/1994	296	325.6	266.4	291.3

En esta tabla, se muestran los resultados de la aplicación del modelo propuesto; los pronósticos de los niveles promedios diarios se dieron para 20 días (desde el 1 hasta el 20 de Enero de 1994), aplicando las fórmulas descritas anteriormente.

En la primera columna de esta tabla se indica la fecha de la elaboración del pronóstico, en la segunda, se presenta el valor (en unidades de centímetros) del nivel del agua, registrado por la estación hidrométrica; en la columna tercera, se establece la margen positiva (por encima) del 10% del nivel registrado, es decir, se establece un límite máximo del 10% por encima del nivel registrado, el cual no debe ser superado por la metodología de pronóstico; mientras que en la columna cuarta se presenta la margen negativa (por debajo) del 10% del nivel registrado. La margen del 10% por encima y por debajo del nivel registrado fue establecida como una aproximación previa al intervalo de confianza que no debe superar el error del pronóstico de los niveles; es decir, aquellos pronósticos que se logren dar con menos del 10% de error se consideraban satisfactorios.

3.3. Evaluación del funcionamiento del modelo

Los resultados de la aplicación del criterio denominado “Intervalos de confianza” este criterio se describe a continuación:

Tabla No 4. Resultado de la evaluación de la calidad del funcionamiento de los pronósticos

PRONOSTICOS		%
<i>MUY BUENOS</i>	501	15.311
<i>BUENOS</i>	496	15.158
<i>SATISFACTORIOS</i>	498	15.220
<i>NO SATISFACTORIOS</i>	1777	54.309
<i>TOTAL</i>	3272	

De acuerdo a este criterio, los pronósticos realizados para la estación Quibdó pertenecen al rango de “No satisfactorios”, ya que en más del 50% de los 3272 casos (desde el 1 Enero de 1994 hasta el 31 de Diciembre de 2002) los valores predictivos de los niveles diarios promedios mantuvieron un error por encima del 15%; mientras que el 45% restante de los pronósticos se ubican en el rango de “Muy Buenos a “Satisfactorios”, ya que mantuvieron errores entre el menor al 5% y el 15%.

En las siguientes figuras (Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7) podemos observar para diferentes años, los gráficos que reflejan la dinámica de los niveles diarios que fueron registrados en la estación Quibdó y los que se pronosticaron después de aplicada la ecuación y se obtuvo que los márgenes de error fueron superior del 10% respecto al valor del nivel registrado cuyo resultado se considera No Satisfactorio de acuerdo a la evaluación porcentual del acierto de los pronósticos de los niveles del agua, el cual se puede observar en la imagen simbolizada por el color azul que representa los niveles medidos y el color fucsia los niveles pronosticados con la ecuación determinista aplicada en este trabajo.

Los resultados de la aplicación del criterio denominado “porcentaje de pronósticos acertados” este criterio se presenta en la siguiente tabla:

Tabla No 5. Evaluación de la calidad del funcionamiento del sistema experto de acuerdo al segundo criterio

Estación	\bar{H}	δ	Δ_{permis}	P_{total}	$P_{acertados}$	$P_{no\ acertados}$	$P\%_{acertados}$	$P\%_{no\ acertados}$
Quibdó	338.9	68.23	45.98	3274	1479	1795	45.17	54.82

Como se puede apreciar, este criterio aunque es mucho más generoso que el anterior, ya que para considerar una metodología de pronósticos como “satisfactoria” generalmente se exige que el “Porcentaje de pronósticos acertados $P\%$ ” supere el 80%, los resultados muestran que el porcentaje de pronósticos acertados logrados por el modelo no superaron el 54.8%, por lo que se concluye que el modelo en su condición básica, no se ajusta a las condiciones de la zona en estudio.

Figura 3. Comportamiento Niveles diarios Medidos y Pronosticados Río Atrato Estación Quibdó, para el mes de Junio de 1994.

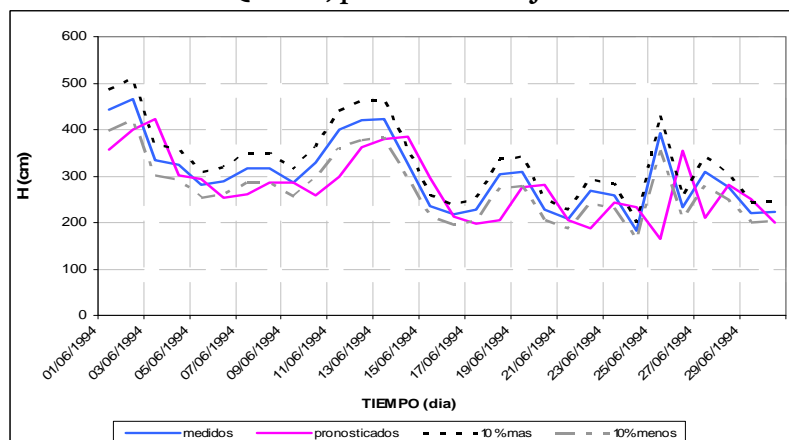


Figura 4. Comportamiento Niveles diarios Medidos y Pronosticados Río Atrato Estación Quibdó, para el mes de Marzo de 1995.

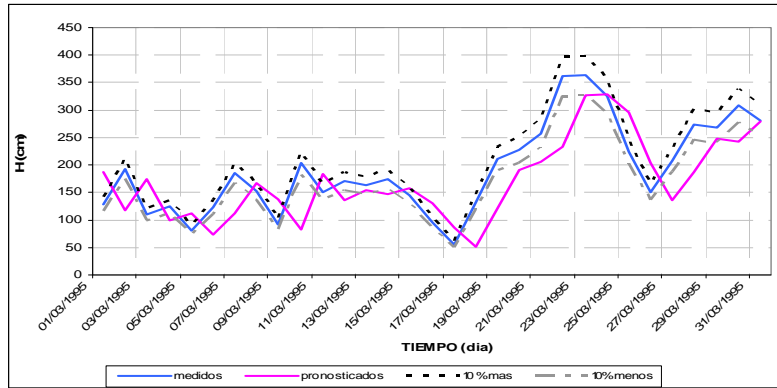


Figura 5. Comportamiento Niveles diarios Medidos y Pronosticados Río Atrato Estación Quibdó, para el mes de Mayo de 1996.

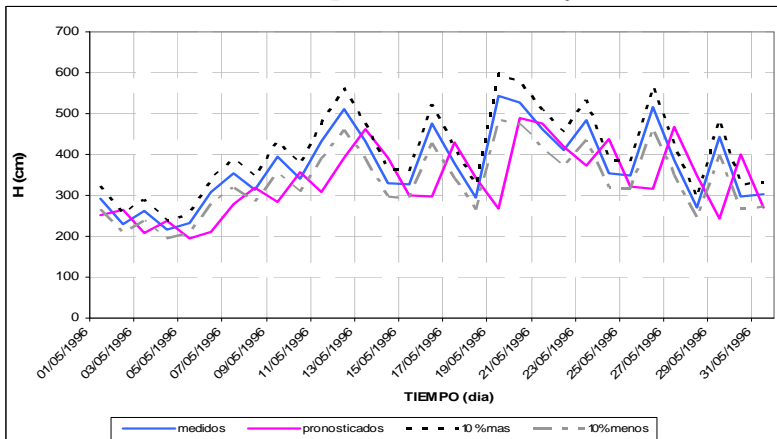


Figura 6. Comportamiento Niveles diarios Medidos y Pronosticados Río Atrato Estación Quibdó, para el mes de Febrero de 1997.

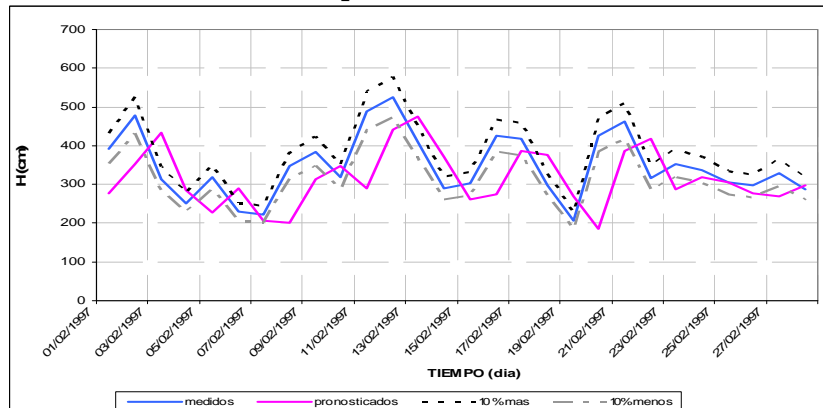
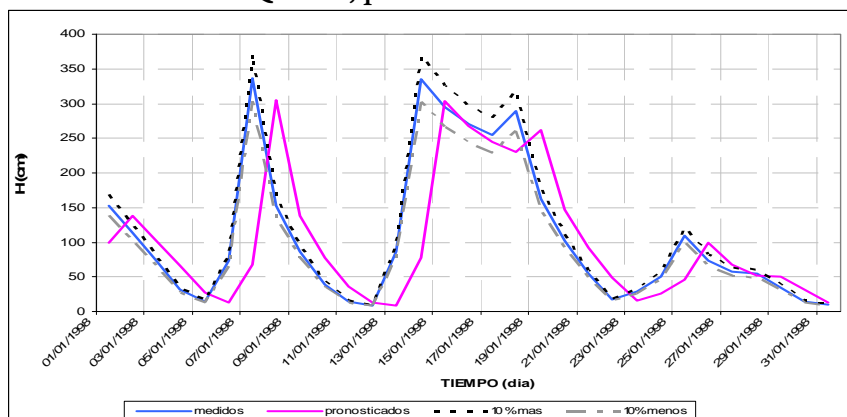


Figura 7. Comportamiento Niveles diarios Medidos y Pronosticados Río Atrato Estación Quibdó, para el mes de Enero de 1998.



De los resultados de la evaluación de la calidad de funcionamiento del modelo por los dos criterios anteriores y de los gráficos de dispersión de niveles medidos vs niveles pronosticados se puede inferir que el modelo aplicado no tuvo buenos resultados para las condiciones de la cuenca del río Atrato, posiblemente debido a que, a pesar que este modelo fue desarrollado para ríos grandes, de grandes secciones y régimen aluvial como el Atrato, este río presenta unas características muy particulares, ya que se comporta como un río de régimen torrencial, debido a sus grandes fluctuaciones que llegan hasta los 2-3 mts en algunos casos, en muy pocas horas como se puede apreciar en las anteriores graficas, este fenómeno se puede deber a los altos regímenes de precipitaciones existentes en la zona.

3.4. Comparación de resultados

Los resultados arrojados por la Ecuación Diferencial Determinista (EDD) de este trabajo demuestran que los pronósticos son “No Acertados”, dado que el margen de error de éstos superó al 10 %, y se requiere en el futuro ajustes al modelo para lograr mejorar los pronósticos de Buenos, Satisfactorios y No Satisfactorios a Muy Buenos, Sin embargo, realizaremos un breve análisis sobre la comparación del tipo de resultados obtenido por este modelo con los que arrojan algunos modelos que con frecuencia se utilizan en Colombia.

Modelos como SACRAMENTO desarrollado en USA y aplicado en entidades del nivel nacional (IDEAM e HIMAT), el modelo de TANK desarrollado en Japón y aplicado débilmente en Colombia, el modelo HVB desarrollado en Suecia con amplia aplicación en Colombia, todos estos modelos contemplan en su núcleo algorítmico una serie de ecuaciones diferenciales deterministas. La principal restricción de estos modelos radica en que este pronostica valores de caudales y no valores de niveles del agua; y la transformación de caudal al nivel del agua genera márgenes de error en los valores de niveles mayores al 10%, En este sentido se justifica la predicción de los niveles del agua y no de los caudales.

4. Conclusiones

El presente trabajo demuestra preliminarmente que la Ecuación Diferencial aplicada en el mismo en su forma básica, no arroja resultados óptimos con posibilidades de emitir

pronósticos hidrológicos de los niveles del agua con fines de soportar la toma de decisiones en la prevención de inundaciones en la ciudad de Quibdó.

En el proceso de parametrización se obtuvo que el valor de gamma que mejor se ajusto a los valores registrados de la serie fue **-0.1**, que alcanzo un error de **21.4%**.

Según el primer criterio de evaluación de la calidad del funcionamiento del modelo, el **54.3%** de los pronósticos emitidos se califican como “No satisfactorios”, seguidos por el **15.3%**, que se consideraron como “Muy Buenos”.

Según el segundo criterio de evaluación de la calidad del funcionamiento del modelo el **54.8%** de los pronósticos fueron no acertados, por lo que se requerirá realizar ajustes al modelo para poder mejorar el funcionamiento del mismo.

El modelo no obtuvo buenos resultados en cuanto a los pronósticos en la zona, debido posiblemente a la alta variabilidad en la dinámica de los niveles que se presenta en el río Atrato, ocasionada por el alto régimen de precipitación que se presenta en esta región del país.

Se requiere un riguroso proceso de calibración del modelo para la zona en estudio a fin de poder ajustar los parámetros y las variables del mismo a las condiciones de la zona y así obtener mejores resultados en los pronósticos de los niveles diarios.

Cabe señalar que este trabajo es el inicio de una nueva etapa en la investigación hidrológica, puesto que se limita al pronóstico determinista y solo para la estación Quibdó; por ello, es necesario continuar con este tipo de trabajos para avanzar en el proceso de pronósticos hidrológicos en tiempo real en la cuenca del río Atrato.

5. Recomendaciones

Se deberá investigar sobre la inclusión en la EDD presentada las variables de climatología (temperatura, precipitación, humedad, etc.), así como también incluir la influencia de las variables geomorfométricas de la cuenca (pendiente, área, altura, etc.).

La mejora de la calidad del modelo debe contemplar la introducción de variables aleatorias que reflejen la incertidumbre misma del proceso hidrológico mediante el desarrollo y aplicación de Ecuaciones Diferenciales Estocásticas, lo cual permitirá reducir errores de los pronósticos de los niveles diarios, se podrían utilizar ecuaciones del tipo $dH = \gamma(t) h dt$, $\gamma(t) = \bar{\gamma}(t) + \tilde{\gamma}(t)$.

Es necesaria la instalación de estaciones automáticas que envíen datos de nivel en tiempo real y así poder emitir los pronósticos con una resolución temporal inferior a un día, si resulta necesario.

A lo largo del río Atrato existen sitios con mayores problemas de inundaciones que los que presenta Quibdó; en este sentido, será benéfico ampliar la calibración y aplicación del modelo desarrollado por el IDEAM, para sitios Rio Sucio, Curvaradó, Rio Quito y otros.

Para los casos en que se requiera pronosticar los caudales diarios, resultaría importante conocer la calidad en términos cuantitativos de los caudales que se obtienen a partir de la

curva nivel-caudal, y a partir de ésta poder establecer la calidad de los pronósticos de caudales. Ello toma importancia para sectores tales como infraestructuras y otros.

Desarrollar la plataforma informática (base de datos), acoplada a un SIG, donde los diferentes usuarios de los pronósticos puedan consultar la información en tiempo real y así poder tomar las mediadas pertinentes.

BIBLIOGRAFIA

Alcaldía de Quibdó, 2005. Plan de Ordenamiento Territorial - Municipio de Quibdó. <http://alcaldiadequibdo.gov.co>. Acceso 20 de octubre de 2007

Carvajal, Y, Marco, J., 2004. Modelos multivariados de predicción de caudales mensuales utilizando variables macroclimáticas. Caso de estudio río Cauca – Colombia. http://www.udep.edu.pe/rupsur/trabajos_y_presentaciones/chilef.doc. Acceso 15 de octubre de 2007.

Flórez, A., 2006. Desarrollo de un modelo determinista para pronosticar los niveles pentadales del agua en periodo de estiaje del río Pamplonita. Universidad de Pamplona, Pamplona- Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2005. Protocolo para la emisión de los pronósticos hidrológicos, 152 p. Bogotá.

Kovalenko V.V., 1993. Modelación de procesos hidrológicos, San Petersburgo, Gudrometeoizdat, 256 p.

Quijano Nieto, J. C., 2006. Desarrollo de una ecuación diferencial estocástica para pronosticar los niveles del agua en el río Pamplonita - La Don Juana, municipio de Cúcuta - Norte de Santander. Tesis para optar al título de maestría en Hidrosistemas, Pontificia Universidad Javeriana, 80 p.

Rivera H., 2001. Lineamientos ingenieriles para la administración pública del agua con énfasis en la predicción de la oferta mensual hídrica bajo escenario no estacionario. Biblioteca Virtual del PHI-UNESCO, disponible en <http://www.unesco.org.uy/phi/bibli.htm>. Acceso 15 de octubre de 2007.

Rivera H, Zamudio E, Pinzón H, 2004. Modelación hidrológica en tiempo real para soportar las decisiones en el sector de navegación del río Magdalena. Memorias congreso nacional de hidráulica, Armenia – Colombia.

Rivera M, Umanest Y, Flórez A, 2006. Prevención en tiempo real del riesgo por desabastecimiento de agua en los sistemas de riego para la agricultura ante la variabilidad hidrológica, aplicando la teoría de procesos estocásticos. 2006. Revista Ambiental. 1900 - 9178 Volumen I.