

Pronóstico de caudales del río Piura calibrado con El Niño Costero 2017

Abstract— El Niño Costero extraordinario 2017 afectó la costa peruana, principalmente en la región Piura, con el desborde del río del mismo nombre, afectando zonas rurales y urbanas del medio y bajo Piura. Este trabajo analiza la situación desde el punto de vista hidrológico. Desde el año 2002 la cuenca contaba con un sistema de alerta temprana (SAT) conformado por una red hidrometeorológica y un modelo de pronóstico, NAXOS. El SAT predecía los caudales en la estación hidrométrica Los Ejidos, ubicada inmediatamente agua arriba de la ciudad. La red ha ido perdiendo operatividad y el NAXOS ha quedado descalibrado. Sus pronósticos imprecisos contribuyeron a la mala toma de decisiones en la prevención de desastres en el año 2017. Con la información hidrometeorológica de ese año se ha ajustado, mediante regresión lineal múltiple, tres modelos de pronóstico determinístico del caudal en Los Ejidos, con 12 horas de anticipación para eventos máximos, partiendo de precipitación diaria y caudales agua arriba, provenientes de estaciones convencionales y automáticas. En crecidas moderadas se llega incluso a tener 18 horas de anticipación. El modelo brinda una adecuada aproximación de los hidrogramas del verano 2017. Para el caudal máximo, 3468 m³/s, se obtuvieron valores de pronóstico con error menor al 5%. También se ha validado el modelo con datos del año 2019, obteniendo valores satisfactorios. Este modelo puede ser usado por las autoridades, ante la posible ocurrencia de eventos futuros para la toma oportuna de medidas de prevención.

Keywords—El Niño Costero, 2017, pronóstico, regresión lineal múltiple, caudal máximo, río Piura.

I. INTRODUCCIÓN

Históricamente se tiene registrada la presencia de anomalías climáticas en el océano Pacífico que generan años muy lluviosos en las costas sudamericanas, especialmente en Perú y Ecuador, a las que se les conoce como El Niño – Oscilación Sur o ENOS, que en realidad tiene tres fases: El Niño, La Niña y neutra [1]. En los últimos años se ha observado una manifestación anómala cálida de diferente alcance geográfico que ENOS, cuyo estudio es aún incipiente, y a la que en el Perú se le ha denominado Niño Costero por su presencia únicamente en las costas sudamericanas [2] [3]. Para desambiguación, últimamente en el Perú la fase cálida del ENOS es conocida como El Niño global [3].

Entre los meses de febrero y abril del año 2017 se presentó en las costas peruanas el Fenómeno El Niño Costero (FENC), de magnitud extraordinaria. En las regiones costeras de Piura, Lambayeque, La Libertad y Ancash se registraron tormentas semejantes a los registros históricos observados solo en eventos ENOS extraordinarios, 1983 y 1998. Por ejemplo,

el 23 de febrero la estación meteorológica de Morropón registró 150.0 mm y la estación San Pedro el 28 del mismo mes un valor de 155.3 mm [4].

La cuenca del río Piura sufrió serios daños [5]. En parte de origen pluvial, con la inundación de cuencas urbanas ciegas sin drenaje, pero principalmente por los desbordes del río Piura. Para evitar o disminuir los daños que pudieran causar eventos El Niño futuros, ya sea de origen global o costero, es necesario contar con un sistema de predicción de caudales. Desde el año 2002 hasta el verano 2017, la cuenca contó con un sistema de alerta temprana basado en algunas estaciones hidrometeorológicas que reportaban directamente a un modelo de pronóstico llamado NAXOS PRAEDICT. Sin embargo, para el evento 2017 quedó demostrada su obsolescencia, debido a que su pronóstico fue un caudal pico de 2900 m³/s para las 22 horas del día 26 de marzo y el caudal pico real fue de 3468 m³/s a las 12 horas del día 27 de marzo. Esto trajo como consecuencia pronósticos alejados de la realidad, tanto en tiempo de ocurrencia como en magnitud de la crecida.

A partir de los principales parámetros hidrometeorológicos medidos durante el evento que son: la precipitación, los niveles y los caudales en el río y apoyados en los conocimientos de hidrología, meteorología y herramientas matemáticas usadas en ingeniería se propone establecer correlaciones y estimaciones de las variables empleadas, obteniendo valiosa información sobre relaciones y pronósticos del comportamiento de dichas variables, que puedan contribuir a contar con un plan integral y eficaz de prevención de riesgos en la cuenca del río Piura.

Las lluvias de mayor intensidad se iniciaron el 17 de febrero y persistieron hasta marzo, ocasionando la inundación de la ciudad de Piura y diversas localidades del Medio y Bajo Piura, así como otras en el resto de la región. Como se sabe, las lluvias y las crecidas e inundaciones relacionadas originan diversos daños a la vida y salud, así como daños materiales El INDECI registró 89.709 personas damnificadas y 375.265 afectadas solo en la región Piura. Muchas viviendas se derrumbaron, los desagües colapsaron, se paralizaron las actividades escolares, varios puentes quedaron sin acceso, además de afectarse carreteras, infraestructura agrícola y 2500 ha de cultivos, entre otros impactos. Otras regiones muy afectadas fueron La Libertad, Lambayeque, Tumbes y Ancash, haciendo un total cercano al millón y medio de habitantes afectados a nivel nacional [5].

El presente estudio tiene como objetivo elaborar un modelo hidrometeorológico de pronóstico determinístico con el fin de predecir los caudales que se presentarán en la estación Los Ejidos en el río Piura con 12 horas de antelación

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

durante avenidas extremas y con 18 horas durante eventos moderados.

II. ELABORACIÓN DEL MODELO DE PRONÓSTICO

A. Área de estudio

La cuenca del río Piura se ubica en la región homónima, en la costa norte del Perú y abarca un área de 10872 km², comprendida entre los paralelos 4°41' y 5°49' Sur. La cuenca pertenece a la vertiente del Océano Pacífico y limita por el norte con la cuenca Chira, por el sur con la cuenca Cascajal, por el este con la cuenca Huancabamba y por el oeste con el océano Pacífico [6].

Según el censo del año 2017, Piura es la segunda región más poblada después de la capital, Lima, alcanzando un promedio de un millón 857 mil habitantes; y la provincia del mismo nombre es la sexta más poblada a nivel nacional [7]. De allí la importancia de contar con un buen sistema de pronóstico de caudales para prevención de daños en la cuenca.

B. Base de datos hidrometeorológica

La investigación inició conociendo a profundidad las principales características de la cuenca y la red hidrometeorológica de monitoreo perteneciente a las distintas entidades que operan en la cuenca del río Piura, tales como SENAMHI, PECHP, ANA, Juntas de Usuarios, etc. (Fig. 1).



Fig. 1 Ubicación de las estaciones presentes en el modelo lineal

La cuenca del río Piura cuenta con cinco estaciones hidrométricas. En el Aliviadero Maray se registra el caudal de trasvase del reservorio San Lorenzo a la cuenca del Piura. Este reservorio pertenece a la cuenca vecina del río Chira, y específicamente su tributario, el río Chipillico. Sin embargo, al estar muy cerca de la línea divisoria de aguas, su aliviadero de excedencias fue diseñado para que vierta sus aguas hacia la quebrada San Francisco, tributaria del Piura. De ese modo, se tiene la particularidad de que en años muy húmedos el referido aliviadero Maray trasvasa agua a la cuenca del río Piura, y en marzo de 2017 este caudal alcanzó valores extremos de 670 m³/s. Las cuatro restantes se ubican en el propio cauce del río

Piura, correlativamente desde aguas arriba hacia aguas abajo (TABLA I). De ellas, la estación Salitral sólo brinda datos de nivel de agua, pero las demás cuentan con curvas de aforo, por lo que brindan el caudal. La estación Los Ejidos se ubica inmediatamente aguas arriba de la ciudad de Piura y se constituye en la estación objetivo para pronóstico de los caudales.

TABLA I
ESTACIONES HIDROMÉTRICAS ACTIVAS USADAS EN EL ESTUDIO

Estación	Coordenadas		Altitud	Parámetro
	Latitud	Longitud	msnm	
Aliviadero Maray	04°44' S	80°11' W	299	Caudal
Salitral	05°21' S	79°50' W	209	Nivel
Puente Ñacara	05°07' S	80°10' W	149	Caudal
Tambogrande	04°57' S	80°19' W	63	Caudal
Los Ejidos	05°10' S	80°37' W	28	Caudal

La precipitación es un parámetro importante, ya que tiene una gran variabilidad espacial y temporal. La red pluviométrica de SENAMHI cuenta con estaciones convencionales (TABLA II) y estaciones automáticas (TABLA III).

TABLA II
ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS CONVENCIONALES ACTIVAS USADAS

Estación	Coordenadas		Altitud
	Latitud	Longitud	msnm
Miraflores	05°10' S	80°36' W	30
Morropón	05°11' S	79°58' W	141
Bigote	05°19' S	79°47' W	213
San Pedro	05°04' S	80°00' W	231
Partidor	04° 43' S	80° 16' W	236
Santo Domingo	05°02' S	79°52' W	1514
Huarmaca	05°33' S	79°31' W	2186

TABLA III
ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS AUTOMÁTICAS ACTIVAS USADAS

Estación	Coordenadas		Altitud
	Latitud	Longitud	msnm
Chulucanas	05°07' S	80°10' W	127
Morropón	05°11' S	79°58' W	141
Puente Ñacara	05°07' S	80°10' W	149
Salitral	05°21' S	79°50' W	209
Chipillico	04°43' S	80°07' W	343
El Virrey	05°35' S	79°58' W	396
San Pedro	05°05' S	80°01' W	528
Canchaque	05°24' S	79°36' W	1239
Sapillica	04°47' S	79°59' W	1470
Hualcuy	04°45' S	79°37' W	1943
Chalaco	05°02' S	79°50' W	1975
Huarmaca	05°34' S	79°32' W	2186
Huancabamba	05°15' S	79°33' W	3190

C. Elección del tipo de modelo

Al contar con información pluviométrica proveniente de dos tipos de estaciones, convencionales y automáticas, cuya disponibilidad es diferente, se decidió ajustar un modelo por cada tipo de estación y uno en conjunto.

Aunque en la práctica internacional evidencia el uso de modelos de tipo físico como el HEC-HMS [8] o modelos matemáticos complejos usando redes neuronales [9], se ha preferido el uso de un modelo matemático simple, que se implementaría por primera vez en la cuenca, que permita tener en corto tiempo las predicciones y que brinde información acerca de la idoneidad de las estaciones para reflejar el comportamiento del proceso lluvia escurrimiento en la cuenca. Además, es sabido que las autoridades correspondientes han dispuesto la modernización de la red hidrometeorológica, por lo que un modelo sencillo se encuentra, por ahora, más útil además de versátil, para mantenerlo calibrado. La metodología de modelación elegida es la regresión lineal múltiple, aplicada con la ayuda del software Excel y Minitab.

D. Selección de las variables

La elaboración de un análisis de correlación de los datos en hidrología supone unas consideraciones iniciales, debido a la naturaleza de las variables a tomar en cuenta en el estudio. Los datos de medición de caudales, por su naturaleza, no son independientes ya que representan el resultado de todos los factores hidrometeorológicos que intervienen en la cuenca estudiada. Por otra parte, están los datos de precipitación diaria, de carácter independiente, debido a que son obtenidos directamente de un fenómeno meteorológico. Sin embargo, para la presente modelación, que busca llegar a una predicción con el menor error posible y sin carecer de sentido físico de la variable de caudal en la estación Los Ejidos, es posible asignar a los datos de caudal medidos en las estaciones Ñácara y Tambogrande la naturaleza de independientes. Esto debido a su ubicación geográfica en el mismo cauce del río aguas arriba de la estación Los Ejidos. En la Fig. 1 se puede apreciar la ubicación de todas las estaciones que tienen influencia en el caudal medido en la estación Los Ejidos.

El análisis de correlación simple entre dos variables permite identificar el grado de relación de cada variable x_n del modelo respecto a la variable y . Un valor positivo indica una relación directa y un valor negativo es indicador de una relación inversa. Por otro lado, el valor del coeficiente de determinación permite identificar el porcentaje de variación en la variable dependiente u observada que está explicada por la ecuación de regresión.

Finalmente, este análisis permite determinar el desfase que hay entre la ocurrencia de las variables x_i con la variable y . Por ejemplo, dado un evento meteorológico de precipitación en la zona de influencia de la estación meteorológica, se espera que luego de un determinado tiempo la escurrimiento llegue al cauce principal y se traduzca en caudal.

El correlograma de las variables brindará dicha información. Así, una vez obtenidos los valores de los

desfases y contrastados con la ubicación geográfica de las estaciones a las que pertenece cada variable, estos serán considerados en la regresión lineal múltiple. Entonces cada variable x_i tendrá un desfase respecto a la variable y y deducido a partir de un análisis de correlación simple individual para cada par (x_i, y) . Dada la naturaleza diaria de los registros, los desfases o retrasos se miden en días. La TABLA IV y la TABLA V muestran los coeficientes de correlación para estaciones convencionales y estaciones automáticas respectivamente, con el fin de establecer un desfase temporal de las distintas estaciones respecto a Los Ejidos en la ciudad de Piura.

TABLA IV
COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS CONVENCIONALES CON LA ESTACIÓN LOS EJIDOS

Retraso (días)	Huamaca	Bigote	Morropón	Santo Domingo	San Pedro	Partidor	Miraflores
0	0.087	0.202	0.169	0.101	0.219	0.150	0.263
-1	0.152	0.250	0.279	0.211	0.230	0.344	0.357
-2	0.390	0.447	0.523	0.395	0.433	0.563	0.517
-3	0.338	0.241	0.332	0.252	0.346	0.281	0.312

TABLA V
ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS AUTOMÁTICAS ACTIVAS USADAS

Retraso (días)	Huamaca	El Virrey	Canchaque	Saltral	Morropón	Chalaco	San Pedro	Ñácara	Chulucanas
0	0.095	0.305	0.068	0.285	0.147	0.120	0.296	0.200	0.166
-1	0.147	0.484	0.141	0.332	0.248	0.213	0.288	0.280	0.228
-2	0.383	0.688	0.441	0.506	0.534	0.420	0.481	0.592	0.544
-3	0.336	0.479	0.440	0.382	0.337	0.410	0.412	0.408	0.381

E. Ajuste de los modelos

Para obtener los tres modelos indicados, de estaciones convencionales, automáticas y conjunto, se realizaron numerosas pruebas, debido al total de variables x_i involucradas en cada modelo, tratando de explicar la variable de respuesta "y", que es el caudal en la estación Los Ejidos.

Cada prueba de regresión consta de un determinado grupo de variables x_i para encontrar el nivel de correlación y obtener una ecuación apropiada. Para que cada variable predictora sea considerada en el modelo de regresión, se tuvo en cuenta diferentes parámetros y ajustes estadísticos, así como modificaciones en las mismas variables, ensayando desfases mayores a los calculados previamente y con valores acumulados, de un día y dos días para el caso de las estaciones convencionales, y acumulación horaria de hasta un día para el caso de las estaciones automáticas.

En la Fig. 2 se presenta a manera de ejemplo un informe de Minitab, donde se aprecian cinco columnas con los

estadígrafos correspondientes a cada variable considerada. Cabe señalar que el nombre de las variables es el de cada estación donde se miden, y la numeración -24, -48 y 72, aluden al desfase horario con Los Ejidos. Por ejemplo “Ñacara -24” se refiere a los caudales que pasaron por dicha estación hace 24 horas. Por su parte, las variables que tienen la indicación “Acum 48” o “Acum 72” indican que es la lluvia registrada acumulada de las últimas 48 o 72 horas.

Coeficientes						
Término	Coef	SE Coef	T-Valor	P-Valor	VIF	
Constante	-85.7	15.1	-5.69	0.000		
Ñacara -24	0.2946	0.0536	5.50	0.000	5.78	
Ñacara -36	0.2748	0.0464	5.92	0.000	4.34	
Ñacara -48	-0.0141	0.0489	-0.29	0.774	4.83	
Tambogrande -18	0.6279	0.0343	18.30	0.000	9.47	
Tambogrande -30	-0.0190	0.0368	-0.52	0.605	10.88	
Tambogrande -42	-0.1411	0.0376	-3.75	0.000	11.39	
Huarmaca -72	1.447	0.562	2.57	0.010	3.95	
Huarmaca Acum 48	-0.938	0.540	-1.74	0.083	9.01	
Huarmaca Acum 72	0.573	0.343	1.67	0.095	6.10	
H. Bigote -48	-0.086	0.422	-0.20	0.839	4.15	
H. Bigote Acum 48	-0.625	0.396	-1.58	0.115	6.69	
H. Bigote Acum 72	0.096	0.279	0.34	0.731	5.08	
E. Morropón -48	3.226	0.610	5.29	0.000	13.88	
E. Morropón Acum 48	-2.649	0.574	-4.62	0.000	26.50	
E. Morropón Acum 72	-0.796	0.464	-1.71	0.087	30.07	
E Sto Dom -48	-0.104	0.614	-0.17	0.866	5.37	

Fig. 2 Ejemplo de informe del análisis de regresión en software Minitab 17

La primera columna muestra los coeficientes de la ecuación de regresión lineal múltiple. Estos valores no pueden ser negativos en la ecuación final, pues el modelo carecería de sentido físico, ya que el caudal que pasa por el río Piura en la estación Los Ejidos no puede estar en función de la disminución de un valor caudal o de un valor de lluvia, sino por el contrario es la manifestación de la escorrentía producida.

La segunda columna indica el error estándar del coeficiente, que es la desviación estándar de la estimación del coeficiente de regresión. Su valor es siempre positivo y mientras más pequeño sea el valor, la estimación es más precisa. Por ejemplo, el error estándar de la variable Ñacara -24 es menor que el error de la variable Huarmaca -72, por lo tanto, quiere decir que los datos permitieron estimar el coeficiente de la variable Ñacara -24 con mayor precisión.

La tercera columna hace referencia al estadígrafo t que para el presente análisis no es un aspecto a tomar en cuenta para excluir alguna variable o medir la precisión de la estimación.

La siguiente columna muestra el estadígrafo p (P-valor), que permite identificar el nivel de significancia de los coeficientes de cada variable predictora. En una regresión se busca obtener coeficientes diferentes de cero que acompañen a las variables independientes, es por ello que la hipótesis nula establece que el valor de cada coeficiente es cero, entonces al obtener un P-valor menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que el coeficiente de la variable es significativamente distinto de cero. Por el contrario, con un valor mayor que 0.05 se acepta la hipótesis nula, el coeficiente es cercano a cero, despreciable, y con ello se descarta la variable independiente evaluada para el modelo.

La última columna contiene los valores del factor de inflación de la varianza e indica el grado en el que la multicolinealidad está presente en un análisis de regresión. Valores igual a 1 indican que las variables no están correlacionadas, valores entre 1 y 5 indican que están moderadamente correlacionadas y valores mayores a 5 indican que están altamente correlacionadas. Valores mayores a 10 suponen que la multicolinealidad está afectando de manera no conveniente a los resultados de la regresión, para reducir este valor se procede a eliminar predictores sin importancia para el modelo.

III. RESULTADOS

En la TABLA VI se muestran los resultados del análisis de regresión de los modelos convencional, automático y conjunto, que incluye tanto variables convencionales como automáticas. La razón de tener tres modelos es por la diferente disponibilidad de información, según el tipo de estación.

TABLA VI
ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS AUTOMÁTICAS ACTIVAS USADAS

Modelo	Coef R ²	SSE	SSE*	Residuo máx	Residuo pico
Convencional	92.3%	24798288	26159	482	274
Automático	91.8%	27360346	29107	509	110
Conjunto	92.2%	26064100	27494	495	170

A continuación, se muestran las ecuaciones correspondientes a cada modelo en el orden presentado en la TABLA VI.

$$Ejidos_{conv} = -70.6 + 0.3117 \text{Ñacara}^{-24} + 0.7081 \text{Tambogrande}^{-18} + 1.062 \text{Huarmaca}^{-72} + 0.610 \text{Partidor}^{-48} + 4.072 \text{Miraflores}^{-24} + 0.2193 \text{Ejidos}^{-24} + 0.984 \text{Maray}^{-12} \quad (1)$$

$$Ejidos_{autom} = -74.0 + 0.2358 \text{Ñacara}^{-24} + 0.7413 \text{Tambogrande}^{-18} + 0.863 \text{Maray}^{-12} + 1.133 \text{Canchaque}^{-60} (\text{Ac } 24 \text{ hrs}) + 1.222 \text{Chulucanas}^{-54} (\text{Ac } 24 \text{ hrs}) + 0.2669 \text{Ejidos}^{-24} \quad (2)$$

$$Ejidos_{conj} = -65.5 + 0.2681 \text{Ñacara}^{-24} + 0.6334 \text{Tambogrande}^{-18} + 1.126 \text{Maray}^{-12} + 1.740 \text{Canchaque}^{-60} (\text{Ac } 24 \text{ hrs}) + 1.336 \text{Chulucanas}^{-54} (\text{Ac } 24 \text{ hrs}) + 0.465 \text{Partidor}^{-48} + 4.354 \text{Miraflores}^{-24} + 0.2502 \text{Ejidos}^{-24} \quad (3)$$

En los tres modelos ajustados destaca la presencia del caudal del aliviadero Maray, con 12 horas de anticipación o desfase. Esto quiere decir que los pronósticos tendrán a lo sumo este grado de anticipación, que puede resultar con poco margen de anticipación. Sin embargo, si se considera que con mayor anticipación sí nos estará brindando la tendencia del comportamiento del caudal, en crecida o descenso, se aprecia la utilidad de los modelos. Cabe indicar que el caudal de Maray corresponde al aliviadero de excedencias del reservorio San Lorenzo, que únicamente en eventos muy caudalosos

derivará al río Piura aguas de la subcuenca del río Chipillico, perteneciente a la cuenca vecina del río Chira. Por tanto, cuando el aliviadero Maray no está derivando sus excedencias al río Piura, el nivel de anticipación del modelo llega a ser de 18 horas. En el año 2017, Maray sí descargó excedencias hacia el río Piura, mientras que en 2019 no se produjeron descargas. Sin embargo, los modelos propuestos consideran ambos escenarios.

En la Fig. 3 se muestra el hidrograma real del evento El Niño Costero 2017 junto con los hidrogramas producto de los tres modelos obtenidos en el estudio. Del mismo modo, en la Fig. 4 se muestra la validación del modelo convencional, mediante el hidrograma real del evento de febrero 2019 junto con el pronóstico obtenido con el modelo. Se registró un caudal máximo de 1503 m³/s se pronosticó 1610 m³/s, con un error porcentual del 7% siendo estos resultados satisfactorios.

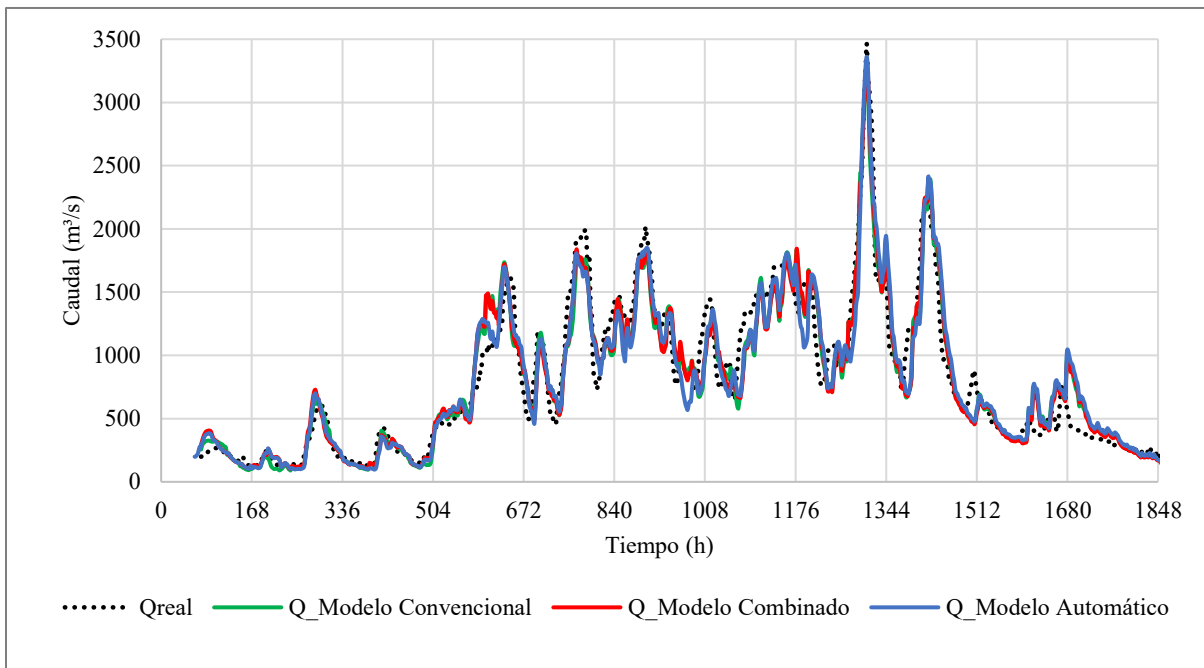


Fig. 3 Hidrograma real y pronósticos de los tres modelos durante el Fenómeno El Niño Costero 2017

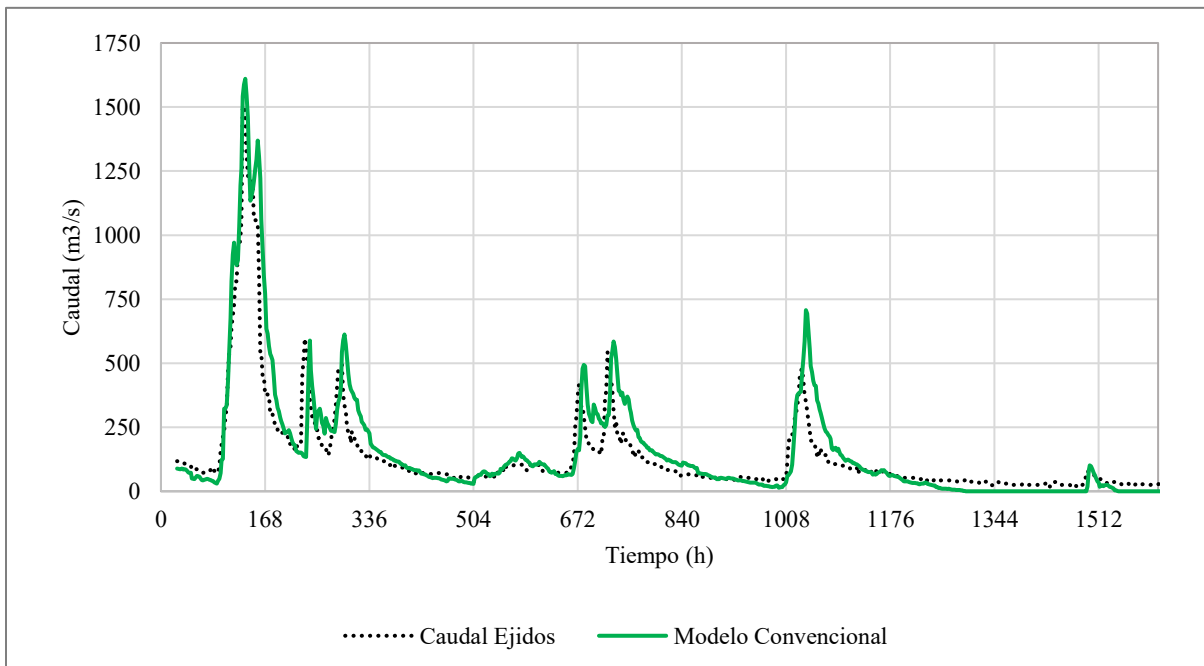


Fig. 4 Hidrograma real y pronóstico del modelo convencional correspondiente a los meses de febrero –abril del año 2019

IV. CONCLUSIONES

La cuenca del río Piura no posee regulación del río principal. Tampoco tiene un sistema apropiado de alerta temprana, que brinde pronósticos certeros y oportunos a la población y a las autoridades encargadas de velar por la seguridad pública. Los puntos más vulnerables son el Medio y Bajo Piura.

La red de monitoreo está a cargo de diversas entidades, siendo la principal el SENAMHI. Unas estaciones pluviométricas son de tipo convencional y otras son automáticas. Asimismo, a lo largo del cauce principal existen estaciones de monitoreo hidrológico, desde el distrito de Salitral hasta la ciudad de Piura. De ellas, las estaciones de Tambogrande y Los Ejidos son críticas para el monitoreo y pronóstico de avenidas, ya que en Tambogrande se concentra la mayor cantidad de precipitación durante eventos El Niño y existe un desfase de 18 horas aproximadamente entre ambas estaciones.

De la base de datos obtenida, con las estaciones disponibles al 2017, se han ajustado tres modelos de pronóstico de los caudales horarios del río Piura en la estación presa Los Ejidos, de acuerdo a la disponibilidad de los datos pluviométricos: estaciones convencionales, estaciones automáticas y modelo conjunto, es decir con ambos tipos de estaciones.

El análisis de correlación realizado con variables de precipitación, caudal y sus modificaciones con carácter acumulativo, ha permitido estimar la variable de caudal horario en la estación Los Ejidos ubicada inmediatamente agua arriba de Piura, con una precisión del 92.3% para el modelo de estaciones convencionales, 90.6 % para el modelo con estaciones automáticas y un 92.2% en un modelo combinado que incluye los dos tipos de estaciones, automática y convencional. Estos valores corresponden al coeficiente de correlación R^2 de cada uno de los modelos obtenidos, y dado que son mayores a 0.90, se concluye que el análisis de regresión elaborado en el presente estudio tiene un carácter significativo, sumado a ello que durante el procedimiento de cálculo se cercioró que el sentido físico de las variables usadas sea coherente, ajustando los desfases en función a la ubicación geográfica de las estaciones respecto de la variable en estudio.

Los modelos obtenidos permiten realizar un pronóstico del caudal registrado en la estación Los Ejidos de hasta 12 horas de anticipación contando para ello con un mínimo de 3 días consecutivos de información hidrometeorológica para poder hacer uso de las ecuaciones.

Cuando el aliviadero Maray del reservorio San Lorenzo no está descargando las excedencias a la cuenca del río Piura, la anticipación de los modelos aumenta a 18 horas. Esto quiere decir que si se cuenta con estaciones de monitoreo aguas arriba de Maray, se pueden considerar como variables predictoras que permitan ampliar el número de horas de anticipación del pronóstico.

Durante el evento del día 27 de marzo de 2017, cuyo caudal máximo fue de 3468 m³/s el error porcentual promedio

del pronóstico proporcionado por los modelos en el presente estudio es apenas del 5 %.

El modelo convencional fue validado con los datos hidrometeorológicos del 26 de febrero de 2019, para este caso el tiempo de pronóstico es de 18 horas, porque durante este evento no hubieron descargas en el aliviadero Maray. Se tuvo un error de predicción del 7% siendo estos resultados satisfactorios.

Estos modelos pueden ser usados por las autoridades, ante la posible ocurrencia de eventos futuros para la toma oportuna de medidas de prevención.

La sencillez de los modelos obtenidos y la metodología seguida permiten volver a calibrarlos, de acuerdo a la actualización de la red hidrometeorológica.

Se recomienda continuar profundizando el trabajo de modelación, simulando la eventual ausencia de datos de alguna estación, obteniendo nuevos parámetros que permitan seguir contando con las predicciones oportunas.

Asimismo es oportuno reforzar el sistema de difusión de la información, tanto de las estaciones convencionales como de las automáticas, para garantizar el funcionamiento ininterrumpido durante eventos extremos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el CONCYTEC-FONDECYT en el marco de la convocatoria E041-01 contrato N° 060-2018-FONDECYT-BM-IADT-AV.

REFERENCIAS

- [1] Quinn, W. H., Neal, V. T., & Antunez De Mayolo, S. E. (1987). El Niño occurrences over the past four and a half centuries. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. <https://doi.org/10.1029/JC092iC13p14449>
- [2] ENFEN (2012). Nota técnica: Definición operacional de los eventos El Niño y La Niña y sus magnitudes en la costa del Perú. 3 pp.
- [3] Takahashi, K. (2017). Fenómeno El Niño: "Global" vs "Costero." Avances En La Ciencia de El Niño: Colección de Artículos de Divulgación Científica 2017.
- [4] ENFEN (2017). Informe Técnico Extraordinario N°001. Obtenido de http://www.imarpe.pe/imarpe/archivos/informes/imarpe_infcto_informe_tecnico_extraordinario_001_2017.pdf
- [5] INDECI (2017) Boletín estadístico virtual de la gestión reactiva N° 07, Año 4/ JUL 2017
- [6] ANA (2015) Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Piura. Tomo I.
- [7] INEI (2017) Perú: Crecimiento y distribución de la población, 2017. Primeros resultados.
- [8] Cazenave, G. & Vives, L. (2014) Predicción de inundaciones y sistemas de alerta: Avances usando datos a tiempo real en la cuenca del arroyo del Azul. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*. N° 33, 83-91. Buenos Aires, Argentina.
- [9] Veintimilla, J. & Cisneros, F. (2015) Predicción de caudales basados en Redes Neuronales Artificiales (RNA) para períodos de tiempo sub diarios. *Revista Politécnica*, Vol 35, No 2. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador. M. Young, *The Technical Writer's Handbook*, Mill Valley, CA: University Science, 1989.