MARN
Ministerio de Medio Ambiente
y Recursos Naturales

Modelación de pronóstico hidrologico a corto plazo usando Redes Neuronales Artificiales Caso de estudio: Cuenca Binacional del Rio Paz entre El Salvador y Guatemala.

José Rodolfo Valles León
Dirección Observatorio Ambiental, Gerencia de hidrología

RESUMEN

En este documento se muestran los resultados de la modelación de pronostico hidrologico ocupando dos funciones de activación de Redes Neuronales Artificiales (ANN) para 1, 2 y 3 horas de tiempo de ventaja. La primera etapa del estudio está basado en una limpieza de datos hidrometeorológicos de las estaciones El Jobo y La Hachadura. Posteriormente, se generaron las curvas de descargas para dichas estaciones hidrométricas en base la información de aforos recolectados en los años 2005-2015. A continuación, se entrenó y verificó los modelos de pronósticos hidrologico usando inspección visual y el cálculo de funciones de error entre el caudal observado y el simulado. Asimismo, se comparó los modelos generados con un modelo de referencia Naive, el cual generalmente se ocupa en estos casos para verificar que estas técnicas sofisticadas, brinden una mayor eficiencia que un modelo sencillo (sin parámetros).

Los resultados de este estudio muestran que los modelos de pronóstico hidrologico para diferente tiempo de ventaja (1, 2 y 3 horas) brindan una muy buena reproducción del caudal observado. Asimismo, los diversos experimentos brindan un mejor desempeño comparado con el modelo de referencia Naive, por lo que se está tomando provecho de la herramienta de Redes Neuronales Artificiales en el pronóstico hidrologico. Sin embargo, se observa que ciertos eventos no son muy bien reproducidos por el modelo, lo que podría deberse a la capacidad de las Redes Neuronales Artificiales en entrenarse para diferentes tiempo de tránsito entre el caudal El Jobo y La Hachadura.

Palabras claves: *Pronostico, Redes Neuronales Artificiales, tiempo ventaja, función sigmoidea, función hiperbólica*

INTRODUCCION

Los pronósticos hidrológicos son un componente principal del manejo del riesgo por inundación con el fin de brindar mayor tiempo de anticipación ante la ocurrencia de un evento hidrometeorológico severo. Dichos pronósticos hidrológicos son desarrollados en centro de pronósticos de cada país, con información hidrometeorológica tales como precipitación, temperatura y caudal. Una vez desarrollados estos modelos de pronósticos, los resultados se diseminan a los tomadores de decisión y comunidades que viven en zonas susceptibles a inundación.

Los modelos basados en datos (Data-Driven Models) permiten predecir caudales con deferentes tiempo de anticipación usando solamente información histórica en la cuenca. Sin embargo, la eficiencia de estos modelos decrece conforme se aumenta el tiempo de ventaja, y por lo general, no son muy útiles para pronósticos de caudales mayores al tiempo de concentración de la cuenca.

Para este estudio se seleccionó la cuenca del Rio Paz, la cual pertenece a dos países: El Salvador y Guatemala, siendo este último país el que mayor área territorial posee. Debido a lo anterior, las mayores aportaciones hidrológicas suceden en dicho sector, siendo necesario la recolección de los datos espacial y temporal de la lluvia, ya que es un factor importante para poder pronosticar el caudal en el cauce principal. Actualmente, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador no posee información de lluvia en la parte de la cuenca que pertenece a Guatemala, por lo que se vuelve necesario el pronosticar los caudales en base a dos estaciones hidrométricas, ubicadas en el territorio salvadoreño.

En el presente estudio, se pretende generar un modelo de pronóstico de caudales a futuro en base a la información obtenida en dos estaciones hidrométricas: el Jobo y La Hachadura. La herramienta seleccionada para desarrollar el modelo de pronóstico son las Redes Neuronales Artificiales (ANN, por sus siglas en ingles). El resultado de este modelo puede ser ocupado por los tomadores de decisión, para poder ejecutar medidas de mitigación en eventos hidrometeorológicos extremos. Actualmente, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) no posee este tipo de modelos, por lo que su importancia e innovación, fortalece los resultados de este estudio.

CASO DE ESTUDIO

La cuenca del Rio Paz es una cuenca transfronteriza entre El Salvador y Guatemala. El área superficial es de 2,661

km² del cual el 34% pertenece a El Salvador y el 66% restante pertenece a Guatemala. (Ver Figura 1)

Figura 1: mapa de ubicación de la cuenca hidrográfica del Rio Paz, hasta el punto de control en la estación Hachadura. La cuenca es compartida entre El Salvador y Guatemala, siendo este país la que mayor área de recogimiento tiene.

La información hidrometeorológica disponible corresponde al área de la cuenca que pertenece a El Salvador, tales como nivel y datos de aforo en las estaciones El Jobo y la Hachadura, ubicados aguas arriba y aguas abajo, respectivamente. Dicho periodos de niveles y caudales corresponden a los años 2006, 2013 y 2014. Una limitante de este estudio es la falta de información de la cuenca correspondiente a Guatemala.

Para fines de modelación hidrológica, se ha considerado el área de drenaje hasta el punto de control La Hachadura, ya que la zona susceptible a inundación se encuentra ubicada aguas abajo de este sitio. El área superficial hasta este punto es de 1,995.16 km².

METODOLOGIA

La metodología propuesta en este estudio, esta mostrada en la Figura 2, en donde se pueden visualizar tres fases. La primera fase es correspondiente a la recolección de datos hidrometeorológicos en la cuenca. Para lo anterior, se recolectaron información de nivel y aforos en las estaciones hidrométricas El Jobo y Hachadura. Con la información de aforos, se obtuvo las curvas de descarga para cada estación y posteriormente se transformó la variable nivel en valores de caudal.

En la fase dos, se pretende definir las variables de entrada de los diferentes modelos hidrológicos, así como definir el horizonte del pronóstico a realizar con los datos disponibles.

La fase tres de la investigación está relacionada a la construcción de los modelos de Redes Neuronales Artificiales en base a dos funciones de activación: la sigmoidea y la hiperbólica. Posteriormente, se evaluaron el desempeño de dichos modelos en base a las siguientes formulas

- Error Medio (ME, en inglés)
- Coeficiente Eficiencia o Nash-Sutcliffe (NSE, en inglés)
- Coeficiente de Determinación (R^2),
- Eficiencia de Kling-Gupta (KGE, en inglés),
- La Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE, en inglés)
- El valor normalizado de la Raíz del Error Medio Cuadrático (NRMSE).

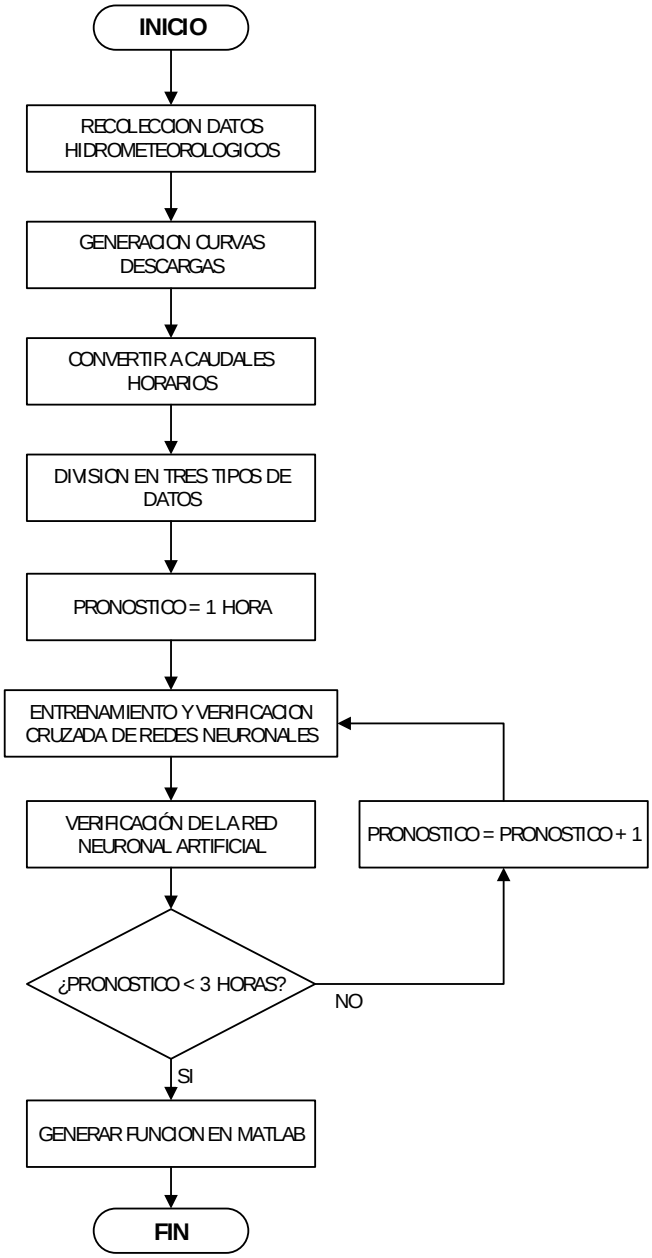

Figura 2: metodología propuesta para generar pronostico corto plazo en el Rio Paz, usando los datos de caudal en las estaciones La Hachadura y El Jobo

GENERACIÓN CURVAS DE DESCARGAS

Los datos de nivel registrados por las estaciones hidrométricas de El Jobo y La Hachadura, fueron convertidos a caudales debido a la variabilidad que muestran el fondo de cauce en estos sitios. Generalmente, se prefiere trabajar con datos de caudal, aunque se podría trabajar con datos de nivel, siempre y cuando la sección transversal del sitio se mantenga estable.

Los datos de aforos corresponden a los años 2005-2014 y 2005-2015 para las estaciones El Jobo y La Hachadura,

respectivamente. Las curvas descargas fueron obtenidas mediante la metodología de mínimos cuadrados y separando familia de curvas en situaciones cuando se observaba cambio en forma de sección. Sin embargo, el trabajo solamente se limitó a verificar las familias de curvas de descarga y no en verificar los cambios en sección transversal en los puntos de control.

Para la estación hidrométrica La Hachadura, se definieron dos familias de curvas correspondientes para los periodos 2005-2009 y 2014-2015. Estas curvas están justificadas en el hecho de que se observaron dos valores de nivel para un solo caudal, lo cual podría deberse a cambios en la sección transversal. Las ecuaciones de dichas curvas, se encuentran definidas en Tabla 1, en donde Q es el valor de caudal en m^3/s y H es el valor de nivel de la estación en metros.

Tabla 1: Formula Curva Descarga en estación La Hachadura

PERIODO VALIDEZ	FORMULA
2005 – 2009	$Q = 37.18 \cdot (H - 0.95)^{1.85}$
2014 – 2015	$Q = 120.33 \cdot (H - 1.85)^{1.41}$

De forma similar, se elaboraron dos familias de curvas para la estación El Jobo. Es de hacer notar, que la justificación de la cantidad de curvas ocupadas en este sitio fue debido a que se observó mucho cambio de profundidad que podría deberse a erosión en el fondo del cauce.

Tabla 2: Fórmula de Curva Descarga en estación El Jobo

PERIODO VALIDEZ	FORMULA
2005 – 2009	$Q = 59.04 \cdot (H - 1.20)^{1.88}$
2009 – 2014	$Q = 44.71 \cdot (H - 1.08)^{1.95}$

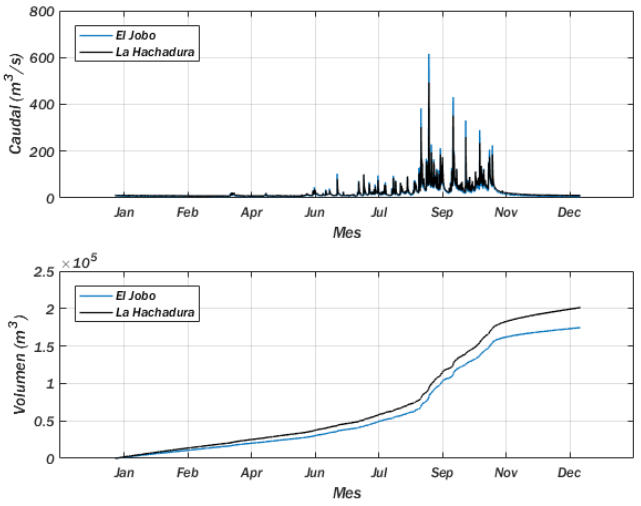

Figura 3: caudal observado en las estaciones El Jobo (azul) y la Hachadura (negro) correspondiente al año 2007. Figura inferior muestra el volumen correspondiente al mismo año

Adicionalmente, se realizó una validación de caudales en las estaciones El Jobo y la Hachadura, en donde se espera mayor cantidad de agua en la última estación. Figura 3 muestra registro de hidrograma y volumen acumulado correspondiente al año 2007. En dicha figura se observa la traslación entre la estación Aguas Arriba (El Jobo) y la ubicada Aguas Abajo (La Hachadura). Además se observa un mayor volumen acumulado en la estación Aguas Abajo, lo cual es el resultado esperado en estos casos.

PREPARACIÓN DE LOS DATOS

Posterior a la conversión de datos de caudales en formato de minutos a horarios, estos últimos fueron divididos en tres tipos de datos:

- **Entrenamiento:** consiste en el mayor porcentaje de datos disponibles y con el cual se entrena la Red Neuronal Artificial.
- **Validación Cruzada:** consiste en la serie de datos con el cual se verifica que el modelo no sobre ajuste la función de la serie de entrenamiento y que permita obtener un modelo más general.
- **Verificación:** esta serie de datos corresponde a la más pequeña de todos los datos disponible, con el fin de evaluar el modelo con una serie que no estuvo involucrada en su entrenamiento ni en su validación cruzada.

Con esta información, se pretende generar modelos que pronostiquen caudales y niveles en la estación La Hachadura con tiempo de ventajas de 1, 2 y 3 horas.

PRONOSTICO HIDROLOGICO 1 HORA TIEMPO VENTAJA

Una vez definido el horizonte del pronóstico hidrologico a realizar, se construyen modelos específicos para cada uno de los tiempos de ventajas definidos anteriormente. El primer paso es definir las variables de entrada del modelo y cuanta información puede transmitirle dicha variable al pronóstico hidrologico de 1 hora. Posteriormente, se entrenaron las redes neuronales con dos funciones de activación (Sigmoidea e Hiperbólica) y se evaluaron sus funciones de desempeño en la etapa de verificación del modelo.

Análisis de independencia entre variables

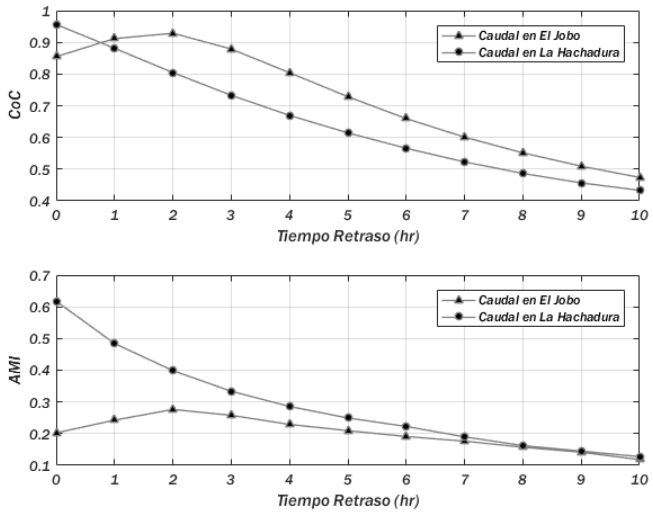

Figura 4: Análisis de Coeficiente de Correlación (CoC) e Información Mutua Media (AMI) para pronóstico de caudales con 1 hora de tiempo de anticipación

El análisis de interdependencias entre variables pretende encontrar las variables de entrada del modelo conforme a un análisis Coeficiente de Correlación (CoC) e

Información Mutual Media (AMI, por sus siglas en ingles). Figura 4 muestra el resultado de dicho análisis en donde se puede observar que un caudal de 2 horas de retraso en la estación el Jobo, brinda mucha información al caudal pronosticado de 1 hora de tiempo de ventaja en la estación Hachadura. De igual forma, la autocorrelación de caudales en la estación Hachadura, muestra que los valores de caudales hasta 3 horas pasadas brindan mucha correlación al caudal pronosticado.

Del análisis mostrado en Figura 4, se definieron las variables de entrada para el caudal pronosticado con 1 hora de tiempo de ventaja, dicha expresión matemática se puede observar en la siguiente ecuación

Ecuación 1: expresión matemática del experimento A-1

$$Q_{h,t+1} = f\left(Q_{j,t-2}, Q_{j,t-1}, Q_{j,t}, Q_{h,t-3}, Q_{h,t-2}, Q_{h,t-1}, Q_{h,t}\right)$$

La expresión matemática mostrada anteriormente, involucra tanto variables de caudal en la estación el Jobo como los registrados en la estación hidrométrica Hachadura.

Como un experimento alterno, se hizo una función en el cual no involucrara los registros de caudales en la estación Hachadura, siendo solamente ocupado los caudales en la Estación El Jobo. Dicha expresión matemática, es mostrada a continuación

Ecuación 2: expresión matemática del experimento A-2

$$Q_{h,t+1} = f\left(Q_{j,t-2}, Q_{j,t-1}, Q_{j,t}\right)$$

Los dos experimentos detallados en Ecuación 1 y Ecuación 2, fueron comparados con respecto al Modelo Naive, con el fin de establecer una referencia en donde los desempeños menores a dicho modelo Naive, no se considera como soluciones que se puedan usar en pronostico hidrologico. Este modelo de referencia no requiere parámetros y solamente ocupa información de caudales pasados, como se detalla en la siguiente ecuación:

Ecuación 3: expresión matemática del modelo Naive o de referencia para el cálculo del caudal con 1 hora de tiempo de ventaja en la estación La Hachadura

$$Q_{h,t+1} = Q_{h,t}$$

PRONÓSTICO HIDROLOGICO 2 HORA TIEMPO VENTAJA

En esta sección se construyó modelos con arquitectura de Redes Neuronales Artificiales con el fin de pronosticar caudales con 2 horas de anticipación. Posteriormente, los resultados de los modelos fueron comparados con el modelo de referencia Naive mediante la evaluación de funciones de error, detalladas en la sección de metodología.

<u>Análisis de interdependencia entre variables</u>

Similar al análisis realizado en la construcción del modelo de pronóstico hidrologico con 1-hora de tiempo de ventaja, se realizó un análisis de correlación (CoC) e Información Mutua Media (AMI) con el fin de encontrar las variables de caudales pasados, en las dos estaciones hidrométricas, que permitan pronosticar caudales con 2 horas de tiempo de ventaja en la estación La Hachadura.

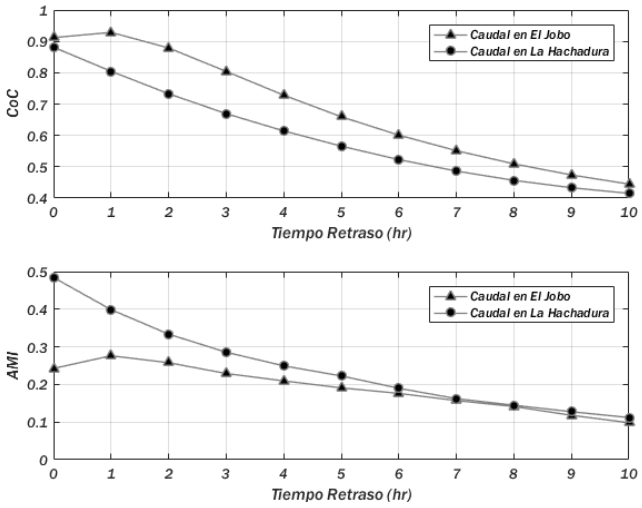

Figura 5: Análisis de Coeficiente de Correlación (CoC) e Información Mutua Media (AMI) para pronóstico de caudales con 2 hora de tiempo de anticipación

Figura 5 muestra los resultados del análisis del Coeficiente de Correlación e Información Mutua Promedio para diferentes tiempos de retraso. En dicha figura, se puede observar que las máximas correlaciones y valores de AMI ocurren hasta 1 hora de tiempo de retraso, en la estación El Jobo. Asimismo, los valores de autocorrelación en la estación Hachadura muestran que los caudales pasados hasta 2 horas, brinda mayor información al caudal pronosticado con 2 horas de tiempo de ventaja. Debido a lo mencionado anteriormente, la expresión matemática para el pronóstico de caudales con 2 horas de tiempo de anticipación, es la siguiente

Ecuación 4: expresión matemática para pronóstico caudal con 2 horas de tiempo de ventaja en la estación Hachadura

$$Q_{h,t+2} = f\left(Q_{j,t-1}, Q_{j,t}, Q_{h,t-2}, Q_{h,t-1}, Q_{h,t}\right)$$

PRONOSTICO HIDROLOGICO 3 HORAS TIEMPO VENTAJA

Similar a las secciones mostradas anteriormente, se realizó un modelo hidrologico con Redes Neuronales Artificiales para pronosticar caudales con 3 horas de tiempo de ventaja. Los desempeños de los modelos fueron evaluados mediante diversas funciones de error, las cuales fueron descritas en secciones anteriores. Asimismo, los resultados se compararon con un modelo de referencia Naive, con el fin de verificar que los resultados obtenidos con Redes Neuronales Artificiales fueran mejores que un modelo de referencia.

<u>Análisis de interdependencia entre variables</u>

De forma similar a los procedimientos realizados en los modelos generados anteriormente, se definieron las variables de entrada del modelo de pronóstico para 3 horas de tiempo de anticipación, usando herramientas estadísticas tales como el Coeficiente de Correlación (CoC) y la Información Mutual Media (AMI). Los resultados mostrados en Figura 6 muestran que el caudal actual en la estación El Jobo, brinda la mayor cantidad de

información para la salida del modelo. Asimismo, los valores auto correlativos actual y con una hora de retraso, en la estación Hachadura, brindan los mayores valores de correlación e Información Mutua Media. En base a lo mencionado anteriormente, la función matemática para el cálculo del caudal pronosticado con 3 horas de tiempo de ventaja, se detalla a continuación:

Ecuación 5: función matemática para el cálculo del caudal en la estación Hachadura, con 3 horas de tiempo de ventaja

$$Q_{h,t+3} = f\left(Q_{j,t}, Q_{h,t-1}, Q_{h,t}\right)$$

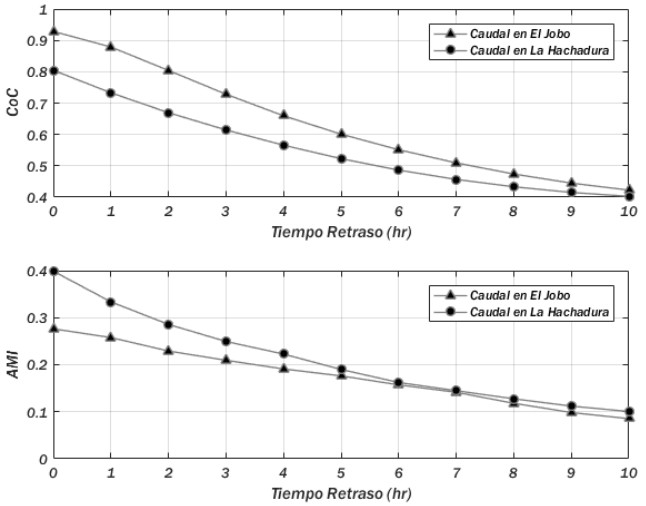

Figura 6: Análisis de Coeficiente de Correlación (CoC) e Información Mutua Media (AMI) para pronóstico de caudales con 3 hora de tiempo de anticipación

Tabla 3 muestra un resumen de las variables de entrada y salida de cada uno de los modelos de Redes Neuronales Artificiales.

Tabla 3: Resumen de variables de entrada y funciones de activación para diferentes modelos de pronostico hidrologico

VARIABLE ENTRADA	VARIABLE SALIDA	ANN-Función Activación
$Qj_{,t-2}$, $Q_{j,t-1}$,$Q_{j,t}$,$Q_{h,t-3}$, $Q_{h,t-2}$, $Q_{h,t-1}$,Q_h	$Q_{h,t+1}$	Sigmoidea, Hiperbólica
$Q_{j,t-1}$,$Q_{j,t}$, $Q_{h,t-2}$, $Q_{h,t-1}$,Q_h	$Q_{h,t+2}$	Sigmoidea, Hiperbólica
$Q_{j,t}$, $Q_{h,t-1}$,Q_h	$Q_{h,t+3}$	Sigmoidea, Hiperbólica

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente estudio tiene como objetivo elaborar modelos hidrológicos para pronóstico de caudales usando dos tipos de funciones de activación de redes neuronales: sigmoidea e hiperbólica. Asimismo, se elaboraron modelos de referencia con el fin de verificar si los modelos de Redes Neuronales Artificiales brindan mejores resultados que su respectivo modelo de referencia. Los resultados de cada uno de los modelos de pronósticos hidrológicos, se detallan a continuación:

Pronostico hidrologico 1 hora de tiempo de ventaja

En esta sección fueron evaluados dos experimentos de redes neuronales, detallados anteriormente. La justificación de la aplicación del experimento A-2, radica en cuantificar el alcance del pronóstico en la estación La Hachadura (aguas arriba), usando información de la estación El Jobo (aguas abajo). Estos experimentos fueron comparados con el caudal observado mediante inspección visual y cálculo de funciones de error, los cuales fueron detallados en la parte de metodología.

Tabla 4 muestra los cálculos de funciones de error para los dos experimentos usando Redes Neuronales Artificiales (ANN). En dicha tabla se puede observar que los experimentos A-1 brindan mejores resultados comparados al modelo de referencia Naive, ya que el valor del RMSE es de 5.13 y 5.73, para funciones Sigmoidea e Hiperbólica, respectivamente. Asimismo, los resultados del experimento A-2 no muestran una mejor representación del caudal observado comparado al modelo de Referencia Naive, ya que el valor del RMSE supera los 9.09 m^3/s, para ambas funciones de activación. Por lo tanto, los resultados de cálculo del caudal en la estación Hachadura, usando solamente información del caudal en El Jobo, no se recomiendan usar para el pronóstico hidrologico con un tiempo de ventaja de 1 hora.

Tabla 4: Calculo del error a la serie de datos de verificación, para los diferentes experimentos propuestos.

FUNCION	Naive	A-1 (Sig.)	A-1 (Hyp.)	A-2 (Sig.)	A-2 (Hyp.)
ME (m^3/s)	0.01	0.35	0.14	3.67	3.70
NSE (-)	0.87	0.95	0.94	0.81	0.81
RMSE(m^3/s)	8.29	5.13	5.73	10.42	10.32
NRMSE (-)	0.35	0.22	0.24	0.44	0.43
R^2 (-)	0.88	0.95	0.94	0.83	0.84
KGE (-)	0.94	0.97	0.96	0.85	0.86

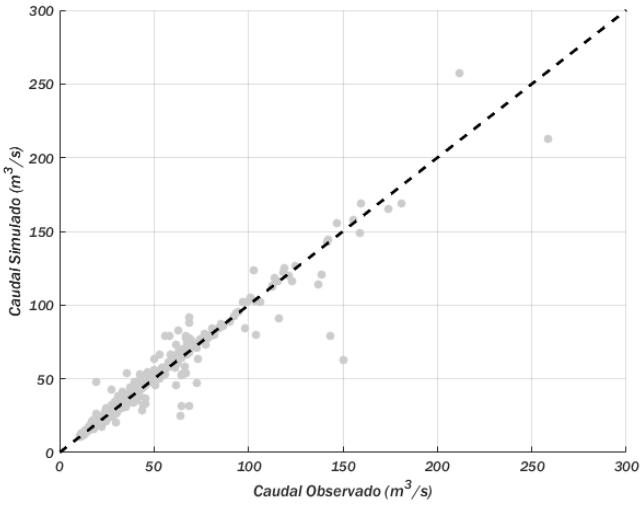

Figura 7: Gráfico de dispersión entre el caudal observado y simulado para un pronóstico hidrológico con 1 hora de tiempo de anticipación, en la estación Hachadura. La serie corresponde a los datos de verificación.

De forma similar, los resultados del experimento A-1, muestran que la función Sigmoidea brinda un menor valor del error, comparado a la función hiperbólica. Por lo tanto, la función sigmoidea del experimento A-1, brinda

un mejor resultado para el pronóstico del caudal con un tiempo de ventaja de 1 hora, en la estación hidrométrica La Hachadura.

Figura 7 muestra un gráfico de dispersión que relaciona la variable del caudal observado en la estación Hachadura y el respectivo caudal simulado usando Redes Neuronales Artificiales con función de activación Sigmoidea. El grafico detalla buena correlación entre las dos variables, existiendo algunos sesgos. Adicionalmente, se presenta en Figura 8 el grafico de caudal observado y simulado, en donde se observa una muy buena representación del caudal observado por parte del modelo de pronóstico. Este tipo de análisis valida la arquitectura del modelo de pronóstico usando en esta sección.

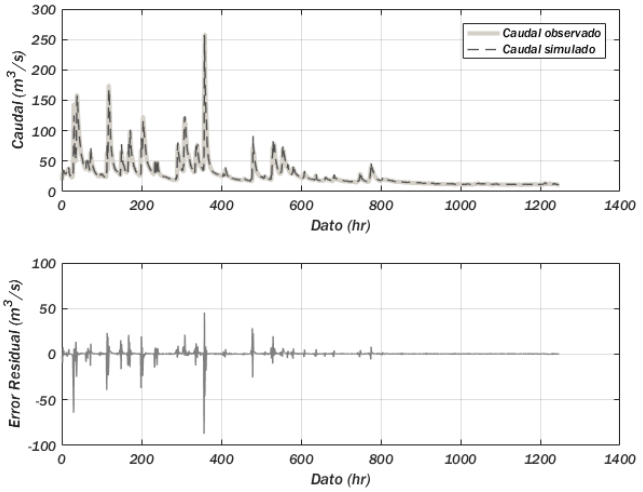

Figura 8: Comparación entre el caudal observado y el caudal simulado en la etapa de verificación. La imagen inferior brinda el error residual entre las dos variables.

Pronóstico Hidrológico 2 horas de tiempo de ventaja

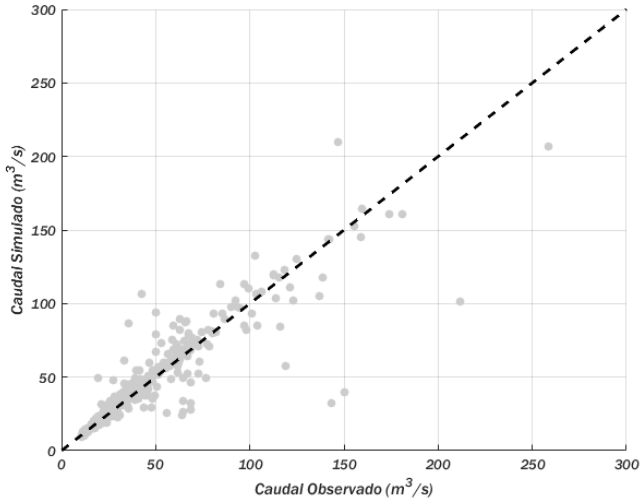

Figura 9: Gráfico de dispersión entre el caudal observado y simulado para un pronóstico hidrológico con 2 hora de tiempo de anticipación, en la estación Hachadura. La serie corresponde a los datos de verificación

Los resultados usando Redes Neuronales Artificiales con funciones de activación Hiperbólica y Sigmoidea, son mostrados en Tabla 5, en donde se puede observar que ambas funciones de activación brindan mejores resultados que el modelo de referencia Naive. Asimismo, el modelo hidrologico de Red Neuronal Artificial con función de activación Sigmoidea brinda un mejor desempeño comparado con el de función activación hiperbólica, debido a que el NRMSE es de 0.35 con un RMSE de 8.40 m^3/s. Por lo anterior, esta arquitectura ha sido seleccionada para pronóstico hidrológica con un tiempo de ventaja de 2 horas.

Tabla 5: funciones de error entre el caudal observado y simulado para pronostico hidrologico con 2 horas tiempo de ventaja, en la etapa de verificación

FUNCION	Naive	Sigmoidea	Hiperbólica
ME (m^3/s)	0.01	0.56	0.48
NSE (-)	0.68	0.88	0.87
RMSE (m^3/s)	13.47	8.40	8.48
NRMSE (-)	0.56	0.35	0.36
R^2 (-)	0.71	0.88	0.87
KGE (-)	0.84	0.93	0.92

El diagrama de dispersión entre los datos observados y simulados es mostrado en Figura 9 en donde se puede observar una buena representación del caudal observado, encontrando algunos eventos de caudales que fueron subestimados. Asimismo, Figura 10 muestra una comparación entre el caudal observado y simulado en la etapa de verificación, en donde se verifica la buena representación del caudal observado.

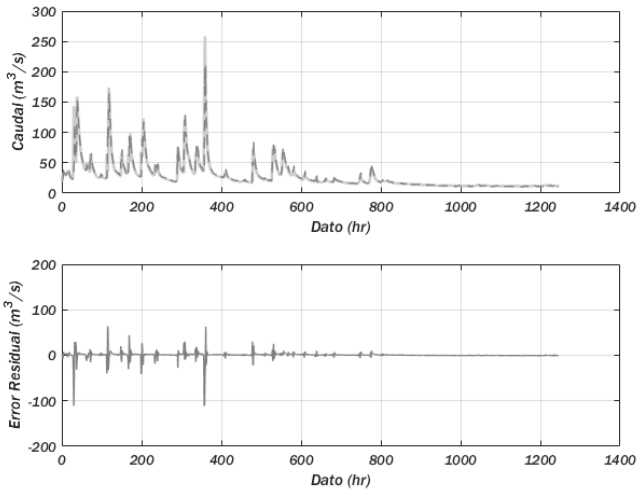

Figura 10: Comparación entre el caudal observado y el caudal simulado en la etapa de verificación. La imagen inferior brinda el error residual entre las dos variables.

Pronóstico Hidrológico 3 horas de tiempo de ventaja

Tabla 6: funciones de error entre el caudal observado y simulado para pronostico hidrologico con 2 horas tiempo de ventaja, en la etapa de verificación

FUNCION	Naive	Sigmoidea	Hiperbólica
ME (m^3/s)	0.02	1.42	1.48
NSE (-)	0.50	0.83	0.84
RMSE (m^3/s)	16.83	9.74	9.57
NRMSE (-)	0.71	0.41	0.40
R^2 (-)	0.56	0.84	0.85
KGE (-)	0.75	0.90	0.90

En esta sección se discuten los resultados del pronóstico hidrologico para un tiempo de ventaja o anticipación de 3 horas, usando la arquitectura de Redes Neuronales

Artificiales con dos funciones de activación: sigmoidea e hiperbólica. Los resultados están mostrados en Tabla 6 en donde se puede observar que ambas funciones de activación brindan mejores resultados que el modelo de referencia Naive. Asimismo, la función de activación hiperbólica brinda un mejor resultado comparado a la función sigmoidea. Por lo tanto, la primera función de activación ha sido seleccionada como modelo de pronóstico hidrológico con 3 horas de tiempo de anticipación.

Figura 11 muestra el diagrama de dispersión que estable una relación entre el caudal observado y el simulado, con los datos de verificación. En dicha figura, se puede apreciar una buena reproducción del caudal observado, con la existencia de cuatro eventos subestimados. Asimismo, Figura 12 muestra la comparación entre los caudales observados y los simulados usando Redes Neuronales Artificiales con función de activación Hiperbólica.

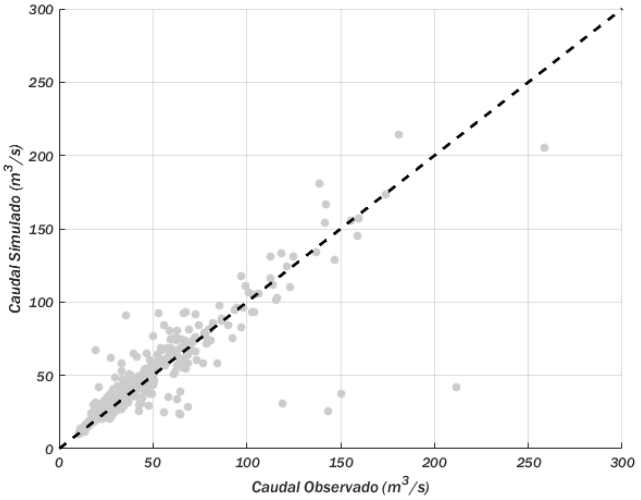

Figura 11: Gráfico de dispersión entre el caudal observado y simulado para un pronóstico hidrológico con 3 hora de tiempo de anticipación, en la estación Hachadura. La serie corresponde a los datos de verificación

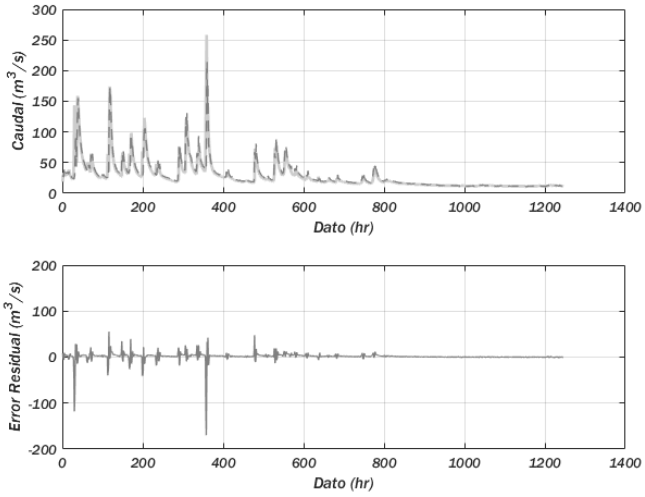

Figura 12: Comparación entre el caudal observado y el caudal simulado en la etapa de verificación. La imagen inferior brinda el error residual entre las dos variables.

Los tres modelos de pronósticos con 1, 2 y 3 horas de tiempo de ventaja, permiten predecir caudales con una buena precisión. Con se puede observar en los valores de Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6; los resultados de precisión de los modelos decrece a medida se aumenta el tiempo de ventaja.

CONCLUSIONES

El presente estudio pretendía evaluar y construir modelos de pronósticos hidrológicos, para diferentes tiempos de ventaja, usando arquitectura de Redes Neuronales Artificiales para la cuenca del Rio Paz. Para cumplir con el objetivo mencionado anteriormente, se realizó una limpieza de datos hidrometeorológicos de nivel en las estaciones El Jobo y La Hachadura. Posteriormente, estos datos fueron transformados a unidades de caudal usando información de curvas de descargas, las cuales fueron obtenidas durante esta investigación. A continuación, se dividieron los datos disponible en tres tipos, con el fin de entrenar la Red Neuronal Artificial, evitar el sobre ajuste de la función de pronostico hidrologico y verificar el desempeño del modelo. Cabe mencionar que para este estudio se ocuparon dos funciones de activación, tales como una función sigmoidea y una hiperbólica. Finalmente, los resultados fueron comparados con un modelo de referencia denominado Naive, mediante inspección visual así como cálculos de funciones de error entre el caudal observado y el simulado.

Las curvas de descarga fueron elaboradas con la información recolectada en campo, los cuales siempre son realizados en flujos bajos y no en altos. Este aspecto resulta de vital importancia, ya que existe incertidumbre en los caudales altos. Asimismo, los parámetros de la curva de descarga son otra fuente de incertidumbre, ya que no son parámetros que se pueden comparar con la realidad. Otras fuentes de incertidumbre de las curvas de descargas son:

- Incertidumbre observacional, debido a que las mediciones siempre tienen cierto grado de error y son de fuente aleatoria.
- Incertidumbre por el método de extrapolación de caudales altos.

Las definiciones de fuente de incertidumbre en la curva de descarga son importantes para un posterior análisis de incertidumbre. Este análisis es importante realizarlo para los pronósticos hidrológicos, debido a que el caudal pronosticado está sujeto a fuente de error y por lo tanto, reducir la credibilidad del pronóstico.

Los resultados de los modelos revelan buena representación entre el caudal observado y el simulado para los tres tipos de pronósticos hidrológicos elaborados (1, 2 y 3 horas de tiempo de ventaja). Sin embargo, se observó algunos eventos (puntos) no muy bien representado por el modelo. Esta situación podría deberse a la limitante del modelo en representar tránsito de hidrogramas, debido a que este fenómeno no tiene un tiempo de transito fijo, ya que dependiendo de la magnitud del caudal y la rugosidad del cauce se tienen diferentes tiempos de tránsitos entre las estaciones El Jobo y La Hachadura.

Los parámetros de los modelos entrenados y verificados usando Redes Neuronales Artificiales, fueron escritos en lenguaje de programación MATLAB, con el fin de ser ocupados en operatividad para el pronóstico hidrologico.