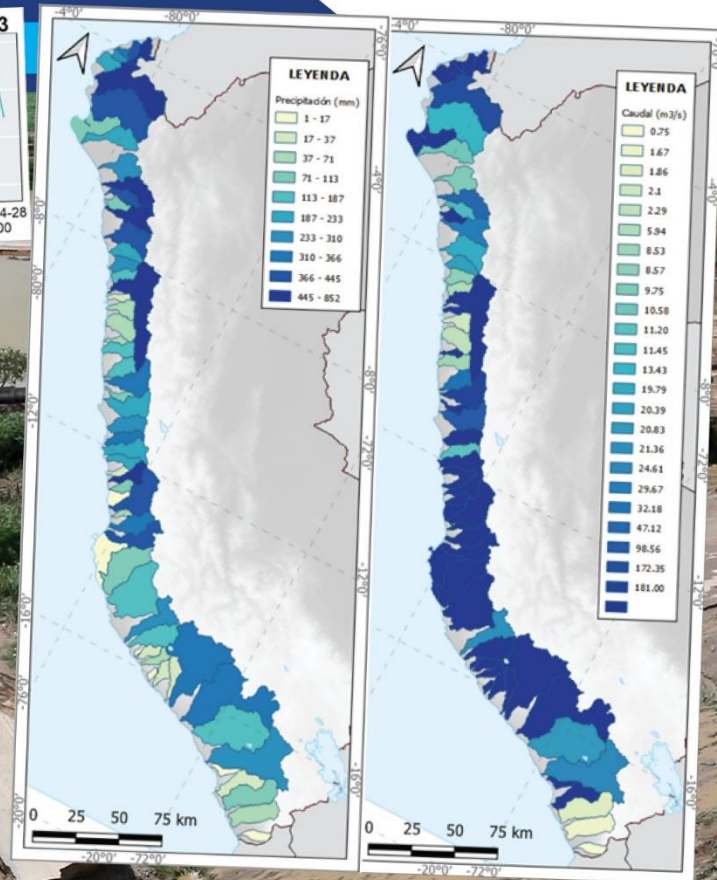


ESTIMACIÓN DE HIDROGRAMAS HORARIOS DE CAUDALES EN LA VERTIENTE DEL PACÍFICO

ESTUDIO FINAL



Citar:

Gutierrez, L.; Lavado-Casimiro, W. y Felipe, O. (2022). Estimación de hidrogramas horarios de caudales en la vertiente del Pacífico. Estudio Final. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI.

<https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1785>

ESTIMACIÓN DE HIDROGRAMAS HORARIOS DE CAUDALES EN LA VERTIENTE DEL PACÍFICO

ESTUDIO FINAL





DIRECTORIO

PhD. Guillermo Antonio Baigorria Paz
PRESIDENTE EJECUTIVO DEL SENAMHI

Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando
DIRECTOR DE HIDROLOGÍA DEL SENAMHI

PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS DEL
SENAMHI

REVISORES DEL ESTUDIO

PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro
Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando

AUTORES

Ing. Leonardo Flavio Gutierrez Lope
PhD. Waldo Sven Lavado Casimiro
Ing. Oscar Gustavo Felipe Obando

Lima-Perú
Mayo – 2022

Contenido

1	Introducción	8
2	Materiales y Métodos	8
2.1	Área de estudio	8
2.2	Caudales observados	9
2.3	Caudales simulados: SONICS.....	10
2.4	Precipitación: PISCOp V2.2.....	11
2.5	Estimación de umbrales de inundación.....	11
2.6.1	Métodos empíricos	13
2.6.2	Métodos de redes neuronales artificiales	13
2.7	Desagregación de caudales diarios de eventos de inundación a escala horaria	14
3	Resultados y Discusiones	16
3.1	Eventos de inundación.....	16
3.2	Red neuronal artificial para la estimación de caudales pico instantáneos	16
3.3	Evaluación de la estimación de caudales pico instantáneos.....	18
3.4	Obtención de parámetros y desagregación de los hidrogramas diarios a horarios de caudales	22
4	Conclusiones	24

Contenido de figuras

Figura 1. Ubicación de estaciones hidrométricas hidrológicas en las Unidades Hidrográficas y regiones climáticas del SENAMHI	10
Figura 2. Identificación de eventos de inundación.....	12
Figura 3. Metodología general	14
Figura 4. Parámetros para la obtención del índice de pendiente del hidrograma de volumen unitario (SIUVFH).....	15
Figura 5. PPY para unidades hidrográficas agrupadas por región climática	16
Figura 6. Precipitación promedio areal multianual en mm y umbrales de inundación en m ³ /s a escala de UH en la VP.....	17
Figura 7. Rendimiento de la ANN en RMSE a lo largo de cada iteración.....	18
Figura 8. Coeficiente de determinación (R ²) de los métodos de estimación de IPF con los IPF observados	19
Figura 9. Relación entre el IPF estandarizado y el SIUVFH estandarizado (unidad: m ³ /s/ (86,400 m ³))	22
Figura 10. Comparación de los caudales observados y desagregados en la UH 1394, durante el 2011-04-18.....	23
Figura 11. Comparación de los caudales observados y desagregados a escala horaria de los eventos de inundación	25

Contenido de tablas

Tabla 1: Estaciones hidrométricas automáticas (EHA) y convencionales (EHC)	11
Tabla 2: Umbrales de inundación.....	12
Tabla 3: Ubicación de estaciones hidrométricas automáticas (EHA) y convencionales (EHC).....	13
Tabla 4: Umbrales de inundación y parámetros geomorfológicos de las UH de la VP 20	
Tabla 5: Valores de Pbias por estación.....	21
Tabla 6: Valores de RMSE por estación	21

Resumen

Los hidrogramas de inundación de alta resolución temporal son empleados para el diseño de estructuras hidráulicas, operación de embalses, análisis de máximas avenidas, identificación de riesgos ante movimientos de masa y sistemas de alerta temprana ante inundaciones. Esta información es obtenida normalmente mediante modelizaciones hidrológicas complejas que relacionan la precipitación y la escorrentía. Es esta investigación, se propone un método para combinar un modelo de red neuronal artificial (ANN) para la estimación de caudales pico instantáneos y el método índice de pendiente del hidrograma de volumen unitario (SIUVFH) para la desagregación de caudales promedio diarios en caudales a escala horaria. Este último método se basa en la correlación entre el caudal pico del evento de inundación y el índice de pendiente, obtenido a partir de la diferencia entre el caudal pico diario de inundación y el caudal promedio diario de días previos al pico de inundación. Esta relación determinará la selección del hidrograma unitario de inundación que será reescalado con el volumen del hidrograma diario de inundación, por ello, esta relación será optimizada mediante la obtención del caudal pico del evento de inundación a partir de modelos de redes neuronales artificiales. La construcción del modelo de ANN, requirió de caudales promedio diarios y precipitación promedio areal durante el día pico y días adyacentes a ese día, además de parámetros geomorfológicos de la cuenca hidrográfica. La estructura óptima de ANN se determinó mediante la optimización de Adam, encontrando un alto rendimiento respecto a los métodos empíricos, según el estadístico del coeficiente de determinación de 0.96, respecto a los datos observados de los hidrogramas horarios de referencia y una raíz del error cuadrático medio de 82.3 m³/s para los datos de validación. La aplicación del caudal pico basado en ANN y la desagregación de caudales con el método de SIUVFH nos proporcionó información de caudales horarios desagregados en las 55 unidades hidrográficas de la vertiente del Pacífico.

ESTIMACIÓN DE HIDROGRAMAS HORARIOS DE CAUDALES EN LA VERTIENTE DEL PACÍFICO

1. Introducción

Los hidrogramas de inundación de alta resolución temporal son útiles para el diseño de estructuras hidráulicas, operación de embalses, análisis de máximas avenidas, identificación de riesgos ante movimientos de masa y sistemas de alerta temprana ante inundaciones. En la vertiente del Pacífico de Perú, esta información es escasa, incluso a escala diaria (Llauca et al., 2021). Por ello, en general se emplean modelos hidrológicos complejos para estimar los hidrogramas con caudales máximos instantáneos (IPF) (Hromadka II, 1990). Es por ello, que usaremos hidrogramas de caudales horarios para obtener los IPF y posteriormente desagregar series de caudales a escala diaria durante los eventos de inundación en zonas de escasa información hidrológica, con la condición de compartir características hidro-meteorológicas similares con vertientes que contengan esta información de resolución horaria.

La estimación del IPF, se puede realizar mediante tres grupos de métodos a partir del MDF (Chen et al., 2017). El primer grupo de métodos establece una relación entre el IPF y el correspondiente caudal máximo diario promedio (MMDF) y características geomorfológicas de la cuenca. El segundo grupo estima el IPF utilizando la secuencia de caudales promedio diarios. Por último, el siguiente grupo utiliza un método de desagregación de caudales, mediante modelos de aprendizaje automático y modelos de regresión múltiple con el MMDF simulado (Jimeno-Sáez et al., 2017).

Por ello, esta investigación tiene como objetivos aplicar un método de estimación de los caudales pico instantáneos de los eventos de inundación, basado en modelos de redes neuronales y el índice de pendiente del hidrograma de volumen unitario para desagregar el hidrograma diario de los eventos de inundación, en las 55 unidades hidrográficas de la vertiente del Pacífico.

2. Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

La Vertiente del Pacífico (VP) cubre una extensión de 278 482.44 km² que representa el 21.7 % del área total del país. Está comprendida entre las latitudes: 3°S hasta los 19°S y las longitudes oeste 81.5°S y 69.5°S (Mapa M-01). Presenta una alta variabilidad hipsométrica, desde el nivel del mar hasta los 6500 m.s.n.m. (Mapa M-03), por ello, se registran múltiples climas desde climas áridos hasta glaciares (Castro et al., 2021).

Se constituye por 74 unidades hidrográficas, pertenecientes a las siguientes 5 Autoridades Administrativas del Agua (AAA) que se visualizan en el Mapa M-05: Caplina-Ocoña (I), Chaparra-Chincha (II), Cañete-Fortaleza (III), Huarmey-Chicama (IV) y Jequetepeque-Zarumilla (V). Además, posee aproximadamente de 62 ríos que la cruzan en dirección este- oeste, con excepción del río Santa, que sigue una orientación inicial de sur a norte; y del río Piura, que tiene un trazo final de norte a sur. Los ríos de la VP nacen en el flanco occidental de la Cordillera de los Andes, entre los 4 000 y 6 000 msnm. Sus cursos de agua se alimentan principalmente de las precipitaciones estacionales que tienen lugar en la parte alta, lo que da origen a un régimen de escurrimiento irregular y de carácter torrencioso.

Los caudales se producen a lo largo de tres a cuatro meses al año, principalmente entre diciembre a marzo, período durante el cual se estima que fluye entre 60 y 70 % del escurrimiento total anual, tendiendo durante el resto del año a tener un período de estiaje. Esto queda en evidencia cuando un 75 % de los ríos de esta región se seca durante el período de estiaje ANA (2012).

En esta vertiente el deshielo de nevados es una fuente natural de agua de relativa importancia. Destacan las cuencas del río Santa y Cañete, con un área de glaciares de 312.18 y 13.11 km², respectivamente INAIGEM (2018). Además, en las cabeceras de las cuencas cada año se incrementa la cantidad de lagunas ANA (2019).

2.2 Caudales observados

La VP dispone de 12 estaciones hidrológicas automáticas (EHA) y convencionales (EHC), las cuales tienen mayor presencia en las AAA I, III y V (Figura 1). En la Tabla 1, se describe la ubicación de las estaciones hidrológicas distribuidas en las 3 regiones climáticas del SENAMHI (Castro et al., 2021), estas estaciones tienen una resolución temporal horaria y cuentan con información en el periodo del 2007 al 2020.

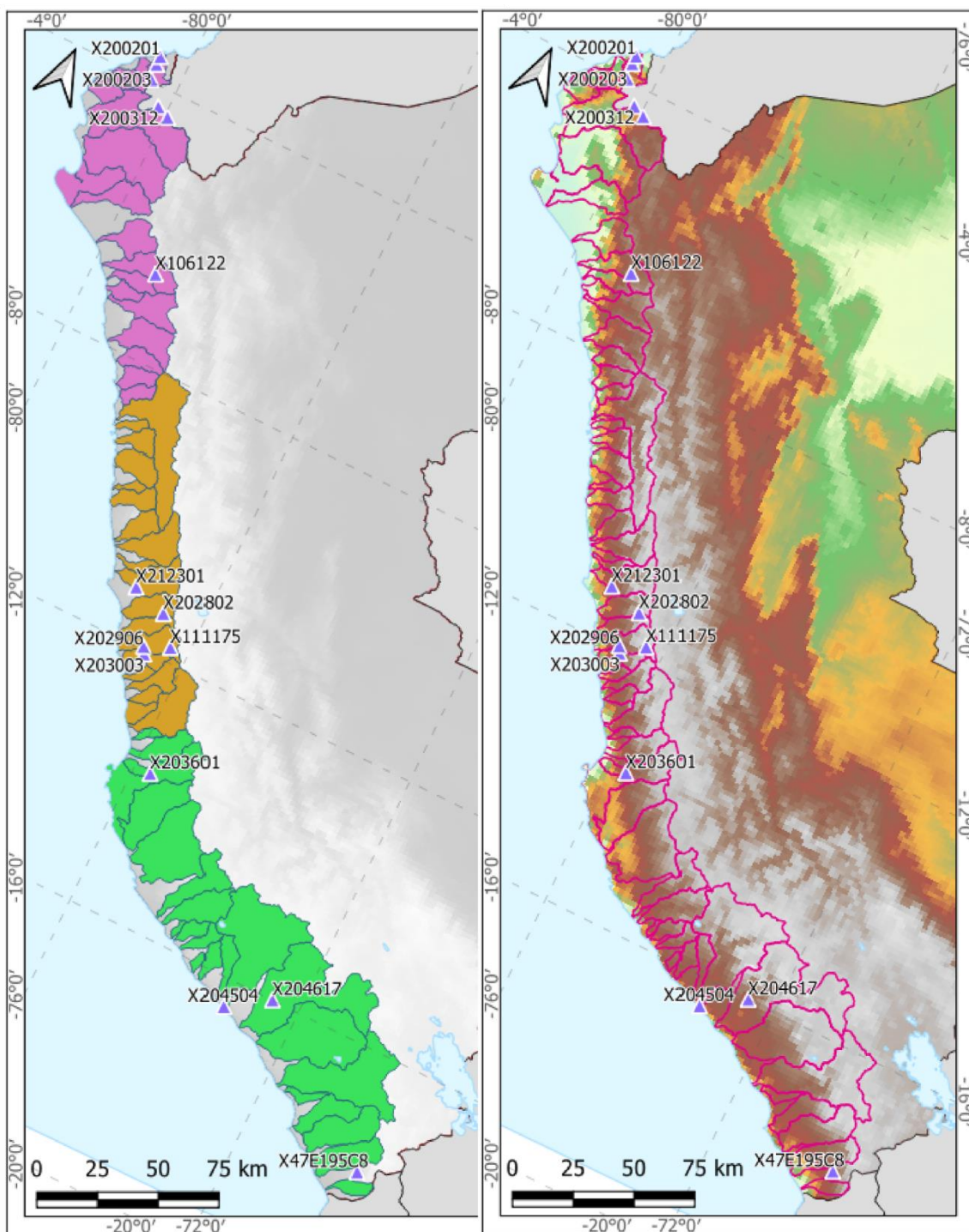


Figura 1. Ubicación de estaciones hidrométricas hidrológicas en las Unidades Hidrográficas y regiones climáticas del SENAMHI

2.3 Caudales simulados: SONICS

El producto SONICS es el resultado de una modelización hidrológica con el modelo GR4J para la generación de caudales diarios a escala de subcuencas en toda la extensión geográfica de Perú. Es un producto operativo, por su utilidad en la

identificación de alertas de inundaciones, por ello, tiene caudales actualizados a tiempo cuasi-real. Para este estudio se seleccionaron las subcuencas ubicadas en la vertiente final de cada unidad hidrográfica de la VP, con el periodo de tiempo de 1981-2020.

Tabla 1: Estaciones hidrométricas automáticas (EHA) y convencionales (EHC)

ID	Código	Nombre	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (msnm)	Área (km ²)	Código UH	Nombre UH	AAA	Región
E01	X203003	Antapucro	-76.633	-12.034	1300	1027.829	X1375534	Lurín	III	2
E02	X200203	Cabo Inga	-80.433	-3.967	205	4296.422	X1394	Tumbes	V	1
E03	X47E195C8	Challata	-70.098	-17.816	1540	607.88	X13156	Caplina	I	3
E04	X202906	Chosica	-76.69	-11.930	906	2307.543	X137554	Rímac	III	2
E05	X106122	Cirato	-79.051	-6.661	1000	1587.376	X138	Chira	V	1
E06	X200312	El Ciruelo	-80.150	-4.300	202	6986.281	X138	Chira	V	1
E07	X200202	El Tigre	-80.467	-3.717	45	4764.074	X1394	Tumbes	V	1
E08	X204617	Huatipa	-72.471	-15.995	699	13422.531	X134	Camaná	I	3
E09	X203601	Letrayoc	-75.729	-13.661	1125	3382.641	X13752	Pisco	II	3
E10	X202802	Obrajillo	-76.633	-11.334	2700	388.45	X137558	Chancay-Huaral	III	2
E11	X204504	Ocoña	-73.115	-16.422	23	15913.221	X136	Ocoña	I	3
E12	X200309	Pte. Int. Macara	-79.950	-4.384	421	2553.304	X138	Chira	V	1
E13	X200201	Pte. Tumbes	-80.467	-3.584	15	5303.018	X1394	Tumbes	V	1
E14	X111175	San Mateo	-76.301	-11.761	3182	460.595	X137554	Rímac	III	2
E15	X212301	Sayan	-77.2	-11.15	672	3528.981	X13756	Huaura	III	2

2.4 Precipitación: PISCOp V2.2

El producto PISCOp V2.2 es un producto grillado de precipitación, obtenido a partir de la mezcla geo-estadística de datos observados de estaciones pluviométricas del Perú con productos satelitales de precipitación de escala global, está elaborado siguiendo la metodología de Aybar Camacho et al. (2020). La extensión geográfica de este producto es para Perú con una resolución espacial de 0.1° y un periodo de tiempo de 1981 al 2020. A partir de este producto, se extrajeron datos de precipitación diaria promedio areal en cada UH de la VP, durante los días cercanos al día con el máximo caudal promedio diario de cada evento de inundación.

2.5 Estimación de umbrales de inundación

Los umbrales para la determinación de eventos de inundación en las EHA y EHC de la Tabla 1 se obtuvieron del SENAMHI-Perú, los cuales fueron determinados mediante el método de Pico sobre Umbral (Lang et al., 1999). El umbral fue determinado para la identificación de 4 eventos por año en promedio, tomando en cuenta la independencia entre eventos sucesivos con un intervalo de tiempo mínimo de 5 días, como recomienda Lee et al. (2021) (Tabla 2). Además, se determinó el área de la unidad hidrográfica correspondiente a cada una de las estaciones hidrológicas.

Para las UH de la VP, la determinación de los umbrales de inundación se realizará con metodología de la distribución de probabilidad de Pareto Zhang et al. (2021). Este método se aplicó para seleccionar un promedio de 2.5 eventos en cada UH de la

vertiente del Pacífico, tomando en cuenta los caudales superiores al límite de excedencia de 80 % de las series diarias de caudales a escala anual, para el periodo de estudio de 1981-2020.

Tabla 2: Umbrales de inundación

ID	Nombre	Caudal umbral (m ³ /s)
E01	Antapucro	21.74
E02	Cabo Inga	390.74
E03	Challata	9.25
E04	Chosica	32.74
E05	Cirato	19.67
E06	El Ciruelo	345.06
E07	El Tigre	409.56
E08	Huatipa	222.17
E09	Letrayoc	87.2
E10	Obrajillo	23.48
E11	Ocoña	315.78
E12	Pte. Int. Macara	255.97
E13	Pte. Tumbes	513.78
E14	San Mateo	27.44
E15	Sayan	53.32

La selección de eventos de inundación se detalla en la Figura 2. El periodo de análisis será desde 2007 al 2020 de la base de caudales horarios, con la identificación de los respectivos caudales picos instantáneos (Q_p) observados.

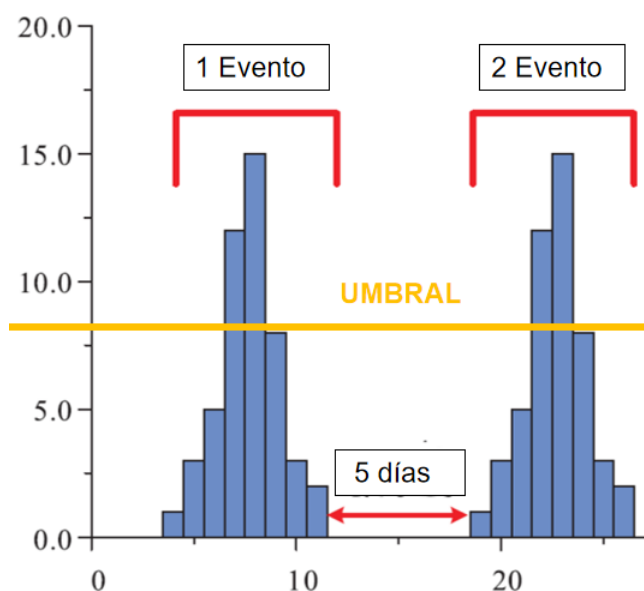


Figura 2. Identificación de eventos de inundación

2.6 Estimación de caudales pico instantáneos

2.6.1 Métodos empíricos

La estimación del caudal pico instantáneo (Q_p) a partir de series de caudales promedio diario, se realizará mediante las ecuaciones empíricas de la Tabla 3. Estas ecuaciones están basadas en la relación de los parámetros del área de drenaje (A), caudal máximo diario (Q_0), caudal promedio diario del día anterior (Q_{-1}) al del Q_0 y el caudal promedio diario del día siguiente Q_1 al Q_0 .

Tabla 3: Ubicación de estaciones hidrométricas automáticas (EHA) y convencionales (EHC)

Fuente	Fórmula empírica
Fuller (1914)	$Q_p = Q_0(1 + 2,66 * A^{-0,3})$
Sangal (1983)	$Q_p = (4 * Q_0 - Q_{-1} - Q_1)/2$
Fill y Steiner (2003)	$Q_p = \frac{0.8 * Q_0 + 0.25 * (Q_{-1} - Q_1)}{0.9123 * (Q_{-1} + Q_1)/(2 * Q_0) + 0.362}$
Chen et al. (2017)	$Q_p = Q_0 + \frac{(Q_0 - Q_{-1}) * (Q_0 - Q_1)}{2 * Q_0 + Q_{-1} - Q_1}$

2.6.2 Métodos de redes neuronales artificiales

El diseño de la ANN se realizó mediante las funciones del package Tensorflow (Abadi et al., 2015). La generación de caudales pico mediante redes neuronales artificiales (ANN), requirió la recopilación de muestras de caudales máximos instantáneos, obtenidas a partir de caudales horarios, además, se usaron datos de los caudales promedio diarios de los días cercanos al día con el caudal máximo del evento de inundación, datos de precipitación promedio areal de los días previos al día del evento de inundación, caudal específico promedio máximo diario y tiempo de concentración de la cuenca a la cual pertenece la estación hidrológica.

Estos datos se usaron para las etapas de entrenamiento, validación y evaluación en las proporciones de 0.7, 0.2 y 0.1, respectivamente. Para ello, se siguió la metodología de (Lee et al., 2021), que se puede desagregar en el flujograma de la Figura 3.

El número de ciclos, cantidad de capas ocultas, número de nodos por cada capa oculta y selección de tipos funciones de activación en cada capa oculta (tangente hiperbólica o linear), se determinaron siguiendo iteraciones de ensayo y error, debido a la cantidad de muestras y número de entradas iniciales.

Se entrenó la ANN con un mínimo de 10000 iteraciones y se finaliza el entrenamiento cuando el error de validación es mínimo. Para el proceso de evaluación se seleccionó la red correspondiente a la época con la mínima Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) de validación.

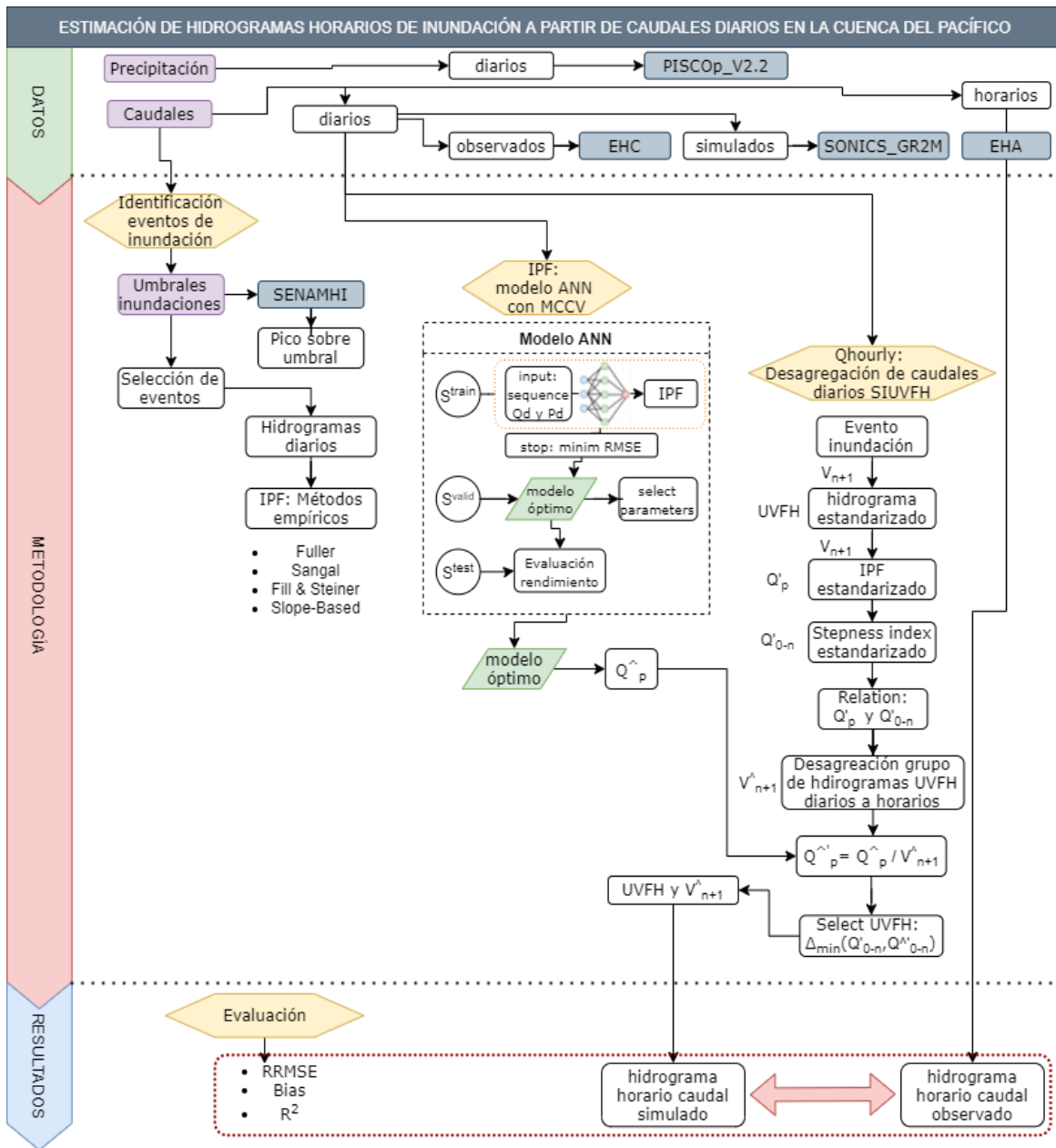


Figura 3. Metodología general

El Q_p se obtendrá a través de los métodos de la Tabla 3 y de la construcción de la ANN, en series de caudales diarios agregados a partir de caudales horarios de las estaciones hidrológicas de la Tabla 1, para poder evaluar su desempeño en la estimación de Q_p , respecto a los datos de Q_p obtenidos de series horarias de caudales. La métrica de evaluación seleccionada para esta etapa es el coeficiente de determinación o R^2 .

2.7 Desagregación de caudales diarios de eventos de inundación a escala horaria

La desagregación de caudales diarios a horarios, durante los eventos de inundación, se realizará según la metodología de Tan et al. (2007). El cuál se basa en el índice de pendiente del hidrograma de volumen unitario (SIUVFH), que relaciona las pendientes

estandariza (Ecuación 1) con los caudales máximos instantáneos estandarizados (Ecuación 2), de un hidrograma diario unitario con los parámetros de hidrogramas horarios unitarios, ambos obtenidos mediante la división de sus caudales con el volumen total durante $n+1$ días previos al caudal pico (Figura 4).

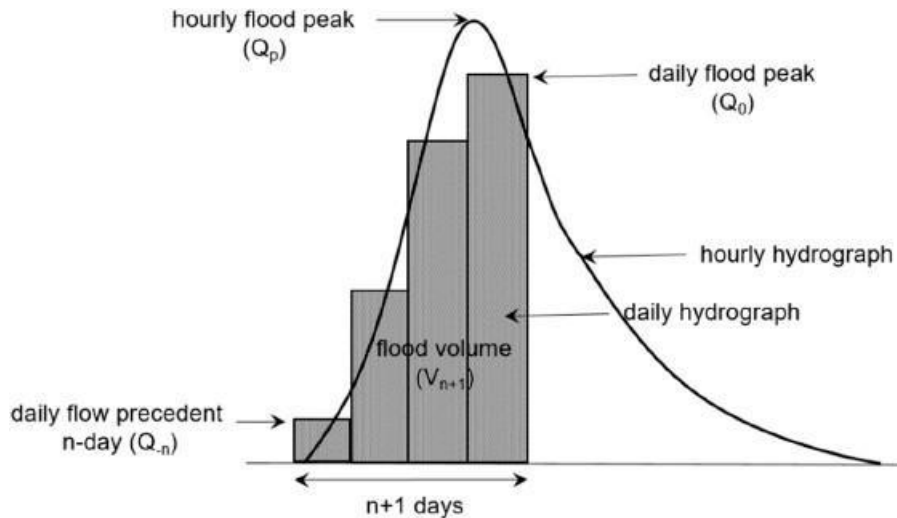


Figura 4. Parámetros para la obtención del índice de pendiente del hidrograma de volumen unitario (SIUVFH)

Ecuación 1:

$$Q'_p = \frac{Q_p}{V_{n+1}}$$

Ecuación 2:

$$Q'_{0-n} = \frac{Q_0 - Q_{-n}}{V_{n+1}}$$

Donde, Q'_p es el caudal pico instantáneo estandarizado, Q_p es el caudal pico instantáneo, V_{n+1} el volumen en m^3 durante los $n+1$ días previos al Q_p del evento de inundación, Q_{-n} es el caudal del día $n-1$, Q_0 es el caudal pico diario, y Q'_{0-n} es el índice de inclinación ascendente del hidrograma de inundación diario estandarizado.

El método SIUVFH consiste en: primero seleccionar hidrogramas de inundación independientes y luego estandarizar los caudales horarios en cada uno de ellos, mediante la división por V_{n+1} . El hidrograma horario estandarizado se denomina hidrograma de inundación de volumen unitario (UVFH). Luego, el IPF estandarizado Q'_p y el Q_{0-n} estandarizado, Q'_{0-n} se calculan usando las Ecuaciones 3 y 4 para cada uno de los hidrogramas de crecida de referencia. Para comparar los pares de Q'_{0-n} y Q'_p de todos los hidrogramas de inundación independientes, se visualiza la relación entre estos índices. Para desagregar un evento de inundación diario a escala horaria, se debe calcular el volumen de inundación de $n + 1$ días (V_{n+1}) y el Q'_{0-n} . Estos índices tienen un símbolo adicional para diferenciar los obtenidos del hidrograma de crecida diario que

se va a desagregar de los obtenidos de los hidrogramas de inundación de referencia. Finalmente, el UVFH por hora con Q'_{0-n} más cercano al Q'_{0-n} se escala multiplicando por V_{n+1} , para obtener el hidrograma de inundación horario hasta el día con el caudal máximo.

3. Resultados y Discusiones

3.1 Eventos de inundación

Se identificó un total de 112 eventos de inundación de la base horaria de las EHA (Tabla 2). Luego de identificar la existencia de datos en los días consecutivos al día del evento máximo, se omitieron un total de 3 eventos, quedando un total de 109 eventos con los hidrogramas horarios de los eventos observados de inundación.

Posteriormente, se identificó los umbrales de inundación en las series diarias de caudales simulados en las UH de la VP para el periodo de 1981-2020, área planimétrica, longitud y pendiente de la red principal de drenaje, datos necesarios para obtener el tiempo de concentración en cada UH (Tabla 4). Obteniéndose un total de 4936 eventos de inundación en las 55 UH, distribuidas en las 3 regiones climáticas de la VP.

La cantidad de eventos de inundación promedio por año (PPY) identificadas en cada UH agrupadas por Región, se presenta en la Figura 5, donde se observa que el PPY varía en el rango de 1 a 6, con una mediana entre 2 a 3, siendo superior la cantidad de PPY en la región 3.

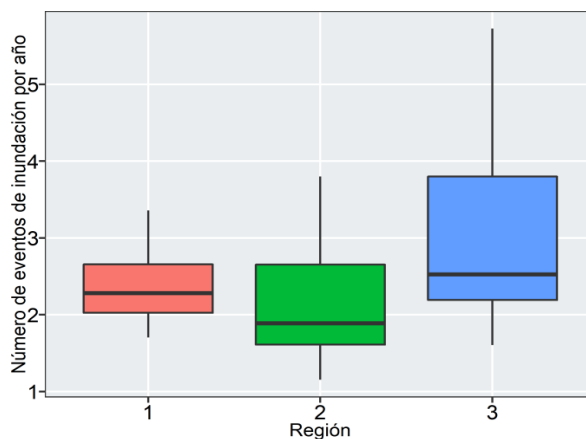


Figura 5. PPY para unidades hidrográficas agrupadas por región climática

3.2 Red neuronal artificial para la estimación de caudales pico instantáneos

Los datos de entrada para el modelo, consistió en los 3 caudales promedio diarios consecutivos, 3 días consecutivos, previos al evento de inundación, de precipitación promedio areal en cada UH, caudal específico del caudal máximo de inundación y tiempo de concentración.

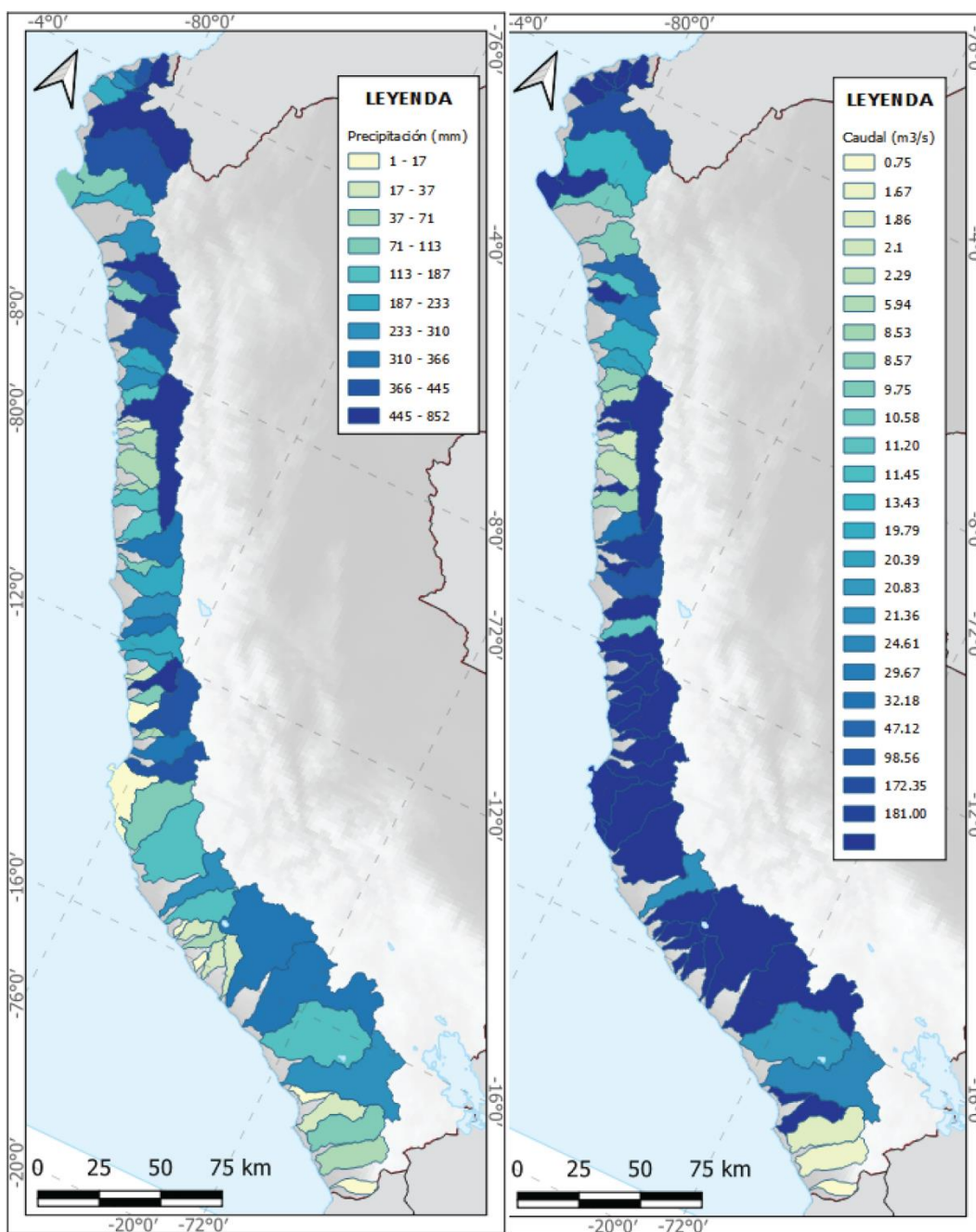


Figura 6. Precipitación promedio areal multianual en mm y umbrales de inundación en m³/s a escala de UH en la VP

Mientras que la salida fue el caudal pico máximo (IPF), obtenido de la base de caudales horarios observados.

Las proporciones de muestreo fueron las siguientes: entrenamiento (70 %), validación (20 %) y test (10 %), siguiendo las recomendaciones de Jimeno-Sáez et al. (2017) y mediante múltiples iteraciones.

La estructura de la ANN se perfeccionó mediante el ensayo-error, obteniéndose un total de 6 capas (1 de entrada, 5 ocultas y 1 de salida), cada capa tiene un número variado de nodos: 162 en la capa de entrada, 128 en 4 capas ocultas, y 1 en la capa de salida. Las funciones de activación de entrada, salida y las dos primeras capas ocultas fueron lineales, mientras que las demás capas ocultas tienen la función de activación hiperbólica. La tasa de aprendizaje de la red neuronal es de 0.001, la función de optimización es la de Adam, y la métrica de evaluación con los datos de validación fue la RMSE. Por último, el número óptimo de iteraciones es de 24000.

La precisión con las muestras del test mediante la RMSE, alcanzó los 82.365 m³/s, siendo un valor adecuado con la cantidad de muestras disponibles. Por otro lado, la evaluación del test alcanzó un RMSE de 126.534 m³/s.

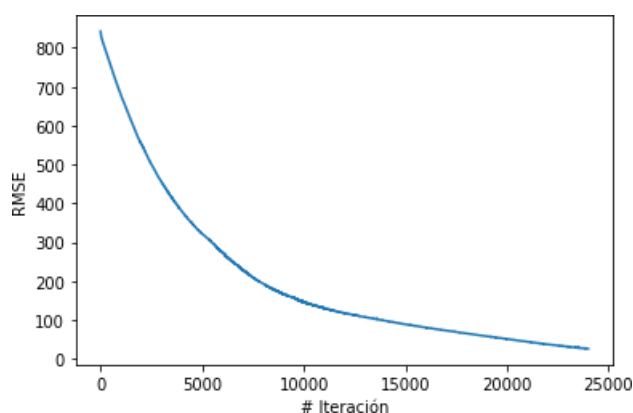


Figura 7. Rendimiento de la ANN en RMSE a lo largo de cada iteración

3.3 Evaluación de la estimación de caudales pico instantáneos

La evaluación del desempeño, a través de las métricas estadísticas RMSE y Pbias, del IPF observado con los obtenido mediante los métodos empíricos y de la ANN, se presentan en la Tabla 6 y 5. En general, se observa un mayor desempeño de la ANN, tanto con la RMSE (2.4 hasta 305.3 m³/s) como en el sesgo porcentual de los resultados insignificante, por lo tanto, se puede considerar como el método superior para la estimación de caudales pico de inundación. En segundo lugar, el método de Sangal presenta un rendimiento aceptable con Pbias de - 0.063 a 0.165 en la estación E02 de la región 1 y un RMSE de 2.3 a 507.27 m³/s, en la estación E12 de la región 1.

Además, los resultados expuestos en la Figura 8 indican que en términos del estadístico R^2 , el método de ANN y de Sangal presenta un mayor rendimiento con 0.97 y 0.903, respectivamente, la existencia de "outliers" es debido a la baja cantidad de muestras (112). Por ello, se confirma la alta capacidad del modelo ANN para la estimación del caudal máximo instantáneo a partir de datos de caudales diarios, como método alternativo, en los eventos de inundación donde el resultado de la ANN no sea óptimo, se usará el método de Sangal.

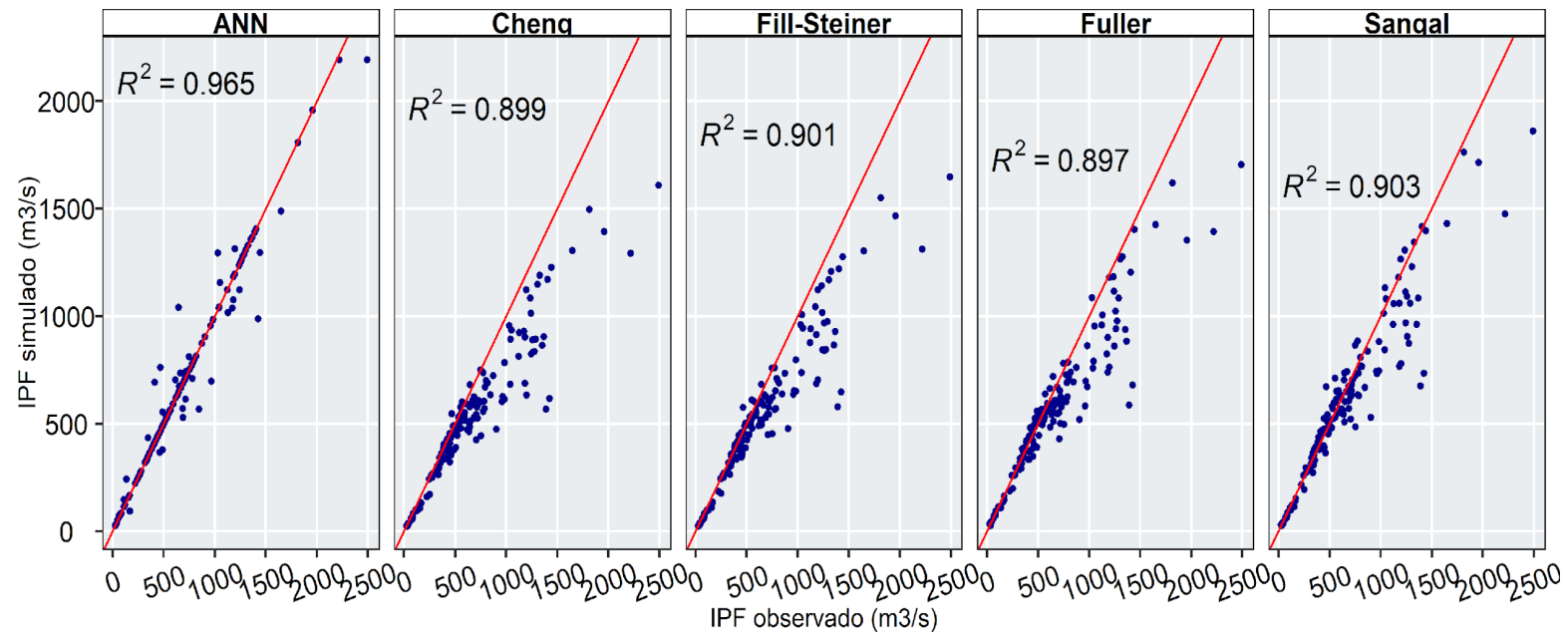


Figura 8. Coeficiente de determinación (R^2) de los métodos de estimación de IPF con los IPF observados

Tabla 4: Umbrales de inundación y parámetros geomorfológicos de las UH de la VP

UH	Nombre	AAA	Área (km ²)	Longitud río (km)	Pendiente río (%)	Caudal umbral (m ³ /s)	Región
X1394	Cuenca Tumbes	V	1817.06255	137.24	0.89	309.348976	3
X13714	Cuenca Atico	I	1400.67933	87.619	3.78	1.139339	1
X13712	Cuenca Pescadores - Caraveli	I	1956.80985	151.929	3.04	1.465024	1
X137156	Cuenca Chala	II	1233.05563	77.214	5.22	2.007	1
X137154	Cuenca Cháparra	II	1282.79082	94.004	4.29	1.780536	1
X137534	Cuenca Topará	III	620.56384	63.818	6.87	0.615176	1
X1375532	Cuenca Chilca	III	783.52839	59.417	6.23	2.236685	2
X13778	Cuenca Cascajal	V	3965.40952	182.34	1.59	15.451	3
X13779	Int 13779	V	4736.80757	121.216	1.352	1.6222	3
X13936	Cuenca Bocapán	V	906.11165	77.9	1.8	7.975	3
X1378	Cuenca Piura	V	10936.37985	332.42	0.69	24.0614	3
X138	Cuenca Chira	V	10596.92685	201.81	0.6	222.0708	3
X137772	Cuenca Motupe	V	3673.65888	132.85	1.9	12.8524	3
X13776	Cuenca Chancay - Lambayeque	V	4042.7612	203.93	1.89	56.4654	3
X137754	Cuenca Zaña	V	1754.51577	124.66	2.87	14.9526	3
X137752	Cuenca Chamán	V	1349.68645	86.21	3.13	1.819504	3
X13774	Cuenca Jequetepeque	V	3954.07005	165.08	2.37	38.7378	3
X137714	Cuenca Virú	IV	1920.35979	95.17	4.22	10.6282	3
X137712	Cuenca Huamansaña	IV	1435.36405	76.11	5.54	5.939288	3
X1376	Cuenca Santa	IV	11642.30844	334.58	1.33	560.613854	2
X1375992	Cuenca Lacramarca	IV	840.35095	68.18	5.84	1.788429	2
X137598	Cuenca Nepeña	IV	1885.23038	81.5	5.78	2.105986	2
X137596	Cuenca Casma	IV	2985.08062	103.08	4.36	2.955	2
X1375952	Cuenca Culebras	IV	669.71376	69.13	6.56	1.697	2
X137594	Cuenca Huarney	IV	2241.54619	99.99	4.45	11.3568	2
X137592	Cuenca Fortaleza	III	2350.34556	115.73	4.08	32.188276	2
X13758	Cuenca Pativilca	III	4598.76674	180.698	2.74	181.002916	2
X137572	Cuenca Supe	III	1020.35713	94.981	5.03	2.009709	2
X13756	Cuenca Huaura	III	4332.28643	163.893	2.93	98.561678	2
X137558	Cuenca Chancay - Huaral	III	3061.95859	118.139	4.08	58.051016	2
X137556	Cuenca Chillón	III	2222.00773	133.035	3.69	11.461	2
X137554	Cuenca Rímac	III	3504.14967	147.881	3.36	75.593888	2
X1375534	Cuenca Lurín	III	1642.667	110.402	4.42	14.798695	2
X137552	Cuenca Mala	III	2332.88725	130.693	3.85	106.522107	2
X1375512	Cuenca Omas	III	1117.39706	73.603	6.04	2.326148	2
X13754	Cuenca Cañete	III	6052.88518	233.912	2.11	99.0436	2
X137532	Cuenca San Juan	II	3355.41996	146.277	3.31	45.983	1
X13752	Cuenca Pisco	II	4234.20972	189.174	2.53	60.24924	1
X1374	Cuenca Ica	II	7346.2108	234.926	1.9	50.14	1
X1372	Cuenca Grande	II	11058.54509	186.199	2.41	81.088166	1
X13718	Cuenca Acarí	II	4318.75635	214.628	2.08	33.499753	1
X13716	Cuenca Yauca	II	4324.88886	186.772	2.49	27.89089	1
X136	Cuenca Ocoña	I	15993.68513	286.64	1.66	244.716988	1
X134	Cuenca Camaná	I	17121.86027	420.555	1.15	115.8678	1
X132	Cuenca Quilca - Vitor - Chili	I	13514.45619	281.301	1.77	34.043048	1
X13172	Cuenca Ilo - Moquegua	I	3405.76759	149.452	3.33	0.887	1
X1316	Cuenca Locumba	I	5834.75433	200.763	2.45	1.855258	1
X13158	Cuenca Sama	I	4617.00682	174.684	2.98	3.0804	1
X13154	Cuenca Hospicio	I	1354.91805	82.689	5.01	0.8484	1
X1318	Cuenca Tambo	I	13019.6536	303.663	1.53	39.662	1
X13932	Cuenca Fernández	V	744.8042	67.03	1.84	1.652474	3
X13934	Cuenca Quebrada Seca	V	486.84681	67.35	1.66	4.602424	3
X1392	Cuenca Pariñas	V	1715.31626	94.81	1.27	4.14783	3
X13772	Cuenca Chicama	IV	4514.15381	168.63	2.46	29.8706	3
X137716	Cuenca Moche	IV	2124.91294	109.87	3.73	25.3184	3

Tabla 5: Valores de Pbias por estación

Estación	Fuller	Sangal	Fill	Chen	ANN
E02	0.235	0.165	0.261	0.286	-0.02
E04	0.026	0.133	0.176	0.186	0.056
E05	0.092	0.141	0.217	0.23	0.051
E06	0.105	-0.016	0.108	0.133	-0.005
E07	0.171	0.098	0.199	0.224	0.002
E08	0.053	0.04	0.107	0.119	0
E09	0.108	0.104	0.186	0.215	0.06
E10	-0.299	0.003	0.046	0.059	-0.112
E11	-0.073	-0.063	-0.005	0.017	-0.006
E12	0.39	0.296	0.396	0.409	0.003
E13	0.068	-0.001	0.1	0.124	-0.004
E15	-0.039	0.041	0.095	0.102	-0.009

Tabla 6: Valores de RMSE por estación

Estación	Fuller	Sangal	Fill	Chen	ANN
E02	316.976	299.263	358.428	375.8	119.056
E04	3.534	9.129	12.305	13.162	5.107
E05	12.615	19.569	25.501	27.31	3.303
E06	224.733	187.75	240.423	253.334	305.307
E07	259.27	192.982	277.401	303.224	60.877
E08	53.057	55.496	74.35	80.407	41.601
E09	28.828	25.266	39.547	46.263	24.575
E10	8.132	2.304	1.981	2.281	3.182
E11	44.904	40.682	19.318	22.138	33.097
E12	572.792	507.269	578.188	587.338	2.425
E13	157.514	64.272	122.356	148.547	57.89
E15	4.626	3.809	7.142	7.629	3.097

3.4 Obtención de parámetros y desagregación de los hidrogramas diarios a horarios de caudales

El método SIUVFH, requiere de una buena correlación entre los parámetros $Q_{0'-n}$ y Q'_p , para ello, se puede variar la cantidad de n días empleados para la estimación de $Q_{0'-n}$. Se tomó en consideración desde los $n = 1$ a $n = 3$ días (Figura 9), encontrando una mayor correlación cuando $Q_{0'-n}$ usa $n = 1$ día.

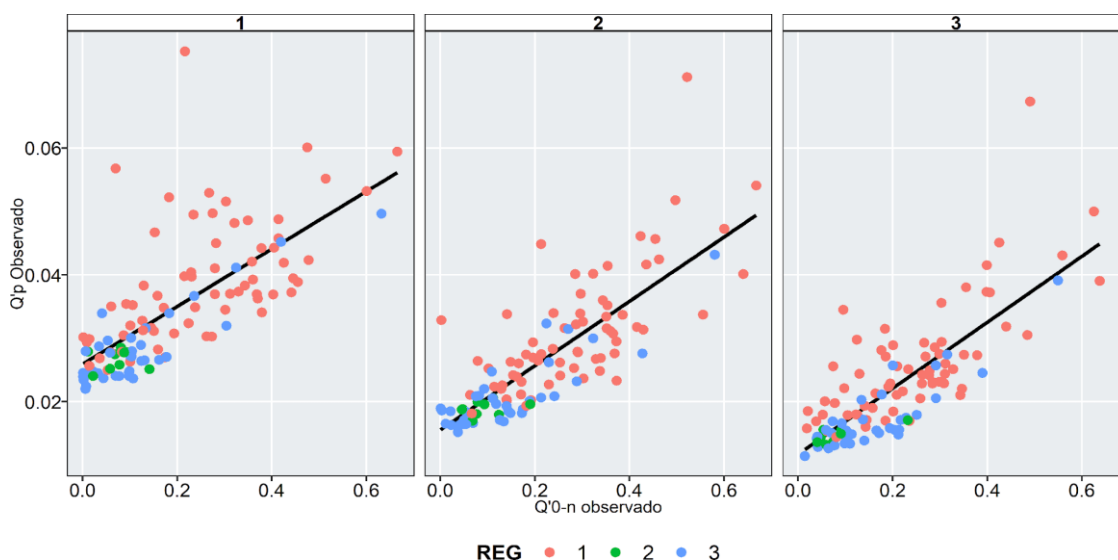


Figura 9. Relación entre el IPF estandarizado y el SIUVFH estandarizado (unidad: $m^3/s / (86,400 m^3)$)

A partir de los parámetros de Q'_p y $Q_{0'-n}$ presentados en la database de caudales desagregados se realizó la desagregación de los caudales diarios de la Figura 10. Para el primer evento 10, se filtraron solo los hidrogramas unitarios horarios pertenecientes a su región climática (3). A continuación, se seleccionó el evento del 2011-04-19 para obtener los parámetros $Q_{0'-n} = 0.082$ y $Q'_p = 0.541$ para el hidrograma diario con la estimación del IPF a partir de la ANN, se seleccionó el hidrograma unitario horario con los parámetros $Q_{0'-n} = 0.098$ y $Q'_p = 0.025$, ya que eran los más cercanos. A partir del volumen durante los 1 días ($1282.8 m^3$) previos al IPF del hidrograma unitario se re-escaló el hidrograma unitario horario, para poder obtener los caudales horarios durante ese evento.

La desagregación de los caudales diarios a hidrogramas horarios, se presenta en la Figura 11. Encontrando un rendimiento adecuado del hidrograma horario simulado, respecto al hidrograma horario observado.

El repositorio con los caudales horarios de los 4922 eventos de inundación de la vertiente del Pacífico agrupados por las UH, se encuentran en el repositorio de Figshare: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.19064351> con libre acceso. Este dataset puede reducir la incertidumbre en estimación de IPF durante los eventos de inundación.

Estación-evento: X1394_045_R3

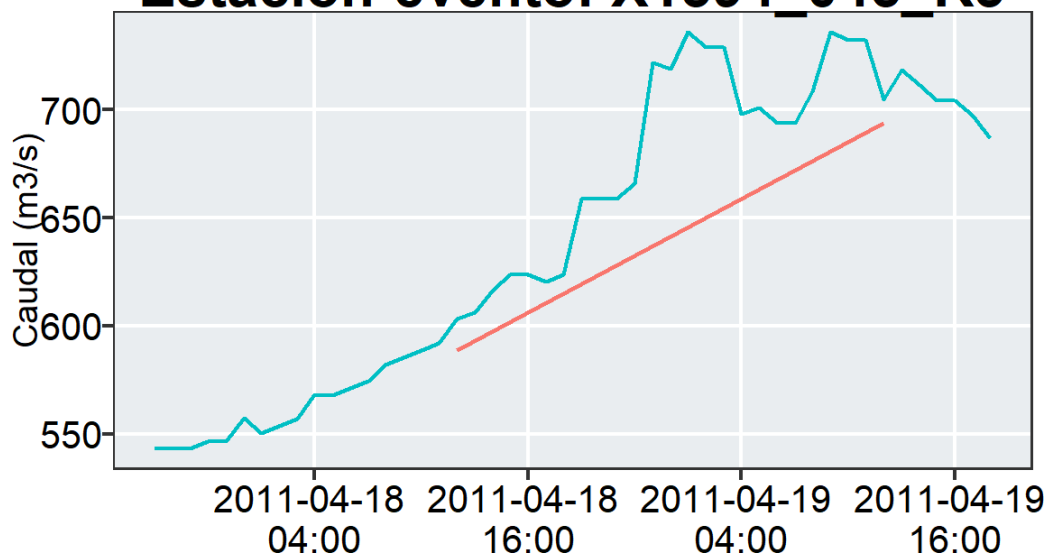


Figura 10. Comparación de los caudales observados y desagregados del evento 45 en la UH 1394 (región 3), durante el 2011-04-18

4. Conclusiones

La generación de hidrogramas de inundación con resolución temporal horaria es esencial para diseñar estructuras hidráulicas para la protección contra inundaciones, operación de embalses para la gestión de inundaciones y sistemas de alerta temprana ante inundaciones. Este conjunto de datos está enfocado en cuencas hidrográficas con déficit de registros de caudal instantáneo o que solo tienen datos de caudal promedio a escala horaria.

En esta investigación, se construyeron modelos de redes neuronales artificiales (ANN) para estimar el IPF de 55 unidades hidrográficas de la VP. A partir de este modelo se consiguió mejorar el desempeño del método SIUVFH para la desagregación de caudales diarios al combinar la estimación del IPF basado principalmente en los modelos de ANN, construidos con variables de caudales promedio diarios, precipitación promedio areal, máximo caudal específico y tiempo de concentración. Obteniendo como resultado de la evaluación valores de RMSE de 2.4 a 305.3 y valores de Pbias de -0.112 a 0.06 para el conjunto de datos horarios de referencia.

El método propuesto se puede ampliar a la desagregación de caudales horarios al relacionar el IPF basado en caudales a escala de minuto como variable de salida y una serie de caudales horarios como variable de entrada. Ya que, mediante una mayor precisión en los IPF se obtendrá un mayor rendimiento de la desagregación de caudales propuestos, por ello, la obtención de información observada a mayor resolución temporal es indispensable para el análisis de máximas avenidas.

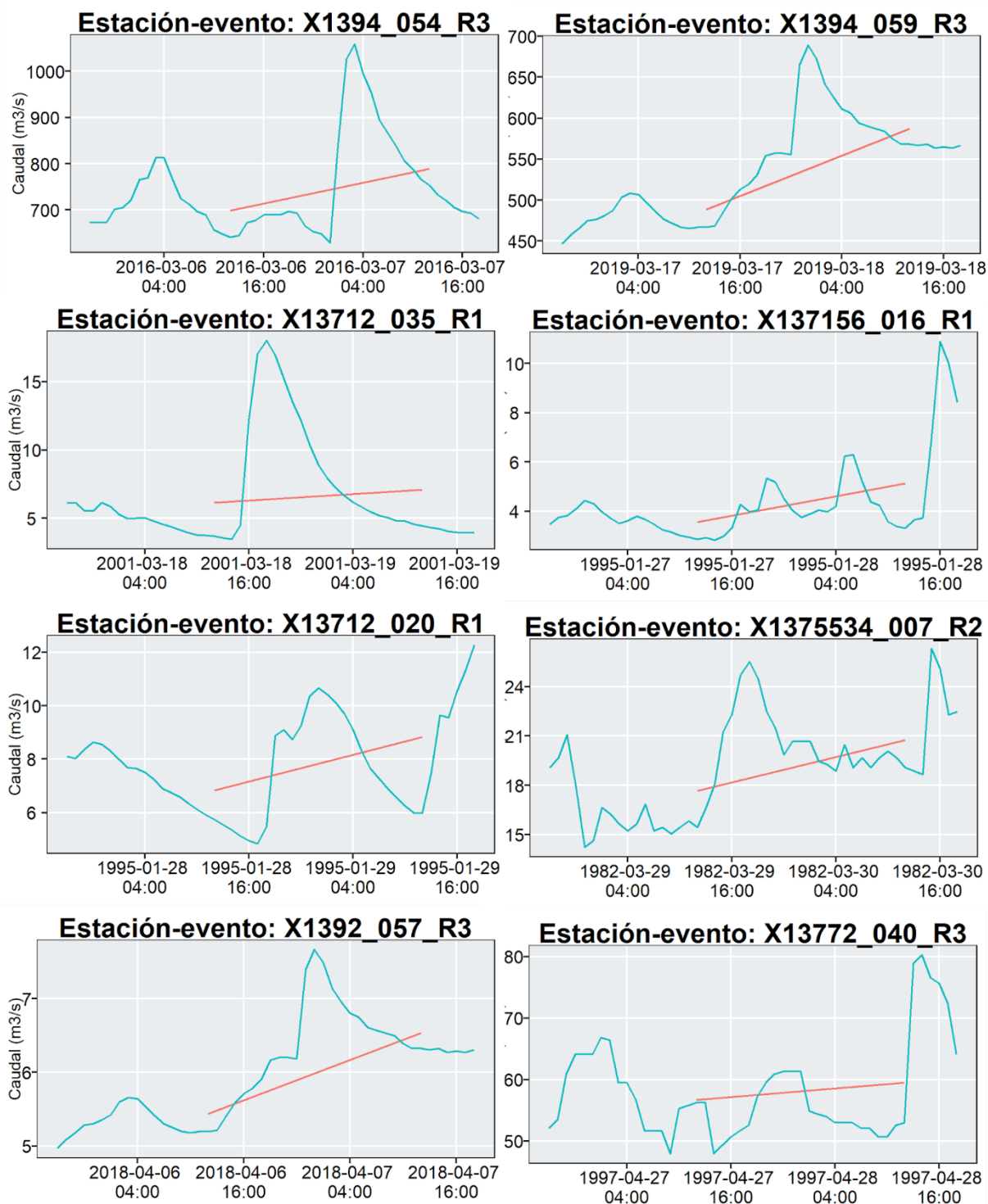


Figura 11. Comparación de los caudales observados y desagregados a escala horaria de los eventos de inundación

5. Referencias bibliográficas

- Abadi, M., Agarwal, A., Barham, P., Brevdo, E., Chen, Z., y Citro, C. 2015. TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems. Software available from tensor-flow.org.
- ANA 2012. Recursos hídricos en el Perú. *Autoridad Nacional del Agua*.
- ANA 2019. Retroceso glaciar en la cordillera blanca 1948 - 2018. *Repositorio institucional - ANA*.
- Aybar Camacho, C. L., Fernández, C., Huerta, A., Lavado-Casimiro, W., Vega-Jácome, F., y Felipe-Obando, O. 2020. Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day.
- Castro, A., Davila, C., Laura, W., Cubas, F., Ávalos, G., López Ocaña, C., Villena, D., Valdez, M., Urbiola, J., Trebejo, I., et al. 2021. Climas del Perú: mapa de clasificación climática nacional.
- Chen, B., Krajewski, W. F., Liu, F., Fang, W., y Xu, Z. 2017. Estimating instantaneous peak flow from mean daily flow. *Hydrology Research*, 48(6):1474–1488.
- Fill, H. D. y Steiner, A. A. 2003. Estimating instantaneous peak flow from mean daily flow data. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(6):365–369.
- Fuller, W. E. 1914. Flood flows. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 77(1):564–617.
- Hromadka II, T. 1990. Rainfall-runoff models: A review. *Environmental Software*, 5(2):82–103.
- INAIGEM 2018. Inventario nacional de glaciares: Las cordilleras glaciares del Perú.
- Jimeno-Sáez, P., Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., Pulido-Velazquez, D., y Cecilia, J. M. 2017. Estimation of instantaneous peak flow using machine-learning models and empirical formula in peninsular Spain. *Water*, 9(5):347.
- Lang, M., Ouara, T. B., y Bobée, B. 1999. Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *Journal of hydrology*, 225(3-4):103–117.
- Lee, J., Lee, J. E., y Kim, N. W. 2021. Estimation of hourly flood hydrograph from daily flows using artificial neural network and flow disaggregation technique. *Water*, 13(1):30.
- Llauca, H., Lavado-Casimiro, W., Montesinos, C., Santini, W., y Rau, P. 2021. Pisco_hym_gr2m: A model of monthly water balance in Peru (1981–2020). *Water*, 13(8):1048.

- Sangal, B. P. 1983. Practical method of estimating peak flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(4):549–563.
- Tan, K.-S., Chiew, F. H., y Grayson, R. B. 2007. A steepness index unit volume flood hydrograph approach for sub-daily flow disaggregation. *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(20):2807–2816.
- Zhang, Q., Zhang, L., She, D., Wang, S., Wang, G., y Zeng, S. 2021. Automatic procedure for selecting flood events and identifying flood characteristics from daily streamflow data. *Environmental Modelling & Software*, 145:105180.