

Systematization of data for ecological flow modeling and its incorporation in integrated water resources management

Richard Linares-Uzcátegui ^{*.a} , Edilberto Guevara-Pérez ^b ,

^aSubprograma de Estudios Avanzados Ciencias del Agro y Mar, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales “Ezequiel Zamora” VIPI Cojedes, Venezuela.

^bEscuela de Posgrado de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú (EPG-UNALM)



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v30i1.423>

Abstract.- This research deals with the systematization of data to model the ecological flow, CE. The study was carried out using the daily and monthly hydrological records of the Condorcerro gaging station of Río Santa, Peru for a period of 60 years, disaggregating the monthly series to fill in the missing values. Twenty-one CE models that use monthly mean flow records and four (4) that use daily mean flow records were applied. The NEABF, Canadian, RVA, Tennant Qe, minimum, Tennant Qe regular, Rafael Heras, French Code, Swiss Legislation, MAVDT-1, IDEAM, DGA criteria I, Fleckinger and Navarro methods yield results that are outside the operating range of the river flows. The application of the QEMR model yields values higher than the minimum operating flows (daily and monthly) in the dry season (July, August and September), and lower than the Peruvian regulations. The conclusions of the investigation are incorporated into the basin's GIRH Integral Management plan for Hydraulic Resources.

Keywords: ecological flow; daily and monthly flow regime; average daily flow; disaggregation of flows; integrated management of water resources.

Sistematización de datos para el modelamiento del caudal ecológico y su incorporación en la gestión integrada de los recursos hídricos

Resumen.- Esta investigación trata de la sistematización de datos para modelar el caudal ecológico, CE. El estudio se llevó a cabo usando los registros hidrológicos diarios y mensuales de la estación hidrométrica Condorcerro del Río Santa, Perú para un período de 60 años, desagregando las series mensuales para rellenar los valores faltantes. Se procesaron 21 modelos de CE que usan registros medios de caudales mensuales y cuatro (4) de caudales medios diarios. Los métodos NEABF, canadiense, RVA, Tennant Qe, mínimo, Tennant Qe regular, Rafael Heras, Código Francés, Legislación Suiza, MAVDT-1, IDEAM, DGA criterio I, Fleckinger y Navarro, arrojan resultados que están fuera del rango de operación de los caudales del río. La aplicación del modelo QEMR arroja valores mayores que los caudales mínimos de operación (diario y mensual) en los meses de estiaje (julio, agosto y septiembre), e inferior a la normativa peruana. Las conclusiones de la investigación se incorporan al plan de Gestión Integral de Recursos Hidráulicos GIRH de la cuenca.

Palabras clave: caudal ecológico; régimen de caudales diarios y mensuales; caudal medio diario; desagregación de caudales; gestión integral de recursos hídricos.

Recibido: 26 de febrero, 2023.

Aceptado: 10 de abril, 2023.

1. Introducción

El incremento de la poblacional mundial requiere del desarrollo de nuevos esquemas de consumo que conducen al uso, explotación y

alteración del régimen natural de los ríos y los ecosistemas fluviales. Esta situación ocasiona gran preocupación ambiental por lo que se vienen incorporando nuevos instrumentos y procesos para mantener la subsistencia de los ecosistemas acuáticos y de todos los hábitats.

En muchos países se han desarrollado métodos para establecer el caudal ambiental como medida de protección de los ecosistemas y su preservación, ocupando este tema un lugar central en el debate sobre gestión hídrica porque se entienden como

* Autor para correspondencia:

Correo-e: richardlinaresu@gmail.com (R. Linares)

una nueva herramienta para la planificación y determinación de las demandas de agua de sectores específicos [1].

Muchos de los métodos no son operados de forma adecuada, debido a la falta de datos, causando generalizaciones de las condiciones hidráulicas que no tienen ninguna semejanza con las condiciones reales y ecosistémicas de la cuenca. El cálculo del régimen de caudal ambiental sigue siendo flexible, dejando a las autoridades correspondientes libertad de decisión sobre la exigencia de un estudio técnico bien fundamentado del tema; de por medio está la afectación de la viabilidad del proyecto y si se condiciona el estudio a la conveniencia de intereses particulares [2].

El objetivo de este estudio es el de sistematizar las diferentes metodologías para la determinar el caudal ecológico, considerando que no existe un modelo perfecto único aplicable a todas las cuencas, debido a que cada una posee condiciones hidrometeorológicas, geológicas, hidrográficas y socioeconómicas muy particulares que determinan el estado del sistema, que priorizan la importancia de un proceso sobre otros y condicionan la estructura del modelo (http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_inter/modhidro_1.pdf).

Se espera que la investigación proporcione criterios que conduzcan a la selección de las metodologías que mejor se adapten a la dinámica hidrológica e hidráulica de la cuenca, a las reglamentaciones de la región y a la estacionalidad del régimen fluvial del río, para que los resultados puedan ser incluidos en el plan de Gestión Integral de Recursos Hidráulicos GIRH. Así mismo, el estudio constituye un aporte académico en lo que concierne al cálculo de caudales ecológicos y que servirá como referencia para futuras investigaciones en instituciones, organismos ambientales y otras universidades, a nivel nacional e internacional.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

Se estableció como ámbito de estudio la cuenca del río Santa, estación hidrográfica Condorcerro, código de estación N° 201713, ubicada en

la República del Perú, Departamento Ancash, Provincia Santa, Distrito Chimbote, Latitud: 8°39'28,55"S, Longitud: 78°15'42,17"W, cuya ubicación se ilustra en la Figura 1 [3, 4].

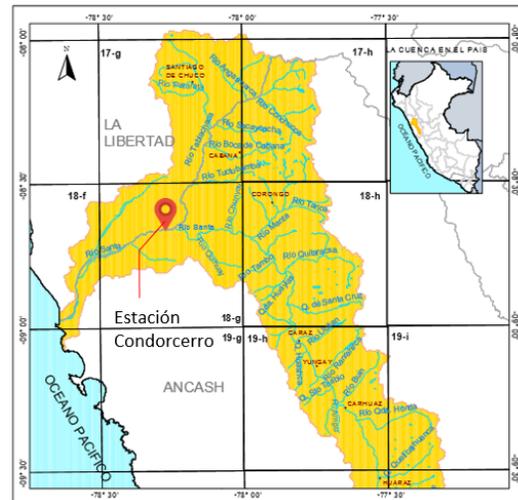


Figura 1: Localización espacial de la cuenca Santa y de la estación Condorcerro [4]

2.2. Datos hidrometeorológicos

La información hidrométrica utilizada corresponde al registro de los caudales medios mensuales de la estación 201713 Condorcerro del período 1960 - 2019 bajada de la base de datos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), y al de caudales medios diarios de las estaciones C315 Condorcerro y C310 La Balsa extraídos del Sistema de Información Ambiental Regional SIAR [5] con registros faltantes. Como información secundaria se obtuvieron los datos oficiales de climatología e hidrometría [6].

La información recolectada de los registros de caudales medios mensuales y diarios se digitalizó y procesó mediante hojas de cálculo en formato Excel para la clasificación de la secuencia de datos, detección de errores, localización de datos faltantes y operación de cálculos numéricos y estadísticos del comportamiento del caudal operativo y ecológico.

Para determinar los regímenes fluviales de avenida-sequía del río Santa durante el año, se aplicó el mapa de calor (heat map chart) con el formato condicional de Excel a los registros

de caudales medios mensuales, para medir las magnitudes en escalas de colores, siendo el color verde para indicar los valores más altos o con mayor caudal y el color rojo para indicar los valores más bajos o con menos caudal.

2.3. Desagregación de las series mensuales

Para completar los registros faltantes de caudales medios diarios, se utilizó la técnica determinista lineal simple de desagregación de serie de datos mensuales. Este procedimiento desagrega los caudales mensuales a caudales diarios en la estación destino (Target Station TS) basado en el caudal mensual seleccionado en la estación origen (Source Station SS) utilizando criterios de error mínimo, que se calculan a partir de una ventana de tiempo centrada en tres meses para capturar el volumen de flujo estacional según lo adoptado [7]. La selección de contrapartes de caudal mensual histórico para la misma ventana se basa en el criterio de error relativo que se calcula con la desviación cuadrática media (Root-Mean-Square Deviation- RMSE) cuya expresión se da en la ecuación (1).

$$DCM = \sqrt{\frac{(CMTS - CMSS)^2}{2}} \quad (1)$$

Donde:

DCM: Desviación cuadrática media.

CMTS: Caudal mensual estación destino.

CMSS: Caudal mensual estación origen.

El caudal mensual estación origen (CMSS) que se utilizará para desagregar será aquel con el menor error de la DCM en la ventana de tiempo.

El caudal índice es la relación entre el caudal diario y el caudal mensual de la estación origen como se expresa en la ecuación (2) y el caudal desagregado o caudal diario estación destino (CDTS) es el producto del caudal índice (SiSS) y el caudal mensual estación destino (CMTS) como se indica en la ecuación (3).

$$SiSS = \frac{CDSS}{CMSS} \quad (2)$$

$$CDTS = SiSS \cdot CMTS \quad (3)$$

Donde:

SiSS: caudal índice.

CDSS: caudal diario estación origen.

CMTS: caudal mensual estación destino.

CDTS: caudal desagregado o caudal diario estación destino.

El cálculo de los errores relativos mínimos y la desagregación se realizaron usando hojas Excel y los promedios mensuales de los caudales medios diarios disponibles. Se tomó como estaciones origen la C315 Condorcerro, período 1960–1997 y la C130 La Balsa, período 1998–2011. Como estación destino la de Condorcerro 201713, período 1960–2019, para los registros de los caudales medios mensuales. Para los caudales medios diarios de los años faltantes del período 2012 al 2019 se utilizaron los caudales medios diarios de los años anteriores incluyendo los desagregados como estación origen.

Se emplearon hojas de cálculo en Excel para la interpolación spline cúbica (ISC) en las transiciones mensuales de los caudales desagregados, utilizando la herramienta de complemento Add-in SRS1 Cubic Spline (<https://www.srs1software.com/SRS1CubicSplineForExcel.aspx>) con los valores de los caudales diarios de los últimos 7 días del mes previo y los primeros 7 días del mes siguiente. Con este procedimiento se minimizan los saltos hidrológicos en la transición de mes a mes cuando las diferencias de caudal entre el último día del mes y el primer día del mes siguiente son superiores al 10 % [8].

La interpolación requiere establecer una serie de datos fijos dentro del rango de días de ajuste que no intervendrán en el proceso, por lo que se asignaron 4, 5 y 6 datos fijos para elegir el mejor ajuste con el menor porcentaje de diferencia en la transición intermensual.

Para verificar la fiabilidad de los registros obtenidos de la desagregación, se calcularon las desviaciones estándares (σ) anuales de los registros de caudales medios mensuales y diarios. Ambas curvas de desviaciones se graficaron en Excel usando el formato combo de dispersión para graficar los caudales medios mensuales y en barras verticales para graficar las desviaciones estándar

mensuales y diarias. Se usaron las opciones en las gráficas de Excel para mostrar las relaciones de tendencia lineal y las respectivas pendientes.

2.4. Caudales medios mensuales y diarios

Para la sistematización de los CE mensuales y diarios se procesan los datos usando cada uno los métodos hidráulicos. Los resultados de los CE se reflejan en forma mensual multi-anual. Para cada método se enlazan los resultados con la tabla resumen de CE. El procesamiento de los datos se lleva a cabo utilizando hojas de cálculo en Excel.

Métodos hidráulicos propuestos para calcular el CE a nivel mensual, río Santa, estación Condorcerro

1. Método Northern Great Plains Resource Program (NGPRP) [9]
2. Método de Índices de Curva de duración de caudales (CDC) [10]
3. Método de Tennant o Montana [11]
4. Método de New England Aquatic Base Flow (NEABF) [12]
5. Método de Rafael Heras [13]
6. Método de Texas [14]
7. Método Aquatic Base Flow (ABF) [15]
8. Hoppe [2]
9. Método del 90 % de excedencia [16]
10. Código del Medio Ambiente Francés [17]
11. Legislación Suiza [18]
12. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (MAVDT) [19]
13. Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) [20]
14. Método de Matthey [14]
15. Método de las Provincias en el Atlántico de Canadá [21]
16. Método Canadiense [22]
17. Método de la Provincia de Ontario [23]
18. Dirección General de Aguas de Chile (DGA) [22]
19. Dirección General de Aguas de Chile (DGA) Ley 20.217 [24]
20. Método Fleckinger [25]
21. Método de Navarro [26]

Métodos hidráulico propuestos a nivel diarios, río Santa, estación Condorcerro

1. Método 7Q10 de Chiang y Johnson [14]

2. Método Range Variability Approach (RVA) [15]
3. Método de la Provincia de Ontario-Canadá [23]
4. Método de Caudal Básico de Mantenimiento (QBM) [27].

En el caso de los CE mensuales las metodologías se tabularon según el procedimiento de cálculo y se utilizó la CDC para los métodos 90 % de excedencia e IDEAM. En los CE medios diarios se calcularon las distribuciones de frecuencia Log-Pearson III para el método 7Q10 y el Gumbel III para el método 7Q20; se utilizó el IHA Software (<http://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/IndicatorsofHydrologicAlteration/Pages/indicators-hydrologic-alt.aspx>) para determinar los indicadores de alteración hidrológica del método RVA.

2.5. Modelo propuesto

El desarrollo del modelo propuesto en este estudio se llevó a cabo en las siguientes cinco fases de desarrollo:

Fase 1 Evaluación: Contempla la evaluación y selección de las metodologías de los CE a aplicar, tomando como criterios el descarte de aquellos métodos de CE que no describan un comportamiento ajustado a la dinámica fluvial del río y que estén por debajo del rango de operaciones hidráulicas de los caudales medios del río CMMin.

Fase 2 Consolidación: Para unificar los métodos seleccionados en la fase de evaluación, se promediaron por meses todos los CE s mensuales y diarios respectivamente y se obtuvieron los CE promedios consolidados.

Fase 3 Resultante: El producto del modelo se obtuvo con los caudales ecológicos resultantes, aplicando la media aritmética en ambos CE promedios consolidados en forma mensual y por registro.

Fase 4 Viabilidad: Permite determinar si el caudal ecológico resultante en el modelo propuesto es hidráulicamente apto en referencia a los valores medios y mínimos que el río permite, para ello se confronta el caudal ecológico promedio resultante

con los caudales mínimos y medios multianuales mensuales y con el mínimo medio diario.

Fase 5 Normativa: Para comprobar que los CE resultantes obtenidos en la fase 3 cumplen con la normativa regional, se compararon los CE resultantes (mensual y diario) y la media de los meses de estiaje (julio, agosto y septiembre) con los CE de la metodología del 95 % de persistencia establecida en la República del Perú [28].

3. Análisis y Discusión de resultados

3.1. Cálculos iniciales

En la Tabla 1 se presenta el comportamiento del régimen fluvial del río Santa en la estación Condorcerro. La interpretación colorimétrica de los valores de la Tabla 1 indica que anualmente el régimen fluvial del período de estiaje o caudales menores se inicia en el mes de junio y culmina en el mes de noviembre, mientras que los períodos de avenidas o crecidas se inician en el mes de diciembre y culminan en el mes de mayo.

La zona de estudio se ubica en el hemisferio sur y las estaciones astronómicas tienen una duración aproximada de tres meses; cuando el sol está directamente sobre la línea ecuatorial se producen el equinoccio de otoño lo que ocurre en el mes de marzo; el equinoccio de primavera ocurre en el mes de septiembre. Cuando el sol está sobre los trópicos de cáncer y capricornio se producen el solsticio de invierno en el mes de junio y el solsticio de verano en el mes de diciembre [28]. En la Tabla 2 se diferencia las cuatro estaciones geográficas indicadas.

Superponiendo las Tablas 1 y 2 se observa que los caudales de avenida o crecidas se producen en las estaciones de verano-otoño, mientras que las condiciones de sequía o estiaje se producen durante las estaciones de invierno-primavera. Este fenómeno ocurre porque el caudal del río Santa depende del aporte de fuentes que provienen en la época de verano de los deshielos de glaciares ubicados en la Cordillera Blanca [6] donde las precipitaciones en la cuenca alta se transforman en nieve y se acumulan como hielo glaciar impidiendo que circule el agua en los meses de invierno.

Tabla 1: Comportamiento régimen fluvial anual, río Santa, estación Condorcerro

Mes	Caudal Medio Mensual CMM (m ³ /s)
Enero	201,135
Febrero	274,480
Marzo	354,719
Abril	259,028
Mayo	107,529
Junio	60,072
Julio	46,176
Agosto	42,978
Septiembre	45,878
Octubre	65,570
Noviembre	96,119
Diciembre	143,210

Tabla 2: Estaciones astronómicas, río Santa, estación Condorcerro

Mes	Estación
Enero Febrero	Verano
Marzo Abril Mayo	Otoño
Junio Julio Agosto	Invierno
Septiembre Octubre Noviembre	Primavera
Diciembre	Verano

Basado en el análisis del régimen fluvial dado en la Tabla 1 se determinan las condiciones para la calcular los CE por los métodos Tennant o Montana, método Canadiense, método Aquatic Base Flow (ABF) y método Dirección General de Aguas de Chile (DGA); mientras que los períodos estacionales indicados en la Tabla 2 forman parte de la determinación de los CE por los métodos NABF y Hoppe.

En la Figura 2 se presenta la curva de duración generada a partir de los 720 datos de los caudales mensuales. Esta curva muestra el comportamiento hidráulico del régimen fluvial para las frecuencias/magnitudes de los caudales igualados o excedidos y la proporción acumulada del porcentaje del tiempo que el caudal se excede. Esta información servirá de base para la determinación de los CE de los métodos 90 % de excedencia, 95 % de persistencia y el método IDEAM.

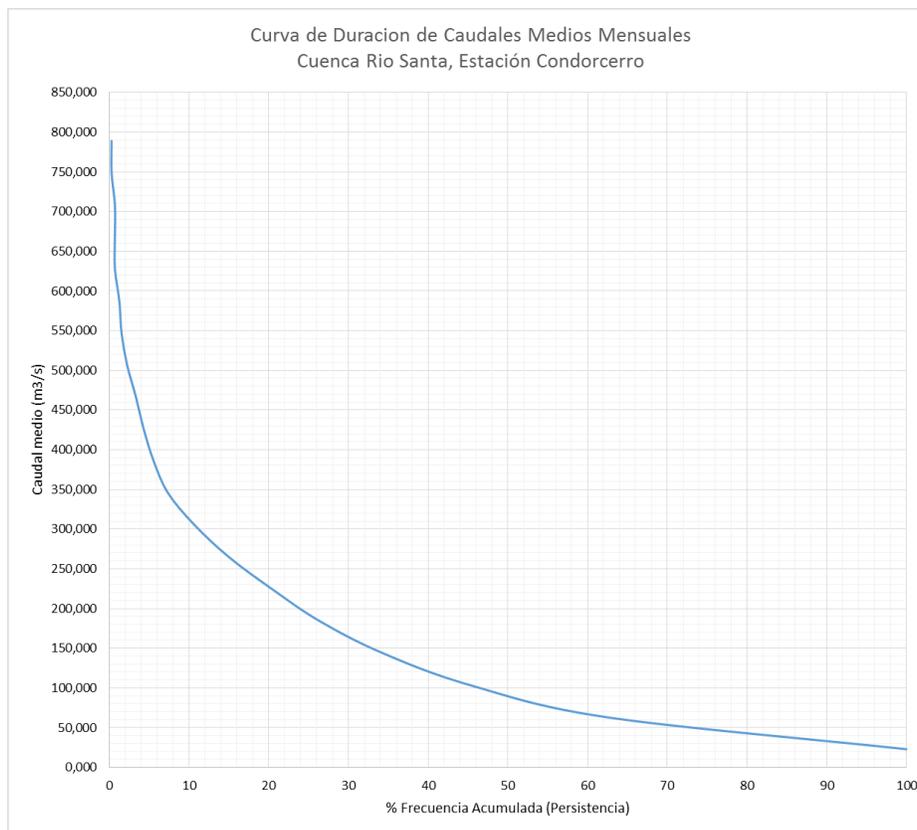


Figura 2: Curva de duración de caudales CDC, caudales medios mensuales, río Santa, estación Condorcerro

3.2. Desagregación de caudales mensuales

3.2.1. Interpolación

Luego de la desagregación de las series mensuales se realizó la interpolación spline cúbica ISC en todas las transiciones de un mes a otro de los registros de caudales diarios, utilizando un rango de 14 días de ajustes y las asignaciones de los días fijos en el rango de ajustes como se muestran en la Tabla 3 realizada en la transición de los meses Enero-febrero de 1962.

La transición entre los meses de Enero-Febrero se produce en los renglones de datos 7 y 8, y las diferencias porcentuales se obtienen de la relación porcentual que hay entre ellos. El caudal desagregado presenta una diferencia porcentual de 60,10 % que es superior al 10 % de lo recomendado, lo que amerita la aplicación de la ISC y que, a través de los datos restringidos de 4, 5 y 6 días, se definen y se grafican las diferencias porcentuales para cada caso como se muestra la Figura 3.

En la Tabla 3 se presenta la interpolación spline

cúbica de los caudales medios diarios, transición Enero-febrero 1962 del río Santa en la estación Condorcerro. En esta tabla, programada para el cálculo de la ISC, se aprecian que los días fijos resaltados en color amarillo, para 4 días ocupan las posiciones 1, 3, 12 y 14; los días fijos para 5 días están distribuidos en las posiciones 1,4,7,12 y 14 y los días fijos para 6 días se establecieron en las posiciones 1,3,6,9,12 y 14, lo que permite a la ISC realizar el ajuste de los datos en aquellos renglones no restringidos. Los resultados porcentuales para los 4, 5 y 6 días fijos presentan una diferencia porcentual de transición del 9,27 %, 11,85 % y 36,36 % respectivamente, infiriendo que a mayor cantidad de días fijos se incrementa la diferencia intermensual de transición como se evidencia en los valores porcentuales de las interpolaciones para los días fijos 5 y 6.

En vista que las interpolaciones con 5 y 6 días fijos sobrepasan el mínimo porcentaje requerido significativamente y que la interpolación con

Tabla 3: Interpolación spline cúbica, caudales medios diarios, transición Enero-febrero 1962, río Santa, estación Condorcerro

Mes	Dato	Caudal m ³ /s			
		Caudal Desagregado	Caudal Interpolado 4 Datos fijos	Caudal Interpolado 5 Datos fijos	Caudal Interpolado 5 Datos fijos
Enero	1	900,20	900,20	900,20	900,20
	2	649,48	752,79	801,01	703,84
	3	618,28	618,28	719,70	618,28
	4	674,15	507,10	674,15	708,99
	5	886,37	419,67	672,96	859,93
	6	909,71	353,93	687,46	909,71
	7	679,74	307,82	679,74	749,29
Febrero	8	271,21	279,29	622,40	479,10
	9	251,92	266,27	530,31	251,92
	10	255,97	266,70	428,87	181,42
	11	279,44	278,51	343,52	224,67
	12	299,66	299,66	299,66	299,66
	13	323,40	327,81	312,90	342,20
	14	359,60	359,60	359,60	359,60
Diferencia		60,10	9,27	11,85	36,36

:Dato fijo

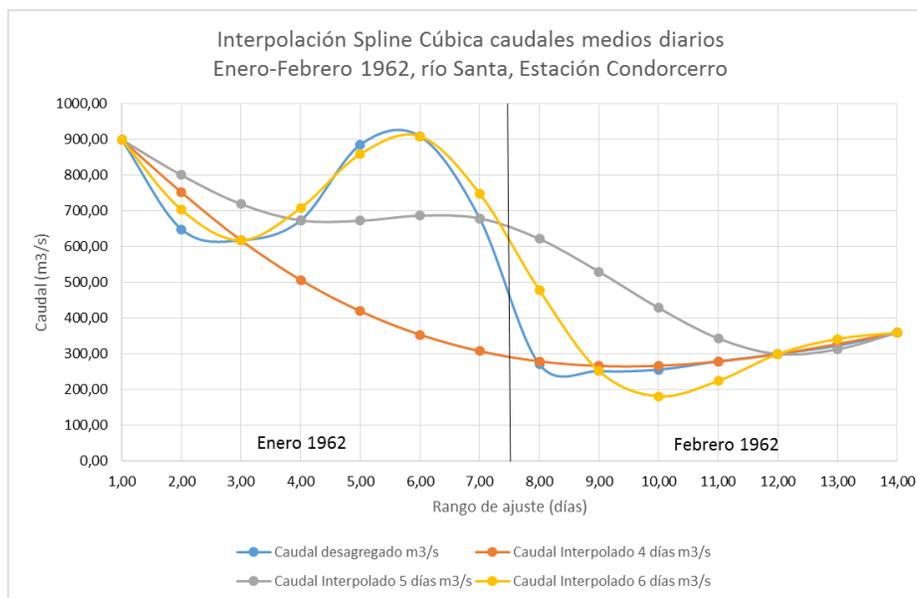


Figura 3: Interpolación Spline Cúbica en la transición de caudales diarios Enero-Febrero 1962, río Santa, estación Condorcerro

4 días fijos presenta un porcentaje menor al porcentaje de diferencia de transición requerida, se escogieron los datos de los caudales medios diarios de la transición con la interpolación de 4 días para constituirse como datos definitivos para la verificación estadística y determinación de los caudales ecológicos.

En las observaciones realizadas a las curvas de interpolación de la Figura 4, la curva de caudal interpolado de 4 días refleja un comportamiento

ordenado e inscrita en una curva extendidas, mientras que la curva de caudal interpolado de 5 días es más pronunciada con cuatro curvas circulares con tendencia a un trazado medio dentro de la curva de caudal desagregado; la curva de caudal interpolado de 6 días describe una trayectoria paralela a la curva de caudal desagregado con tendencia a la invariabilidad por contener la mayor cantidad de datos fijos.

Tomando en cuenta la curva de mejor ajuste con

respecto a los datos contenidos en cada mes de datos diarios y el objetivo de suprimir los cambios bruscos en la transición intermensual de los datos de caudales diarios, se elige la curva de caudales interpolados con 4 días fijos ya que esta curva de interpolación se ajusta dentro de los 14 días del rango de transición para la interpolación con restricción de datos mínimo y equidistante para ambos meses, generando una relación promedio de afectación de datos 5/30 días para cada mes interpolado.

3.2.2. Verificación

La comprobación de los registros obtenidos de la desagregación se realizó a través de la representación de las desviaciones estándares (σ) anuales aplicados a los registros de caudales medios anuales diarios y mensuales como se muestran en la Figura 4. Así mismo para establecer las diferencias numéricas se contrastaron los caudales medios (mínimos, máximos y medios multianuales) de ambos registros como se aprecian en Figura 5.

Las desviaciones estándares anuales se muestran en las barras de la Figura 4, siendo los registros de caudales medios mensuales las barras de color naranja, los registros de caudales medios diarios las barras de color verde y la curva de caudales medios anuales se identifican en color azul.

En el análisis comparativo de las desviaciones estándar aplicado en los registros mensuales y diarios no se aprecia variaciones de valores de las barras representativas, indicando que el procedimiento de desagregación de datos para este periodo es válido. El reuso de registros de caudales medios diarios para la desagregación de datos para el periodo 2011 - 2019 no revela cambios en el comportamiento hidráulico ni variaciones que afecten el manejo de los datos, confirmando que el uso de datos anteriores con la misma dinámica hidráulica permite la desagregación de series mensuales de manera exitosa y eficiente.

Las líneas de tendencia de las desviaciones estándares para ambos registros son paralelas y descendientes como lo expresan las ecuaciones con pendientes negativas de -0.5523 y -0.5596 mostrando una diferencia porcentual entre ambas

pendientes del 0.73 %, lo que infiere que ambas desviaciones estándares calculadas son semejante con una diferencia de error descartable, por lo que se considera que los registros de caudales medios diarios desagregados son aceptable y adecuados para las consecución de cálculos para la determinación de caudales ecológicos.

De la comparación de caudales medios (mínimos, máximos y medios multianuales) de ambos registros mostrados en la Figura 5 se obtiene que la variación de los promedios en los caudales máximos es del 41,16 % y de los caudales mínimos es del 28,96 %, mientras que los promedios mensuales multianuales presentan una variación de 0,055 m³/s equivalente al 0,40 %. Estas diferencias porcentuales se generan debido a que el registro de flujos de caudales con los registros diarios refleja el comportamiento más exacto y real del río, no afectando el desarrollo de las determinaciones de caudales y procesos subsecuentes de este estudio.

3.3. CE con registros mensuales

En la Tabla 4 se muestran los CE propuestos. Los resultados se totalizaron en medios mensuales (multi-métodos) y por cada metodología en caudales medios anuales CEMA. Las gráficas comparativas por grupos de CE respecto al caudal medio mínimo mensual CMMin se ilustran en las Figuras 6, 7 y 8.

Del análisis numérico de la sistematización de la Tabla 4 se obtuvieron las siguientes observaciones:

1. El método Índice 95 % coincide en el procedimiento y los resultados con el método de 95 % de persistencia que se utiliza como referencia normativa por la legislación peruana.
2. El caudal ecológico medio anual CEMA obtenido en cada uno de los métodos Tennant Q_e mínimo, Rafael Heras, ABF, 90 % excedencia, código francés, legislación Suiza, MVDT1-Colombia, IDEAM-Colombia, Provincia del Atlántico – Canadá, DGA Chile criterio I y II, Fleckinger y Navarro, mantiene el mismo valor mensual durante el año.
3. Los métodos Tennant Q_e mínimo, código francés, DGA Chile criterio I y Navarro arrojan el mismo valor de 14,141 m³/s,

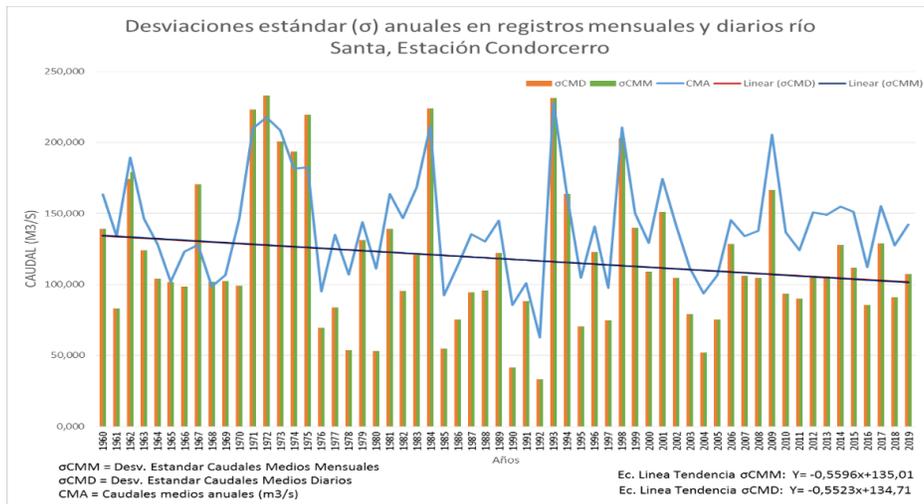


Figura 4: Desviaciones estándares anuales en caudales medios mensuales-diarios, río Santa, estación Condorcero

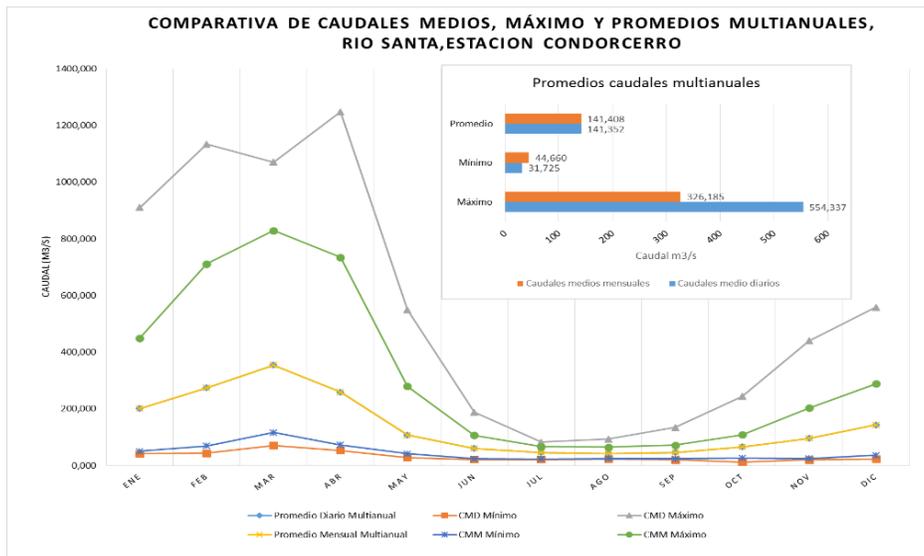


Figura 5: Promedios máximos, mínimos y promedio multianual, registros mensuales y diarios, río Santa, Estación Condorcero

lo que indica que el método Tennant por ser más conocido por su trayectoria se utiliza como procedimiento adoptado con otra denominación para efectos normativos o legales.

Los métodos NGPRP, Índice CDC (50%, 90%, 95%), Tennant Qe (mínimo, regular, bueno, excelente, sobresaliente) y NEABF fueron representados y comparados con el caudal medio mínimo CMMin en la Figura 6 en formato lineal de Excel, del cual se destaca el trazado del método

NEABF que incrementa el CE requerido a partir del mes crítico de los caudales mínimos que es Agosto. Los métodos Tennant Qe (mínimo y regular) presentan valores inferiores el CMMin durante el año de estudio, mientras que los métodos Tennant Qe (bueno, excelente, sobresaliente) presentan un comportamiento mixto, con valores de CE por debajo del CMMin en la temporada de avenida y en el resto del año con valores superiores.

En los métodos de CE representados en la Figura 7 se destacan los métodos código francés,

Tabla 4: Caudales ecológicos, registros medios mensuales, río Santa, estación Condorcerro

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	CEMA
NGPRP	167,404	251,349	315,505	234,462	99,910	41,174	36,842	32,143	33,22	47,731	56,319	123,704	119,98
Índice CDC 50 %	175,027	256,947	327,165	241,543	100,237	57,826	46,131	42,755	45,417	62,025	85,869	129,228	130,847
Índice CDC 90 %	107,641	157,847	173,776	134,271	59,109	39,814	34,780	29,611	32,492	47,047	56,760	69,455	78,55
Índice CDC 95 % (norma Peruana)	103,168	141,739	134,355	108,184	51,925	36,656	28,572	28,673	28,222	43,500	50,390	59,978	67,947
Tennant Mínimo	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141
Tennant Regular	42,422	42,422	42,422	42,422	42,422	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	42,422	28,282
Tennant Bueno	56,563	56,563	56,563	56,563	56,563	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	56,563	42,422
Tennant Excelente	70,704	70,704	70,704	70,704	70,704	42,422	42,422	42,422	42,422	42,422	42,422	70,704	56,563
Tennant Sobresaliente	84,845	84,845	84,845	84,845	84,845	56,563	56,563	56,563	56,563	56,563	56,563	84,845	70,704
NEABF	125,752	125,752	222,982	222,982	222,982	42,755	42,755	42,755	125,752	125,752	125,752	125,752	129,31
Rafael Heras	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784	4,784
Texas	70,011	102,779	130,866	96,617	40,095	34,695	27,679	25,653	27,250	37,215	51,521	51,691	58,006
ABF	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755
Hoppe	80,454	109,792	212,831	155,417	64,517	48,058	36,941	34,382	32,115	39,342	38,447	57,284	75,798
90 %	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816
Excedencia													
Código Frances	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141
Leg. Suiza Qe-0,5 %CMA	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873	1,873
Leg. Suiza Qe-1 %CMA	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121	3,121
Leg. Suiza Qe-1,5 %CMA	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182
Leg. Suiza Qe-1,8 %CMA	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818	4,818
MVDTI-Colombia	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489	21,489
IDEAM-Colombia	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39
Canadiense	42,422	42,422	42,422	42,422	42,422	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	42,422	28,282
Prov. Atlántico - Canadá	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352
DGA - Chile Criterio I	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141
DGA - Chile Criterio I	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282
Fleckinger 30 %CMMMA Min	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893	12,893
Fleckinger 8 %CMMMA	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313	11,313
Navarro	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141	14,141
Promedio:	49,471	60,393	73,196	62,023	42,896	26,371	24,741	24,13	27,181	29,876	32,029	42,148	41,205

legislación Suiza (0.5 %, 1 %, 1.5 %, 1.8 %) CMMA y Rafael Heras que presentan valores inferiores el CMMin durante el año de estudio, mientras que los métodos ABF y 90 % de excedencia presentan una transición con el CMMin cuyos CE son menores de Enero a Mayo y superiores de Mayo a Diciembre. El método de Texas muestra dos puntos de intersección con la

curva de CMMin, en el mes de Mayo cuando culmina la temporada de lluvias e inicia la de sequía y en el mes de Agosto de caudal mínimo minimorum. El método Hoppe describe el CE en forma paralela sobre la curva de CMMin.

En los CE comparativos de la Figura 8 los métodos MAVDT-1, Navarro, Fleckinger (8 %, 305) CMMA, Canadiense y DGA Criterio I

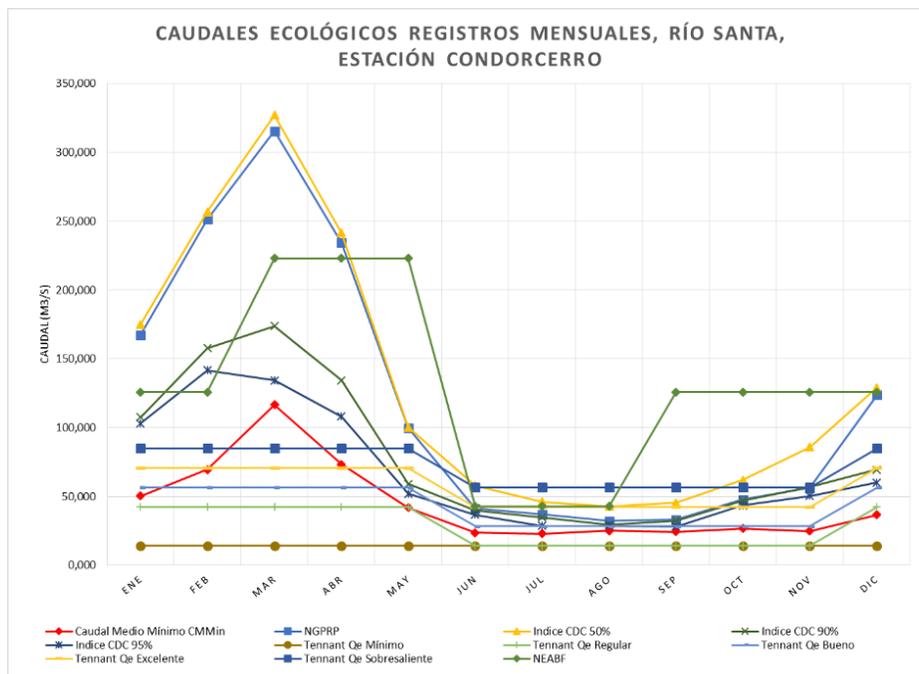


Figura 6: Caudales ecológicos comparativos, registros mensuales, río Santa, Estación Condorcero

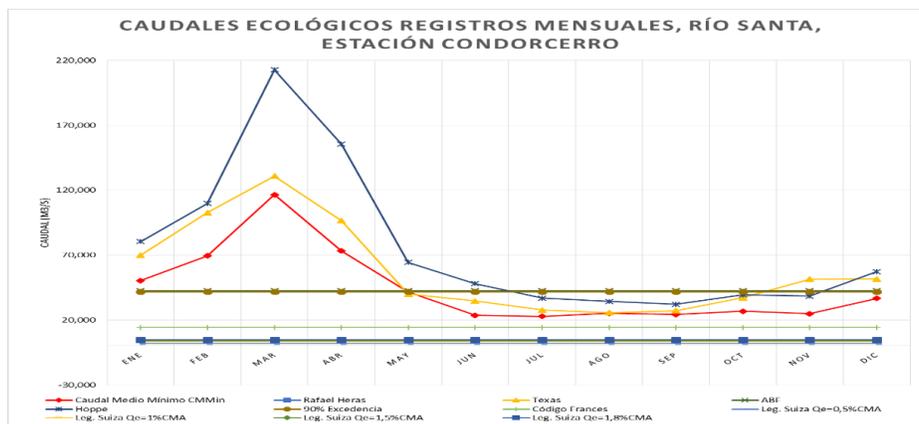


Figura 7: Caudales ecológicos comparativos, registros mensuales, río Santa, Estación Condorcero

presentan valores inferiores el CMMin durante el año de estudio, mientras que los métodos IDEAM, Provincia del Atlántico y DGA Criterio II muestran un comportamiento lineal bimodal en referencia al CMMin con CE inferiores en la temporada de lluvia de Enero a Mayo y CE superiores en la temporada de sequía de Junio a Diciembre.

3.4. CE con registros diarios.

En la Tabla 5 se muestran los CE propuestos. Los resultados se totalizaron de la misma manera que se hicieron con los registros mensuales. Las gráficas comparativas por grupos de CE respecto al caudal

medio mínimo mensual CMMin se ilustran en la Figura 9.

Del análisis numérico de la sistematización de la Tabla 5 se destaca que el caudal ecológico medio anual CEMA obtenido en el método 7Q10 y el método Provincia de Ontario, tienen el mismo valor mensual en las distintas estaciones climatológicas del año de estudio.

Los métodos de CE obtenidos de los registros de caudales medios diarios fueron representados y comparados con el caudal medio mínimo CMMin en la Figura 9 en formato lineal de Excel. El análisis

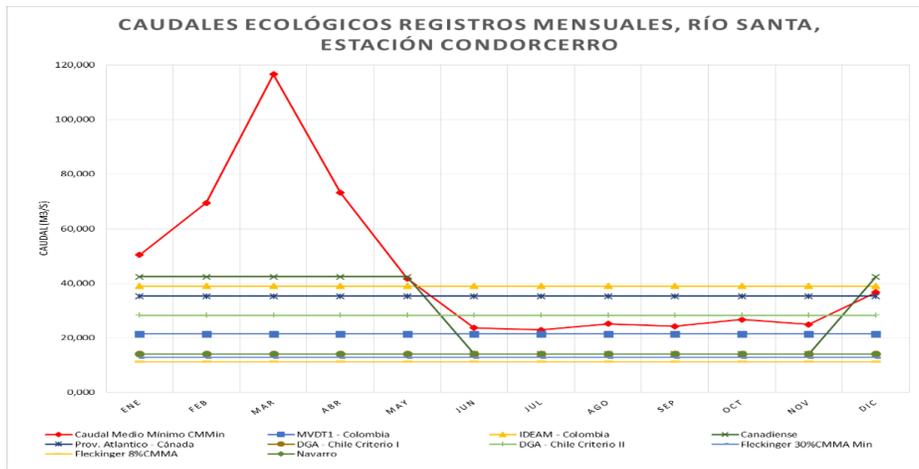


Figura 8: Caudales ecológicos comparativos, registros mensuales, río Santa, Estación Condorcero

Tabla 5: Caudales ecológicos, registros medios diarios, río Santa, estación Condorcero

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	CEMA
7010	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421
RVA	91,581	120,308	163,446	119,503	44,183	17,474	9,786	8,364	10,11	18,222	38,342	63,810	58,761
Prov. Ontario	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133
Caudal Básico de Mto.	77,599	77,237	67,770	73,084	62,338	61,910	55,145	50,765	53,426	60,829	76,288	76,711	66,092
Promedio:	66,433	73,525	81,943	72,285	50,768	43,985	40,371	38,921	40,022	43,901	52,796	59,269	55,352

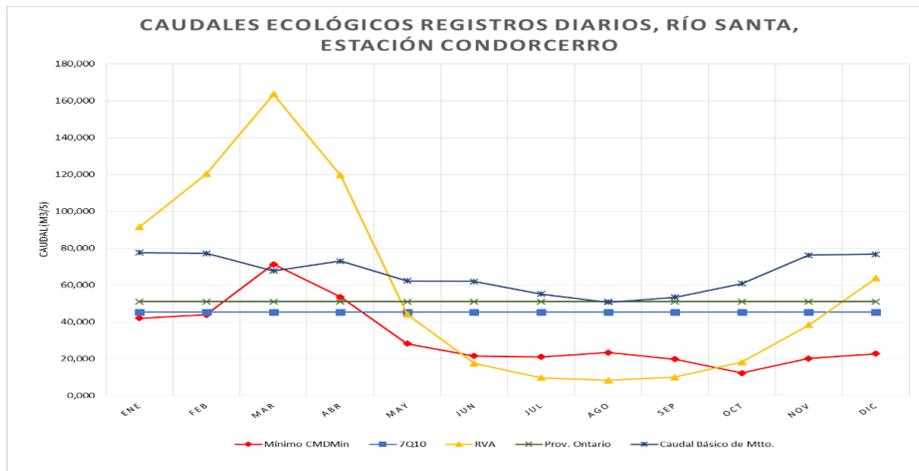


Figura 9: Caudales ecológicos de registro de caudales medios diarios, río Santa, estación Condorcero.

grafico de cada método se describe a continuación:

1. Los CE de los métodos 7Q10 y Provincia de Ontario se expresan en forma constante durante todo el año de estudio, siendo inferiores al CMDMin de Febrero hasta Abril, el resto de los meses se mantiene con CE superiores al CMDMin
2. El método caudal básico de mantenimiento CBM mantiene valores de CE superiores al

3. El método RVA estima los CE en forma variable, con valores mayores que los de CMDMin en la temporada de avenidas destacando un pico máximo en el mes de Marzo; en cambio en los meses de sequía Junio a Octubre las estimaciones del CE son

menores.

3.5. Modelo propuesto

El proceso de selección del modelo propuesto se realizó siguiendo lo establecido en las cinco fases de desarrollo indicadas en la metodología. En la fase de evaluación de los CE (mensuales y diarios), se descartaron los métodos NEABF, Canadiense y el RVA representados en las Figuras 6, 8 y 9 por presentar valores irregulares que inducen a variaciones atípicas que no se corresponden con el flujo normal del río. Se descartaron los métodos Tennant Q_e mínimo, Código Francés, DGA criterio I y Navarro por arrojar valores repetitivos de $14,141 \text{ m}^3/\text{s}$; también se eliminaron las metodologías: Tennant Q_e regular, Rafael Heras, Legislación Suiza, MAVDT-1, IDEAM, y Fleckinger, por arrojar valores de CE menores que el CMMin. Adicionalmente con el fin de hacer prevalecer la importancia del caudal mínimo que se produce en la época de estiaje, se incluyeron en el modelo propuesto los métodos que arrojan valores menores que los del CMMin en los meses de avenida, como son: Tennant (bueno, excelente, sobresaliente), ABF, 90 % excedencia, IDEAM, Provincia del Atlántico y DGA Criterio II, 7Q10, Provincia de Ontario y CBM.

De la fase de depuración se pasó a la fase de consolidación con los métodos no eliminados y los considerados como conformes. Así, la propuesta se conforma de los 13 métodos de CE de caudales medios mensuales que se presentan en la Tabla 6 y tres métodos de CE de caudales medios diarios que se dan en la Tabla 7. En la Tabla 8 se presentan los caudales ecológicos resultantes mensuales y por registro que constituyen la fase 3 del proceso de selección de la propuesta; en la tabla se incluye el valor absoluto objeto de este estudio.

Como se muestra en la Figura 10 el caudal ecológico promedio resultante de $58,823 \text{ m}^3/\text{s}$ se encuentra dentro del rango de operaciones mensuales del río Santa entre el caudal medio de $141,352 \text{ m}^3/\text{s}$ y el caudal mínimo mensual de $44,660 \text{ m}^3/\text{s}$ y también dentro del rango de operaciones diaria del río Santa entre el caudal medio de $141,352 \text{ m}^3/\text{s}$ y el caudal mínimo diario de $31,725 \text{ m}^3/\text{s}$. Se considera que estos resultados

son hidráulicamente adecuados y representan bien a los valores medios y mínimos del río Santa permite.

En la Tabla 9 se presenta una comparación de los resultados obtenidos mediante el método del 95 % de persistencia y los valores dados por la normativa de la República del Perú de la fase 5 del modelo, la que justamente propone el método el mismo método del 95 % de persistencia [29]. La comparación entre los CE promedios diario y mensual mostrados en la Tabla 9 muestra que los CE de manera individual y consolidada no cumplen con la normativa regional por presentar valores menores a los establecidos en la mencionada norma. La menor variación ocurre en los CE promedios mensuales los que arrojan una diferencia del -7 %. Esto indica que los registros de caudales a ese nivel son más idóneos para el manejo normativo. Sin embargo, operacionalmente los meses de estiaje (julio, agosto y septiembre) son los que representan el período crítico multianual en el río Santa. En este período los caudales ecológicos resultantes arrojan valores mayores que los caudales de operación mínimos, diario y mensual, en porcentajes del 101,8 % y 79,7 % respectivamente; y al caudal ecológico estimado de 95 % de persistencia en los mismos meses en un 52,2 %. De ese modo, se establece que el caudal ecológico promedio resultante en este estudio con un valor de $58,82 \text{ m}^3/\text{s}$, es óptimo y viable.

4. Conclusiones

La información recabada de los registros y datos secundarios fueron los factores prevalecientes en el desarrollo de este estudio y sobre esa base se seleccionó la estación Condorcerro y un conjunto de métodos hidráulicos que utilizan registros mensuales y diarios. Por falta de información, no se pudieron incluir otras metodologías de CE que podrían ser potencialmente aplicables.

El método de Tennant que utiliza los tiempos de lluvia y sequía y el método de Hoppe que considera los periodos estacionales, fueron adaptados transformando los parámetros hemisféricos de los métodos a las condiciones de la estación

Tabla 6: Resumen consolidado de caudales ecológicos (m³/s) para los registros mensuales del río Santa en la estación Condorcerro

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
NGPRP	167,404	251,349	315,505	234,462	99,910	41,174	36,842	32,143	33,22	47,731	56,319	123,704	119,980
Índice CDC 50 %	175,027	256,947	327,165	241,543	100,237	57,826	46,131	42,755	45,417	62,025	85,869	129,228	130,847
Índice CDC 90 %	107,641	157,847	173,776	134,271	59,109	39,814	34,780	29,611	32,492	47,047	56,760	69,455	78,55
Índice CDC 95 %	103,168	141,739	134,355	108,184	51,925	36,656	28,572	28,673	28,222	43,5	50,390	59,978	67,947
Tennant Qe Bueno	56,563	56,563	56,563	56,563	56,563	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	56,563	42,422
Tennant Qe Excelente	70,704	70,704	70,704	70,704	70,704	42,422	42,422	42,422	42,422	42,422	42,422	70,704	56,563
Tennant Qe Sobresaliente	84,845	84,845	84,845	84,845	84,845	56,563	56,563	56,563	56,563	56,563	56,563	84,845	70,704
Texas	70,011	102,779	130,866	96,617	40,095	34,695	27,679	25,653	27,250	37,215	51,521	51,691	58,006
ABF	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755	42,755
Hoppe	80,454	109,792	212,831	155,417	64,517	48,058	36,941	34,382	32,115	39,342	38,447	57,284	75,798
90%Excedencia	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816	41,816
IDEAM - Colombia	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000	39,000
Prov. Atlántico - Canadá	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352	35,352
DGA-Chile-Criterio 1	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282	28,282
CE promedio multianual	78,787	101,412	120,987	97,844	58,222	40,907	37,53	36,263	36,656	42,238	46,698	63,618	63,43

Tabla 7: Resumen consolidado de caudales ecológicos para los registros diarios del río Santa en la estación Condorcerro (m³/s)

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
7Q10	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421	45,421
Prov. Ontario	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133	51,133
Caudal Básico de Mtto.	77,599	77,237	67,770	73,084	62,338	61,910	55,145	50,765	53,426	60,829	76,288	76,711	66,092
CE Promedio multianual	58,051	57,93	54,775	56,546	52,964	52,821	50,566	49,106	49,993	52,461	57,614	57,755	54,215

Tabla 8: Caudales ecológicos promedios diarios, mensuales y resultantes (m³/s), río Santa, estación Condorcerro

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
CE prom multianual diario	58,051	57,930	54,775	56,546	52,964	52,821	50,566	49,106	49,993	52,461	57,614	57,755	54,215
CE prom multianual	78,787	101,412	120,987	97,844	58,222	40,907	37,530	36,263	36,656	42,238	46,698	63,618	63,43
CE prom multianual resultante	68,419	79,671	87,881	77,195	55,593	46,864	44,048	42,685	43,325	47,349	52,156	60,687	58,823

Condorcerro, utilizando los regímenes fluviales que establecen las temporadas de avenidas y sequías y las estaciones astronómicas de los meses de verano, otoño, invierno y primavera en la cuenca. Los resultados obtenidos mediante estos métodos son los que mejor se ajustan al

comportamiento hidráulico del río Santa.

El proceso de sistematización de los métodos aplicados para el cálculo del CE se relaciona con el volumen y manejo de los registros de la estación Condorcerro. Para el caso de los valores mensuales se utilizaron 720 datos para las 21 metodologías;

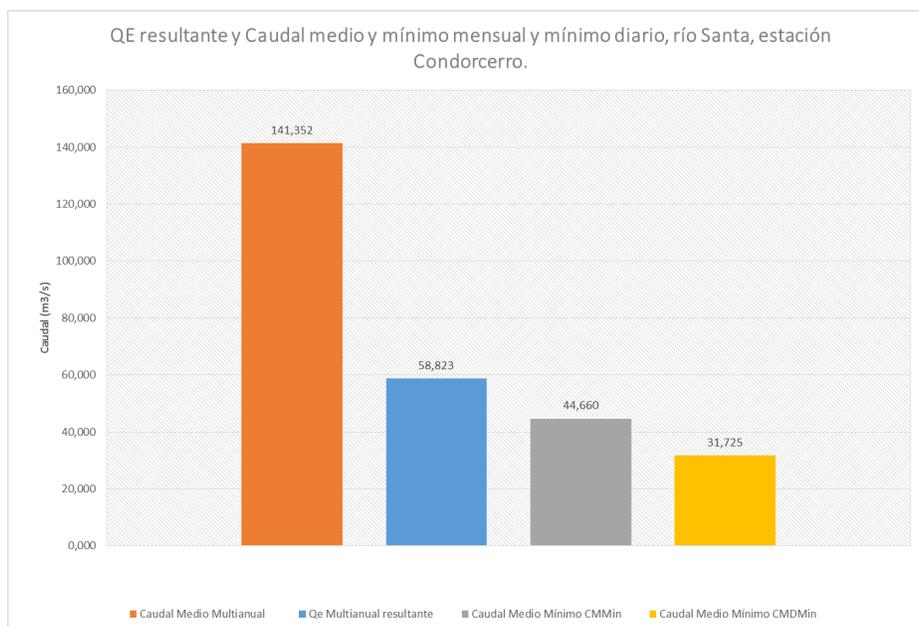


Figura 10: Comparación entre el QE resultante y el caudal medio y mínimo mensual y mínimo diario promedio, río Santa, estación Condorcerro

Tabla 9: Caudales ecológicos especificados en la norma peruana, río Santa, estación Condorcerro

	Caudal m ³ /s	Porcentaje %
95 % persistencia (normativo)	67,947	
CE Promedio Diario Multianual	↓ 54,215	-20
CE Promedio Mensual Multianual	↓ 63,43	-7
CE Promedio Resultante	↓ 58,823	-13
Análisis período sequía (Jul-Agost-Sep)		
95 % persistencia (normativo)	28,489	
CE Promedio (Diario&Mensual)	↑ 43,353	52,2
Q mínimo operativo diario	21,484	
CE Promedio (Diario&Mensual)	↑ 43,353	101,8
Q mínimo operativo mensual	24,122	
CE Promedio (Diario&Mensual)	↑ 43,353	79,7

mientras que, para los CE diarios, 21915 para las 4 metodologías; de estos últimos, 4470 se obtuvieron y verificaron en el proceso de desagregación de series mensuales.

En la fase de evaluación del modelo se analizó cada método identificando los casos repetidos, los comportamientos irregulares y/o lineales, la comparación con otros métodos aplicados y se estableció el esquema de bandas de caudales de operaciones mínimo-medio mensual donde los CE puede fluctuar.

El CE resultante del análisis realizado es de 58,82 m³/s (Tabla 9) en la estación Condorcerro.

Este resultado concuerda con los caudales mínimos operativos del río, los cuales persisten en el rango de operaciones de flujo normal durante los regímenes fluviales de avenida-sequía, incorporando un factor de seguridad que garantiza mayor estabilidad hidráulica del cauce y una mejora de los hábitats en el ecosistema del río. Así se previenen riesgos de eventos climatológicos de sequía extrema como la fase cálida de El Niño costero.

5. Recomendaciones

Sobre la base de los resultados obtenidos en el presente estudio, se recomienda el uso de los métodos de Curva de Duración de Caudales CDC y el método de Tennant o Montana para registros de caudales medios mensuales; mientras que para para registros de caudales medios diarios se recomienda aplicar el método Canadiense desarrollado para la Provincia de Ontario. Estos métodos incluyen las condiciones hidrológicas y estacionales necesarias para la estimación adecuada del caudal ecológico.

En aquellos casos con restricciones normativas para el uso de determinadas metodologías, en la estimación de los caudales ecológicos solo se podrá usar el modelo propuesto para fines de investigación.

Es necesario organizar la difusión del tema de caudales ecológicos como agente determinante del mantenimiento de los ecosistemas, a nivel académico, mediante la organización de simposios, congresos, conferencias y publicaciones científicas, que permitan divulgar los resultados de las investigaciones.

Se recomienda motivar a las instituciones públicas y privadas para que brinden el apoyo logístico para continuar con investigaciones sobre esta importante temática ambiental.

Se requiere que los ministerios de ambiente y organismos relacionados de cada país de la región diseñen planes hidroecológicos necesarios para el sostenimiento de los ecosistemas y de los hábitats de las especies piscícolas en cada cuenca, y permitan la incorporación y actualización de las estaciones hidrométricas en las principales cuencas para el monitoreo a través de redes sistemáticas en tiempo real proporcionen la información sobre las condiciones ecológicas y niveles de los ríos.

6. Referencias

- [1] M. Moreno, “Metodología y determinación de caudales ambientales en la cuenca del río Pastaza,” Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniería Ambiental, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2008.
- [2] L. M. Castro, Y. Carvajal, y E. A. Monsalve, “Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental,” *Ingeniería y Universidad*, vol. 10, no. 2, pp. 179–195, 2006.
- [3] SEDALIB, “Diagnóstico hídrico rápido de la cuenca del río Santa como fuente de agua y servicios ecosistémicos hídricos,” Perú, Reporte técnico, 2018.
- [4] SIAR-ANCASH, “Cuenca Hidrográfica del Río Santa - Departamento de Ancash,” Perú, Reporte técnico, 2022.
- [5] SIAR-ANCASH, “Sistema de Información Ambiental Regional SIAR - Ancash,” Perú, Reporte técnico, 2022.
- [6] SENAMHI, “Escenarios climáticos en la cuenca del río Santa para el año 2030,” Perú, Resumen técnico, 2009.
- [7] D. Kumar, U. Lall, and M. Petersen, “Multisite disaggregation of monthly to daily streamflow,” *Water Resources Research*, vol. 36, no. 7, pp. 1823–1833, 2000. <https://doi.org/10.1029/2000WR900049>
- [8] A. Acharya and J. H. Ryu, “Simple Method for Streamflow Disaggregation,” *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 509–519, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.000081](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.000081)
- [9] C. C. Martínez, “Síntesis Metodológica para la Obtención de Caudales Ecológicos (Qe), Resultados y Posibles Consecuencias,” Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, 2013.
- [10] A. Silveira y G. Silveira, “Vazões mínimas,” in *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*, E. M. C. João Batista Dias De Paiva, Ed. Porto Alegre: ABRH, 2001, ch. 5.
- [11] ENDESA, “Introducción al Cálculo de Caudales Ecológicos, Un análisis de las tendencias actuales,” ENDESA, Santiago de Chile, Chile, Informe técnico, 2011.
- [12] D. S. Armstrong, G. W. Parker, and T. A. Richards, *Evaluation of Streamflow Requirements for Habitat Protection by Comparison to Streamflow Characteristics at Index Streamflow-Gaging Stations in Southern New England*. Reston, Virginia USA: U.S. Geological Survey, 2004.
- [13] O. Brown, Y. Gallardo, P. Williams, e Y. Torres, “Caudal ecológico del río Chambas en la provincia Ciego de Ávila,” *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 37, no. 1, pp. 58–71, 2016.
- [14] D. Moreno, “Análisis de Variables Ecohidrológicas e Hidráulicas en la Implementación de Metodologías para Determinar Caudales Ambientales en Ecosistemas de Alta Montaña y Páramo,” Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de Magister en Ingeniería Agrícolas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2020.
- [15] A. L. F. Troya, “Análisis de metodologías para el estudio de Caudales Ecológicos. Casos de estudio en ríos altoandinos ecuatorianos,” Monografía previa a la obtención del título de Licenciada en Ciencias Biológicas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador, 2016.
- [16] Autoridad Nacional del Agua (ANA), *Diagnóstico sobre los caudales ecológicos en el Perú (primera fase): Contexto nacional e internacional*, Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú, 2015.
- [17] République Française, Code de l’environnement, *Création Loi N° 2006-1772 30/12/2006 - art. 6 JORF 31/12/2006*, París, 2006.
- [18] N. Pantoja, “Estimación de caudales ecológicos mediante métodos hidráulicos, hidrológicos y ecológicos en la quebrada El Conejo (Mocoa-Putumayo),” Trabajo especial de grado para optar al título de Magister en Conservación y Uso de la Biodiversidad, Universidad Pontificia Javeriana, Bogotá, Colombia, 2017.
- [19] A. Cabra y M. F. Corradine, “Estimación del caudal ecológico por los métodos $7Q_{10}$, $Q_{95\%}$ y los factores de reducción del 25 % en el río Ocoa, a partir de la generación de caudales diarios utilizando el modelo agregado de tanques,” Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Recursos Hídricos, Universidad Católica de Colombia, Colombia, 2014.
- [20] República de Colombia, *Proyecto de Ley de Aguas, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*, Colombia, 2005.

- [21] J. Caissie, D. Caissie, and N. El-Jabi, “Hydrologically Based Environmental Flow Methods Applied to Rivers in the Maritime Provinces (Canada),” *River Research and Applications*, vol. 31, no. 6, pp. 651–662, 2014. <https://doi.org/10.1002/rra.2772>
- [22] L. Berthot, A. St-Hilaire, D. Caissie, N. El-Jabi, J. Kirby, and S. Ouellet-Proulx, “The use of wetted perimeter as habitat proxy to assess environmental flows in Southern Quebec rivers (Canada),” *Ecological Indicators*, vol. 132, p. 108283, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108283>
- [23] Government of Ontario, “Technical guidance document for surface water studies in support of category 3 applications,” Ministry of the Environment, Conservation and Parks, Canada, TechReport, 2022.
- [24] Dirección General de Aguas. División de Estudios y Planificación, *Evaluación de Caudales Ecológicos en Cuencas de la IV, V y VI Región*, GeoHidrología Consultores LTDA., Santiago de Chile, Chile, 2014.
- [25] D. A. Pinzón, “Revisión y Aplicación de Metodología IFIM de Caudal Ambiental al Tramo La Calera-La Cabaña del Río Teusacá,” Proyecto de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2016.
- [26] M. Rustarazo, “Determinación de regímenes de caudales ecológicos mínimos. Adaptación del método IFIM-PHABSIM y aplicación a los ríos españoles,” Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2000. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.667>.
- [27] L. M. Castro, Y. Carvajal, y G. Céspedes, “Aplicación de la metodología de caudales básicos de mantenimiento en la Cuenca Media del río Tuluá - Subcuenca del Río Cauca,” *Revista Tecnura*, vol. 16, no. 31, pp. 33–44, 2012.
- [28] República del Perú, Ministerio del Ambiente, *Fechas de las estaciones astronómicas en el Perú*, Plataforma digital única del Estado Peruano, Perú, 2023.
- [29] Autoridad Nacional del Agua (ANA), “Metodología para determinar Caudales Ecológicos RJ-154-2016-ANA,” Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú, Informe Técnico, 2016.