

USO DE TELEDETECCIÓN REMOTA PARA EL ANÁLISIS DE CAMBIOS HIDRO-MORFOLÓGICOS EN EL RÍO BIOBÍO, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.

A. Peña Romero¹, D. Caamaño Avendaño² y P. Fuentes Aguilera³

RESUMEN

Los cambios hidro-morfológicos son aquellos cambios que comparan las características hidrológicas y geomorfológicas de los ríos. En este estudio se propone analizar los cambios de regímenes y forma del río Biobío a través de teledetección remota en diferentes tramos a lo largo de su curso. Los cambios se cuantifican mediante el procesamiento de imágenes del satélite LANDSAT, en sus versiones 5,7 y 8, obtenidas de la base de datos publicada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés). Con la información anterior se estimó el índice MNDWI con el fin de caracterizar automáticamente la forma del río. También, se consideró la información fluviométrica de la estación río Biobío en Rucalhue (DGA-MOP). Estos datos fueron clasificados en 4 periodos según la operación de las represas presentes en el curso principal del río Biobío, se estimaron las variaciones mensuales de caudales y las curvas de duración respectivas. La mayor disminución de caudales se observa en el período de implementación de la central Ralco bajando los niveles de caudales de 3000 a 1500 m³/s, mientras que con la construcción de la central Angostura se mantienen los caudales bajo los 1000 m³/s el 90% de las veces. Se observa variabilidad en el ancho medio del río, sin embargo, el índice de sinuosidad se mantiene a través de cada uno de los períodos. Por lo tanto, mediante el procesamiento y análisis de imágenes satelitales es posible visualizar y cuantificar los cambios morfológicos a lo largo del río Biobío.

PALABRAS CLAVES: Teledetección remota; Cambios hidro-morfológicos; MNDWI.

ABSTRACT

Hydro-morphological changes are those changes that compare the hydrological and geomorphological characteristics of rivers. In this study it is proposed to analyze the changes of regimes and the shape of the Biobío River through remote sensing in different sections throughout its course. The changes are quantified by the image processing of the LANDSAT satellite, in its versions 5, 7 and 8, obtained from the database published by the United States Geological Survey (USGS). With the above information, the MNDWI index is estimated in order to automatically characterize the shape of the river. Also, the discharge gaging station at Río Biobío en Rucalhue is considered (DGA-MOP). These data were classified in 4 periods according to the operation of the dams present in the main course of the Biobío River, the monthly variations of flows and the respective duration curves were estimated. The greatest decrease in flows is observed in the Ralco plant's implementation period, lowering the flow levels from 3,000 to 1,500 m³/s, while with the construction of the central Angostura the flows are implemented below 1000 m³/s in 90% of the time. Variability is observed in the average width of the river, however, the sinuosity index is maintained throughout each of the maintained ones. Therefore, through the processing and analysis of satellite images it is possible to visualize and quantify morphological along the Biobío River system.

KEYWORDS: Remote sensing; Hydro-Morphological changes; MNDWI.

¹Estudiante Pregrado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción – ampena@ing.ucsc.cl

²Profesor Guía, Departamento Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción – dcaamano@ucsc.cl

³Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción- pfuentes@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

La teledetección se define como la observación de objetos a distancia (Di Bella et al., 2008). El uso de esta herramienta tiene multipropósitos en materia de investigación, como el estudio de zonas de inundación (Aragonés et al., 2005), los incendios forestales (Escuin et al., 2002), el modelamiento de deshielos (Rango et al., 1979), el desarrollo urbano de una localidad (Salinas et al., 2017), entre otras. Consecuentemente se han convertido en una herramienta eficaz para estudiar los recursos naturales, como las reservas de agua, que directamente afectan el hábitat animal y humano.

El cambio abrupto en los patrones de caudales en los ríos, los procesos morfológicos inducidos por actividades antropogénicas (Saleh et al., 2013) y el cambio climático pueden causar cambios sustanciales en los sistemas hidrológicos (Yang et al 2002). Entender los procesos hidro-morfológicos no es tarea sencilla debido a la naturaleza compleja de los flujos en una cuenca. Es por ello que se necesita realizar no solo un estudio visual de los cambios de forma sino también a través de parámetros que permitan cuantificar dichos cambios. Resulta vital para la investigación el uso de la información disponible de manera gratuita como lo son los datos proporcionados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) y la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas de Chile (DGA). La primera otorga imágenes de teledetección remota para cualquier latitud del mundo mediante su línea de satélites LANDSAT TM, mientras que la DGA mantiene estimaciones de caudales en cada una de las estaciones fluviométricas a lo largo del río Biobío. Estas dos bases de datos permitirán la realización de este estudio, cuantificado a través de indicadores que faciliten la visualización de formas y flujos.

El análisis de curva de duración de flujo (FDC) proporciona una herramienta útil para detectar el cambio en la magnitud y frecuencia de los caudales en distintas condiciones. El análisis FDC, proporciona una visión sinóptica de los procesos hidrológicos en una cuenca. Su aplicación en ingeniería, planificación y gestión de recursos hídricos es ampliamente reconocida (Voget et al 2019).

Los datos satelitales proporcionados por la USGS son relevantes para analizar los procesos hidrológicos y los cambios de forma del canal a lo largo de un río. Correspondiendo estos cambios a indicadores de variaciones en los regímenes de flujo y transporte de sedimentos (Taylor, 2002). De esta manera el Índice diferencial de agua normalizado modificado (MNDWI por sus siglas en inglés), permite medir la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo, y así diferenciar de gran manera el volumen de agua de la superficie de suelo (Xu, 2006).

Adicionalmente se realizará el estudio de otras variables con el fin de cuantificar los cambios hidro-morfológicos en el río Biobío en los períodos de tiempo pre y post represas hidroeléctricas.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en la parte media-alta del río Biobío, en la provincia del Biobío, región del Biobío y comprende las zonas aguas abajo de las centrales hidroeléctricas ubicadas al interior del cauce del río Biobío, entre la localidad de Los Ángeles por el norte y Llanquén, región de la Araucanía por el sur (37° y 39° S y los $71^{\circ}05'$ y 72° O aproximadamente) (Figura 1). La zona de estudio sigue el cauce principal del río Biobío y comprende una longitud de 150 kilómetros, se divide en 4 sectores desde la bocatoma del canal de regadío al sur de Los Ángeles pasando por la estación fluviométrica río Biobío en Rucalhue ($37^{\circ} 42' 34''$ S y $71^{\circ} 54' 08''$ O) hasta la estación río Biobío en Llanquén ($38^{\circ}12'03''$ S y $71^{\circ}17'55''$ O), cada zona corresponde al sector de influencia de cada una de las centrales hidroeléctricas, la zona A corresponde a la ubicación de la central Angostura (2014), la zona B a la central Pangué (1996) y la zona C a la central Ralco (2004), además de la zona D correspondiente al canal de regadío.

El río Biobío atraviesa el valle central y luego vierte sus aguas al océano Pacífico entre las comunas de San Pedro de la Paz y Hualpén, en el sector norte del golfo de Arauco, próximo a Concepción. Posee un recorrido de 380 km., ocupando el segundo lugar en Chile por su longitud, después del Loa. El Biobío en su origen, siempre serpenteante, cambia lentamente su curso en dirección noroeste NNW en todo su camino va captando aguas de ríos más pequeños de los cuales destaca el Lonquimay, por su caudal. A partir de su confluencia, empieza a encajonarse y la velocidad de sus aguas aumenta. El río representa, a nivel nacional, un importante

centro económico para el sector industrial, en especial para el sector hidroeléctrico dado que corresponde a una de las principales fuentes de energía eléctrica en el país (DGA, 2004).

El caudal promedio del Biobío en su nacimiento es de $30 \text{ m}^3/\text{s}$. La hidrología del cauce principal y de sus afluentes, sigue comportamientos diferentes debido a las distintas unidades morfológicas presentes (Cordillera de los Andes, Valle Central o Depresión Intermedia y Cordillera de la Costa) que influyen en la precipitación nival y/o pluvial, en toda la extensión de la cuenca. Además, las formaciones geológicas existentes influyen de manera diversa en los aportes de aguas subterráneas a los cauces superficiales. Se observa que el régimen del río es del tipo pluvio-nival, con un caudal máximo medio mensual de aproximadamente $2.200 \text{ m}^3/\text{s}$ en los meses de junio-julio, que corresponde a los meses de máximas precipitaciones en la cuenca. Los caudales mínimos medio mensuales se ubican en los meses de marzo-abril con valores cercanos a los 180 a $220 \text{ m}^3/\text{s}$, cuando se termina el verano y aún no se registran las primeras precipitaciones. Este caudal mínimo se mantiene gracias a algunos aportes nivales remanentes y a la napa. (Valdovinos et al Parra, 2006).

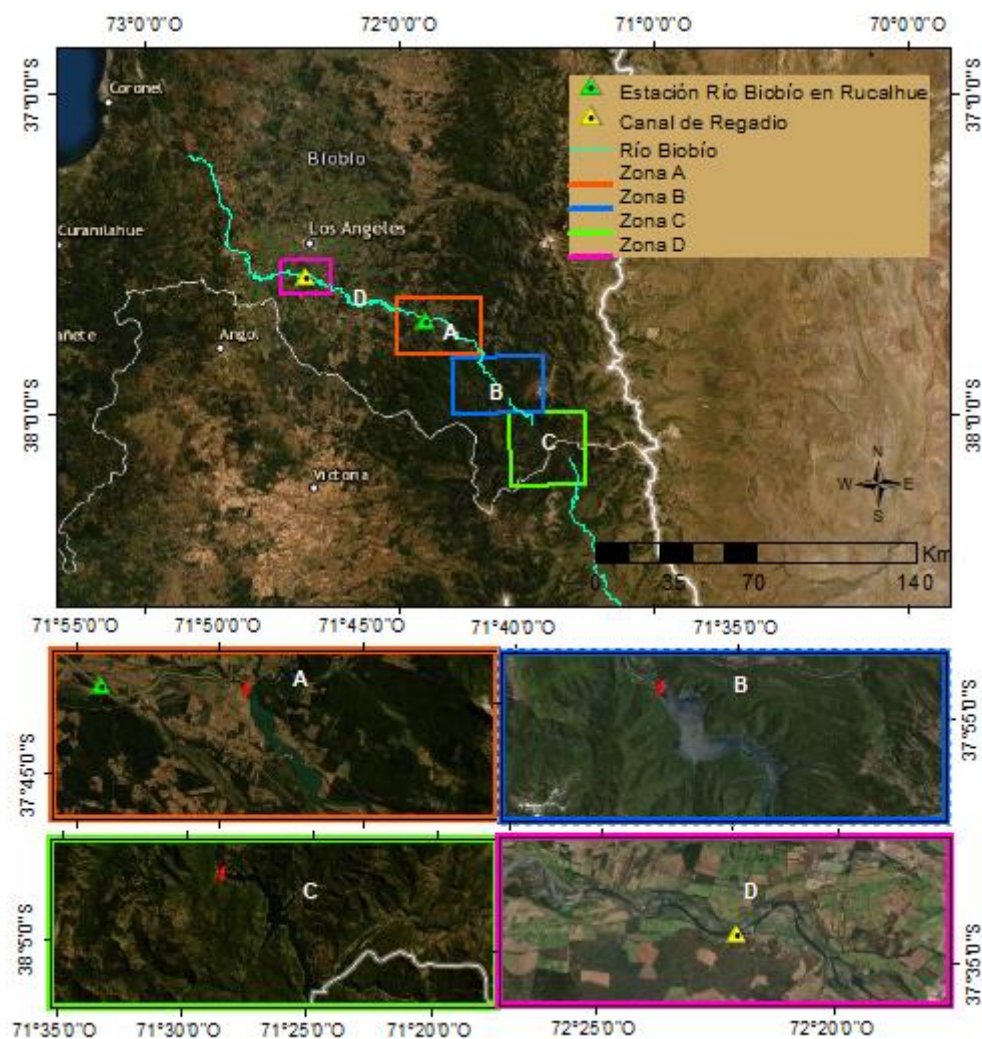


Figura 1: Zonas A) Aguas abajo de central Angostura, B) Aguas abajo central Pangué, C) Aguas abajo central Ralco, D) Aguas abajo canal de regadío y aguas abajo central Angostura.

3. MÉTODOS

3.1. Datos

Para la implementación del análisis de cambios hidro-morfológicos se requieren series de datos de caudales medios diarios. Obtenidos desde la estación fluviométrica río Biobío en Rucalhue (Figura 1), controlada por la Dirección General de Aguas (DGA-MOP), de ella se analizan datos comprendidos entre los años 1985 a 2018, separados en 4 periodos contables (Figura 2), el primero desde el origen de las mediciones hasta el inicio de construcción de la primera central hidroeléctrica en el río Biobío (1985 a 1990), luego la implementación de la central Pangué y el inicio de la construcción de la central Ralco (1990 a 2000), entre el funcionamiento de Ralco hasta el inicio de obras de la última central Angostura (2000 a 2010), para finalizar con los registros de los últimos años (2010 a 2018)(Figura 3) periodo en el que las 3 centrales hidroeléctricas están simultáneamente en operación.

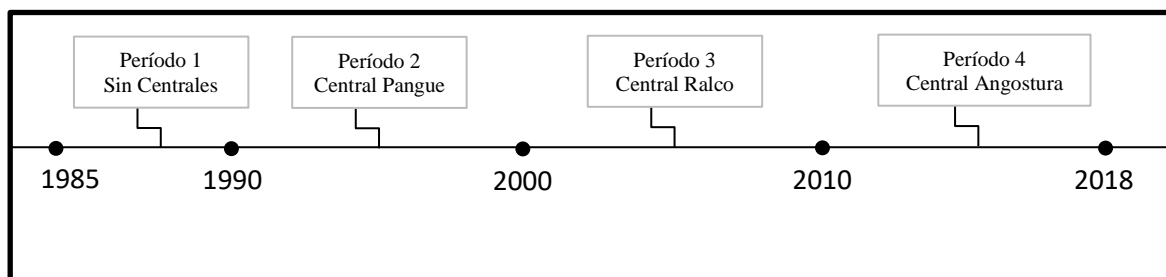


Figura 2: Esquema de periodos abarcados en el estudio. 1) Sin centrales, 2) Central Pangué (1990-2000), 3) Central Ralco (2000-2010), 4) Central Angostura (2010-2018).

A continuación, se presenta el hidrograma de caudales utilizado en este estudio:

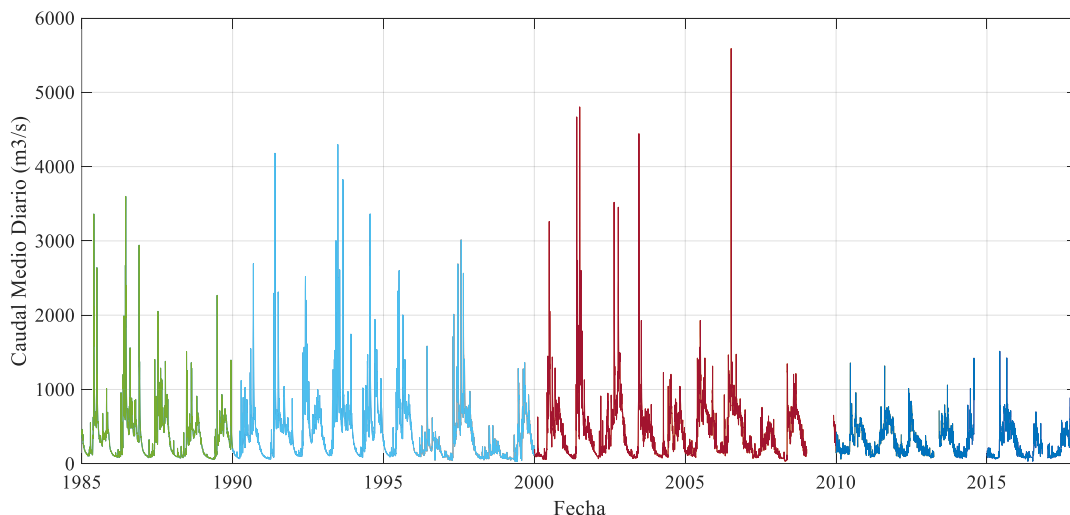


Figura 3: Caudales medios diarios en estación río Biobío en Rucalhue (DGA-MOP), Período 1 (verde); Período 2 (celeste); Período 3 (rojo); Período 4 (azul).

Para los 2 primeros periodos (Figura 2) se recopilaban imágenes del satélite LANDSAT 5 operativo en esos años, mientras que para el periodo 3 se obtuvo de la versión 7 y para el periodo 4 desde la última versión del LANDSAT (ver Tabla 1).

Tabla 1: Tabla indicativa de obtención de imágenes satelitales, época estival (verano) para cada período.

N° Imagen	Período	Fecha	Caudal Medio Diario (m ³ /s)	LANDSAT
1	1985-1990	15-01-1990	149.0	versión 5
2	1990-2000	28-12-2000	341.0	
3	2000-2010	23-02-2010	166.0	versión 7
4	2010-2018	26-12-2018	322.0	versión 8

3.2 Índice MNDWI

El Índice diferencial de agua normalizado modificado (MNDWI por sus siglas en inglés) (Xu, 2006) se utiliza para medir la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo, realizando un gran contraste entre la superficie de suelo versus la superficie del cuerpo de agua, esto mediante a valores que oscilan entre -1 y 1.

Este índice está diseñado para maximizar la reflectancia del agua mediante el uso de longitudes de onda verdes; minimizar la baja reflectancia de NIR por las características del agua; y aprovechar la alta reflectancia de NIR por la vegetación y las características del suelo, como resultado el MNDWI tiene valores positivos para el agua, por lo tanto mejora el NDWI (McFeeters, 1996), el suelo y vegetación posee valores de pixel cero y negativos, es decir, el contraste es evidente por lo que permite separar la masa de agua del suelo, ya sea vegetal o urbano.

El uso de este indicador se explica a continuación, la ecuación 1 corresponde a la ecuación general de (Xu,2006) mientras que para cada uno de los satélites utilizados en esta investigación se calculan a partir de bandas distintas, dependiendo de la versión de LANDSAT (ver Tabla 2), tal como lo detalla las ecuaciones 2 y 3. Para calcular este índice se debe utilizar un software de procesamiento de imágenes ráster, como por ejemplo ArcMap.

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR} \quad (1)$$

$$MNDWI_{Landsat\ 5\ y\ 7} = \frac{B2 - B5}{B2 + B5} \quad (2)$$

$$MNDWI_{Landsat\ 8} = \frac{B3 - B6}{B3 + B6} \quad (3)$$

Tabla 2: Tabla comparativa de las bandas en los sensores Landsat 7 y Landsat 8 de acuerdo con la longitud de onda en el espectro electromagnético.

LANDSAT 5 Y 7					LANDSAT 8				
Banda	Resolución	Visibilidad	μm		Banda	Resolución	Visibilidad	μm	
					Banda 1	30m	Coastal/Aerosol	0.435	0.451
Banda 1	30m	Blue	0.441	0.514	Banda 2	30m	Blue	0.452	0.512
Banda 2	30m	Green	0.519	0.601	Banda 3	30m	Green	0.533	0.590
Banda 3	30m	Red	0.631	0.692	Banda 4	30m	Red	0.636	0.673
Banda 4	30m	NIR	0.772	0.898	Banda 5	30m	NIR	0.851	0.879
Banda 5	30m	SWIR-1	1.547	1.749	Banda 6	30m	SWIR-1	1.566	1.651
Banda 6	60m	TIR	10.31	12.36	Banda 10	100m	TIR-1	10.60	11.19
					Banda 11	100m	TIR-2	11.50	12.51
Banda 7	30m	SWIR-2	2.064	2.345	Banda 7	30m	SWIR-2	2.107	2.294
Banda 8 (LANDSAT 7)	15m	Pan	0.515	0.896	Banda 8	15m	Pan	0.503	0.676
					Banda 9	30m	Cirrus	1.363	1.384

3.3 Curva de duración de flujo (FDC)

Una curva de duración de flujo (FDC), típicamente construida a partir de registros de datos históricos, proporciona un método conveniente y simple para estudiar las características del régimen de flujo en una cuenca fluvial bajo la influencia de un forzante externo como el caso de centrales hidroeléctricas (Langlat et al 2019).

Para conformar la curva FDC es necesario ordenar los datos de caudales de tal manera que se pueda comparar los caudales medidos versus la probabilidad de que estos caudales se excedan (Arias et al., 2017). Esta curva permite analizar la variación de los caudales en el tiempo, y para este caso para cada periodo de influencia de las centrales. Lo anterior permite comparar cambios en las frecuencias de los caudales extremos que son los responsables de los cambios morfológicos en el cauce del río.

3.4 Cuantificación de cambios morfológicos

En este estudio para cuantificar los cambios morfológicos se utilizarán dos índices como el índice de Sinuosidad y el ancho medio de secciones transversales del río.

3.4.1 Índice de Sinuosidad

La mayoría de los ríos y arroyos de un solo canal siguen un camino sinuoso y los canales rectos son difíciles de encontrar. La relación de sinuosidad da una indicación de cuán "flexible" es un canal y puede calcularse midiendo la longitud del alcance de un canal y dividiéndolo por la distancia en línea recta a lo largo del valle (Charlton, 2007) (Ecuación 4). Para medir dichas longitudes se utiliza el software ArcMap 10, que permite calcular la longitud de cauce principal mediante la unión de los puntos medio de las secciones transversales a lo largo del río, de manera similar para la distancia en línea recta del valle.

$$\text{Índice de Sinuosidad} = \frac{\text{Longitud tramo del cauce principal}}{\text{Longitud recta entre punto inicial y final}} \geq 1 \quad (4)$$

Se clasifica según el valor del índice, en donde los rangos definen su característica (ver Tabla 3).

Tabla 3: Rangos de clasificación de sinuosidad.

Clasificación	Rango
Recto	Inferior a 1,1
Sinuoso	Entre 1,1 y 1,3
Meandiforme	Superior a 1,3

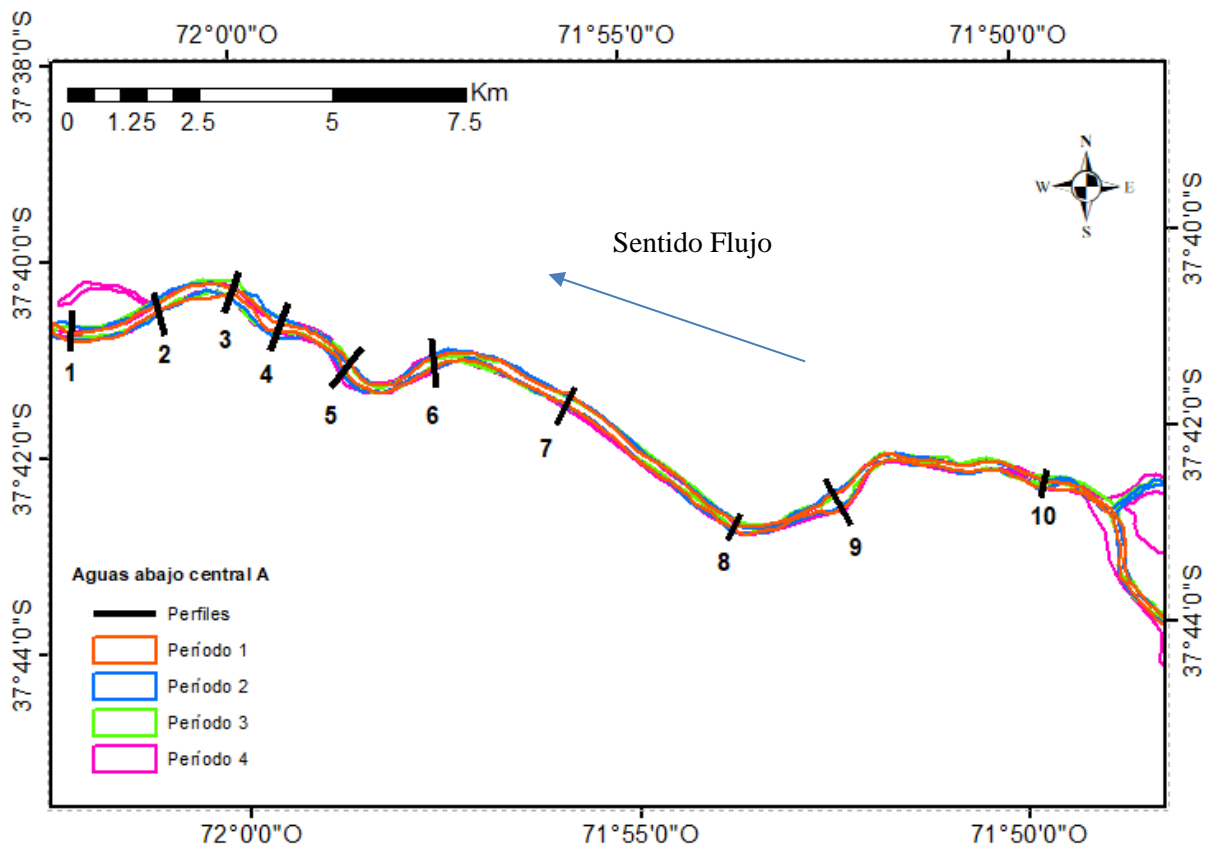
3.4.2 Ancho Medio

Otra forma de cuantificar el cambio morfológico de un río es observando como cambia su forma a lo largo del cauce, por lo que se propone medir el ancho medio del canal en varias secciones transversales en las distintas zonas de estudio para los 4 periodos y así analizar cómo influyen los caudales máximos extremos y la instalación de las centrales hidroeléctricas en la variabilidad espacio-temporal de su forma.

4 RESULTADOS

4.1 MNDWI

La principal herramienta de procesamiento de imágenes satelitales (MNDWI) entregó distintos tipos de resultados según la zona de influencia estudiada.


Figura 4: Cambios morfológicos en el lecho del río Biobío en la Zona A obtenidos a partir del índice MNDWI.

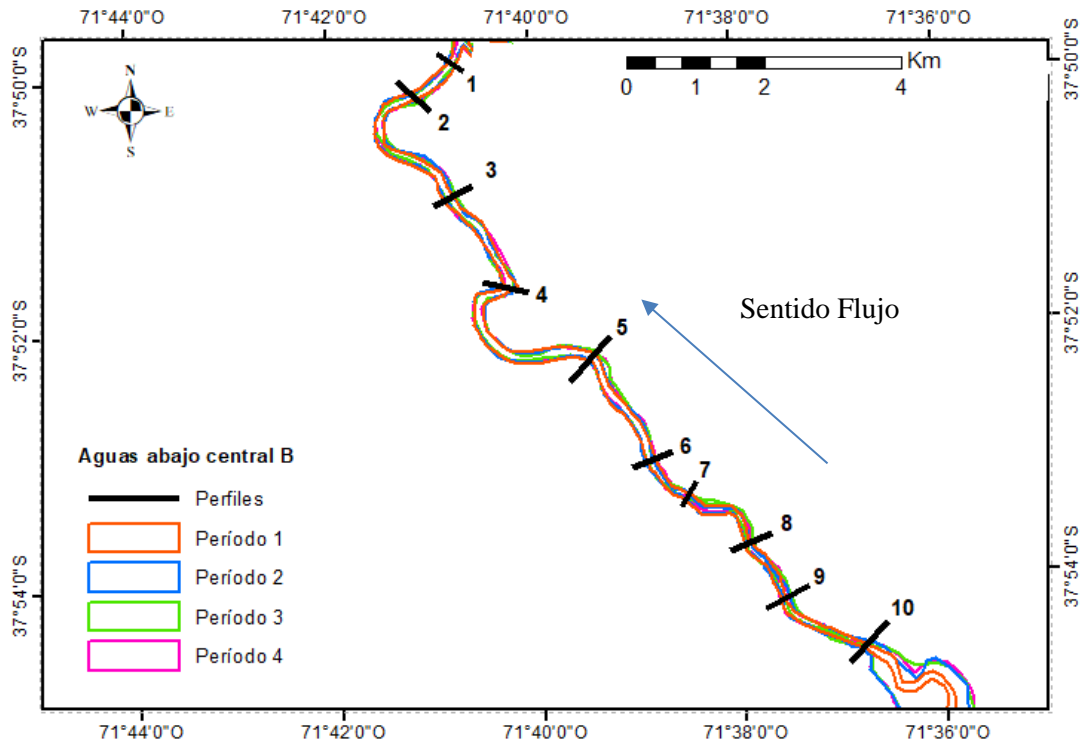


Figura 5: Cambios morfológicos en el lecho del río Biobío en la zona B obtenidos a partir del índice MNDWI.

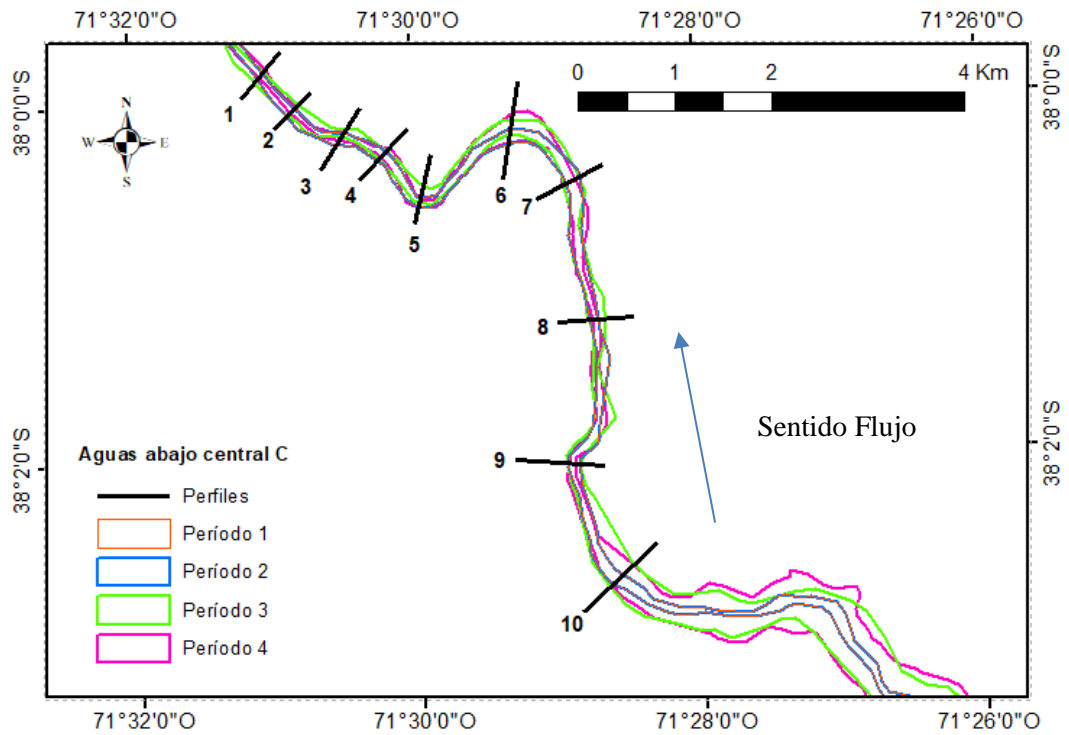


Figura 6: Cambios morfológicos en el lecho del río Biobío la zona C obtenidos a partir del índice MNDWI.

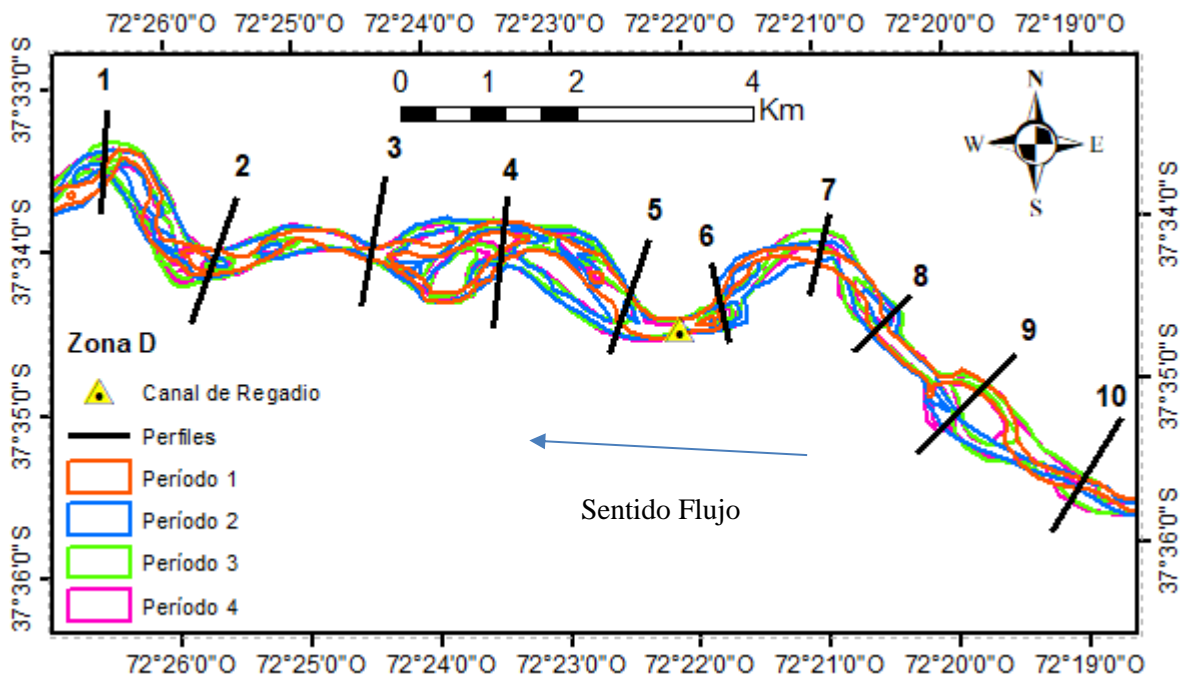


Figura 7: Cambios morfológicos en el lecho del río Biobío la zona D obtenidos a partir del índice MNDWI.

En la zona A (Figura 4) se aprecia ensanchamiento y angostamiento acotado a lo largo del tiempo en los perfiles aguas abajo de la central (1-4). Entre el perfil 6 y 8 se percibe un tramo de canal recto poco sensible a cambios para el rango de caudales estudiado (Figura 3).

La zona B (Figura 5) se logra apreciar en primera instancia pocos cambios en la vista en planta, ya que en todo el cauce principal del río su forma tiende a mantenerse igual entre el período 1 al 4, es decir, el río logra mantener la “memoria” con respecto a su forma.

La zona C (Figura 6) se observa un ensanchamiento del espejo de agua del río desde aguas arriba hacia aguas abajo producto del embalse de la central, sin embargo, se puede apreciar otros fenómenos como por ejemplo en movimiento de la ribera derecha del flujo (perfil 6) que a través de los años se desplaza de izquierda a derecha.

En la zona D (Figura 7) la principal característica que se observa es la forma trenzada del flujo en la mayor parte del tramo, dejando islas de sedimentos a medida que avanza el río, dividiendo en 2 o más partes el cauce.

4.2 Curva de Duración de Flujo (FDC)

Los principales cambios observados en materia hidrológica fueron el decrecimiento de caudales máximos extremos registrados, observando una disminución leve con la puesta en marcha de la central Pangué, sin embargo, se presenta una caída abrupta de los niveles de caudales después de la operación de Ralco, disminuyendo el flujo medido a la mitad en la mayoría de los casos. Para el caso de la central Angostura podemos observar que los niveles de agua están fuertemente influenciados por las centrales debido a que regula en rangos menores a los 100 m³/s cerca del 90% de las veces.

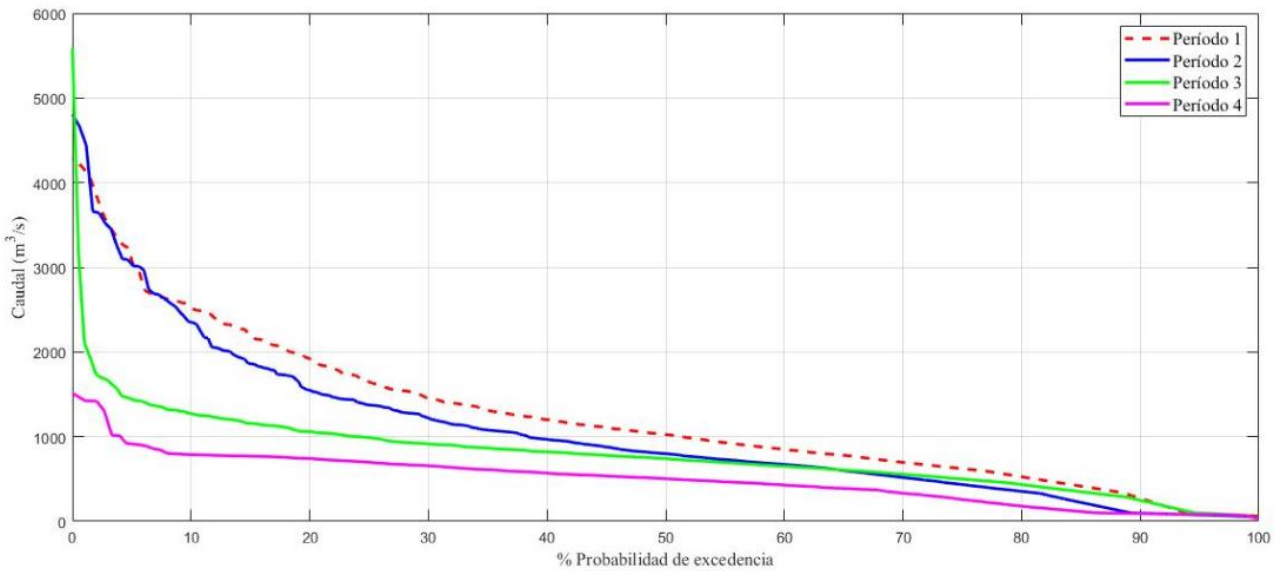


Figura 8: Curva de Duración (FDC) en estación río Biobío en Rucalhue para cada uno de los períodos.

4.3 Serie de caudales medios diarios

En la Figura 9, se observan los caudales medios diarios medidos antes de la construcción de centrales dejando ver que los mayores aportes de caudales se manifiestan en los meses de invierno alcanzando peaks del orden de los 3500 m³/s. Sin embargo, entre la construcción y operación de la primera central Pangué podemos observar que dichos máximos caudales son del orden de los 4500 m³/s (Figura 10) aumentando la variabilidad de caudales en los meses de invierno. En cambio para el periodo comprendido entre el 2000 al 2010 (Figura 11) se registraron caudales peak de casi 6000 m³/s, dejando ver que dichos caudales son atribuibles a las crecidas producto del invierno que azotó la región el año 2006.

En la actualidad podemos observar que los caudales medios diarios sufrieron una baja significativa (Figura 12), debido a que los milímetros de lluvia que aportaban gran parte de caudal ya no descienden, además el control aguas abajo en el sector de Rucalhue está dominado por las centrales hidroeléctricas que la mayoría del tiempo regulan la salida de agua desde sus embalses.

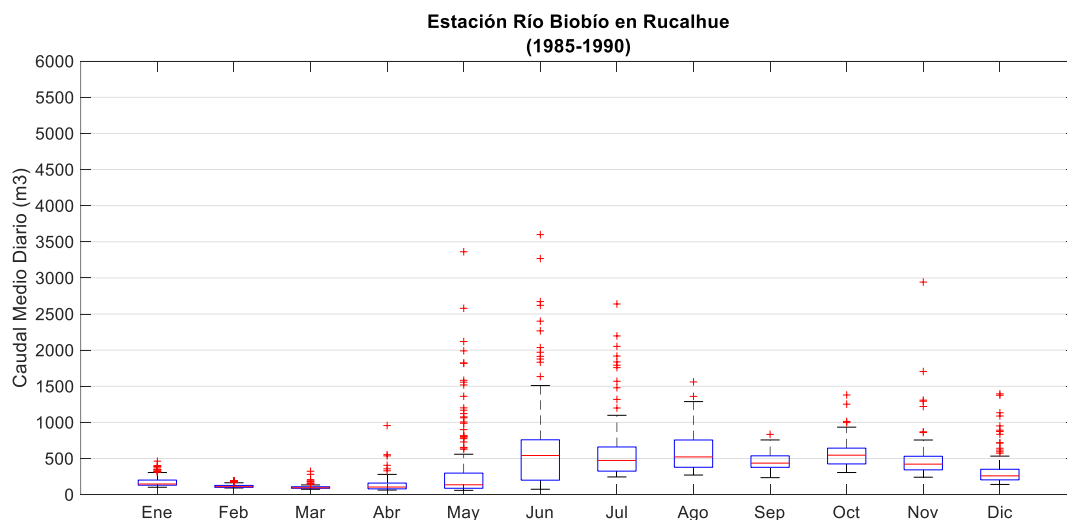


Figura 9: Variabilidad de caudales medios diarios para el período 1.

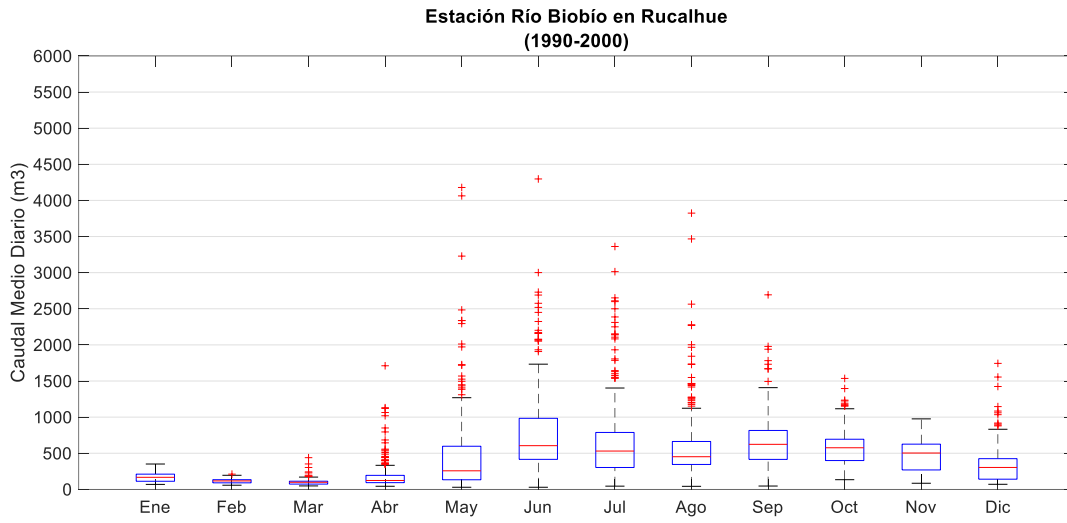


Figura 10: Variabilidad de caudales medios diarios para el período 2.

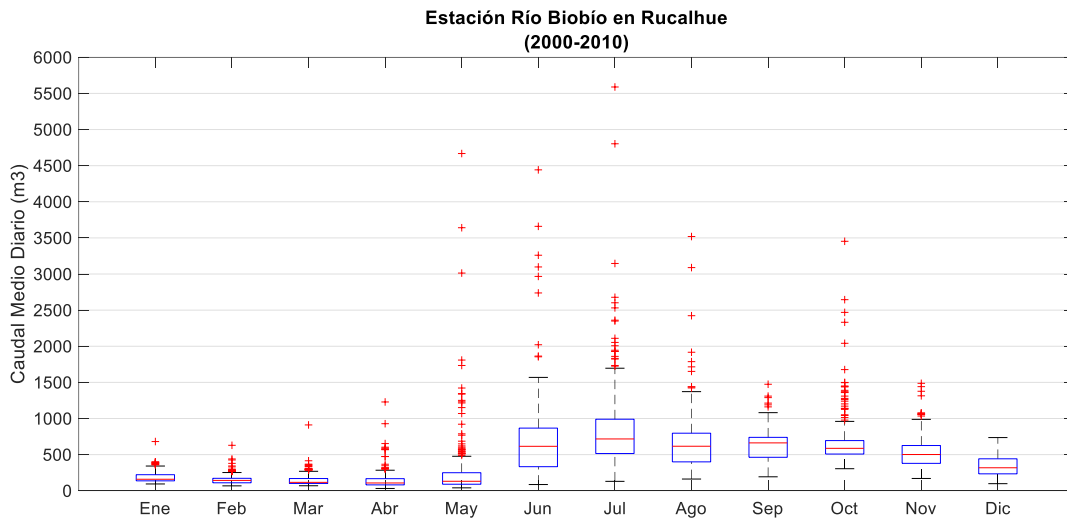


Figura 11: Variabilidad de caudales medios diarios para el período 3.

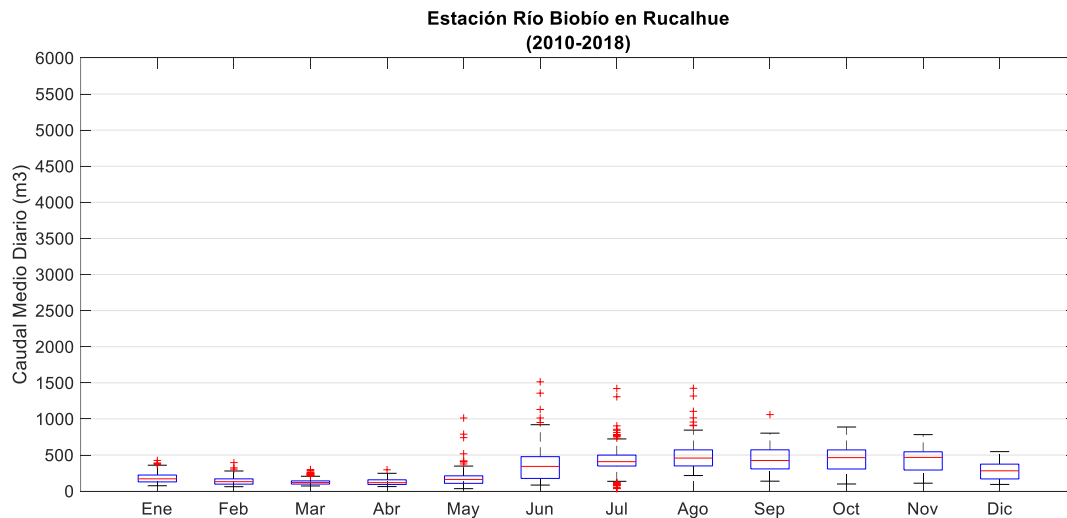


Figura 12: Variabilidad de caudales medios diarios para el período 4.

4.4 Variabilidad de secciones transversales

En los siguientes gráficos se muestran los resultados obtenidos para la medición del ancho medio a lo largo del tiempo (ver Figuras 13-16). Cabe mencionar que tanto para los períodos 1 y 3 se registraron caudales del orden de 150 m³/s, mientras que para el 2 y 4 fueron de 330 m³/s aproximadamente.

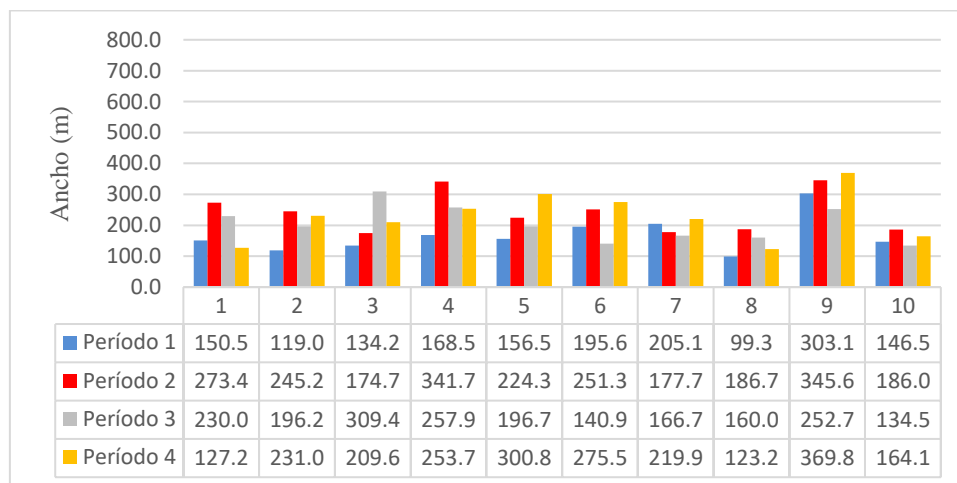


Figura 13: Variabilidad espacial y temporal de los anchos medios en la zona A.

Si comparamos los peaks de ancho en cada uno de los perfiles de la zona A nos podemos dar cuenta que por ejemplo para el perfil 1 se observa que tanto para el período 2 como el período 3 poseen los anchos mayores para su sección, sin embargo, tienen caudales medios diarios significativamente distintos, lo que es un indicador de cambio. El perfil 10, más cercano a la compuerta de la central Angostura, posee anchos similares para distintos caudales lo cual permite indicar que el sedimento disponible es igual al transportado para los caudales registrados en ese momento.

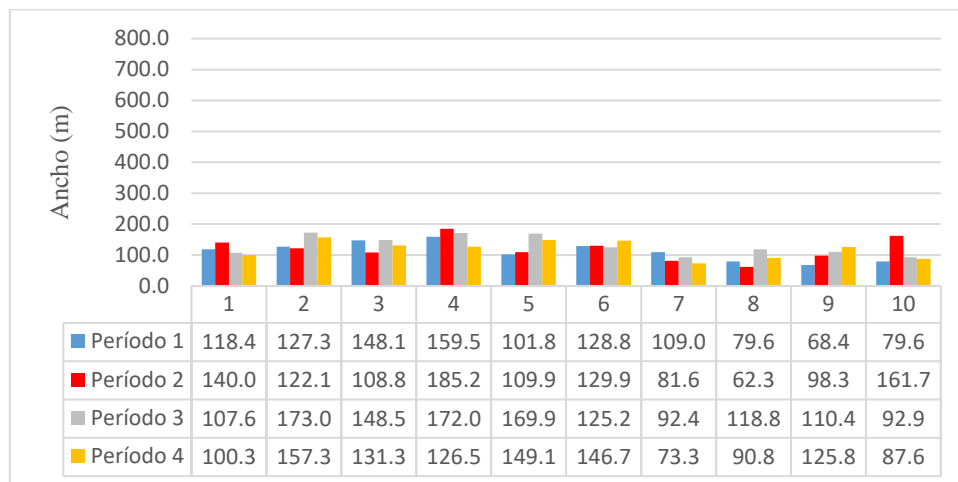


Figura 14: Variabilidad espacial y temporal de los anchos medios en la zona B.

A diferencia del caso anterior, se observa que no existe variación de anchos durante los 4 períodos en la zona B (Figura 14), sin embargo, esto es una demostración implícita de cambio, debido a la diferencia de caudales porteados por el río durante los 4 períodos, es decir, para llevar mayor caudal tuvo que transportar más sedimento de fondo que de cada una de las riberas.

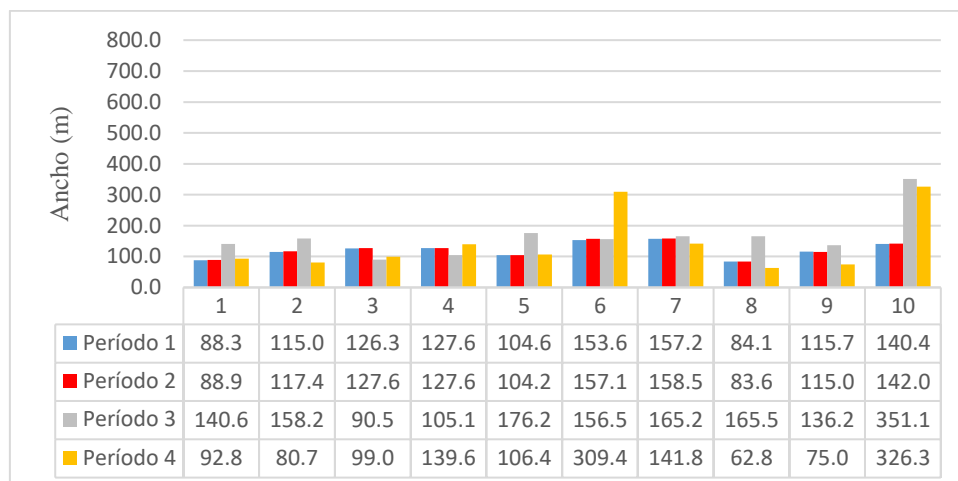


Figura 15: Variabilidad espacial y temporal de los anchos medios en la zona C.

La zona C se encuentra aguas abajo de sus dos centrales vecinas, por lo tanto, el caudal de paso está condicionado por la cantidad de agua que permita liberar cada una de las compuertas, de esto podemos observar que los anchos medios tienden a mantenerse en los perfiles 3 a 5 e incluso el 7 (Figura 15), donde se aprecia que son zonas altamente resistentes al cambio, al aumento o disminución de caudales, lo que permite concluir que existe cambio solo en el fondo del río. En el perfil 10 ubicado en la salida de la compuerta de la central Ralco se observa un aumento considerablemente de ancho entre el período 2 y 3, lo cual es atribuible a que entre esos períodos empezó el funcionamiento de Ralco y existe una zona altamente erosionada por la caída de agua desde la compuerta, independiente del caudal que este pasando la sección mantendrá un ancho mayor que los períodos anteriores debido a un posible acorazamiento del fondo a lo largo de los años.

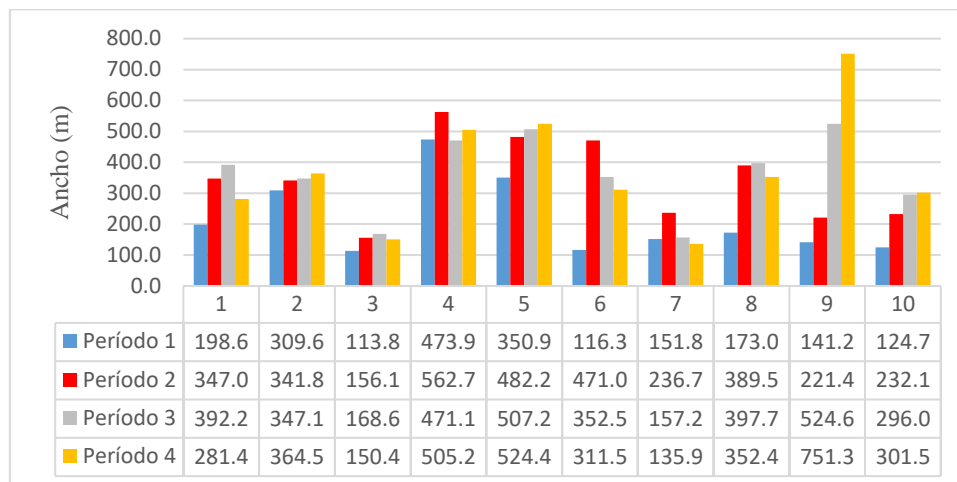


Figura 16: Variabilidad espacial y temporal de los anchos medios en la zona D.

Para la zona D, los perfiles 1 al 5 corresponden aguas abajo de la bocatoma, de los cuales en el perfil 2 y 5 se aprecia un aumento en el ancho de su sección lo que indica que no son zonas susceptibles al transporte de sedimentos de fondo, es decir, independiente del caudal porteados erosionan solo sus riberas y no su lecho.

4.5 Índice de Sinuosidad

Para cuantificar el cambio morfológico en el río se obtuvo los siguientes índices de sinuosidad, en donde la zona A no sufrió mayor cambio de forma manteniéndose en el orden de 1.22 (Tabla 4), valor idéntico al medido sin centrales en el cauce del río. La zona B en cambio observa una disminución de 1.33 a 1.26, es decir, paso de meandiforme a sinuoso. En la zona C podemos observar que los perfiles más aguas arriba mantuvieron su forma meandiforme, incluso con la puesta en marcha de la central Pangue, disminuyendo a 1.24 el índice (sinuoso) si bien luego aumenta a 1.28 mantiene la tipología de sinuoso. La zona D al igual que la zona A mantuvo su valor de sinuosidad, pese a poseer claramente una forma trezada.

Tabla 4: Índice de Sinuosidad calculado para cada una de las zonas.

Índice de Sinuosidad				
Periodo	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D
1	1.22	1.33	1.31	1.25
2	1.24	1.26	1.31	1.27
3	1.24	1.26	1.24	1.26
4	1.22	1.26	1.28	1.26

5 CONCLUSIONES

El presente estudio utiliza datos hidrológicos y satelitales, hace uso de curvas FDC y técnicas geoespaciales para evaluar cuantitativamente cambios en los regímenes de flujo y examinar la dinámica del río Biobío en el sector medio-alto del Biobío, específicamente las zonas de influencias de las centrales hidroeléctricas Pangué, Ralco y Angostura, para 4 periodos de tiempo distribuidos en cerca de 30 años de datos fluviométricos (Figura 2), además se analizó una zona de extracción de agua, como lo es una bocatoma perteneciente a un canal de regadío observando distintas formas de canal (Figura 7).

En general se observó que los caudales medios diarios disminuyeron a medida que se instalaban las centrales, a ello debe incluirse el aporte de caudal proveniente del sistema fluvial que ha presentado disminuciones con el paso de los años, donde en invierno precipita poco y en verano la lluvia registradas es casi nula.

Se observa que el flujo con un 90% de probabilidad de excedencia disminuyo a partir de la central Pangué en un 5% mientras que al entrar en funcionamiento la central Ralco bajo en un 50%.

La variabilidad en los anchos medios medidos, las imágenes obtenidas del MNDWI y el índice de sinuosidad permiten concluir que cuando existen cambios en los anchos de las secciones transversales puede obedecer a un cambio morfológico. Para ello es necesario observar además el caudal medido para cada imagen y período, por lo que para anchos distintos y caudales similares se atribuye solo a un movimiento lateral del río. Es decir, el río se trasladó debido al depósito de sedimento en una ribera y la erosión de la ribera contraria. Estos cambios se observaron en varios tramos, sin embargo, no fueron lo suficientemente significativos para afectar la clasificación de sinuosidad, donde en general mantuvo su característica a lo largo del tiempo. Obviamente dicho análisis no considera las zonas de inundación propias de cada represa.

En un futuro estudio se debería explorar el estudio del índice MNDWI para imágenes de teledetección remota con mayor resolución. Cabe mencionar que resolución del satélite LANDSAT no permite apreciar a nivel profundo los cambios parciales que presenta el río a lo largo de la historia y solo realiza una estimación global de morfología, al mejorar la resolución se podría estudiar otros fenómenos de flujo y forma. Como por ejemplo el estudio de la batimetría en los ríos a través del MNDWI y de esta manera incluir más funciones a su uso que pueden servir para la modelación del transporte de sedimentos, comparando eventos extremos, como terremotos, crecidas o inundaciones, así como la sequía, calentamiento global o cambio en el uso de suelo en las riberas del río.

6 REFERENCIAS

- Aragón, D., Díaz-Delgado, R., & Bustamante, J. (2005). Estudio de la dinámica de inundación histórica de las marismas de Doñana a partir de una serie temporal larga de imágenes Landsat. In Proceedings of XI Congreso Nacional de Teledetección (pp. 407-410).
- Arias, S. G., & Serna, L. F. C. (2017). Regionalización de curvas de duración de caudales en el Departamento de Antioquia-Colombia. *Revista EIA*, 14(27), 21-30.
- Charlton, R. (2007). *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Routledge. 137-139
- Department of the Interior U.S. Geological Survey. (2016). LANDSAT 8 (L8) DATA USERS HANDBOOK. 2017, de USGS Sitio web: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- Di Bella, C.M., Posse, G., Beget, M.E., Fischer, M.A., Mari, N., Veron, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Ecosistemas* 17(3):39-52.
- Dirección General de Aguas. (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del Río Biobío. Santiago, Chile.
- Escuin, S., Fernández Rebollo, P., & Navarro Cerrillo, R. M. (2002). Aplicación de escenas Landsat a la asignación de grados de afectación producidos por incendios forestales. *Revista de Teledetección*, 1, 25-36.
- Langat, P. K., Kumar, L., Koech, R., & Ghosh, M. K. (2019). Hydro-Morphological Characteristics Using Flow Duration Curve, Historical Data and Remote Sensing: Effects of Land Use and Climate. *Water*, 11(2), 309.
- S. K. McFeeters (1996) The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, 17:7, 1425-1432, DOI: 10.1080/01431169608948714
- Rango, A., & Martinec, J. (1979). Application of a snowmelt-runoff model using Landsat data. *Hydrology Research*, 10(4), 225-238.
- Saleh, F.; Ducharne, A.; Flipo, N.; Oudin, L.; Ledoux, E. (2013). Impact of river bed morphology on discharge and water levels simulated by a 1D Saint-Venant hydraulic model at regional scale. *J. Hydrol.* 2013, 476, 169–177.
- Salinas, L. C., Laguna, R. R., Lazalde, J. R. V., Sandoval, O. A. A., & Hernández, R. I. B. (2017). Detección del crecimiento urbano en el estado de Hidalgo mediante imágenes Landsat. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 2017(92), 64-73.
- Valdovinos & Parra (2006). *La Cuenca del Río Biobío: Historia Natural de un Ecosistema de Uso Múltiple*. Publicaciones Centro EULA. 4.
- Vogel, R.M.; Fennessey, N.M. (1995). Flow duration curves II: A review of applications in water resources planning. *J Am. Water Resour. Assoc.* 1995, 31, 1029–1039.
- Xu, Hanqiu. (2006). Modification of Normalized Difference Water Index (MNDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 27. 3025–3033.



Yang, S.; Zhao,Q; Belkin, I.M. (2002). Temporal variation in the sediments load of the Yangtze River and the influences of human activities. J. Hydrol. 2002,54,307-323.