

ESTUDIO MORFOLÓGICO EN MEANDROS DEL RÍO ANDALIÉN, SECTOR COSMITO

F. Pacheco Vergara¹ D. Caamaño Avendaño² R. King St-Onge³

RESUMEN:

La parte baja del río Andalién, específicamente el sector Cosmito, presenta un comportamiento morfológico divagante. Se identifican varios meandros que han sido afectados por las recientes urbanizaciones y obras asociadas. Por ejemplo, el proyecto del Ministerio de Obras Públicas denominado Plan de Mejoramiento Integral del río Andalién, que tiene por objetivo disminuir el nivel de las aguas durante las crecidas invernales, ha 1) transformado transversalmente el río a una sección trapezoidal, 2) aumentado significativamente el ancho superficial, y producto de lo anterior, 3) proyectado un lecho plano. Este estudio plantea estudiar la evolución morfológica de los meandros del río Andalién en la zona de Cosmito, y predecir el comportamiento morfológico de manera conceptual. De esta forma se analizaron imágenes aéreas desde 1978 a 2007 (último año sin intervención en la zona de estudio), y se dispuso de un modelo teórico sencillo para evaluar la evolución del río. Consecuentemente los resultados sugieren una evolución morfológica basada en un modelo conceptual. Las principales conclusiones apuntan a que el río presenta un estado de degradación, y que esta condición representa un forzante potencial para modificar la proyección de los meandros.

PALABRAS CLAVES: Cambios morfológicos, degradación, meandros.

ABSTRACT:

The downstream end of the Andalién River presents a wandering morphologic behavior. Existing meanders are affected by recent urban developments. A project entitled “Integral improvement of the Andalién River” is currently modifying the river planform in order to increase its conveyance and decrease the flood risk. The project is 1) converting the river transversal form into a trapezoid section, 2) increasing its width, and 3) establishing a plane river bed with sand as substrate. This study defines the Cosmito area as the reach of interest, and it establishes a diagnostic on the river original morphology condition by assessing its equilibrium status. Meanders progression is observed by combining several historical areal photos and knowledge from the system is learned. Consequently the results suggest a morphologic evolution based on a conceptual model. The most important conclusions indicate that the river currently represents a degradation state, which could be a main stressor for the meander progression.

KEYWORDS: Morphological changes, degradation, meanders.

¹ Alumno Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, fpacheco@ing.ucsc.cl

² Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dcaamaño@ucsc.cl

³ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

En el año 2004 la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) del Ministerio de Obras Públicas (MOP) solicitó un estudio para conocer el diagnóstico hidráulico del comportamiento del río Andalién durante crecidas, y que resultó en un anteproyecto de obras de defensas destinadas a disminuir los riesgos de inundación provocados por desbordes de su cauce (i.e. se denominó Estudio Base). Durante el mes de Julio del año 2006 se registraron precipitaciones por 260 mm en 36 horas, esto provocó que los cauces naturales que conforman el Sistema Fluvial Andalién, alcanzaran magnitudes de caudal nunca antes registradas, desbordándose e inundando gran parte de los sectores urbanos de la zona nor-oriental de la ciudad de Concepción. Lo anterior causó un daño al patrimonio público y privado, y afectó a más de 100.000 habitantes del sector. La VIII Región del Bio Bío fue declarada Zona de Catástrofe a través del D.S. N° 759/2006, del Ministerio del Interior, en respuesta a esto el MOP declaró de Emergencia la ejecución de diversos Estudios y Obras para la región.

Los caudales de crecidas registrados el 2006 aportaron antecedentes extras a la investigación realizada el año 2004, esto por que a) se aumentaron los caudales de diseño en un 20%, y b) entregó información sobre la respuesta real del sistema, permitiendo un mejor diagnóstico. Como resultado, un par de años más tarde se da inicio a las obras *“Diseño de obras fluviales río Andalién, Esteros Nonguén y Palomares, VIII Región del Biobío”*.

Además, el río Andalién ha sufrido continuas modificaciones debido al incremento del desarrollo inmobiliario. Antiguamente las planicies de inundación se utilizaban para el ganado y agricultura, pero el crecimiento de la demanda habitacional en Concepción ha hecho que el río actualmente se encuentre entre poblaciones y no planicies húmedas como antaño. Es un riesgo construir en zonas correspondientes a planicies de inundación, pero su bajo costo genera una diferencia significativa en el precio final de venta, y hace los inmuebles atractivos para el público.

La zona baja del río Andalién, siete kilómetros aguas arriba de la desembocadura, cuenta con un par de meandros que se ven afectados por las obras de ingeniería, a simple vista se puede observar que uno de los meandros fue eliminado y otro está siendo intervenido en su forma, por lo que surge la interrogante sobre si el río ¿respetará la forma que el proyecto le impone?

Tomando en consideración los efectos de que han tenido los eventos de inundación de las últimas 4 décadas en el río Andalién en Concepción, la gran envergadura del proyecto que se está ejecutando en el cauce, y que el río es un sistema que está en constante cambio, se ha dispuesto investigar la evolución del cauce principal del río y su potencial interacción con las obras planteadas. Para ello se realizó un análisis morfológico en la zona baja del río Andalién, el último forzado artificialmente por el caudal formador representativo del periodo en estudio.

2. MOTIVACIÓN

Se dispuso esta investigación para determinar la evolución morfológica histórica del río Andalién. Los resultados podrán ser utilizados para predecir el comportamiento del río en el mediano y largo plazo, con fines de definir la interacción entre el cauce principal y las modificaciones producto de las obras realizadas.

3. ZONA DE ESTUDIO

El río Andalién está ubicado en la localidad de Concepción, región del Bio Bío, Chile (Figura 1A). Nace en la Cordillera de la Costa en la confluencia de los esteros, Poñen y Curapalihue, a 92 msnm. Tiene una longitud de 36 km y finaliza en el océano Pacífico, particularmente en la bahía de Concepción. La cuenca del río Andalién tiene un área de 783 km² y, posee un régimen hidrológico del tipo pluvial. Los principales uso de suelo corresponden a: 1.659 Ha de tipo agrícola y equivalentes al 2% de la superficie total, 36.868 Ha de tipo forestal correspondientes al 46% de la superficie, y 1.341 Ha de tipo urbano también cercano al 2% del total de la superficie.

La zona de estudio es un tramo de la zona baja del río Andalién, entre los km 5,5 y 9 (desde de la desembocadura). Esta zona pertenece a la comuna de Concepción, sector Cosmito (Figura 1B).

Actualmente la zona se encuentra intervenida entre el km 5,5 y el km 7, habiendo modificado varias estructuras de meandros, pero está proyectada la finalización de las obras para comienzos del presente año. Los meandros intervenidos contaban con abundante vegetación, la que aún se encuentra presente aguas arriba del km 7. Aguas abajo el lecho se muestra con una configuración plana con un substrato arenoso.

Cabe notar que el río Andalién dispone de dos estaciones fluviométricas que son propiedad de la Dirección General de Aguas (DGA) ubicadas en la parte media y baja del río (Tabla 1).

Tabla 1: Estaciones fluviométricas de la DGA en río Andalién.

	Nombre estaciones	Coordenadas UTM
1	Río Andalién Puente Trinitarias	682.981m E, 5.925.778 m N
2	Río Andalién Camino a Penco	675.423 m E, 5.923.595 m N

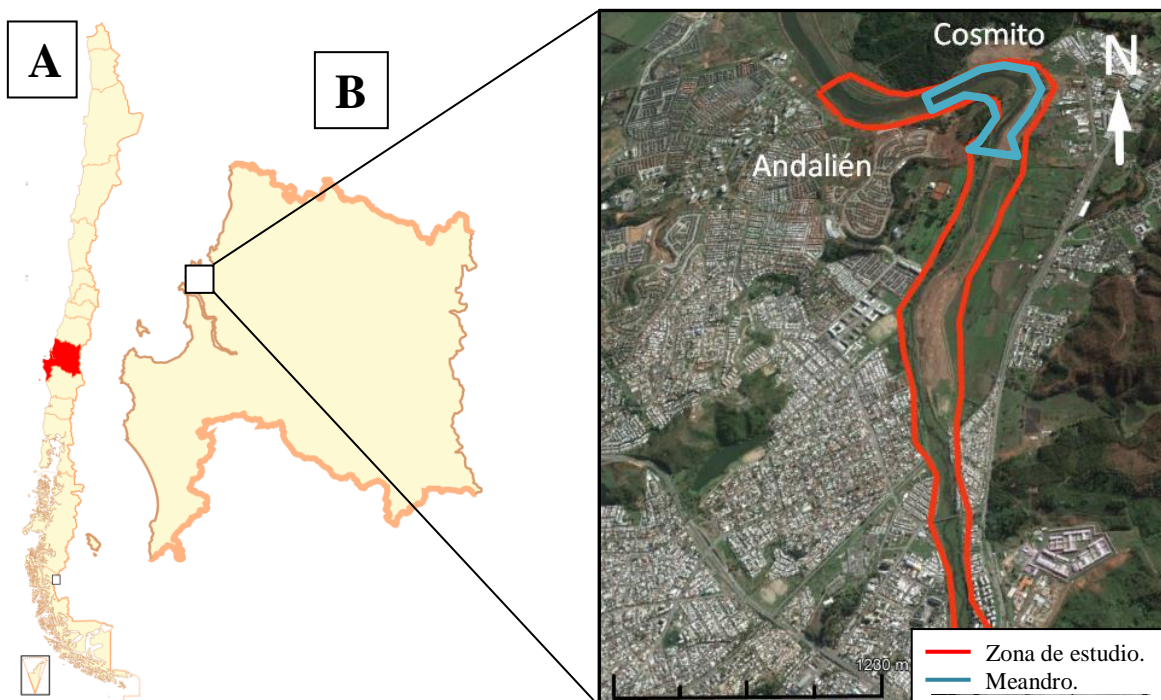


Figura 1. A) Región del Biobío, Chile. B) Zona de estudio y meandro en el sector Cosmito.

4. METODOS

Se recopilaron antecedentes históricos del río Andalién con fines de determinar los caudales formadores, y caracterizar las formas de los meandros antes de las intervenciones. En este contexto se revisaron estudios hidráulicos previos, por ejemplo, la tesis de pregrado para optar al título de ingeniero civil de la Universidad de Concepción titulada “*Crecidas en el Andalién bajo: Análisis Hidráulico de las intervenciones en su planicie de inundación*” que proporciona un modelo hidráulico 1D del río Andalién en HECRAS 5.0 sin intervención de obras fluviales. Esta investigación es anterior a la investigación solicitada por la DOH la cual ofrece los primeros resultados de intervenciones fluviales en el río Andalién. El resultado principal de esta tesis muestra al eje hidráulico afectado para un escenario de planicies de inundación intervenidas para el caudal de 298 m³/s (i.e. crecida registrada el año 2002).

Conocido el modelo hidráulico se procede a estimar los caudales formadores, es decir, aquellos caudales responsables de darle la forma al río. Para esto se utilizaron dos metodologías, la primera fue con el caudal Bankfull y la otra la Descarga Efectiva. Entonces, los resultados de los informes previos se complementaron con la información de las estaciones fluviométricas, permitiendo discriminar sobre la magnitud de los caudales y sus respectivas frecuencias de ocurrencia.

4.1. Bankfull

El Bankfull (Q_b) es el caudal a sección llena, es decir, caudal máximo que puede conducir el canal sin desbordarse sobre la planicie de inundación (Leopold (1994, pag. 128). El bankfull es morfológicamente significativo puesto que las tasas de transporte son máximas en el canal. Consecuentemente, Q_b es considerado una descarga formativa ya que “es la más efectiva para la mantención de canales y aquella cuyos trabajos arrojan como resultado las características morfológicas generales de los río” (Dunne and Leopold, 1978). El Bankfull es un caudal observable, y por lo tanto fue necesario realizar un proceso iterativo de caudales en el modelo 1D para la zona del meandro de estudio que se describen por las secciones 22 a la 37 (Anexo A). En estas 16 secciones se consideraron las variaciones necesarias de caudal para producir una sección llena, se definió un bankfull para cada una de las 16 secciones, cuyo promedio fue utilizada como representativo del Q_b del meandro.

4.2. Descarga Efectiva

La descarga efectiva (Q_e) es el caudal que transporta la mayor fracción promedio anual de sedimento desde el lecho. Es decir, aquella que más trabajo morfológico ejecuta en relación con su frecuencia (Wolman and Miller, 1960). Los caudales bajos son más frecuentes, pero realizan poco trabajo; en cambio, los caudales altos son bastante significativos en términos de trabajo, pero son poco frecuentes. Por tanto el caudal efectivo es un valor intermedio que mantiene en el tiempo la capacidad volumétrica y las características morfológicas generales de los canales (Leopold, 1994:126). El Q_e es un caudal cuantificable de manera teórica, y para ello se realizaron análisis de caudales medios diarios y del transporte de sedimento que éstos producen.

Goodwin (2004) propone una relación entre las curvas del transporte de sedimento y la frecuencia de los caudales de río. El producto entre la frecuencia de los caudales medios diarios y la capacidad de transporte de sedimento describe una curva, cuyo máximo corresponde a la Descarga Efectiva (Figura 2).

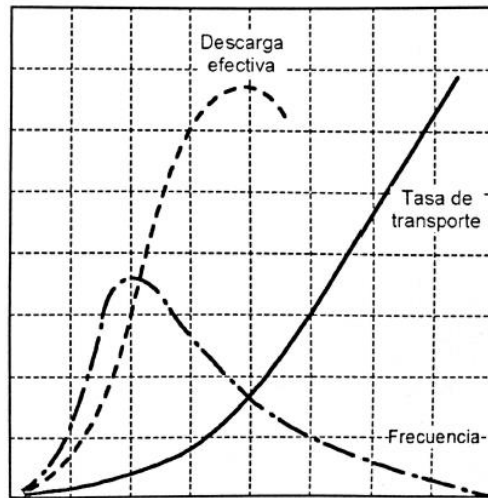


Figura 2. Descarga efectiva, frecuencia de caudales y tasas de transporte de sedimento (modificado de Rosgen, 1996).

Se realizó la curva de capacidad de transporte de sedimentos mediante la Ecuación (1) propuesta en Goodwin (2004) y donde es necesario realizar una calibración para ajustar sus parámetros α y β .

$$Q_s = \alpha Q^\beta \quad (1)$$

Para la calibración de los parámetros se utilizó de capacidad de transporte de sedimentos definida por la ecuación de Meyer-Peter and Mueller (1948). Se seleccionó esta ecuación puesto que las condiciones bajo las cuales fue creada la ecuación de MPM se ajustan a la zona de estudio.

Además del análisis de sedimento fue necesario realizar análisis de consistencia de datos, con esto se conoce la ecuación de probabilidades que se ajusta a los caudales medios diarios. El río Andalién tiene una frecuencia de caudales que se distribuye Log-Normal y por lo tanto se describe por la Ecuación (2).

$$f(Q) = \frac{1}{Q\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(y - \mu)^2\right] \quad (2)$$

Donde Q es el caudal (>0), $y = \ln(Q)$, σ la desviación estándar y μ la media.

El producto entre las ecuaciones 1 y 2, se indica en la Ecuación (3).

$$Q_e = \exp[\mu + \sigma^2(\beta - 1)] \quad (3)$$

En donde Q_e solo depende de la media (μ), desviación estándar (σ) y el parámetro β calibrado por MPM de la Ecuación (1).

4.3. Meandros

Los ríos son un sistema dinámico, en general no muestran una forma recta. El río Andalién no es la excepción, dado que presenta una serie de curvas que le da su característica de meandros. Entonces, para entender y explicar la forma de río Andalién, se propuso un análisis con el método *Sine-generated curve*.

4.3.1. Sine-generated curve

Leopold (1964) describe al meandro como una curva que le entrega al río mayor estabilidad, y que matemáticamente podría representarse por una “curva sinusoidal”, siendo ésta la forma que más se aproxima a la trayectoria de ríos no confinados. Una curva generada por el *Sine-generated curve* tiene la particularidad que sus variaciones en los cambios de dirección son más pequeños, por ejemplo, que una formada por semicírculos conectados entre sí. Esto quiere decir que cuando los cambios de dirección son tabulados para una distancia determinada a lo largo de varios meandros hipotéticos, la suma de los cuadrados de estos cambios serán menores para una curva generada por el *Sine-generated curve*.

Un análisis fotográfico de la zona de estudio permite estudiar la evolución del cauce. Se comenzó con fotografías aéreas proporcionadas por el Servicio Aerofotogramétrico (SAF, que depende de la Fuerza Aérea de Chile) a una escala de 1:30000 y 1:20000 que datan de los años 1978 y 1992 respectivamente. Además se capturaron tres imágenes a través de Google Earth Pro, para tres fechas distintas. La primera data del 21 de septiembre de 2002, la segunda corresponde al 7 de abril de 2006 (antes de la gran crecida), y la última es del 25 de abril de 2007 (después de la gran crecida). Todas las fotografías se encuentran en el Anexo B.

Se trazó el eje longitudinal para cada una de las fotografías, y de esta manera se puede cuantificar la forma del cauce de cada año. En la foto del año 1978 se trazó la línea de dirección del flujo que pasa por el centro del meandro (Figura 3), sumado su eje longitudinal se registran los ángulos de deflexión máxima con respecto a la dirección media del valle (Figura 4).

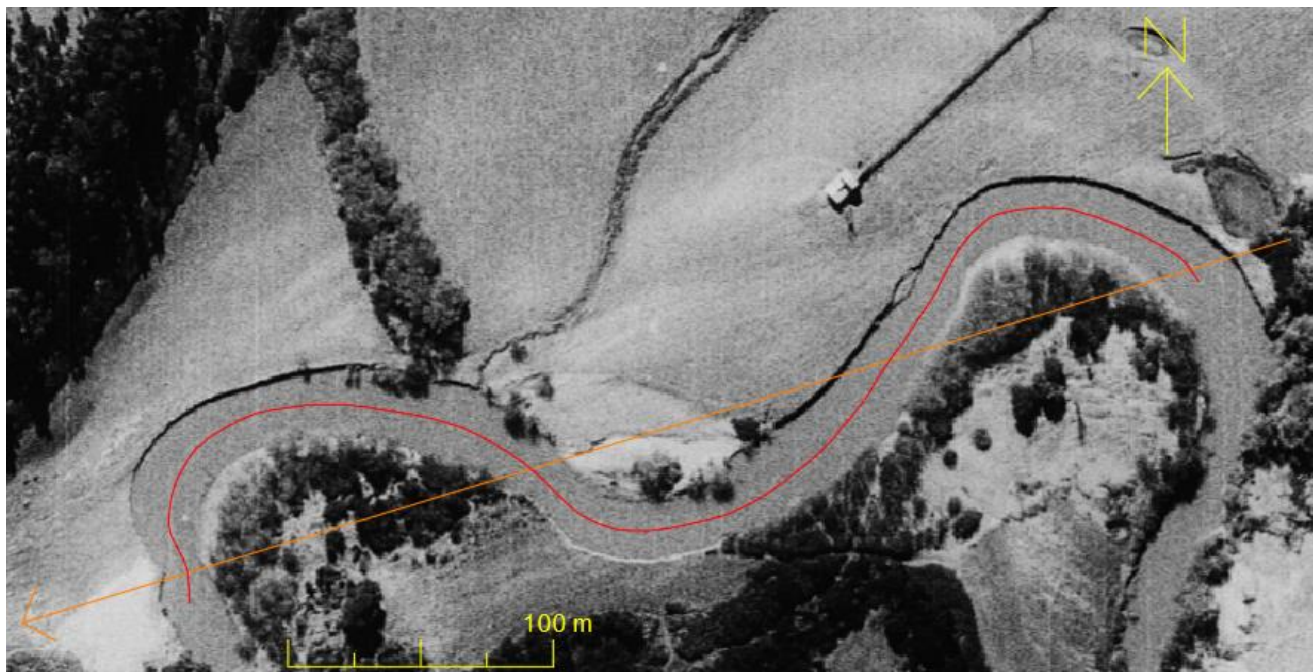


Figura 3. Fotografía 3667, vuelo CH-30 de 1978 proporcionado por SAF.

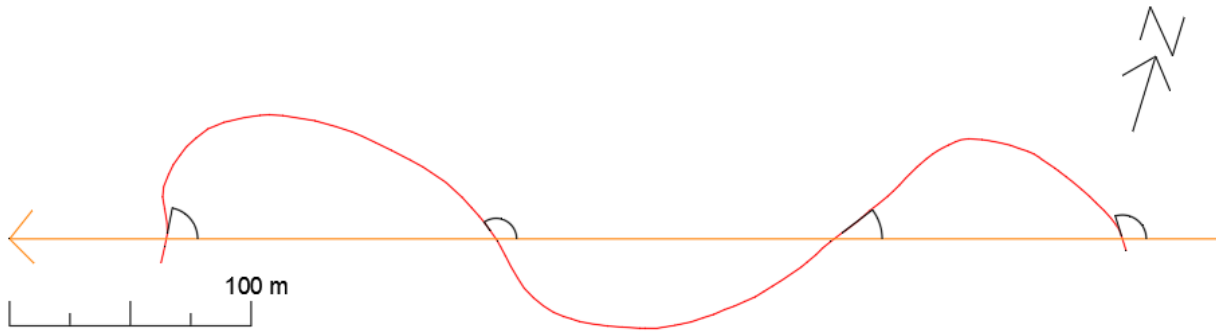


Figura 4. Medición de ángulos de deflexión con respecto a la dirección media del valle.

Conocidos los ángulos en cada punto de inflexión (θ_0) se realizó un promedio simple para obtener el θ_0 del meandro completo. Se mide la longitud del valle λ_m que corresponde a la longitud de la onda. Se divide la longitud del valle en 36 partes iguales (l) con el fin de obtener variaciones cada 10° , y se estimó el ángulo de desviación teórico mediante Ecuación (4) para todo el tramo de estudio.

$$\Phi = \theta_0 \sin\left(\frac{l \cdot 360}{\lambda_m}\right) \quad (4)$$

Se construyó la curva teórica que el río tendría en un estado de equilibrio (Sine-generated curve). Además se determinó el ángulo entre la dirección del flujo y la dirección del valle observable para cada tramo l , de esta forma pudimos obtener la desviación actual del cauce. La forma teórica nos permite también comparar el progreso que tiene el cauce con los otros casos a lo largo de los años.

4.4. Modelo Digital

Se construyó una superficie batimétrica sobre la base de 31.247 puntos levantados topográficamente, y proporcionados por BESALCO S.A. (empresa a cargo de las obras en este tramo del río) (Figura 5A), la superficie resultante se suavizó por medio de interpolaciones locales obteniendo los resultados que se indican en la Figura 5B.

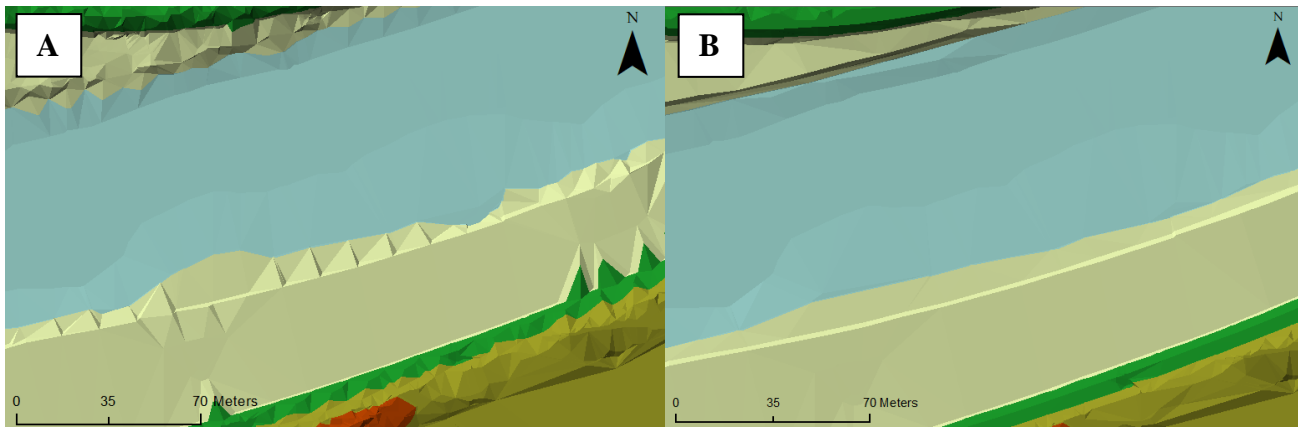


Figura 5. Modelo digital de la superficie en ArcGIS con y sin refinado de su triangulación.

Se extendió el la zona de interés en 1.5km manteniendo la forma de la última sección conocida aguas abajo (Figura 6A) y la pendiente longitudinal indicada en los planos del proyecto de mejoramiento utilizado por el MOP (Figura 6B).

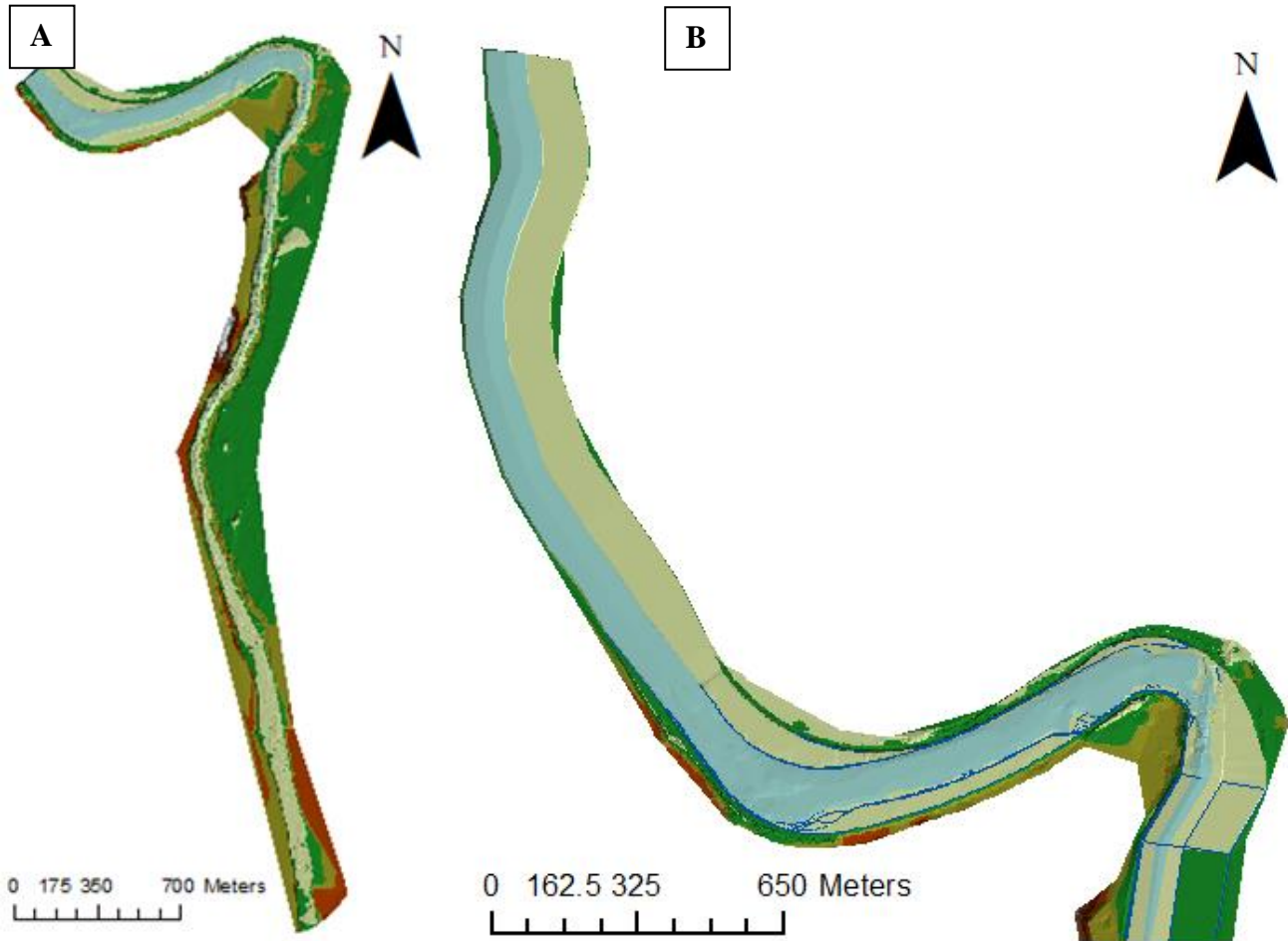


Figura 6. Superficie TIN de ArcGIS 10.2. A) condición inicial de la topografía. B) extensión de la parte superior del modelo (aguas abajo) para alejar las condiciones de borde de la zona de interés.

5. RESULTADOS

Tras realizar el proceso iterativo en cada una de las secciones transversales del meandro del río Andalién se obtuvieron los datos representados en la Tabla 2. El promedio de las 16 secciones consideradas entregó un caudal de $68 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual corresponde al caudal Bankfull de meandro en el río Andalién para una condición natural. En el (Anexo A) se puede apreciar una vista longitudinal con la posición de cada una de las secciones a lo largo del río para el modelo 1D de Inostroza (2004).

Tabla 2. Caudal Bakfull en cada sección del meandro para el año 2004.

SECCIONES	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
CAUDAL (m^3/s)	38	28	29	44	154	105	70	20	47	69	63	114	56	74	88	90

En la Figura 7 se observa el caudal Bankfull para la sección 25 del modelo HECRAS 1D de Inostroza (2004). Se logra apreciar que el caudal va a sección llena (escurrimiento de borde a borde).

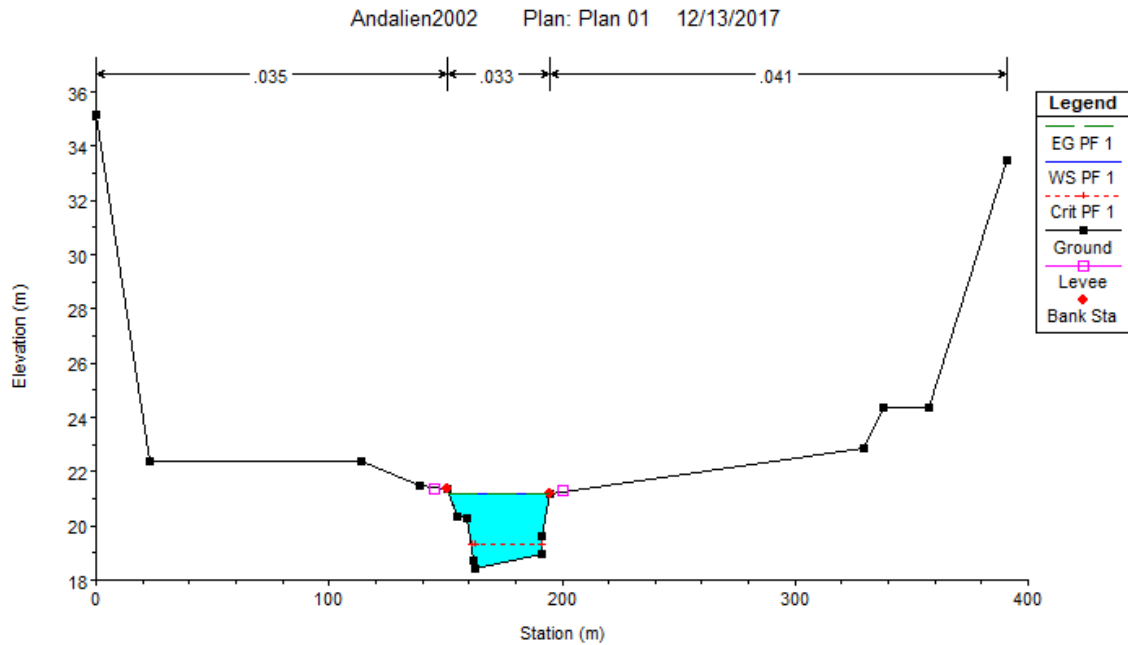


Figura 7. Sección N° 25 del modelo HECRAS 1D de Inostroza (2004), con el Bankfull calculado.

Los resultados de la parametrización de la ecuación de MPM se indican en la Figura 8. La curva de color azul describe el transporte de sedimento según MPM y la curva roja es la curva calibrada y definida por la Ecuación (1). El parámetro β resultó con una magnitud de 1.074 que según la literatura se encuentra en el rango correcto de valores para este parámetro (Goodwin (2004)).

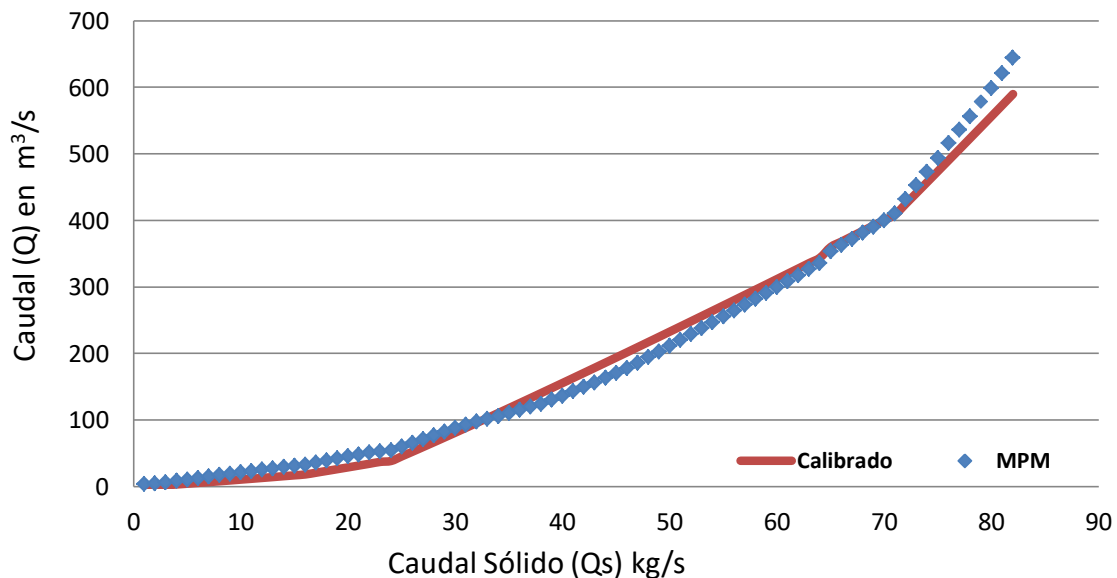


Figura 8. Gráfico de transporte de sedimento con MPM y Ecuación 1 parametrizada.

La distribución de caudales del río Andalién se describe de manera Log-Normal, y se caracteriza por una media y desviación estándar de 23.5 y 13.8 m³/s, respectivamente.

La Figura 9 muestra la distribución de caudales medios diarios de río Andalién provenientes de las estaciones DGA, y que se tienden a una distribución Log-Normal.

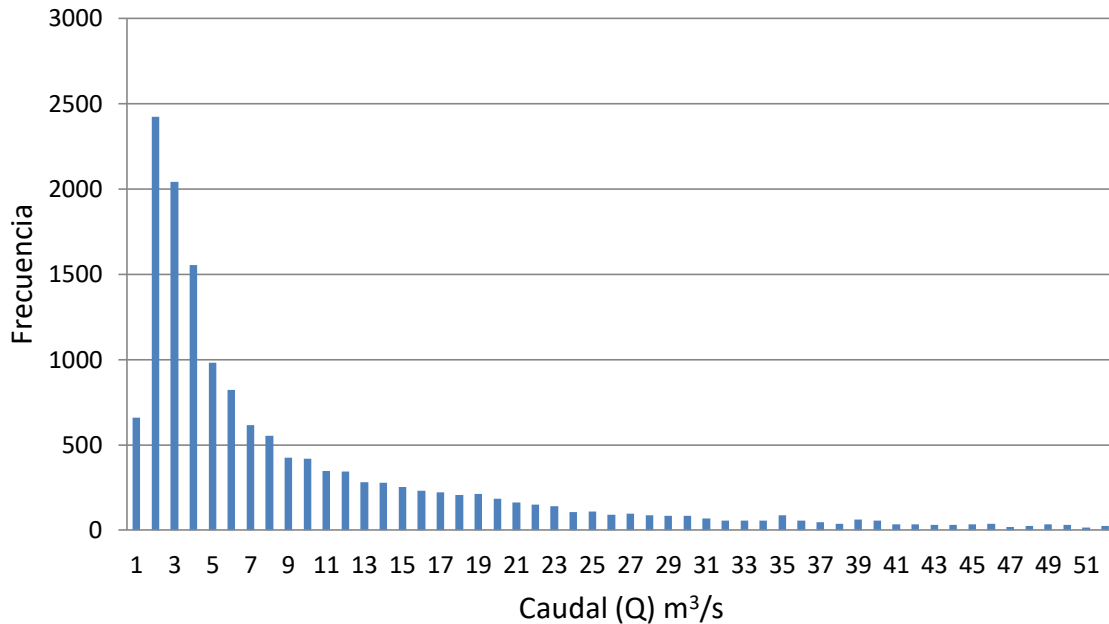


Figura 9. Distribución de caudales medios diarios del río Andalién.

Con los parámetros característicos de la frecuencia de caudales y de la capacidad de transporte de sedimentos la Ecuación (3) entrega un valor 4.34 m³/s, que corresponde a la descarga efectiva del tramo.

En lo que concierne a la forma del cauce del río Andalién, el meandro del año 1978 tiene una longitud de valle (onda) $\lambda_m = 259.3$ m, amplitud $A = 38.3$ m, una longitud de meandro $M = 317.2$ m, un ángulo de deflexión máxima promedio con respecto a la dirección media de abajo $\theta_0 = 98^\circ$ y una sinuosidad $K = 1.22$.

La Figura 10 muestra la curva generada (color azul) para el año 1978 y como se encontraba en ese momento el cauce (color naranja), además en la Figura 11 se observa la sobre posición del meandro teórico y el observado en la fotografía de 1978. El resumen los demás años estudiados se entrega en la Tabla 3, y se representan gráficamente en la Figura 12.

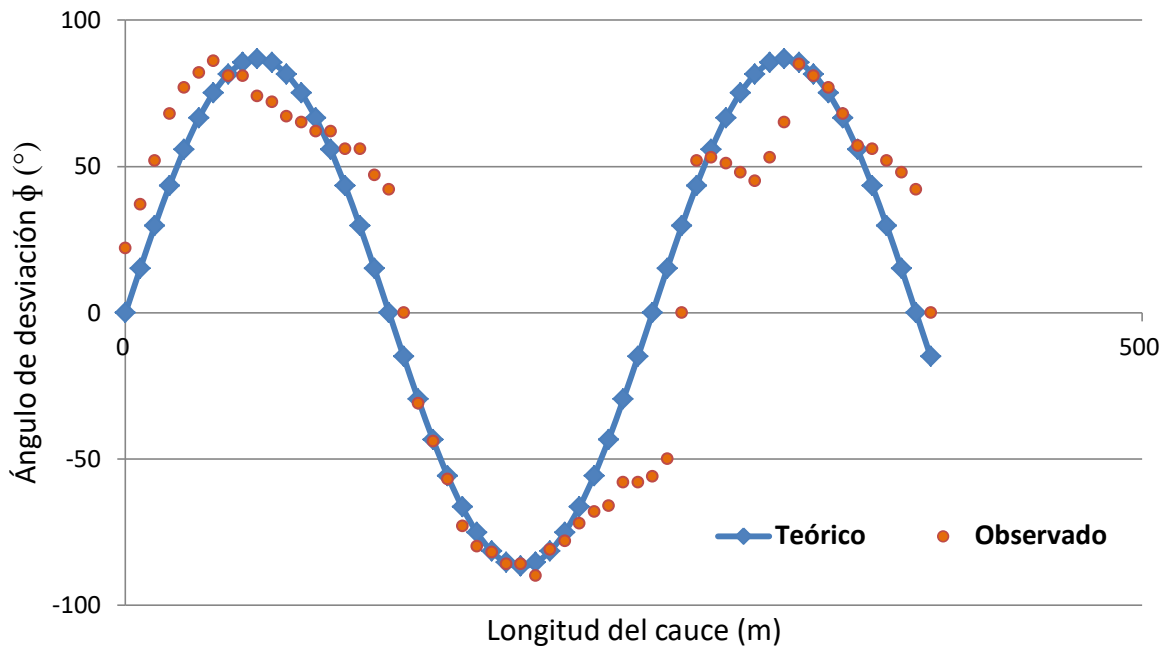


Figura 10. Dirección del canal teórico versus el observado en 1978.

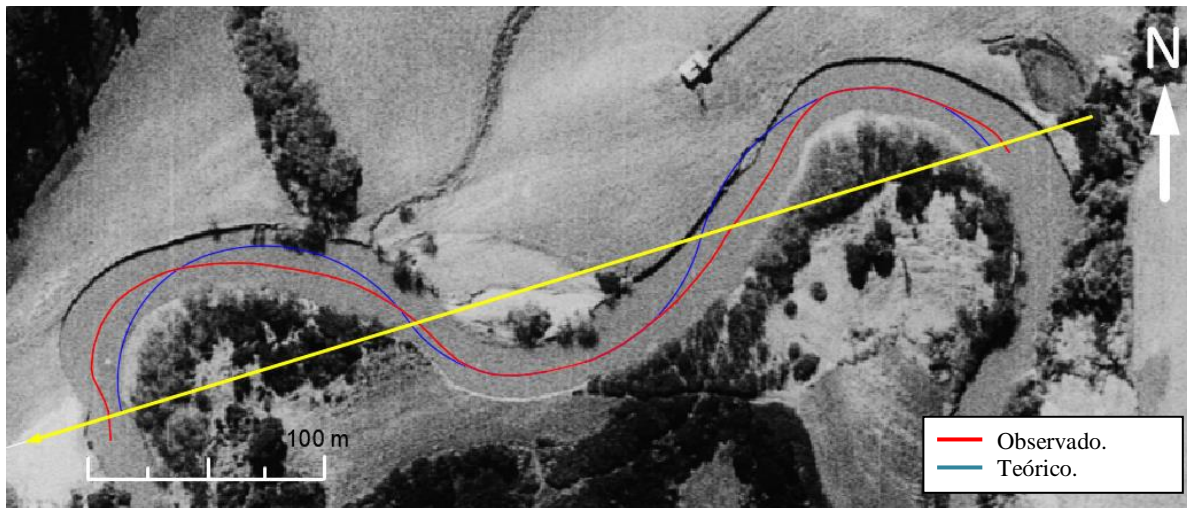


Figura 11. Meandro teórico vs el observado para el año 1978.

Tabla 3. Resultado de los parámetros para todos los casos del estudio.

	1978	1992	2002	2006	2007
λ (m)	259.3	271.3	270.62	267.5	262.9
A (m)	41.2	50.3	53.7	53.9	56.2
M (m)	317.2	340	357.3	365.8	361.4
θ (°)	87	90.25	105	96	91
k	1.22	1.25	1.32	1.37	1.37

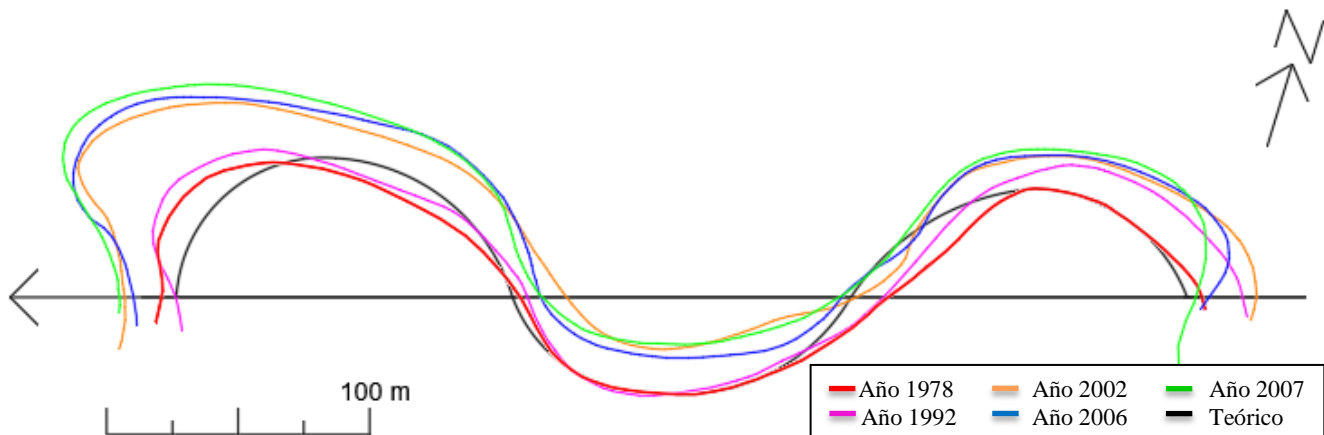


Figura 12. Meandros observados del río Andalién para los años 1978, 1992, 2002, 2006, 2007 y para el caso teórico de 1978.

6. CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

El bankfull es casi 16 veces la descarga efectiva, que puede ser común en ríos urbanos y cuya condición se atribuye a la mantención del cauce (Goodwin 2004). Sin embargo, el río Andalién no presenta mayores procesos de mantención en el periodo considerado para la descarga efectiva. Consecuentemente es válido suponer que el río presenta un estado de degradación en la zona de estudio, y que dicha condición influye sobre la condición migratoria de los meandros puesto indica un exceso de transporte (sedimento ingresa desde aguas arriba es menor que la capacidad de transporte del cauce).

En el año 1978 el río se encontraba en una condición cercana al equilibrio. La trayectoria del cauce es similar a la condición de equilibrio (Figura 10), en la que se aprecia una razón entre el radio de curvatura y el ancho del cauce (Rc/W) cercana a 2 y que representa una condición de equilibrio según Nanson and Hickin (1986). Además se observa un ancho superficial relativamente constante (Figura B1) que es una característica de cauces cuando minimizan la pérdida energía por unidad de longitud, y que a su vez refuerza lo anterior. Sin embargo, para el año 1992 el río muestra una evolución del meandro del tipo rotacional que es indicadora de meandros desarrollados y riberas moderadamente erodables (Anexo C, Figura c). El ancho superficial se muestra variable a lo largo del cauce y se entiende como una condición de respuesta a forzantes externos, probablemente asociados al exceso de sedimento desde aguas arriba (Condición de degradación). Entonces, el material que llega desde aguas arriba a un tramo cercano a la condición de equilibrio (tasa neta de transporte sedimento nula) producirá zonas de depositación en el interior de las curvas promoviendo la erosión de la parte externa de las mismas y el consecuente desplazamiento del meandro. Este tipo de desplazamiento se identifica como un cambio de orientación de la curva del meandro con respecto al alineamiento del valle. La razón Rc/W aumenta a valores entre 3 y 4 e indicando máxima erosión en la curva externa del meandro, y justificando el aumento de la amplitud identificada para la imagen del año 2002. Entre los años 1978 y 2002 se registran los mayores cambios, conservando el cauce parámetros morfológicos relativamente constantes entre los años 2002 a 2007, incluso considerando que el año 2006 ocurre una de las mayores crecidas históricas registradas.

Además entre los años 1978 y 1992 se observó un corte artificial de meandro a 1 km aguas arriba del meandro de Cosmito. Esto disminuyó la longitud del cauce, aumentando la pendiente y energía, permitiendo así mayor

capacidad de transporte de sedimento en el sector, por lo que al meandro llegó más sedimento, si es que la disponibilidad de sedimento lo permitió.

La razón Rc/W se mantiene en la vecindad de 4 entre los años 2002 a 2007, condición que podría haber derivado en un radio de curvatura corto y un potencial abandono del meandro debido al avance “recto” del cauce (condición conocida como cut off).

Otra situación indicadora de degradación corresponde al meandro abandonado ubicado al norte del cauce actual (Figura 13, cuadrado rojo). Se puede entonces entender que dicha modificación se debe a una condición de regularización del río para acortar su longitud, aumentar la pendiente longitudinal y aumentar la capacidad de transporte con el fin de transportar el sedimento extra proveniente desde aguas arriba.



Figura 13. Meandro abandonado del río Andalién en el Sector Cosmito.

Entre los años 1978 y 1992 se observó un corte de meandro (de forma artificial) a 1 km aguas arriba de la zona de estudio afectando la zona de estudio. La condición con proyecto condicionará los cambios morfológicos del cauce en su proceso de construcción como de operación. La construcción aisló el meandro indicado en la Figura 14.

Cabe notar que la situación con proyecto confina el cauce a un ancho fijo, pudiendo generarse dos escenarios diferentes. 1) Las riberas son poco erodables y los meandros gobernados por la descarga efectiva avanzarán hacia aguas abajo por traslación (Figura C1, b) sin afectar las riberas, o 2) las riberas son erodables y el río se ocupará en recuperar su sinuosidad (app 1.3) y amplitud (app 50m) afectando las riberas construidas.

Se recomienda incorporar estudios morfológicos en proyectos de esta naturaleza. Debido a que el cauce diseñado debería ajustarse a las condiciones del equilibrio del cauce original.

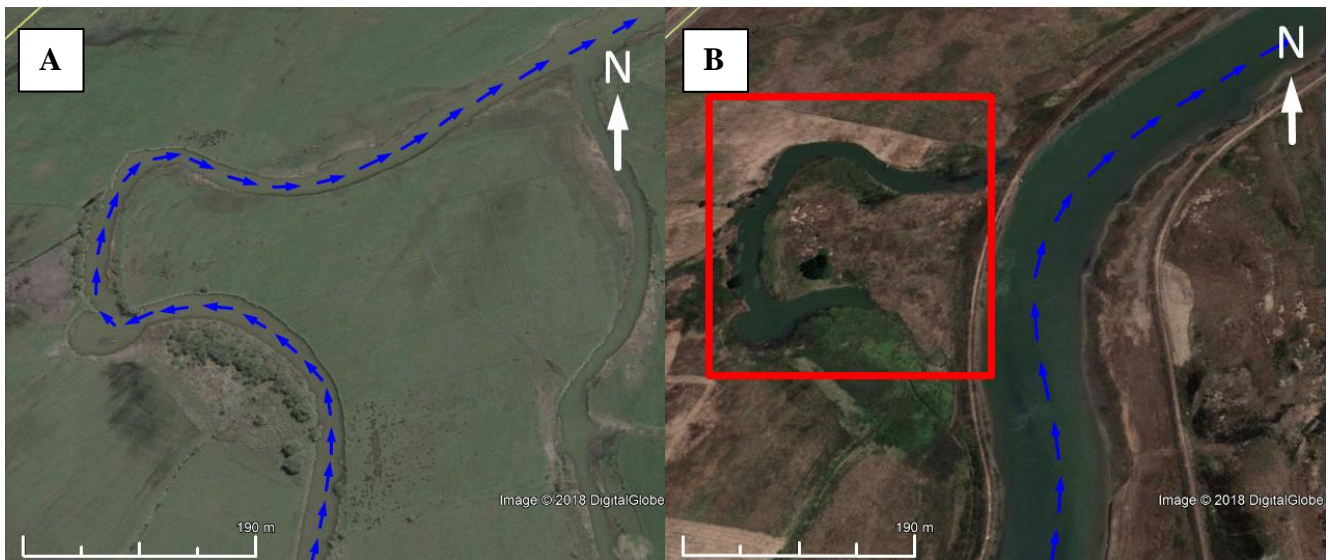


Figura 14. A) meandro vigente el año 2002, B) meandro abandonado por el proyecto el 2017.

7. REFERENCIAS

- EIC Ingenieros Consultores** (2007). Diseño de obras fluviales río Andalién, Estero Nonguén y Palomares, VIII Región del Biobío.
- Godoy, H.** (2014). “*Delimitación deslindes en zonas ribereñas: Análisis caso Río Andalién*”. Concepción, Chile.
- Goodwin, P.** (2004). “Analytical Solution for Estimating Effective Discharge”. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, August 2004.
- Horacio, J.** (2014). “*River Sinuosity Index: Gemorphological characterization*”. Technical note 2. CIREF and Wetlands International 6p.
- Inostroza, A.M** (2005). “*crecidas en el Andalién bajo: Análisis hidráulico de las intervenciones en su planicie de inundación*” Concepción, Chile.
- Jalowska A.M., McKee B.A., Lacey J.P., and Rodriguez A.B.** (2017). “Tracing the sources, fate and recycling of fine sediments across a river-delta interface” *Catena* 154 (2017) pp. 95-106.
- Leopold, L.B. and W.B. Langbein** (1966). “River Meanders” *Theory of Minimum Variance*. United States Geological Survey pp. 60-70.
- Meckenburg, D. and Jayakaran, A.** (2012). “Dimensioning The Sine-Generated Curve Meander Geometry”. *Journal of the American Water Resources Association* Vol. 49, No. 3, June 2012. Pp. 635-642.
- Mohamad, I.N., Lee W.K. and May R.** (2016). “Idealized River Meander Using Improved Sine-Generated Curve Method”. *Yusoff M. Hamid N., Arshad M., Arshad A., Ridzuan A., Awang H.* (eds) InCIEC 2005: Springer, Singapore.
- Nanson, G. C., and Hickin, E.J.** (1986). “A statistical analysis of bank erosion and channel migration in western Canada” *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 97, pp. 497 – 504.
- SERNAGEOMIN** (2003). “Mapa Geológico de Chile: Versión digital” *Servicio Nacional DE Geología y Minería*. Publicación Geológica Digital N° 4 (Versión 1.0, 2003), Santiago, Chile.
- Simoon E.M.** (2010). *El río y la forma. Introducción a la geomorfología fluvial*. Santiago Chile.

8. ANEXOS

Anexo A

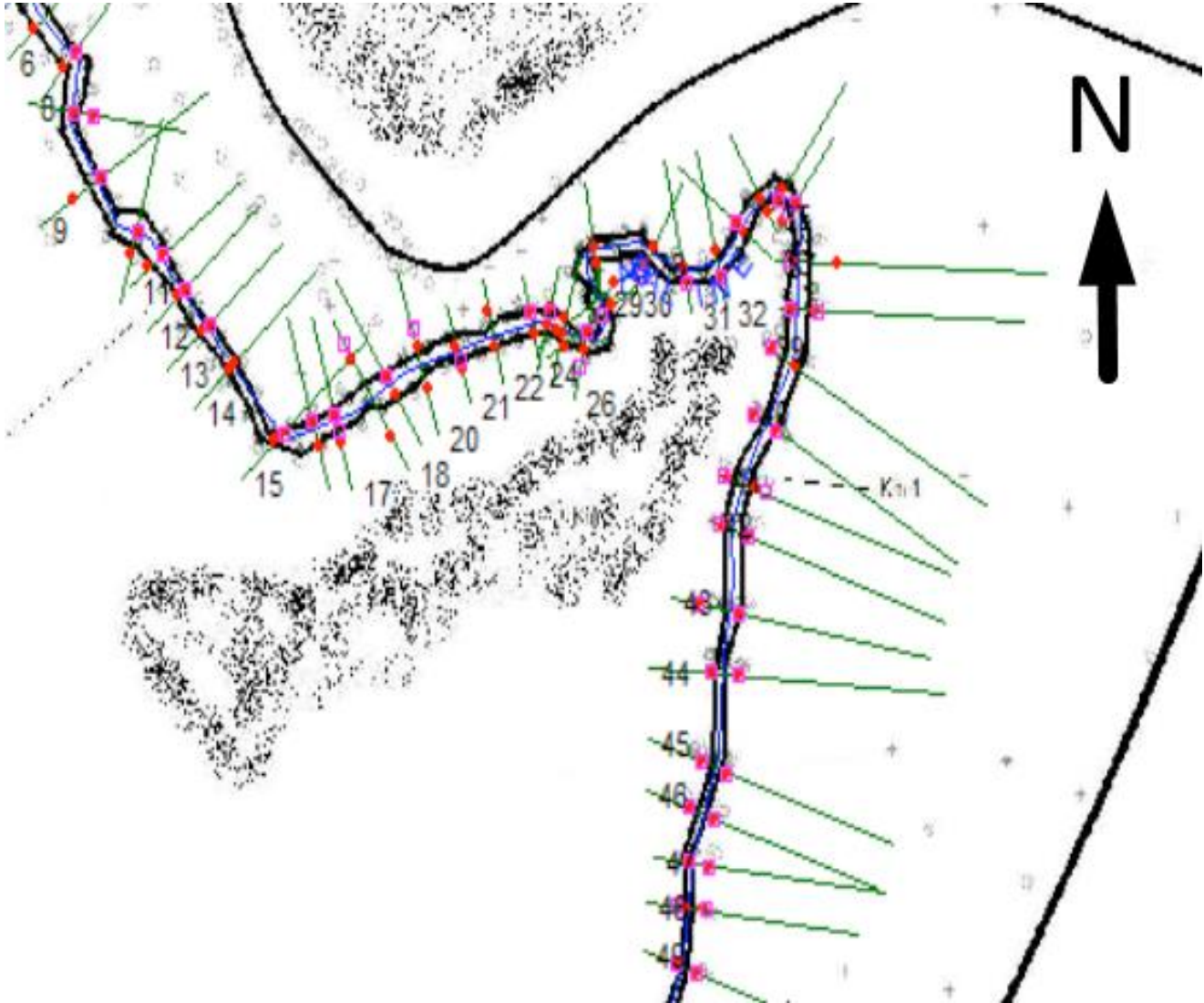


Figura A. Secciones transversales del modelo 1D (modificado por Inostroza (2004)).

Anexo B



Figura B1. Fotografía 3667, vuelo CH-30 de 1978 proporcionado por SAF.



Figura B2. Fotografía 3541, vuelo FONDEF de 1992 proporcionado por SAF.



Figura B3. Captura de imagen satelital de Google Earth Pro (21/09/2002).

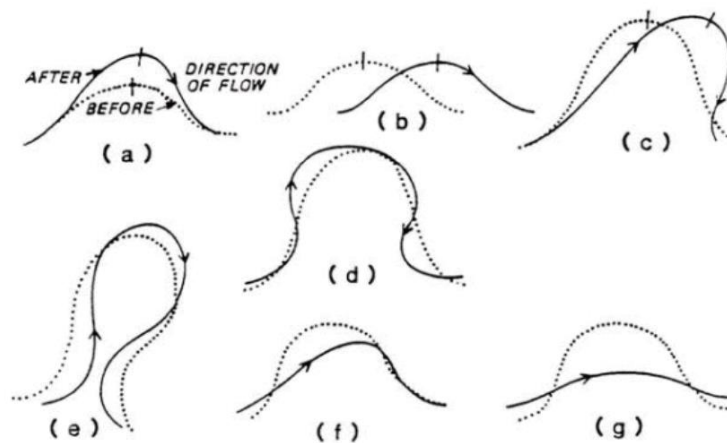


Figura B4. Captura de imagen satelital de Google Earth Pro (07/04/2006).



Figura B5. Captura de imagen satelital de Google Earth Pro (28/04/2007).

Anexo C.



SOURCE: Modified from Brice, 1977

Figure 2.3. Modes of meander loop development: (a) extension, (b) translation, (c) rotation, (d) conversion to a compound loop, (e) neck cutoff by closure, (f) diagonal cutoff by chute, and (g) neck cutoff by chute.

Figura C1. Modificada de Brice (1977).