

APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE KINOSHITA PARA LA DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE FUNCIONAMIENTO ÓPTIMO DE UN ESTERO COSTERO

DEFINITION OF OPTIMA HYDRAULIC USE AREA IN A COASTAL ESTERO, USING KINOSHITA EQUATION

M. Alfonso Gutiérrez-López¹, María Gricelda Jiménez J.²

Resumen

Se utiliza la formulación propuesta por Kinoshita para estimar la evolución del meandro en ríos, empleando las características fisiográficas de un cauce. Como principal característica se emplea la sinuosidad y la amplitud de las curvas; representadas por un coeficiente de sinuosidad angular. En este trabajo se presenta una fórmula alternativa basada en un análisis estocástico multivariado de las características hidráulicas del conjunto fluvial representado por un estero y dos ríos en confluencia. Asimismo, se utiliza una modelación hidráulica bidimensional para comparar los resultados del ancho óptimo del estero. Se aplican estos procedimientos en el conjunto estero San Pancho-Los Izotes-Las Calabazas ubicados en el estado de Nayarit, México. La comparación de los anchos obtenidos por ambos procedimientos permite estimar una zona de funcionamiento óptimo y definir en consecuencia zonas de riesgo potencial de inundación.

Palabras clave: meandro, análisis multivariado, simulación hidráulica, Nayarit México

Abstract

The formulation of Kinoshita curves takes into account a number of physiographic characteristics and the configuration of the river; however, it is the curve amplitude, the one that represents the main characteristic of this formulation. This main feature is known as the angular sinuosity coefficient. In this paper an alternative expression for meander prediction formulation, based on a stochastic multivariate analysis of the geomorphologic and physiographic characteristics of a river is proposed. Stochastic and hydraulic models are used to simulate the meandering of Estero San Pancho-Los Izotes-Las Calabazas Rivers in the Mexican state of Nayarit. The computation of the confidence limits, although from a statistical approach, constitutes a good tool to consolidate the arguments that define the zones at potential flood risk.

Key words: meander river, multivariate analysis, hydraulic simulation, Nayarit Mexico

1. INTRODUCCIÓN

La localidad de San Francisco (San Pancho) Nayarit, resalta entre los destinos de playa de la zona del Pacífico mexicano por su calidad proactiva en beneficio de los recursos naturales. No obstante, las presiones del crecimiento urbano afectan a la biodiversidad de sus cuerpos fluviales y costeros. En especial se puede mencionar el estero de San Pancho (en ocasiones conocido como estero La Palma), en donde se ha documentado la presencia de animales como nutrias, cocodrilos y una gran cantidad de aves; pero que desafortunadamente se ha visto afectado, en fechas recientes, por acciones que ponen en riesgo su continuidad y su supervivencia. Gracias a las valiosas acciones de activismo ecológico de la comunidad se ha evitado su muerte, deterioro y pérdida definitiva. Asimismo, está presente la problemática de la contaminación del agua, agravada por la contaminación de residuos sólidos urbanos en la playa que afecta sin duda a las poblaciones de plantas, disminuye las especies de aves y altera los principales recursos del estero. Lo principal para lograr una correcta comprensión del

funcionamiento del estero es lograr una delimitación óptima de su desembocadura a fin de garantizar su descarga. Se presenta a continuación una descripción del estero y de los procesos fluviales que caracterizan el funcionamiento hidráulico de este cuerpo de agua. Se realiza una simulación matemática basada en la formulación propuesta por Gutiérrez-López *et al.*, (2014) y una comprobación numérica, empleando la caracterización en campo del estero y de la modelación 2D de su principal afluente el río Los Izotes. El corredor fluvial, expresado como un ancho de cauce, en hidráulica fluvial se basa en un procedimiento que identifica dos tipos de sinuosidad en un río: la topográfica y la hidráulica. En este último tipo, la forma del meandro se asocia con la delimitación del corredor fluvial y con la configuración de la plataforma geológica de la corriente. Para el tipo de sinuosidad topográfica, se utilizan las llamadas curvas de Kinoshita las cuales se basan en la formulación empírica desarrollada por Beck (1988). La formulación de curvas Kinoshita incorpora un gran número de

¹ Centro de Investigaciones del Agua, Querétaro / Iniciativa Internacional sobre Inundaciones IFI-LAC.
e-mail: alfonso.gutierrez@uaq.mx

² Consultoría Punto Cero para el Desarrollo S.C., Querétaro, México

características fisiográficas y de configuración de un río, sin embargo, es la amplitud de las curvas, lo que representa la característica primordial de esta formulación; a esta característica se le conoce como coeficiente de sinuosidad angular, la cual se logra determinar con mediciones en campo y una caracterización geométrica de la evolución histórica del meandro del río. Es importante mencionar que con estos resultados se desea poner en evidencia la importancia del estero y lo valioso que resulta que se mantenga su funcionamiento como cuerpo regulador y generador de funciones ambientales e hidráulicas vitales para la población de San Pancho. A continuación se muestra una secuencia histórica de fotografías que permiten observar la interacción que tiene el estero San Pancho y los ríos Los Izotes y Las Calabazas.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Región Hidrológica 13 se ubica en el occidente de la República Mexicana en los estados de Nayarit y Jalisco, cuenta con una extensión 5,225 km². La integran 6 cuencas hidrológicas, la parte norte denominada R. HUICICILA- SAN BLAS, está formada por las cuencas: Río Huicicila, Río Ixtapa y Río San Blas; la parte sur que corresponde a R. CUALE- PITILLAL está formada por las cuencas: Río Tecomala, Río Cuale y Río Pitillal. (CONAGUA, 2012). Esta ubicación se muestra a detalle en las figuras 1 y 2.

La zona de estudio se localiza en la subcuenca Charco Hondo que pertenece a la cuenca hidrológica del río Huicicila está conformada por las microcuencas del Arroyo Los Izotes, Arroyo Las Calabazas, cuenta con una superficie de 68.48 km². Limita en la parte con

el Océano Pacífico, al este con la Región Hidrológica 14, al norte y sur colinda con otras microcuencas que pertenecen a la cuenca del Río Huicicila (Figura 2).

Para el estudio de los efectos de inundación en el estero San Pancho, localizado en la localidad de San Francisco, Nayarit, México fue necesario calcular los caudales que aporta la cuenca de la que forma parte dicho estero ubicado a la salida de la cuenca que conforman los ríos Los Izotes que tiene una pendiente media del cauce de 1.7% con un tiempo de concentración de 2.94 horas. El río Las Calabazas tiene una pendiente media del cauce 3.2% con un tiempo de concentración de 1.59 horas. Partiendo del estudio hidrológico calculado con hietogramas tipo, relacionados con tormentas de gran intensidad y corta duración producto del paso de huracanes por esta región del país, utilizando técnicas de análisis espacial de precipitaciones, cartografía de campos de lluvia dentro de regiones consideradas hidrológicamente homogéneas, se obtuvieron gastos para un periodo de retorno de 100 años de 147.7 m³/s para el río Los Izotes y 92.6 m³/s para el río Las Calabazas. Los caudales dominantes calculados tienen una gran correlación con los valores estimados en el estudio hidrológico de estos dos ríos. Por ejemplo para el caso del río Los Izotes, se estimó un caudal dominante de 108 m³/s para un periodo de retorno de 25 años y de 125 m³/s para 50 años. De forma similar para el río Las Calabazas se tienen 102 m³/s y 117 m³/s respectivamente. En la figura 3, se muestra la ubicación del conjunto fluvial, río Los Izotes, río Las Calabazas y estero San Pancho (ESP-Izotes-Calabazas). También se muestran en la figura 4 (a,b,c y d) la evolución en el tiempo de la mancha urbana alrededor de este sistema fluvial.

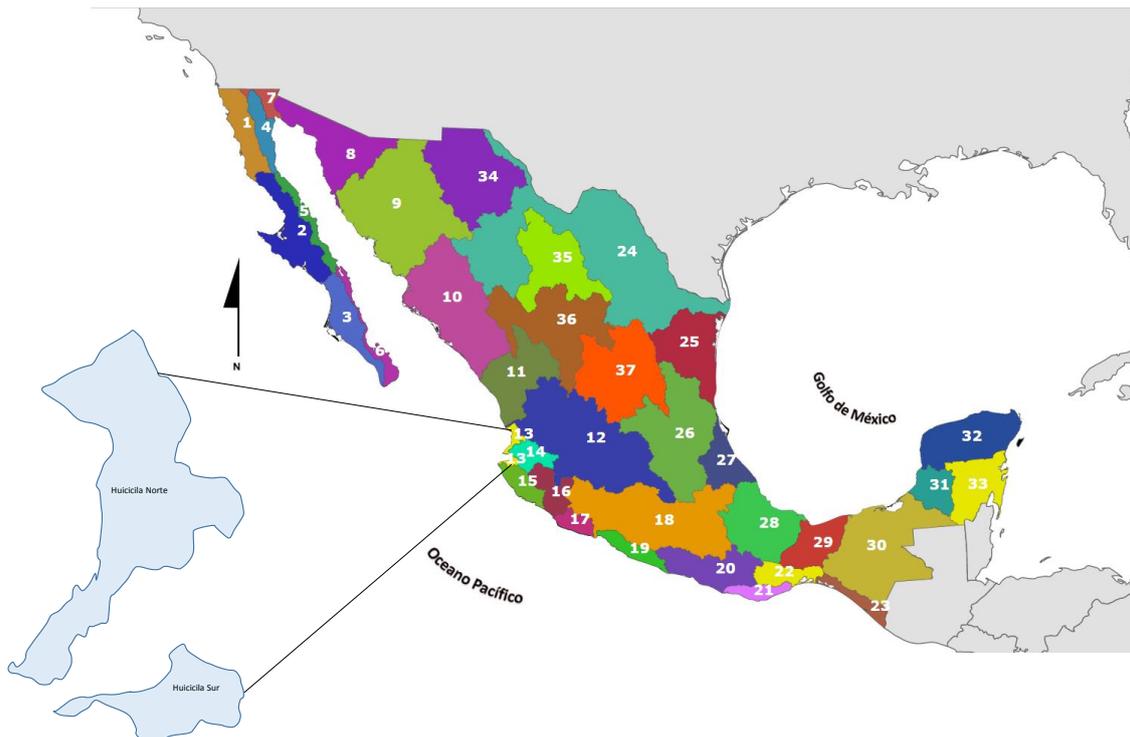


Figura 1. Ubicación de la Región Hidrológica 13: Huicicila

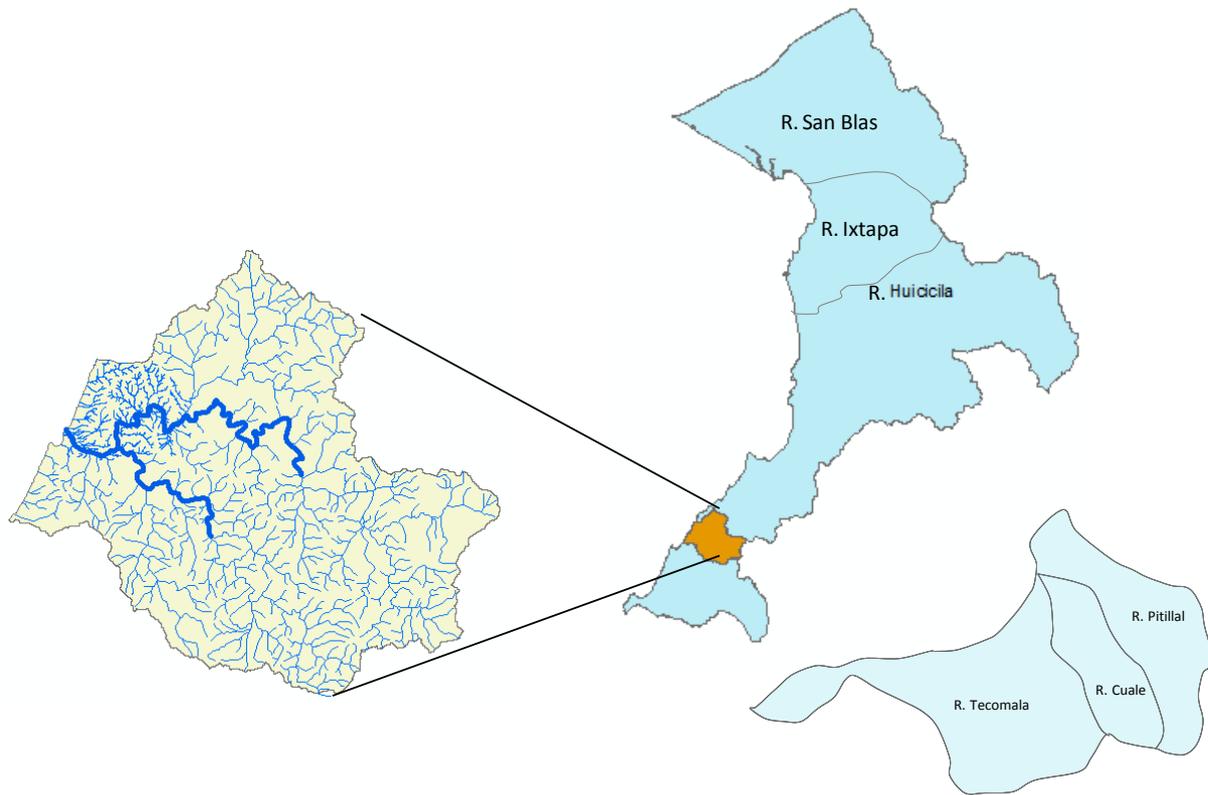


Figura 2. Subcuenca Charco Hondo

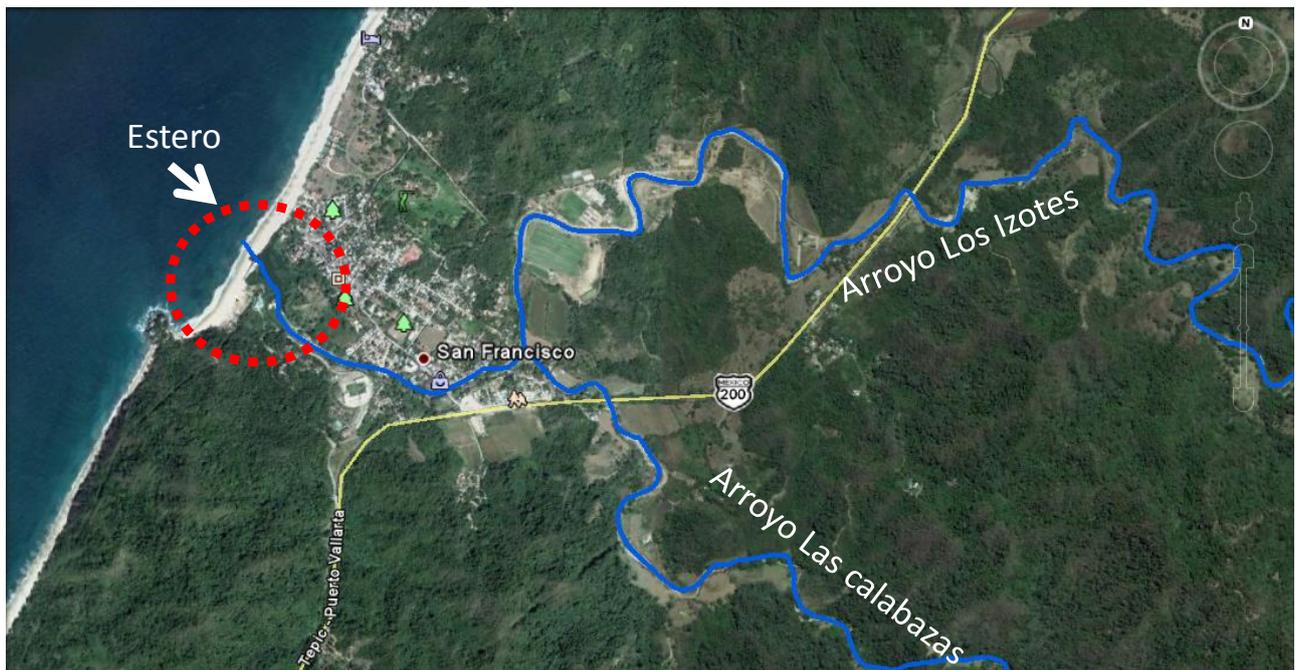
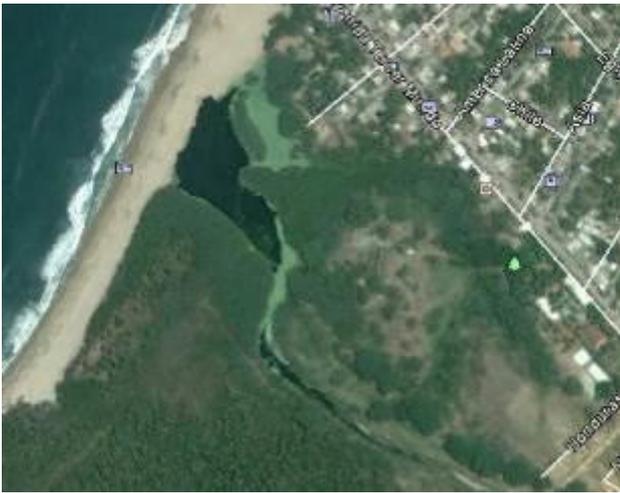
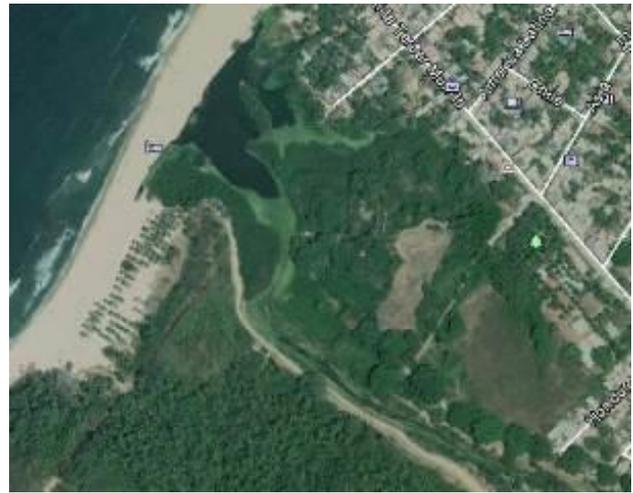


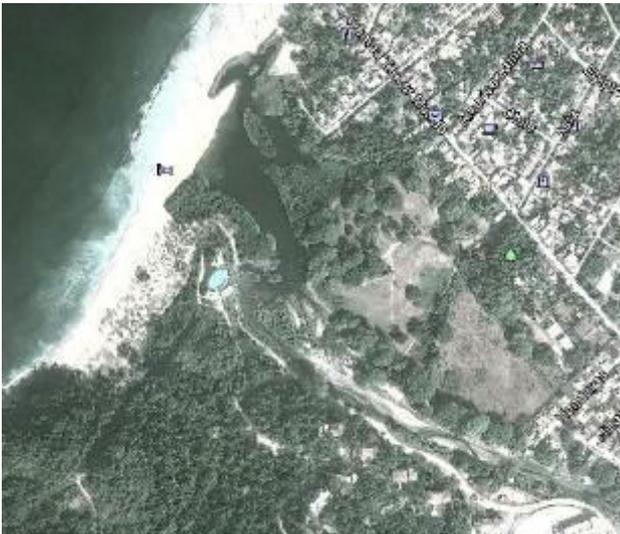
Figura 3. Ubicación de la zona de estudio



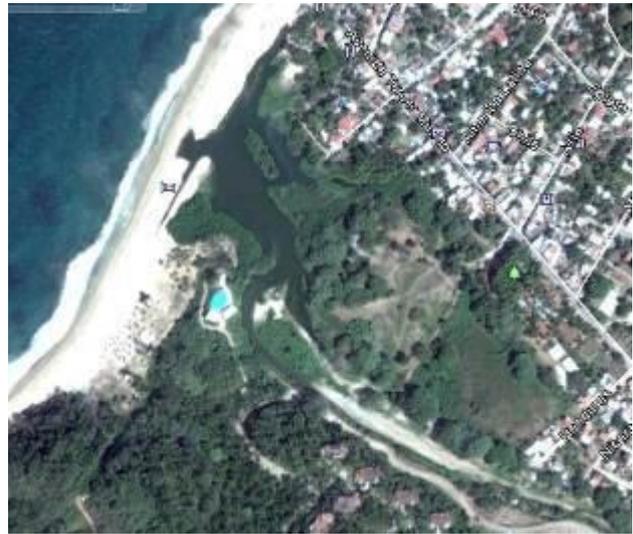
a) Vista aérea del estero San Pancho 2002



b) Vista aérea del estero San Pancho 2009



c) Vista aérea del estero San Pancho 2011



b) Vista aérea del estero San Pancho 2014

Figura 4. Vista aérea del estero San Pancho, evolución en el tiempo

3. FUNCIONAMIENTO FLUVIAL DE LOS RÍOS LOS IZOTES Y LAS CALABAZAS

La predicción del meandro de ríos es uno de los fenómenos físicos más complejos a estudiar dentro de la hidráulica fluvial. La constante interacción de causa-efecto entre la propagación de una onda de avenida y las condiciones geológicas de la sección transversal de un cauce, son sin duda el génesis del meandreo en ríos. Como una consecuencia de esta interacción, procesos como la migración lateral (debida a la erosión de las márgenes), el ensanchamiento del cauce, la degradación y agradación del lecho, la evolución de las formas de fondo y las variaciones en las concentraciones de sedimentos suspendidos; son procesos fluviales que ocurren a lo largo y ancho de los componentes funcionales de un río; transmitiendo así, un sello o característica única a la planicie de inundación y a la desembocadura de un río. A este conjunto de procesos fluviales se les conoce con el nombre de migración de ríos. En la actualidad numerosos estudios se llevan a cabo para predecir el comportamiento de un río con

base en este tipo de procesos. Pero también estas características hidrodinámicas aportan un grado de dificultad cuando se trata de utilizar modelos hidrodinámicos para predecir la migración de ríos con meandros. Sin embargo, pocos son los programas de cómputo desarrollados específicamente para describir y pronosticar la migración de ríos (Lagasse *et al.*, 2004; Abad y García, 2006). En Latinoamérica, el modelo RVR Meander (Abad y García, 2004), constituye la más precisa herramienta para el pronóstico de meandros. Un procedimiento para caracterizar el meandreo en ríos debe considerar, una completa descripción del ciclo fluvial. Es decir, una caracterización de la etapa de juventud, madurez y completo desarrollo del río (Mueller, 1968). Este procedimiento se basa en la identificación de los dos tipos de sinuosidad: topográfica e hidráulica. En este último tipo, la forma del meandro se asocia con la delimitación del corredor fluvial y con la configuración de la plataforma geológica de la corriente. Para el tipo de sinuosidad topográfica, se utilizan las llamadas curvas de Kinoshita las cuales se basan en la formulación empírica desarrollada por Beck

(1988). La formulación de curvas Kinoshita incorpora un gran número de características fisiográficas y de configuración de un río, sin embargo, es la amplitud de las curvas, lo que representa la característica primordial de esta formulación; a esta característica se le conoce como coeficiente de sinusidad angular. Un procedimiento propuesto por (Abad y García, 2006), consiste en identificar tres etapas principales. Un pre-procesamiento, el cual consiste en obtener la ubicación exacta (coordenadas) de los n puntos que juntos conforman la traza de un río a lo largo de su eje. La segunda etapa es el procesamiento estadístico. En ella se estima apropiadamente la evolución del río. Se calculan parámetros como el desplazamiento lateral y longitudinal del río, la amplitud, la sinusidad, así como la curvatura promedio (MacDonald *et al.*, 1992). Adicionalmente se emplean otros parámetros correspondientes a los aspectos dinámicos como el gasto de lavado y gasto dominante. En las tablas siguientes se muestran las características morfológicas y fluviales para el análisis de migración de ríos utilizando un esquema

estocástico senoidal. La figura 5 describe cada uno de los parámetros recién comentados.

Características morfológicas y fluviales para el análisis de migración de ríos

No.	Variables que intervienen (Xi)	Símbolo
1	Longitud del río	L
2	Radio de curvatura	r
3	Ancho del cauce	b
4	Longitud de onda del meandro	M_L / λ
5	Ancho del meandro	B
6	1/2 Ancho de cauce primer tramo	b_1
7	1/2 Ancho de cauce segundo tramo	b_2
8	Amplitud del meandro	a
9	Grado de curvatura	G_c
10	Ángulo de desvío del cauce en un punto	θ
11	Longitud de curva	Lc
12	Relación de Schumm (amplitud de curva)	r/b
13	Área de la cuenca, a la curva	Ac
14	Factor de área	FA
15	Gasto dominante (Tr = 2 años)	Qd

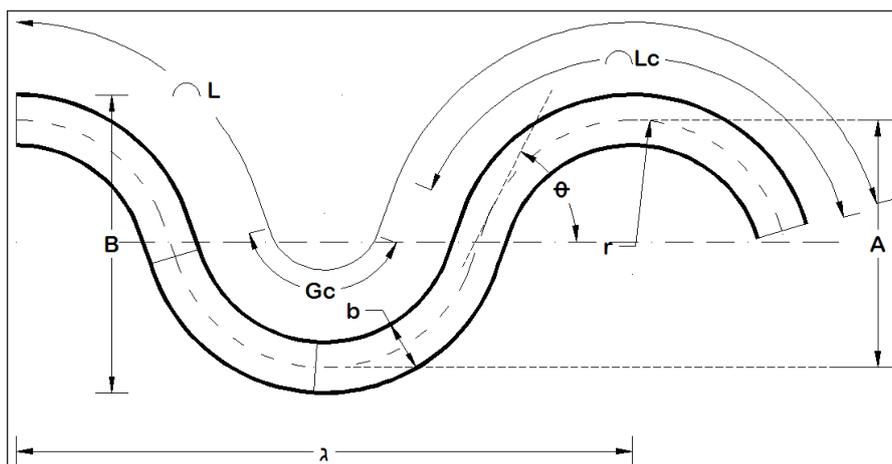


Figura 5. Características morfológicas y fluviales propuestas

Tabla 1. Características morfológicas y fluviales del conjunto ESP-Izotes-Calabazas

Variables		Tramo			
		1	2	3	4
L	Longitud río L (m)	3024.86	2962.46	705.15	1242.74
r	Radio de curvatura (m)	797.95	1166.59	360.2	1278.91
B	Ancho del cauce b (m)	292.648	179.311	145.7025	164.588
ML	Longitud de onda λ (m)	4363.02	3913.70	2449.32	1814.77
B	Ancho del meandro B (m)	1536.69	502.23	1206.17	1482.00
b_1	1/2 Ancho de cauce (m)	146.324	89.6555	72.85125	82.294
b_2	1/2 Ancho de cauce (m)	149.175	71.305	48.32	76.33
a	Amplitud (m)	1241.191	341.2695	1084.999	1323.376
G_c	Grado de curvatura (grados)	56	85	88	99
Angle	Ángulo Θ (grados)	49	42	48	41
Lc	Longitud curva (m)	779.9039	1730.671	553.2275	2209.798
r/b	(r/b) (forzadas)	2.7266545	6.5059589	2.4721607	7.7703721
Ac	Área de cuenca en curvas (km ²)	177.19323	180.05136	180.70565	181.64418
FA	Factor de área (%)	0.730	0.742	0.745	0.749

La tercera etapa comprende propiamente la predicción de la migración del río. En esta etapa es importante definir la formulación de la configuración de curvas; si son simétricas (*sinegenerated curves*) (Langbein y Leopold, 1966) o asimétricas (Kinoshita, 1961; Kinoshita y Miwa, 1974; Parker *et al.*, 1983; Yamaoka y Hasegawa, 1984; Parker y Andrews, 1986). (*Asymmetric Bends*). Para modelar la erosión de bancos, considerados verticales, se emplea el concepto de velocidad excesiva. Algunas simplificaciones son utilizadas en este tipo de modelos, por ejemplo la ecuación de continuidad del sedimento, no es incluida y se considera un perfil lineal del fondo del río (Abad y García, 2006). Este nuevo procedimiento utiliza la *forma* de la expresión de Kinoshita, pero afecta la sucesión de senos y cosenos directamente con las características morfológicas del río. Esta idea no es nueva y normalmente se utiliza para definir la variación promedio aguas abajo del valle (\dot{z}) y el ancho de la sección transversal del valle (\dot{y}) (MacDonald, 1991; MacDonald *et al.*, 1992).

$$\dot{z} = \frac{\sum n \text{sen } \theta \Delta s}{\Delta t \sum \Delta s} \quad \dot{y} = \frac{\sum n \text{cos } \theta \Delta s}{\Delta t \sum \Delta s} \quad (1)$$

donde:

- n es el componente perpendicular al eje del río, a lo largo de la sección transversal.
- s es el componente perpendicular a "n" que forma un ángulo (θ) con el plano horizontal de referencia.
- Δt es el intervalo de tiempo de ocurrencia.

Se proponen formar una ecuación con una sucesión de senos y cosenos. La amplitud de cada función trigonométrica, está formada por los valores de cada una de las características morfológicas y fluviales propuestas (X_i). Asimismo, la frecuencia de los senos y cosenos es el producto de cada uno de los componentes principales Ω_i por la distancia longitudinal de desarrollo del meandro. Esto quiere decir que el ancho de la sección transversal del valle (\dot{y}) es función de la variación del meandro a lo largo del valle (\dot{z}) y de las características morfológicas-fluviales.

$$(\dot{y}_i) = \left[X_{i+(i-1)}'' \text{seno}(|\Omega_i| \dot{z}) \right] + \left[X_{i+i}'' \text{cos}(|\Omega_i| \dot{z}) \right] \quad (2)$$

donde:

- X_i'' son los valores centrados-estandarizados de las características morfológicas y fluviales propuestas $X_i'' = (X_i - \mu_x) / \sigma_x$
- Ω_i es el i-ésimo componente principal

Una expresión similar a la anterior, es la propuesta por Kinoshita para generar curvas de meandros Beck (1988).

$$\theta = \theta_0 \text{sen} \left(\frac{2\pi s}{\lambda} \right) + \theta_0^3 \left[J_s \text{cos} \left(3 \frac{2\pi s}{\lambda} \right) - J_f \text{sen} \left(3 \frac{2\pi s}{\lambda} \right) \right] \quad (3)$$

Donde:

- J_s es el coeficiente de asimetría
- J_f es el coeficiente de aplastamiento o curtosis
- θ_0 es ángulo máximo de amplitud
- λ es el arco de curvatura del canal
- s es la coordenada de giro

Beck (1988) presentó una comparación cualitativa entre la sinuosidad media y la elevación del fondo de un río con curvatura simétrica (Hooke, 1984) presentó estas relaciones a través de tres ecuaciones que se conocen como las relaciones de Beck (Abad y García, 2006). Esta misma comparación se realizó para ríos con alta sinuosidad. Estas comparaciones sugieren que existe un componente a lo largo del eje del río, que relaciona la pendiente transversal máxima del río con el radio máximo de curvatura. Sin embargo, los demás componentes topográficos son bien representados. De forma similar, se puede demostrar que existe similitud entre la formulación de Kinoshita (ecuación 3) y la expresión propuesta en este trabajo dada por la ecuación 2. Lo anterior fue presentado por Gutiérrez-López *et al.*, (2014) quienes mostraron que la sinuosidad utilizando los valores presentados por la formulación de Beck (1988) y utilizando los mismo parámetros se puede estimar la sinuosidad empleando la ecuación 2, para $i=1$ (un solo par de senos y cosenos). La similitud entre las dos formulaciones es evidente, a pesar de que existe un desfaseamiento. La formulación propuesta lo corrige agregando otro par de senos y cosenos y así sucesivamente, hasta lograr la precisión deseada. Cabe mencionar que en ambos casos se utilizaron los valores de $\theta_0 = 20^\circ$ $J_s = 1/32$ $J_f = 1/192$ y $\theta_0 = 100^\circ$ $J_s = 1/32$ $J_f = 1/192$ presentados por Beck (1988). La idea fundamental de la expresión propuesta radica en utilizar un número tal de pares de senos y cosenos que permitan describir la trayectoria y migración del meandro. Además estas funciones trigonométricas estarán afectadas por un máximo de características morfológicas y fluviales, siempre y cuando éstas hayan sido seleccionadas y jerarquizadas con un análisis multivariado. Por ejemplo para nuestro caso, al estimar la sinuosidad del río Los Izotes, la formulación se puede extender hasta 15 características morfológicas y fluviales; lo cual da como resultado tener 7 pares de senos y cosenos ($n=7$), más un término independiente. La selección de variables que se utiliz proviene de una análisis multivariado y se basa en la idea de que un conjunto de variables son capaces de especificar

por si solas una cierta semejanza, que dibujadas en un diagrama revelarán similitudes (o agrupaciones) entre cada una de ellas. Esta consideración se emplea sistemáticamente en la delimitación de regiones hidrológicamente homogéneas en hidrología (Everitt, 1978; Wiltshire y Beran, 1987; Donald, 1988; Nathan y McMahon, 1990). Este tipo de desarrollo multivariado prevé una discriminación previa de variables, la cual sirve para resaltar la importancia de cada una de las características empleadas.

Como se ha mencionado, antes de utilizar el esquema propuesto es necesario llevar a cabo una jerarquización de variables. Con los valores de las características morfológicas y fluviales presentadas, se llevó a cabo un Análisis de Componentes Principales (ACP) en donde se encontró que los dos primeros componentes principales explican el 70.5 % de la varianza de las características morfológicas y fluviales del río Los Izotes. Los resultados del ACP muestran la existencia de tres grupos de variables que definen el comportamiento del río Los Izotes. El primer grupo está formado por las características morfológicas del río, como son el radio de curvatura, la sinuosidad y las longitudes de curva y de la onda (r/b , r , ML , Lc y $b2$). El segundo grupo está formado por características netamente hidrológicas, en donde se incluye el gasto de aportación y el

área de la cuenca (Qd , FA y Ac). El tercer grupo de características representa variables morfológicas y geométricas del río (a , B , L , Gc , $Ang \theta$, b y $b1$). También de este análisis se puede obtener una jerarquización de características con base en la proyección de cada variable sobre los ejes de los componentes principales $|\Omega_i$. Este procedimiento es la interpretación tradicional de un ACP. Gutiérrez-López *et al.*, (2014) mostraron que la variable con mayor importancia para el primer componente principal Ω_1 es la sinuosidad (r/b) y la de mayor relevancia para el segundo componente Ω_2 es el ancho del meandro (B).

Por otro lado, se estiman los valores máximos y mínimos de cada una de las características del conjunto fluvial ESP-Izotes-Calabazas. Estos valores permiten obtener las condiciones límite hasta la fecha, de la posible configuración morfológica de sus meandros. A continuación se utilizan estas características jerarquizadas y los componentes principales en la ecuación 2 para obtener una representación del meandro del río en el tramo estudiado. Para el caso del río Los Izotes se seleccionaron 9 características $X_{i,i=1...9}$ ($n=4$ + un término independiente) y los primeros cuatro componentes principales $\Omega_{i,i=1...4}$. Con estos valores puede desarrollarse la expresión de la siguiente forma:

$$\hat{y}(z) = [(r/b)/\sqrt{2}] + \sum_{i=1}^4 [X_{i+(i-1)}'' \text{seno}(|\Omega_i|z) + X_{i+i}'' \text{cos}(|\Omega_i|z)] \quad (4)$$

donde

z es la variación de las condiciones de meandro a lo largo del eje del río (2.3 km)

$$\hat{y}(z) = [(r/b)/\sqrt{2}] + [M_L \cdot \text{seno}(|\Omega_1|z) + \theta \cdot \text{cos}(|\Omega_1|z)] + [r \cdot \text{seno}(|\Omega_2|z) + Lc \cdot \text{cos}(|\Omega_2|z)] + \dots \\ \dots + [G_c \cdot \text{seno}(|\Omega_3|z) + FA \cdot \text{cos}(|\Omega_3|z)] + [Qd \cdot \text{seno}(|\Omega_4|z) + AC \cdot \text{cos}(|\Omega_4|z)] \quad (5)$$

Al sustituir las características morfológicas máximas y mínimas del río en la expresión anterior se obtiene el pronóstico del meandro como una representación gráfica de la sinuosidad del río. La figura 6 muestra los resultados de este procedimiento. Cabe señalar que al utilizar cuatro pares de senos y cosenos, la señal se deforma y presenta lo que se conoce como *ruido blanco* de una señal. Para suavizar el trazo es necesario tomar el promedio móvil de cada una de las condiciones. La sinuosidad obtenida de un promedio móvil tiene la ventaja de poder desfasarse a lo largo del eje longitudinal del río, lo cual permite adecuar la configuración del meandro, según lo analizado al comparar la expresión propuesta en este trabajo, con la formulación de Beck (1988).

Si se acepta que el trazo de estos límites proviene de una formulación que involucra las características morfológicas y fluviales del río Los Izotes, entonces esta frontera así determinada podrá delimitar las condiciones extremas de movimiento del río. Sin embargo, es importante mencionar que rigurosamente la construcción de estos límites se basa en una condición puramente estadística y no involucra en su formulación condiciones físicas del río. Esto puede solucionarse, por ejemplo agregando a la metodología propuesta una etapa de simulación estocástica para definir directamente las fronteras o zonas de riesgo por meandro del río Los Izotes; o en su caso como se muestra a continuación con una simulación hidráulica.

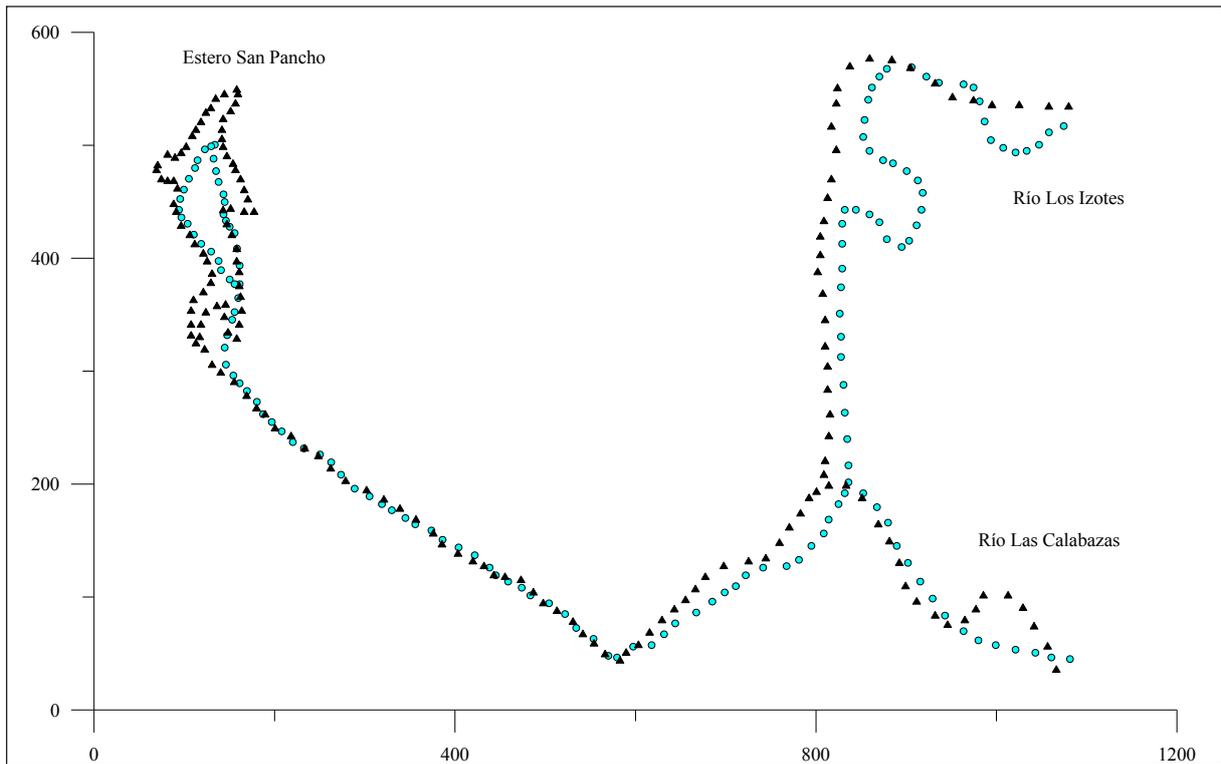


Figura 6. Comparación entre la condición natural de meandro del conjunto estero SP-Izotes-Calabazas y sus condiciones máximas (triángulos) y mínimas simuladas (círculos).

4. MODELACIÓN HIDRÁULICA BIDIMENSIONAL

Para conocer la zona de inundación del estero fue necesario utilizar una modelación matemática del flujo de agua en los ríos Izotes y Calabazas, los cuales descargan en el estero y finalmente al mar del Océano Pacífico. La modelación matemática del flujo de agua en un río consiste en intentar conocer los valores que toman las variables hidráulicas (calado, velocidades, caudal, etc.) a partir de la resolución por métodos numéricos de unas ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis. La modelación matemática es siempre una aproximación a la realidad, tanto mejor cuanto más se adapten las ecuaciones de partida y el esquema numérico para su resolución al fenómeno real que se está estudiando. (Bladé E. *et al*, 2006). Para describir muchos fenómenos naturales como puede ser la inundación de una gran llanura, la confluencia de dos cauces, el cruce de dos corrientes de agua, el flujo en un cauce ancho e irregular, etc., la aproximación unidimensional (1D) deja de ser adecuada y por ello se desarrollaron primero los esquemas cuasi bidimensionales y luego los esquemas bidimensionales (2D). Para el caso de la modelación de inundación del estero, necesariamente se utilizó un modelo 2D ya que existen meandros fuertes con llanuras de inundación importantes.

Los modelos bidimensionales simulan flujo de fluidos no-newtonianos, aludes torrenciales en conos de deyección, simula flujos en topografías complejas, en dichos modelos se trabaja sobre un dominio bidimensional con 3 variables definidas en cada

punto del dominio: el calado y las dos componentes de la velocidad horizontal. Las ecuaciones que rigen la evolución de dichas variables se conocen como ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad o ecuaciones de St. Venant bidimensionales, y se pueden expresar como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} + \frac{\partial h V_y}{\partial y} = i \quad (6)$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (7)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial t} \quad (8)$$

donde:

- h es la profundidad del flujo (m);
- V_x y V_y son las componentes de la velocidad media en la vertical (m/s),
- T es el tiempo(s),
- G es la aceleración de la gravedad (m/s²),
- S_f es la pendiente de fricción;
- S_o es la pendiente del lecho,
- i es intensidad de la precipitación (m/s).

Para resolver numéricamente las ecuaciones de flujo es necesario discretizarlas en una malla bidimensional. Independientemente del esquema numérico utilizado, las mallas en que se discretizan las ecuaciones se pueden clasificar de forma general en mallas estructuradas y mallas no estructuradas. Se podría realizar una clasificación más detallada de las mismas, pero para los propósitos de este artículo la anterior clasificación es suficiente, (Bladé E. *et al*, 2006). Las mallas estructuradas bidimensionales están formadas por elementos cuadrangulares ordenados en filas y columnas, de forma que cualquier elemento quede perfectamente identificado por un par de índices (i,j). La principal ventaja de las mallas estructuradas es su eficiencia desde el punto de vista numérico, tanto en lo que se refiere a la programación de algoritmos como al orden de precisión. Tienen el inconveniente de ser difícilmente adaptables a geometrías muy irregulares, como es el caso de los cauces fluviales. Este problema se solventa en algunos casos mediante el uso de coordenadas curvilíneas o mediante mallas estructuradas por bloques. Las mallas no estructuradas están formadas por elementos de cualquier forma. En mallas bidimensionales lo más habitual es utilizar elementos triangulares, pudiéndose utilizar asimismo elementos cuadrangulares en zonas con una geometría más regular. Su principal ventaja es la facilidad con que se adaptan a cualquier geometría, ya que no es necesario que la malla tenga ningún tipo de organización o estructura interna. Esta característica las hace especialmente indicadas para su utilización en hidráulica fluvial. Se utilizó la herramienta computacional Iber que es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en ríos y estuarios desarrollado a partir de la colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente,

GEAMA (Universidad de La Coruña), del Grupo de Ingeniería Matemática (Universidad de Santiago de Compostela), del Instituto Flumen (Universidad Politécnica de Cataluña y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería) y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Dicho modelo incluye un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos, de granulometría uniforme, por carga de fondo y por carga en suspensión. Iber es un modelo de uso libre que se puede descargar de la página web www.iberaula.es, donde se ofrece documentación adicional, soporte a través de un foro de discusión y cursos de formación, (Bladé E. *et al*, 2012). Utilizando el modelo Iber, se realizó la simulación de inundación de los arroyos Izotes y Calabazas así como del estero ubicado aguas abajo hasta la desembocadura con el mar. En dicho modelo se utilizó información topográfica obtenida del Modelo Digital de Elevación del INEGI, datos de caudal e hidrogramas obtenidos en el estudio hidrológico.

5. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA

El cálculo de las zonas inundables en los sitios antes mencionados se realizó para caudales asociados al periodo de retorno de 100 años. Como primer resultado, se muestra el tirante (calado) a lo largo del tramo analizado (figura 7).

El calado o tirante del agua en el tramo analizado puede llegar hasta 6.65 metros como se marca en color rojo en la figura 7, el calado máximo se genera en el punto donde se ubica en el estero y es lógico debido a que este sitio trabaja como zona de inundación por su configuración topográfica y por ser el punto de descarga de la cuenca.

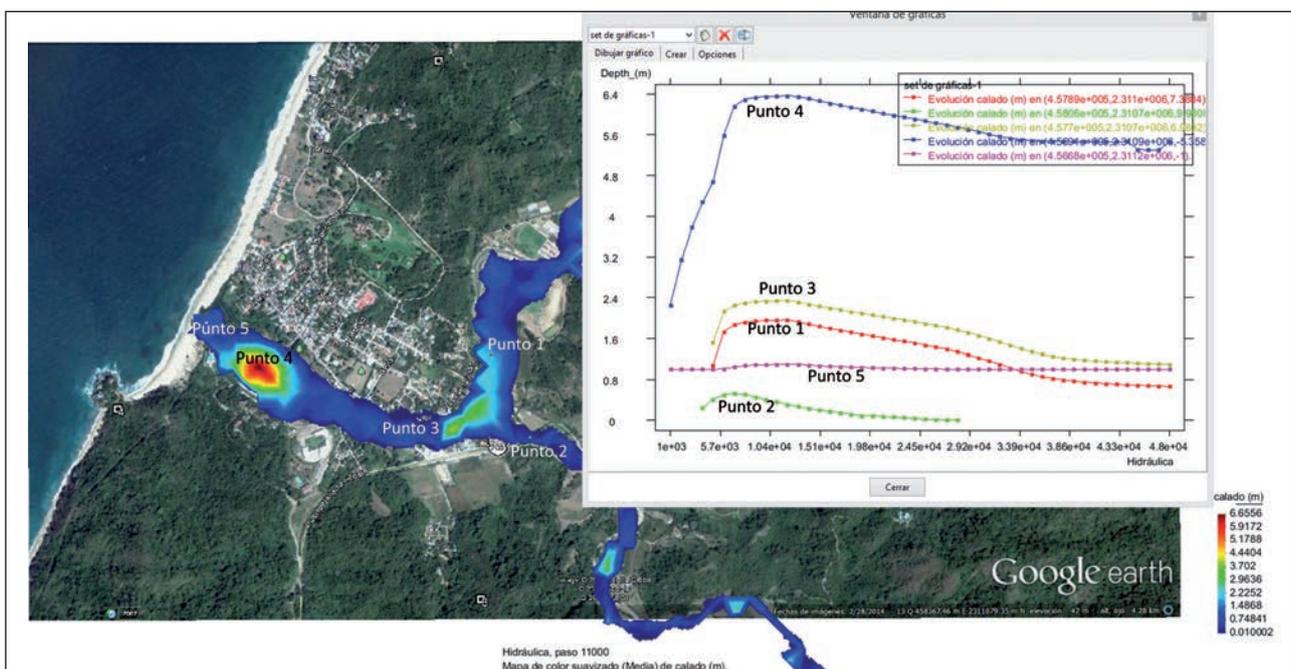


Figura 7. Evolución del calado en diferentes puntos

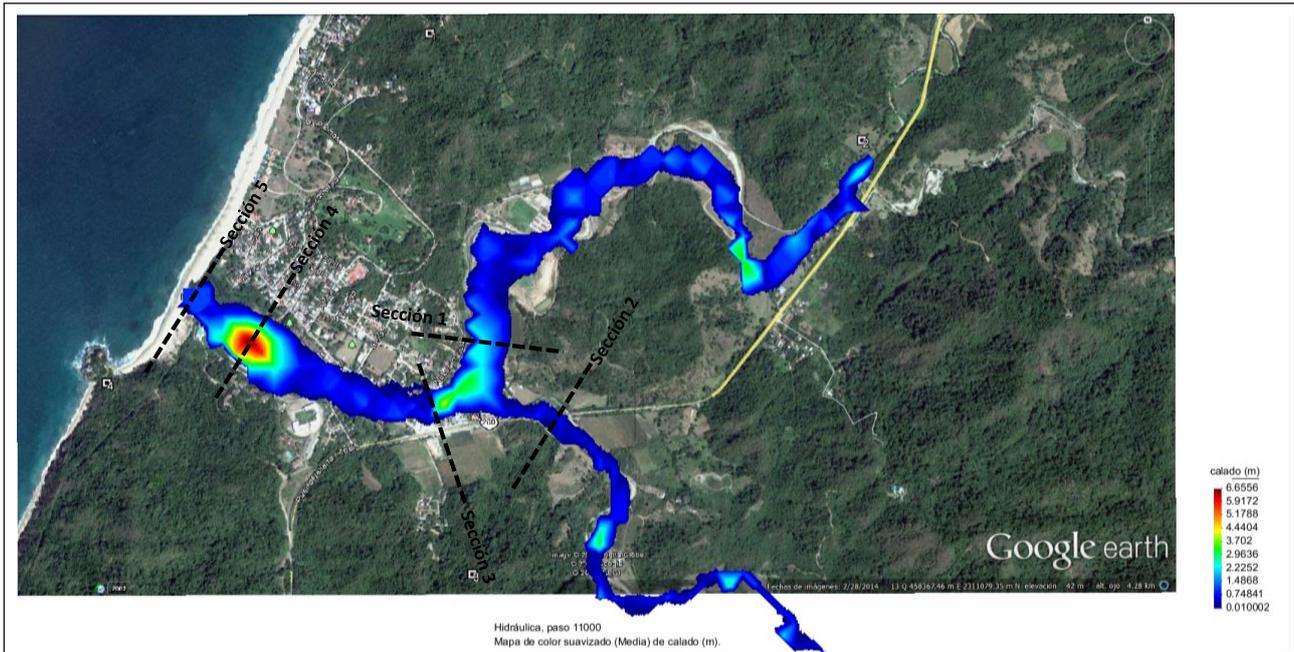


Figura 8. Puntos de secciones transversales en análisis

El modelo Iber permite conocer la evolución de las velocidades así como los valores en un punto a lo largo del tiempo establecido en el hidrograma, se eligieron cinco puntos de análisis para el calado, mismos que se muestran en la figura 7.

Los puntos 1 y 2 se encuentran antes de la confluencia de los arroyos Izotes y Calabazas, el punto 3 es inmediatamente después de la confluencia, el punto 4 corresponde al estero y finalmente el punto 5 está en la desembocadura del agua al mar. Como puede observarse, los tirantes máximos se generan en el estero (punto 4) mientras que en la desembocadura (punto 5) se mantiene un tirante casi constante, esto puede justificarse debido a que la ubicación del estero permite que éste tenga una función reguladora de los escurrimientos generados en la cuenca. Las velocidades generadas en la modelación bidimensional indican que los puntos con mayor velocidad de flujo son en los puntos de inicio del modelo y después de la confluencia de los ríos Izotes y Calabazas donde se presentan velocidades de hasta 5 m/s mientras que en el estero las velocidades varían desde 0.75 m/s a 1.5 m/s. El escurrimiento del río las Calabazas es el primero en llegar al punto de confluencia y esto se debe al tiempo de concentración de esta cuenca ya que al ser 1.59 horas es menor que el de los Izotes es 2.94 horas además de que el río las calabazas tiene una pendiente media mayor a la de los izotes.

Como forma adicional de mostrar el ancho de la inundación en el tramo, se generaron secciones con la variable de tirante de agua a fin de observar la amplitud del espejo de agua, las secciones elegidas son las que integran los puntos de evolución de calado mostrados en la figura 8. La sección 1 indica una amplitud de espejo de agua aproximada de

237 m, la sección 2 de 85 m, la sección 3 de 140 m, **sección 4 (en el inicio del estero) es de 250 m y finalmente la sección 5 que se localiza en el cuerpo del estero es de 180 m.**

6. DISCUSIÓN

La jerarquización de las variables obtenida con el ACP, mostró claramente tres grupos de parámetros los cuales en conjunto explican el comportamiento del meandreo en el río Los Izotes. El primer grupo formado por las características morfológicas del río. El segundo grupo está formado por características netamente hidrológicas, en donde se incluye el gasto de aportación y el área de la cuenca y el tercero formado por las características morfológicas y geométricas del río. La utilización de las condiciones máximas y mínimas que ha presentado el meandreo del río históricamente, arrojan un panorama adecuado para comenzar la estimación de la zona de posibles daños. De esta forma, el cálculo de los límites de confianza aunque de una manera estadística, constituye una buena herramienta para consolidar los argumentos que definen las zonas de riesgo potencial de ser afectadas por el meandreo del río Los Izotes. Como se muestra en la siguiente figura, la sobre-posición de las condiciones simuladas con la teoría del meandro de ríos, arroja un **ancho necesario de 148.68 metros de ancho libre para que el estero funcione hidráulicamente óptimo**, que exista un caudal dominante que permita la vida en el estero y el almacenamiento o regulación temporal necesario para que los ríos Los Izotes y Las Calabazas, no provoque inundaciones en las zonas bajas de la cuenca. Claramente, se puede dictaminar que la obra que se construyó y obstruye

la zona del estero de San Pancho, representa una clara afectación a los componentes funciones de este sistema. Cualquier obra que se construya en el estero, podrá en riesgo el flujo normal del río y constituye un riesgo potencial para la sedimentación del cuerpo de agua, con la inminente muerte del estero y del valor ambiental que éste representa en la zona. De no detener esta obra, el daño será irreversible ya que al entrar en el periodo de secas, los ecosistemas perdidos y la dinámica fluvial del río se perderán. Adicionalmente, se está poniendo en riesgo a la población aldeaña pues una obstrucción en la desembocadura de dos ríos representa un peligro potencial.

7. CONCLUSIONES

Los ríos son componentes funcionales que captan de forma natural las aguas que drena una cuenca; normalmente, las aguas presentan un régimen a superficie libre, hasta su eventual desembocadura en el mar. Es importante considerar que la intervención del hombre sobre los ríos, puede alterar las condiciones naturales de escurrimiento. Sin embargo, en todo momento se debe considerar que el río, al ser parte del medio ambiente, se relaciona con el mismo y conforma a su alrededor un ecosistema húmedo, apropiado para la vida vegetal y animal. Asimismo, un río mantiene un flujo constante de agua y sedimento (procedente del cauce o de la cuenca). De esta forma se concluye que los ríos como componentes funcionales para desalojar las aguas que escurren naturalmente y toda obstrucción provocarán efectos en la dinámica fluvial del entorno. Toda intervención humana requiere de estudios muy detallados y especializados e incluso de campañas de medición en campo para conocer las posibles obras a construir y de qué forma se verá afectado el entorno hidrológico, fluvial, biológico y natural. Asimismo, la calidad del agua en esa zona se verá afectada provocando daños asociados a su aprovechamiento. Finalmente, los riesgos a desastres aumentan, ya que la vulnerabilidad de la zona se incrementa al construir una obstrucción en el cauce sin un estudio hidráulico previo. En este estudio se consideró la sinuosidad del río como una variante de la formulación de Kinoshita y los resultados obtenidos empleando cuatro pares de senos y cosenos más un término independiente, permitieron obtener un ancho mínimo que garantice el funcionamiento óptimo del estero. Si bien la formulación expuesta no presenta componentes cinemáticos del comportamiento del meandro, si es una buena aproximación de la evolución de la sinuosidad del conjunto estero SP-Izotes-Calabazas. Tampoco se utilizaron parámetros que involucren el transporte de sedimentos, pero el desarrollo presentado permite incorporar variables relacionadas con este fenómeno. La modelación bidimensional con la ayuda del programa Iber, permitió conocer las zonas de inundación así como obtener los tirantes de agua generados en una

avenida asociada al periodo de retorno de 100 años. Para la simulación de inundación del estero San Pancho. Por lo que se concluye que los anchos mínimos a respetar en el conjunto estero SP-Izotes-Calabazas deben ser entre 150 y 250 metros libres, los cuales corresponden a la simulación fluvial e hidráulica. Finalmente, como recomendación general se puede decir que dado que el estero tiene una vital función en la descarga de los escurrimientos de la cuenca, es importante mencionar que dicho estero debe conservarse desde punto de vista hidrológico e hidráulico así como evitar la invasión urbana de la zona de inundación determinada en este análisis además de tomar en cuenta la franja de inundación generada en los ríos Los Izotes y Las Calabazas a fin de delimitar las zonas con probabilidad de inundación y evitar daños a la población que se encuentra cercana a los ríos.

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, J. D. y García, M. H. (2004). Conceptual and Mathematical Model for Evolution of Meandering Rivers in Naturalization Processes. *ASCE World Water & Environmental Resources Congress, Salt Lake City, Utah, USA*.
- Abad, J. D. y García, M. H. (2006). RVR Meander: A toolbox for re-meandering of channelized streams. *Computers & Geosciences* (32) 92–101.
- Beck, S. M. (1988). *Computer-simulated deformation of meandering river patterns*. PhD Thesis. Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Bladé E, et al. (2012). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos, Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bladé, E., Gómez-Valentín, M. (2006). Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones. Monograph CIMNE N°97. Barcelona, España.
- Donald, H.B., 1988 Delineation of groups for regional flood frequency analysis, *Journal of Hydrology*, Number 104, 345-361 pp.
- Everitt, B.S., 1978 Graphical techniques for multivariate data, Great Britain, North-Holland, 117 p.
- Gutierrez-Lopez, A., Contreras, V., Ramirez, A. I., y Mejia, R. (2014). Risk Zone Prediction in Meandering Rivers by Using a Multivariate Approach. *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, 19(9).
- Hooke, J. M. 1984. Changes in river meanders: a review of techniques and results of analyses. *Prog. Phys. Geog.* 8: 473-508.
- Kinoshita, R. 1961. Investigation of channel deformation in Ishikari River. *Report to the Bureau of Resources*: 1-174.

-
- Kinoshita, R. y Miwa, H. (1974). River channel formation which prevents downstream translation of transverse bars. *ShinSabo*, 94: 12-17.
- Lagasse, P. F., Spitz, W. J., Zevenbergen, L. W., y Zachmann, D. W. (2004). *Handbook for predicting stream meander migration. Report 533*, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, USA, 105 pp.
- Langbein, W. B. y Leopold, L. B. 1966. River meanders, a theory of minimum variance. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 422-H, 15.
- MacDonald, T. E., Parker, G., y Leuthe, D. 1992. Inventory and analysis of stream meander problems in Minnesota. *Technical report., Department of Civil Engineering, University of Minnesota*, Minneapolis, Minnesota, USA, 38 pp.
- MacDonald, T.E., 1991. Inventory and analysis of stream meander problems in Minnesota. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, USA, 152pp.
- Mueller, J. E. (1968). An introduction to the hydraulic and topographic sinuosity indexes. *Annals of the American Geographers*, 58 (2): 371-385.
- Nathan, J., y McMahon, T., 1990 Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation, *Journal of Hidrology*, Number 121, 217-238 pp.
- Parker, G. y Andrews, E. D. 1986. On the time development of meanders bends. *Journal of Fluid Mechanics*, 162: 139-156.
- Parker, G., Diplas, P., y Akiyama, J. 1983. Meander bends on high amplitude. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109 (10).
- Wiltshire, S., y Beran, M., 1987 Multivariate techniques for the identification of homegeneous flood frequency regions, *Regional flood frequency analysis*, 133-145 pp.
- Yamaoka, I. y Hasegawa, K. 1984. Effects of bends and alternate bars on meander evolution. *In River Meandering, Proceedings of the Conference, Rivers '83*, edited by C. M. Elliot, pp: 783-793, ASCE, New York.