



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

INFLUENCIA DE LA DINÁMICA FLUVIAL DEL RÍO BOBOS
EN LAS AFECTACIONES A LA ZONA ARQUEOLÓGICA
VEGA DE LA PEÑA EN OCTUBRE DE 1995

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Gabriel Soriano Santiago

DIRECTOR DE TESIS

M. en I. Martín Rubén Jiménez Magaña



Nezahualcóyotl Edo. Méx., 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice

1	Listado de símbolos	4
2	Introducción.....	5
3	Conceptos fundamentales de Hidráulica fluvial.....	7
3.1	Hidráulica fluvial	7
3.2	Clasificación de ríos	8
3.2.1	De acuerdo con la duración de la corriente	8
3.2.2	De acuerdo con su forma en planta.....	9
3.2.3	Por los materiales constituyentes de la margen y el fondo.....	12
3.2.4	De acuerdo con su edad o posición en la cuenca	13
3.3	Gasto dominante.....	14
3.3.1	Métodos geométricos	15
3.3.2	Métodos estadísticos	16
3.3.3	Métodos morfológicos.....	16
3.4	Estabilidad de cauces	17
3.5	Procesos relacionados a la inestabilidad	20
3.5.1	Existencia de bifurcaciones y avulsiones.....	20
3.5.2	Erosión	22
3.5.3	Estabilidad de la orilla y fallas en márgenes.....	23
4	Obras de protección de márgenes	27
4.1	Espigones	27
4.2	Diques marginales.....	29
4.3	Protecciones marginales	30
5	Características de la zona de estudio	32
5.1	Zona arqueológica Vega de la Peña	32
5.2	Cuenca Nautla	38
5.2.1	Relieve.....	39
5.2.2	Temperatura	41
5.2.3	Lluvia	42
5.2.4	Hidrografía.....	43
5.2.5	Uso de suelo.....	46
5.2.6	Interpretación de los datos compilados	47

5.3	Río Bobos	49
6	Descripción del evento de 1995 que provocó daños severos en la zona arqueológica.....	51
6.1	Fenómenos naturales asociados a crecidas	51
6.2	Huracán Janet, fenómeno de 1955	52
6.3	Huracán Roxanne, fenómeno de 1995.....	54
6.4	Comparación entre Janet y Roxanne	55
7	Condiciones previas al evento de 1995.....	58
7.1	Efectos provocados por la crecida	61
8	Cambios morfológicos del río Bobos.....	64
8.1	Periodo de 1972 a 1980	64
8.2	Periodo de 1981 a 1987	65
8.3	Periodo de 1988 a 1994	66
8.4	Evento de 1995	69
8.5	Periodo de 1996 a 1998	71
8.6	Periodo de 1999 a 2001	72
9	Análisis previo de los datos.....	74
10	Análisis de gastos máximos	75
11	Conclusiones.....	79
12	Anexo: Aplicación de distribuciones de probabilidad	84
1.1	Cálculo de periodo de retorno	85
1.2	Distribución Normal	86
1.3	Distribución Log Normal	86
1.4	Distribución Log-Pearson	87
1.5	Distribución Gumbel	87
1.6	Distribución Log-Gumbel.....	87
13	Bibliografía	87

1 Listado de símbolos

S , Sinuosidad, parámetro adimensional

BD , Índice de entrelazamiento

p , Pendiente del fondo del río, adimensional

H , profundidad media, o tirante medio

C coeficiente cuyo valor depende de la rugosidad del lecho, aparece en la fórmula de Chezy

n , Coeficiente de rugosidad del lecho

A , área transversal en m^2

B , ancho superficial de una sección, en m

V , velocidad estimada por la fórmula de Chezy en m (Velocidad teórica)

Qd , Gasto dominante en m^3/s

d , tirante asociado al gasto dominante en m

Q_i , Gasto medio diario, el promedio de los gastos registrados en un día

QBT , Gasto sólido

n , frecuencia asociada a algún gasto registrado, ya sea medio o máximo, es adimensional y se puede mostrar en porcentaje

S_a , pendiente del curso potencial de una avulsión

S_c , pendiente existente en el canal (Pendiente del fondo), se usa para comparar el valor de S_a ,

σ , Desviación estándar

F_s , Factor de seguridad

2 Introducción

Históricamente las civilizaciones humanas han buscado asentarse cerca de las fuentes de alimento y agua, esta última proveniente de cuerpos superficiales como son ríos y lagos. Los ríos especialmente han sido determinantes en la prevalencia de distintas culturas a lo largo del tiempo, por lo que, siempre se ha buscado su control por medio de diques y represas, ya sea para proteger a los asentamientos de inundaciones o para almacenar agua.

Respecto a las inundaciones debidas al desborde de ríos, actualmente siguen representando un problema común en algunos núcleos urbanos debido a que estos se ubican cerca de las llanuras de inundación. Por ello, la hidráulica fluvial sirve como una herramienta en la predicción del comportamiento de ríos durante tormentas, con la finalidad de delimitar zonas de inundación y diseñar las estructuras de protección necesarias para resguardar a la población.

Los daños debidos al desborde de ríos se manifiestan en pérdidas humanas y materiales, dentro de éstas últimas entra el patrimonio histórico tangible, como son monumentos y restos arqueológicos, que en un país tan rico en cultura como lo es México existe una cantidad considerable distribuida en distintos puntos de país, algunos de ellos están ubicados en zonas de riesgo. Un ejemplo de esta problemática es la zona arqueológica Vega de la Peña ubicada en Veracruz, la cual se edificó durante el periodo clásico (del año 300 a 950 D.C.), en las cercanías del río Bobos cuyo cauce en 1995 desbordó y causó la destrucción del edificio del Dintel que poseía una altura cercana a los 6 metros y nos recordaba a las pirámides del Tajín ubicadas en el mismo estado; y el juego de la pelota, que es una estructura en forma de doble "T" utilizada con fines religiosos.

El presente escrito tiene como objetivo determinar las causas por las cuales desbordó el río Bobos, partiendo de las bases teóricas de la hidráulica fluvial y los registros de precipitación y gasto existentes. Sumado a ello se busca describir los daños ocasionados por la crecida consultando evidencia documental, como son periódicos y revistas de dicho año.

El desarrollo de la investigación inicia en el capítulo 3, donde se describe los conceptos básicos de hidráulica fluvial, como es la clasificación y tipos de ríos, gasto dominante, estabilidad e inestabilidad de un cauce, que represan en conjunto los conocimientos necesarios para la descripción de un río. Mientras que en el capítulo 4, se hace una descripción de los tipos de protección más comunes como son espigones, diques y protecciones marginales.

En el capítulo 5, se describen las características de la zona de estudio (Vega de la peña), realizando dicha tarea a una escala macro, que involucra la caracterización de la cuenca del río, que su vez conlleva una descripción de su relieve, temperatura,

precipitación y uso de suelo; y a nivel micro, en la que se realizó una descripción puntual del tramo del río adyacente a Vega de la Peña, así como también se incluyó una descripción de las estructuras existentes en el sitio arqueológico, y se resume a grandes rasgos la historia del sitio.

En el capítulo 6 se muestran los resultados de las consultas de diversas fuentes de información, que hacen referencia al evento de 1995, asociado a las tormentas provocadas por el huracán Roxanne. En este capítulo se incluye una comparación con un evento anterior a 1995, del cual se encontró evidencia que también causó daños al sitio arqueológico.

En el capítulo 7 se describen las condiciones del cauce previo al evento, y se mencionan las posibles razones por las que el cauce desbordó. Como complemento de este capítulo, se describen los cambios morfológicos del río partiendo de imágenes satelitales (Capítulo 8), con el fin de identificar una tendencia de comportamiento del cauce.

Mientras que en el capítulo 9 y 10 se hace un análisis de la información hidrométrica existente y se describe el tratamiento necesario con el fin de determinar el periodo de retorno que causó los daños al sitio, y determinar si existe una probabilidad de ocurrencia que ponga en peligro la zona nuevamente. Por último, en el capítulo 12 se anexan diversas metodologías con el fin de determinar el periodo de retorno empleado distintas distribuciones de probabilidad, esto, con la finalidad de que el presente escrito pueda usarse como guía para el cálculo de dicho parámetro.

3 Conceptos fundamentales de Hidráulica fluvial

El siguiente capítulo es una recopilación de conceptos básicos para comprender la hidráulica de ríos, iniciando por las variables consideradas en el estudio de ríos, así como el papel que juegan en la forma que adopta un río, y el cómo se relacionan en el equilibrio dinámico del cauce, de igual forma se describen algunas características que debe tener un río para ser considerado estable.

3.1 Hidráulica fluvial

La morfología fluvial es una rama de la geomorfología que estudia la estructura de los ríos, así como los mecanismos por los cuales adoptan cierta forma (Aldana, 2015). Mientras que la Ingeniería Hidráulica la considera como el estudio del transporte de sedimentos, que comprende a los ríos aluviales, cuyo nombre se debe, a que éstos transportan material suelto que previamente fue transportado y depositado por aguas de este (Basile, 2018).

Un río funciona como un sistema que transporta agua y sedimento, ya sea en suspensión o en el fondo. La cantidad que se transporta, así como la forma en que se mueve el material sólido, es el resultado de distintas variables, ya sean directas, como la velocidad de la corriente, tirante, gasto, tipo de material del fondo y orillas; o indirectas como lo es el clima, la pérdida de vegetación, topografía, posición del cauce respecto a la cuenca, y actividades humanas. El gasto líquido y sólido son determinantes en la morfología del río ya que ésta, es principalmente producto del equilibrio dinámico entre la carga de sedimentos que recibe y su capacidad de transporte. Por ejemplo, cuando hay una aportación de sedimento mayor a la cual el cauce puede transportar, este material sedimentará en el fondo, en cambio, si hay un déficit de sedimento, el río provocará erosión en el fondo y se perderá material. Esto sucede en primera instancia por la variación temporal del gasto líquido, ya que habrá épocas donde se transporte un flujo base y su acción erosiva disminuya, y otras donde su capacidad erosiva aumente cuando las lluvias intensas incrementen los volúmenes de agua transportados por el cauce. La variación del gasto no afecta únicamente la cantidad de sedimento que es depositado o transportado, sino que también afecta características hidráulicas como el tirante que es sensible a las variaciones de gasto, en contraste con el fondo y la pendiente, que generalmente se mantienen constantes y su ajuste requiere de un tiempo prolongado.

Por otra parte, para caracterizar un río se requieren variables que pueden agruparse en tres rubros (Trejo, Us, Cortés, & Flores, 2013):

- Geométricas y morfológicas como son ancho de la superficie libre, sección transversal y material del lecho y márgenes.

- Hidráulicas y sedimentológicas, que incluyen velocidad de la corriente, pendiente del fondo e hidráulica, diámetro del material de fondo, tipo de transporte de sedimentos
- Antropogénicas como las poblaciones cercanas, actividades agrícolas y ganaderas, grado de deforestación y obras hidráulicas existentes

La última de ellas considera la acción del hombre, ya que los ríos se encuentran constantemente afectados por actividades humanas, las cuales repercuten de una manera importante en la morfología del río.

Un río involucra otras componentes constitutivas como son meandros; llanuras de inundación donde se alberga sedimento durante las crecidas; una zona de ribera que es la transición entre el medio acuático y terrestre (Mas, 2013), y donde se alberga una cantidad considerable de vegetación; por último, un río tiene asociado un factor biótico representado por las comunidades de organismos. El factor biótico así como el químico se omiten en los estudios de morfología, ya que no contribuyen al cambio fluvimorfológico de un cauce (Trejo, Us, Cortés, & Flores, 2013) pero es importante mencionar su existencia, ya que los ríos funcionan como un hábitat, que es parte de un ecosistema cuya estructura está ligada a la forma y dimensiones del cauce, así como calidad química del agua y comunidades biológicas existentes (Sabater & Elosegí, 2009)

3.2 Clasificación de ríos

Existen diversas formas de clasificar ríos, por ejemplo, tomando en cuenta su posición dentro de la cuenca (río joven, maduro y viejo), materiales constituyentes del fondo (grava, arena y materiales finos), duración de la corriente, entre otros. A continuación, se muestran las formas más comunes de clasificar a los ríos

3.2.1 De acuerdo con la duración de la corriente

Debido a la variación del Gasto anteriormente mencionada, los diferentes canales que aportan agua al cauce principal pueden mantenerse activos o no, por ejemplo, en épocas de estiaje algunos cauces tributarios llegan a secarse siempre que no exista aportación de agua subterránea, considerando esto existen dos tipos de corrientes:

- Ríos perennes: Son aquellos que se mantienen transportando agua a lo largo del año, y pueden llegar a un valor mínimo, que es aportado por el agua subterránea como se muestra en la Figura 1, donde el nivel freático tiene una cota mayor a la del fondo del cauce, por lo que es posible la transferencia de líquido siempre que el material constituyente del fondo sea permeable. El aporte de agua subterránea hace posible que el río transporte agua en épocas de ausencia de lluvia. Se debe considerar, que cuando hay una

crecida, el hidrograma es el resultado del gasto generado por escorrentía directa y el aportado por el agua subterránea.

- Ríos efímeros o intermitentes: Es la condición opuesta a un río perenne, ya que estos se mantienen activos en épocas del año donde exista aportación de gasto debido a la lluvia, y el resto de tiempo se mantendrán secos, ya que no tienen aportación de agua subterránea o en algunos casos, la cota del nivel freático es menor a la del cauce y si el material del fondo es permeable existirá una pérdida de líquido tal y como se muestra en Figura 1.

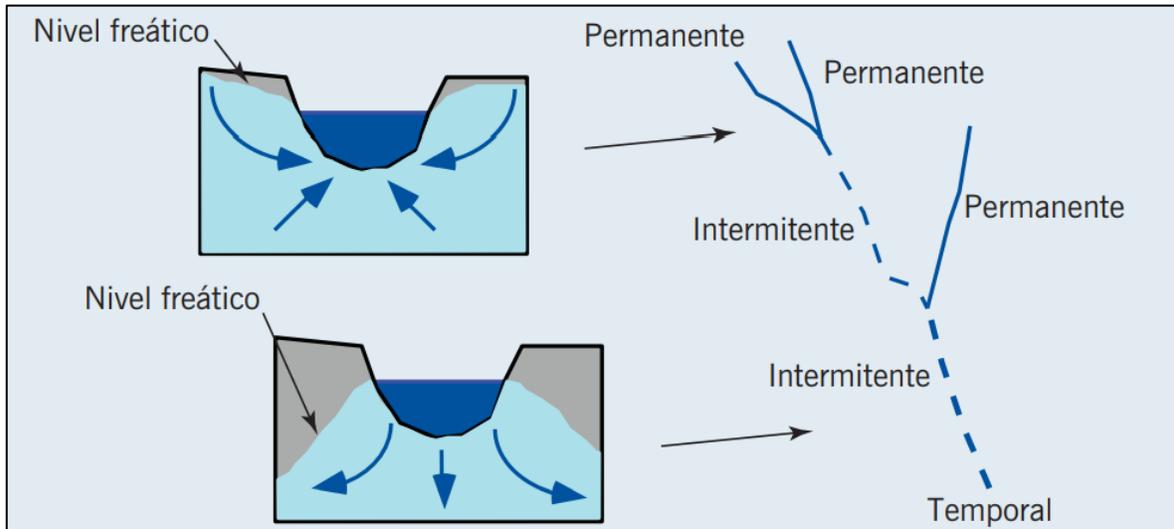


Figura 1 Contribución de agua subterránea en un río. Imagen tomada de (Elosegi, Butturini, & Armengol, 2009)

3.2.2 De acuerdo con su forma en planta

Un río puede clasificarse considerando únicamente la forma que posee en planta. Para realizar esta tarea de una forma objetiva, nos podemos basar en los siguientes parámetros adimensionales (Sopeña & Moya, 2010):

- a) Sinuosidad (S): Se obtienen del cociente entre la longitud del río y la longitud del valle (Ayala J. E., 2000a), ambas variables representadas en la Figura 3.
- b) Índice de entrelazamiento (BD): Se calcula de diversas formas, algunas de ellas son (Sánchez Moya & Sopeña, 2010),:
 - Media de canales activos por sección de valle.
 - Número de canales en una sección del río.
 - Media del número de canales en varias secciones del valle.
- c) Pendiente de fondo (p): Es el cociente entre el desnivel de dos puntos y la distancia que existe entre los mismos

Partiendo de los parámetros antes mencionados, se distinguen tres principales tipos de ríos, los rectos, entrelazados y meandriiformes, a los cuales se les puede sumar los ríos anastomosados, que son similares a los trenzados, pero poseen una mayor sinuosidad (Ver Figura 2).

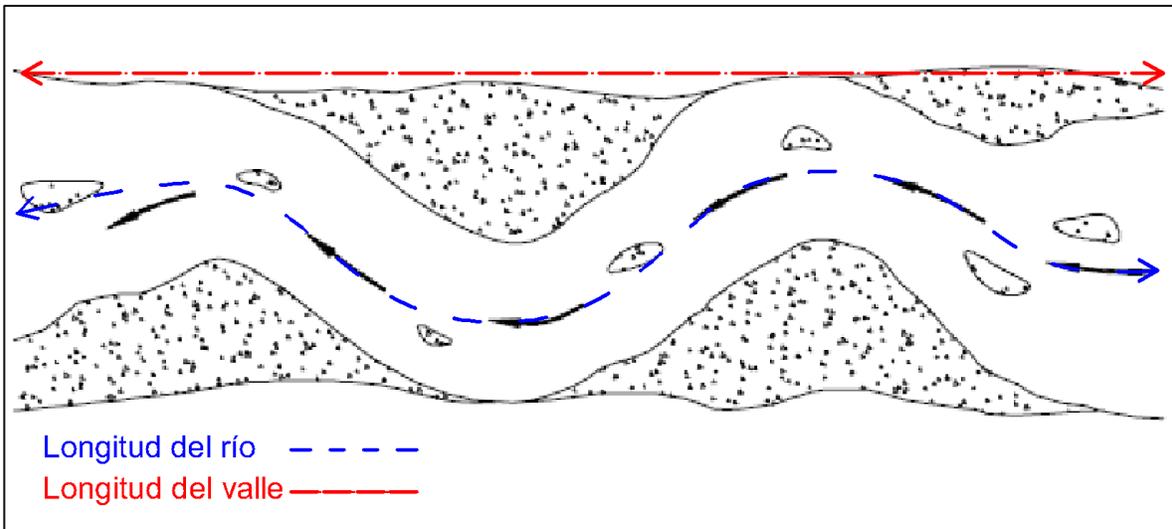


Figura 3 Cálculo de sinuosidad, imagen modificada, tomada de (Rocha, 1998)

A continuación, se mencionan las características más importantes de los tres tipos de ríos principales:

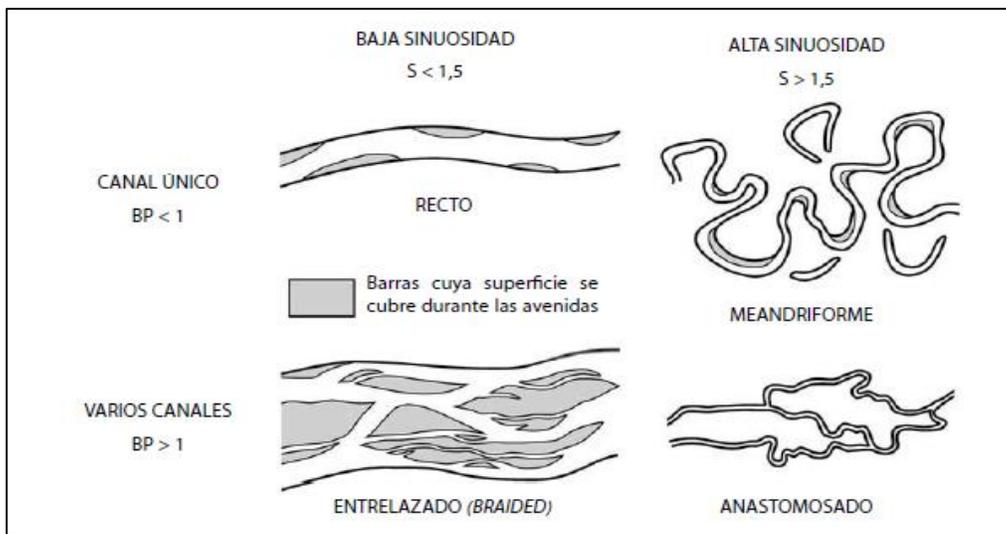


Figura 2 Tipos de ríos. Imagen obtenida de (Sopeña & Moya, 2010)

Ríos rectos: Este tipo de ríos se desarrollan por un único cauce, algunos autores los omiten de la clasificación debido a que no son comunes en la naturaleza, ya que al presentarse en pequeños tramos (Figura 4), son la transición hacia otro tipo de sistema (Maza-Álvarez & Sanchez, 1996), esto se debe a que cualquier irregularidad en el terreno propicia el surgimiento de curvas o meandros. Los cauces rectos se consideran como sistemas aluviales de baja sinuosidad con barras alternas. La sinuosidad es menor a 1.5 (Sopeña & Moya, 2010) como se muestra en la Figura 2, aunque en algunas fuentes como en el Manual de Ríos (Maza-Álvarez & Sanchez, 1996) se hace mención, que ésta debe ser menor a 1.2, y

aquellos comprendidos en un rango de 1.2 a 1.5 corresponden a ríos sinuosos (Maza-Álvarez & Sanchez, 1996)

Ríos trenzados o entrelazados: Se presentan en una parte media de la cuenca, y tienen un tirante pequeño si lo comparamos con el ancho del fondo. En estos tramos, los ríos se dividen y reagrupan entorno a islas o barras (Figura 2 y Figura 4), las cuales se diferencian por la presencia de vegetación, ya que las islas están cubiertas de ella, por lo que son resistentes a crecidas ordinarias, en las cuales pueden mantener su posición original, a diferencia de las barras, las cuales tienen un carácter transitorio y en crecidas son sumergidas y pueden llegar a ser desplazadas. Durante una avenida los canales de un río trenzado ven rebasada su capacidad hidráulica individual, por lo que para evacuar el gasto circulante forman un solo cauce, ocupando el espacio denominado como “cinturón de canales”, que es el área ocupada por el flujo cuando el canal está lleno, que comprende el ancho de cada canal individual activo y no activo y barras (Sánchez Moya & Sopeña, 2010). En estos fenómenos el río conduce una gran cantidad de sedimento que posteriormente es depositado al terminar el evento y en un lapso corto de tiempo el río cambia considerablemente, por ello este tipo de ríos son considerados sistemas inestables, que tienen como proceso dominante la sedimentación, que da pie a la creación de barras y posteriormente islas (Vide, 2003). Los ríos trenzados se presentan en zonas donde existe un flujo de energía alto, que puede deberse a una pendiente alta, o por la existencia de un gasto relativamente grande que intensifica la acción erosiva en las márgenes provocando que la carga de sedimento sea mayor. Considerando el material constituyente del sedimento, si este es de grano pequeño, como la arena, tendrá una menor resistencia al ser movido y el río trenzado podrá darse con un menor gasto y pendiente. Por último, los ríos trenzados son sistemas fluviales de baja sinuosidad por lo que para su caracterización es de gran importancia conocer el índice de entrelazamiento (Sánchez Moya & Sopeña, 2010)

Ríos meandriformes: Este tipo de ríos transcurren por un único canal, y forma una serie de curvas unidas por tramos cortos. Además de esto, se caracterizan por tener una sinuosidad mayor a 1.5 y una pendiente baja, (Maza-Álvarez & Sanchez, 1996). Suelen ubicarse en tramos cercanos a la desembocadura cuando el agua pierde velocidad debido a una disminución de pendientes. En las curvas de los meandros ocurren dos procedimientos en conjunto, el primero es la erosión en la margen externa del río, el segundo es la sedimentación en la parte interior de la curva, provocando la formación de barras (Vide, 2003), ambos procesos provocan un desplazamiento horizontal en dirección a la parte externa y tienen tasa de actuación equivalente por lo que el ancho del meandro se mantendrá constante al ocurrir el desplazamiento. El ritmo con el cual los meandros se desplazan depende de los materiales constituyentes de las márgenes. Los materiales cohesivos serán más resistentes a la acción erosiva si los comparamos con los granulares, pero, si existe vegetación en ambos casos se incrementará la resistencia a la erosión, caso similar

a si el cauce fluye en materiales rocosos, la erosión será casi nula debido a la resistencia de este tipo de materiales.

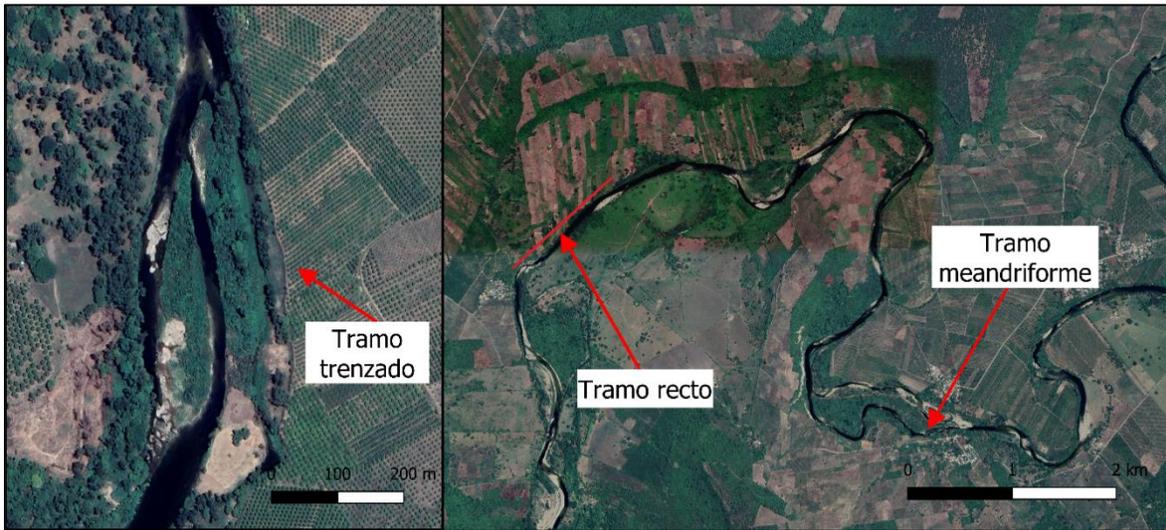


Figura 4 Ejemplo de tipos de cauces presentes en el Río Tuxpan. Imágenes satelitales de Google Earth.

3.2.3 Por los materiales constituyentes de la margen y el fondo

Otra forma de clasificar ríos es por los materiales constituyentes de las márgenes y el fondo. Así, considerando el tamaño del grano existen márgenes de materiales (Maza-Álvarez & Sanchez, 1996):

- Cohesivos: Incluye al material fino, como limos y arcillas, cuyos diámetros de partícula son menores a los 0.062 mm
- No cohesivos: También llamados de material grueso o granulares, incluye a boleos, cantos rodados, grava y arena.

Tabla 1. Clasificación de las partículas de suelo

Clasificación	Tamaño de la partícula
Cantos rodados	25 cm - 4 m
Boleo	6.4 cm - 25 cm
Grava	2 mm - 3.2 cm
Arena	0.062 mm - 2 mm
Limo	0.004mm - 0.062 mm
Arcilla	>0.062 mm

Fuente (Villagómez, Alonso, & Franco, 2000)

Las márgenes pueden estar constituidas por una mezcla de materiales cohesivos y granulares, las cuales se formaron por la sedimentación en diferentes periodos de tiempo, dando como resultado una estructura estratificada, cuando esto suceda la margen se le conoce como margen estratificada o de materiales compuestos y es muy común en la naturaleza (González Ortega, 2004). Es importante mencionar,

que, aunque se haga la distinción entre materiales cohesivos o no cohesivos, siempre existirá un valor mínimo de cohesión, que es aportado por materiales finos en las márgenes granulares, y de igual forma en las márgenes de materiales cohesivos es posible encontrar material granular. Por otra parte, si existe vegetación en la margen, esto provocará un aumento en estabilidad de ésta. De acuerdo con la distribución del tamaño de grano, que compone una margen o el fondo, se pueden clasificar como (Maza-Álvarez & Sanchez, 1996):

- Bien graduado o de granulometría extendida: Se refiere a muestras con diversos tamaños, cuya desviación estándar(σ) es mayor a 3
- Mal graduado o de granulometría uniforme: Es el caso contrario de la granulometría extendida, cuando la desviación estándar(σ) es menor a 3

3.2.4 De acuerdo con su edad o posición en la cuenca

En una región montañosa los procesos hidrológicos y geomorfológicos son función del clima y la geología. Desde una perspectiva geomorfológica, una cuenca se puede dividir en 3 zonas (Basile, 2018):

- a) Zona de producción: Corresponde a la zona más alta de la cuenca, donde se producen las entradas de agua y sedimento, tiene una densidad de drenaje alta, que está compuesta de canales intermitentes o no encauzados que forman cursos principales, que tienen una pendiente alta, la cual propicia a erosionar el lecho, el sedimento también puede provenir de la meteorización de la roca madre, así como de la erosión de la lluvia sobre el terreno, por lo que la cantidad de sedimento estará en función del clima, relieve, cobertura vegetal, entre otros.
- b) Zona de transferencia: Se transporta el sedimento y agua generado y captado en la zona de producción, el material transportado suele ser grueso en las partes altas además de que el cauce tiende a trenzarse, conforme disminuyen las pendientes el cauce comienza a formar grandes meandros con grandes planicies de inundación, los cuales transportan material fino.
- c) Zona de sedimentación, es la zona más baja de la cuenca que se encuentra a nivel del mar, el sedimento se deposita formando estructuras como deltas (Figura 5).

Estas zonas guardan una relación con la clasificación de ríos de acuerdo con su "edad". Nos encontramos que los ríos jóvenes o ríos de montaña se encuentran en la zona alta o de producción, ya que el proceso predominante es de erosión. Este tipo de ríos recorre valles angostos con laderas de fuerte pendiente, el flujo del río tiene poca profundidad y puede ser recto o con curvatura suave. Tiene una pendiente en el fondo fuerte mayor al 0.5%, con una sección transversal en forma de "V", las fuertes pendientes provocan que el agua discurra a una mayor velocidad provocando el proceso de erosión que es predominante en el fondo del cauce. En las crecidas algunos ríos suelen alcanzar velocidades que oscilan entre 1.0 a 2.5 m/s, llegando en ocasiones a 5.0 m/s, por ello tienen la capacidad de mover cantos

rodados o bloques, aunque, se pueden encontrar granulometrías de todos los tamaños, y en general la granulometría de este tramo es extendida con $\sigma > 3$; siguiendo esta clasificación los siguientes son los ríos maduros o de piedemonte que se relacionan con la zona de transporte, y se desarrollan en relieves semimontañosos con pendientes que se encuentran entre el 0.05% a 0.5% y velocidades que van de 1.5 a 3.0 m/s. Los sedimentos están compuestos por arenas gruesas, gravas y algunos bloques, el proceso de erosión en el fondo en su etapa anterior es sustituido por la erosión en las márgenes del río, el cual tiene principalmente una forma trenzada, en este tipo de ríos durante avenidas hay un aumento y descenso rápido del nivel. En el último tramo de la cuenca encontramos ríos de llanura o viejos que se desarrollan en la última fase de la zona de transporte, donde el relieve semimontañoso da pie a valles anchos, donde el río transporta principalmente arenas y forma grandes meandros, el cauce tiene pendientes menores al 0.05%, y en las crecidas el flujo de algunos ríos puede alcanzar velocidades que están entre 2 y 3 m/s (Rubio, 2011).

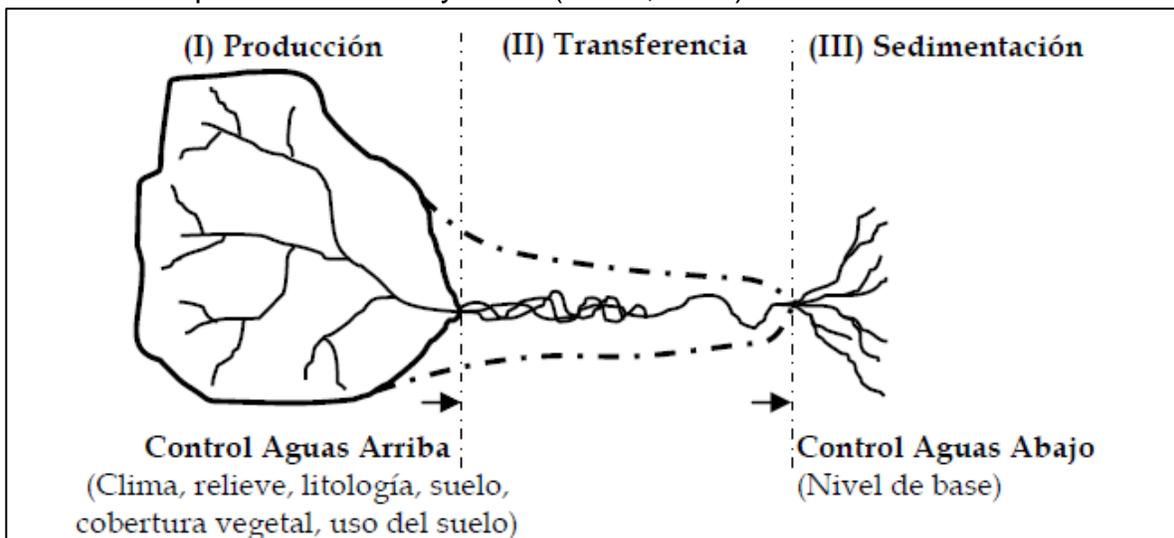


Figura 5 Representación de un sistema fluvial ideal tomado de (Basile, 2018) elaborado por (Schumm, 1977).

3.3 Gasto dominante

Una de las principales características de un río es el gasto ya que está formado por líquido y sólido, el cual varía a lo largo del tiempo, por ello resulta indispensable en el momento de la caracterización de un río, determinar un gasto representativo, al cual se le conoce como gasto dominante, formativo o generativo. Este gasto tiene diversas definiciones, las cuales están asociadas a rasgos morfológicos característicos del cauce, principalmente la sección transversal. De acuerdo con esto, el gasto dominante será *“Aquél gasto teórico que fluyendo en régimen permanente y uniforme es capaz de producir el mismo efecto morfológico sobre el cauce, sección transversal y patrón de alineamiento visto en planta”* (Farías, 2005).

Para su evaluación se cuenta con tres principales metodologías:

1. Métodos geométricos: Se considera la geometría del cauce, el gasto dominante será equivalente al valor que causa el desborde, referente a una sección del río
2. Métodos estadísticos: El gasto dominante será asociado a una frecuencia o periodo de retorno.
3. Métodos morfológicos: Se relaciona con el gasto líquido capaz de transportar el máximo gasto sólido

3.3.1 Métodos geométricos

El gasto máximo o de desborde que pasa a través de una sección se puede determinar calculando la pendiente para un tramo elegido, preferiblemente donde se conste que el cauce tiende a desbordar (Figura 6). En el cálculo, la velocidad del agua puede conocerse empleando la fórmula de Chezy (Ec. 1), que involucra la profundidad media de la sección(H), la pendiente(p) que se puede considerar constante y un coeficiente(C) (Ec. 2), que depende de la rugosidad del lecho(n) y de la profundidad media(H).

$$V = C\sqrt{Hp} \quad \text{Ec. 1}$$

$$C = \frac{1}{n} H^{\frac{1}{6}} \quad \text{Ec. 2}$$

Por su parte, la profundidad media es el cociente del área transversal de la sección(A) y el ancho de ésta (B). El gasto máximo se conoce al multiplicar el área transversal(A) por la velocidad estimada(V) (Hernández, 1995).

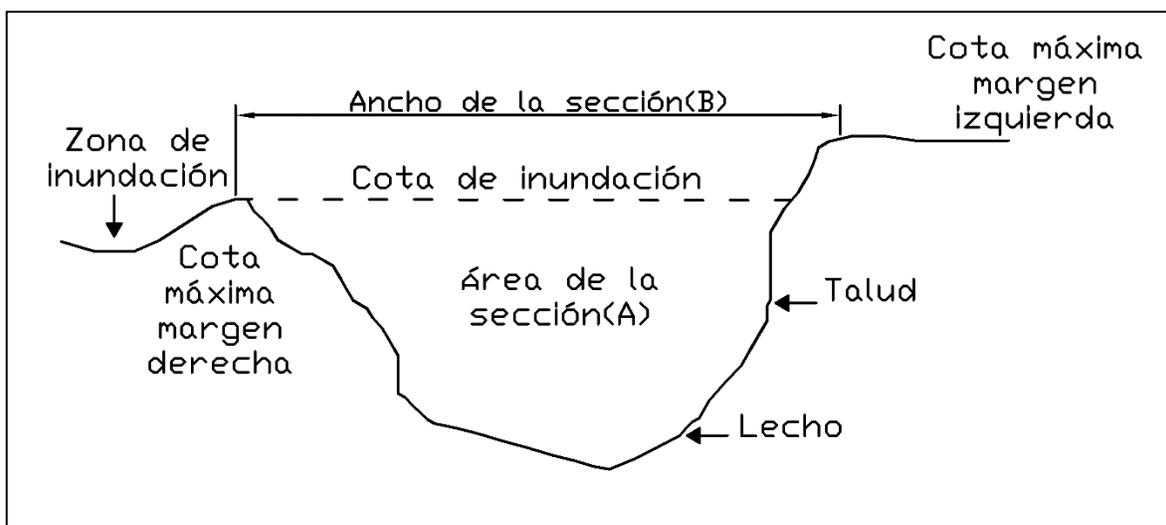


Figura 6 Imagen modificada, tomada de (Hernández, 1995)

3.3.2 Métodos estadísticos

El gasto dominante puede conocerse a partir de información estadística de una serie de registro que debe ser mínimo de 10 años (Martínez, 2017) y de ésta se relaciona con un periodo de retorno. Algunas formas para calcular el gasto dominante son (Álvarez & Flores, 1996):

- Según Leopold y Maddock, es el gasto con un periodo de retorno entre 1.07 y 4 años, para su cálculo se usaron valores máximos anuales.
- De acuerdo con Nixon es aquel que ocurre una vez cada 170 días, empleando gastos medios diarios
- Altunin propone como gasto formativo el que circula el 3% de los días del año

La forma más usual de cálculo es la dada por Leopold y Maddock, empleando un periodo de retorno promedio de 1.4 años, y es aplicable a cauces de planicie y donde el río no puede desbordar (Álvarez & Flores, 1996).

3.3.3 Métodos morfológicos

Algunos autores como Shaffernac hacen la distinción entre gasto formativo y dominante. El gasto formativo está relacionado con las características geométricas del cauce y su gasto líquido, mientras que el gasto dominante se definirá como el gasto líquido que transporte mayor volumen de sedimentos a lo largo de año y para su cálculo considerará cómo se relacionan el gasto líquido y el sólido. Algunos criterios para su cálculo son los siguientes (Álvarez & Flores, 1996):

- Criterio de Shaffernac (Ver Ec. 3): El gasto dominante (Q_d) resulta del cociente de la sumatoria del producto (de 1 al número total de datos N), del gasto líquido medio diario (Q_i) con gasto sólido asociado (Q_{BTi}) y una frecuencia(n_i) obtenida de la curva de gastos clasificados, entre la sumatoria del producto del gasto sólido y frecuencia.

$$Q_d = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{BTi} * Q_i * n_i}{\sum_{i=1}^N Q_{BTi} * n_i} \dots m^3/s \quad \text{Ec. 3}$$

- Criterio de Komura (Ver Ec. 4): Considera una escala mensual para el cálculo del gasto dominante, que se obtendrá del cociente de la sumatoria del producto del gasto medio mensual (Q_{mi}) con el gasto sólido (Q_{BTmi}) asociado entre la sumatoria del gasto sólido

$$Q_d = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{BTi} * Q_{mi}}{\sum_{i=1}^N Q_{BTi}} \dots m^3/s \quad \text{Ec. 4}$$

3.4 Estabilidad de cauces

El concepto de estabilidad o equilibrio de un cauce tiene diversas definiciones, todas ellas coinciden en que las características del río, ancho y pendiente se deben mantener constantes en un periodo largo de años, y si existen cambios, estos deben ser graduales a lo largo del tiempo, debido a que un cauce estable tendrá un equilibrio entre la capacidad de transporte de la corriente y el sedimento que recibe. Otro aspecto que se contempla es que, si existe estabilidad, la forma en planta se mantendrá, es decir si el cauce es meandriforme no pasará a ser trenzado, de lo contrario, se trata de un tramo inestable (Ayala J. E., 2000b).

La estabilidad se presenta en dos condiciones, una estática y otra dinámica (Álvarez & Flores, 1996), que se relacionan con la posición del cauce respecto a la cuenca y los grados de libertad del río:

- Estabilidad estática: El cauce transporta una determinada carga de sedimento, sin que existe una acción erosiva en las márgenes, por lo que el cauce no se desplazará horizontalmente, como suele suceder en los ríos meandriformes. En este caso, el río puede estar confinado por material resistente como es la roca, por lo que esta condición se encontrará en una parte alta de la cuenca, pero, también podrá darse en una zona media o baja, si es que las márgenes se constituyen de materiales cohesivos lo suficientemente resistentes para resistir la erosión. Esta condición se relaciona con dos grados de libertad, ya que los cambios de gasto propician un aumento o disminución del tirante, y con el paso del tiempo de la pendiente, por lo que, para hallar las características estables se requiere de dos ecuaciones.
- Estabilidad dinámica: En este caso, existirán variaciones en el fondo del cauce, así como en las márgenes, debido a que los materiales constituyentes no son capaces de soportar la acción erosiva del agua, las zonas medias de la cuenca son susceptibles a esto. Por otra parte, la migración del cauce es notoria en zonas bajas dónde se encuentran ríos meandriformes, que en las curvas están expuestos a erosionarse en la parte exterior y sedimentar en la interior, esto provoca que el cauce migre siendo los desplazamientos paulatinos para que se considere estable, además que el agua se moverá por un solo cauce. Por su parte, esta condición se relaciona con tres grados de libertad, ya que, a las variables tirante y pendiente, se les suma el ancho, que cambia por la erosión en las márgenes.

La estabilidad dinámica tiene una escala espacial y otra temporal. La primera de ellas se refiere a que cada tramo busca una estabilidad, sin que todo el río al mismo tiempo pueda encontrarse en equilibrio, mientras que la escala temporal se refiere a que el gasto líquido y sólido tienen una variación estacional, y un cauce en equilibrio puede sufrir de erosión y sedimentación durante una avenida, por lo que en el estudio de dichas variables se usa un promedio que no corresponderá a un valor fijo. (Basile, 2018).

Para que sea posible la estabilidad debe existir un balance entre la capacidad de arrastre de la corriente y el sedimento que entra, para que el fondo no se vea expuesto a un proceso de erosión o sedimentación. Para entender el vínculo de dichos procesos se puede usar la balanza de Lane (Ver Figura 7), la cual muestra una relación entre las variables hidráulicas, gasto líquido y pendiente, con las variables sedimentológicas, gasto sólido y tamaño de partícula, en un tramo determinado del río (Farias & Ruben, 2015). Si alguna de las variables se ve afectada, esto causará que el río busque nuevamente hallarse en equilibrio, provocando un cambio en la morfología del río.

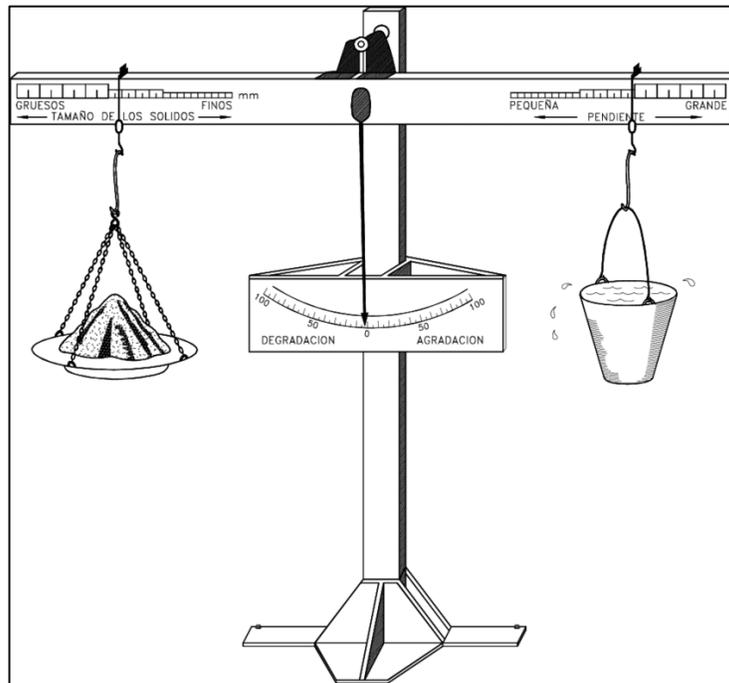


Figura 7 Balanza de Lane, obtenido de (Rocha, 1998)

Algunos ejemplos que se pueden explicar por medio de la balanza de Lane son:

- Durante una avenida el gasto líquido aumenta súbitamente (la balanza se inclina hacia la derecha) por lo que el río buscará equilibrarse desprendiendo material del fondo, el cual requiere de un mayor esfuerzo para ser movido, debido a que es de mayor tamaño, con ello se podrá aumentar la carga de sedimento y el río hallará el equilibrio.
- Si el gasto líquido disminuye por alguna extracción (la balanza se inclina hacia la izquierda), habrá una menor capacidad de arrastre y provocará sedimentación en el fondo, que con lleva un aumento de la pendiente hasta que la corriente tenga la capacidad suficiente de evacuar el sedimento.
- Al reducir la carga de sedimento sin afectar el gasto líquido, habrá erosión en el fondo y para su ajuste, se tendrá que reducir la pendiente del fondo.

La balanza de Lane nos muestra de una forma sencilla la relación entre variables gasto y pendiente con gasto sólido y tamaño de la partícula, pero, para que un cauce alcance un grado de estabilidad intervendrán también las características del material del fondo y orillas, así como geometría de la sección transversal. Cuando se afectan una o varias de éstas variables el río cambiará su forma para hallarse nuevamente en equilibrio, por ello resulta indispensable darle atención a como se relacionan estos parámetros y no a la influencia que tiene cada uno por separado (Trejo, Us, Cortés, & Flores, 2013). La magnitud de los cambios morfológicos estará en función del origen de la alteración, si es natural o provocada por la acción humana, también intervendrá el tiempo en que estas actúan (Figura 8).

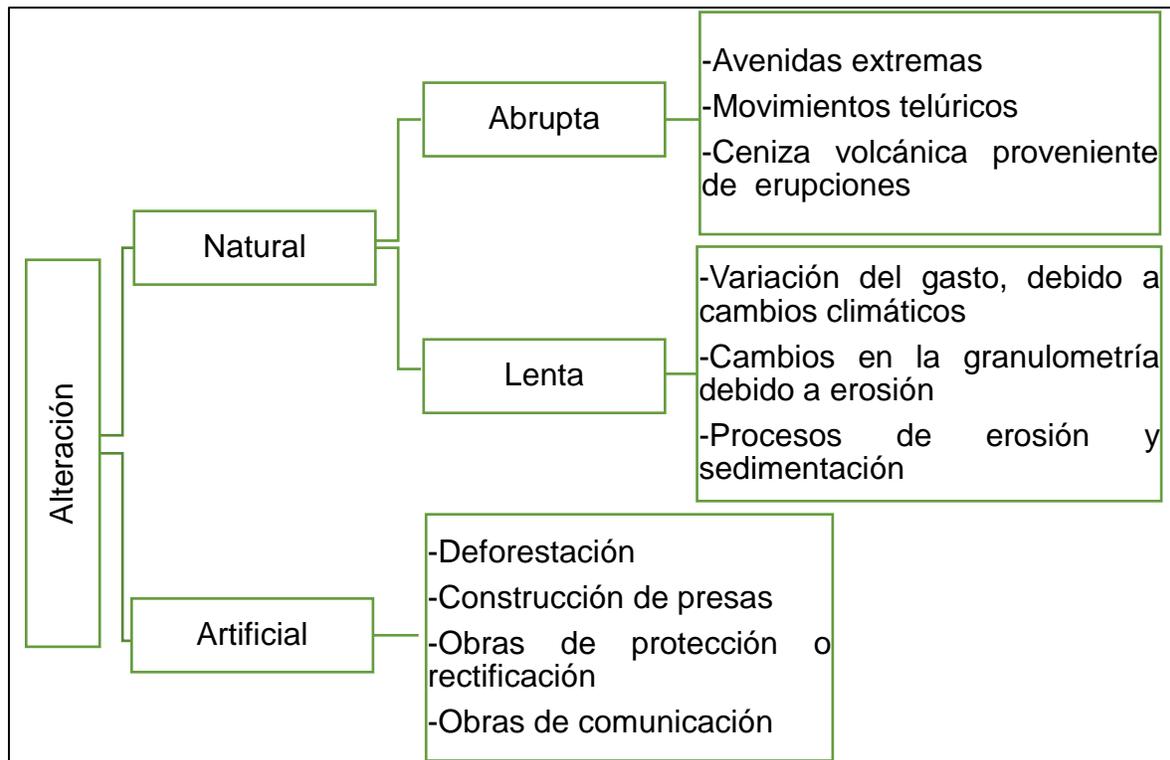


Figura 8 Alteraciones que provocan cambios en el cauce (Ayala J. E., 2000b).

Cada una de estas alteraciones tienen una escala de tiempo distinta en la cual el cauce tendrá una respuesta, ajustando su morfología a las nuevas variables. Este ajuste será a corto, mediano y largo plazo (García C. C., 1999):

- A corto plazo se relaciona con fenómenos hidrológicos extremos, como precipitaciones que originan un aumento en el gasto circulante, los cuales provocan cambios en la sección transversal, trazado y pendiente del río, en un periodo de días, y en algunos casos de horas.
- Mediano plazo, se relacionan por las actividades humanas, como el cambio de uso de suelo, regulación de ríos y presas, que desequilibran el cauce provocando que este pase por varios estados transitorios, para hallarse nuevamente en equilibrio. La escala de tiempo en que el cauce cambia es

variada, por ejemplo, en un río afectado por la construcción de una presa puede ajustar su morfología en un periodo que va de los 5 a 50 años,

- Largo plazo, el cauce se ajustará de acuerdo con las variaciones climáticas, hidrológicas y tectónicas, en un periodo de tiempo histórico, que involucra cientos de años.

3.5 Procesos relacionados a la inestabilidad

En referencia a lo anteriormente mencionado, se puede puntualizar que la condición de estabilidad dependerá de:

- a) La posición del río en la cuenca: Las zonas medias son propensas a la sedimentación por lo que el cauce se trenza, mismo que durante avenidas sufre cambios significativos, por lo que el río no goza de una condición de equilibrio en todo su trayecto hacia su desembocadura, y solo será estable en algunos tramos.
- b) La escala de tiempo: Un cauce a pesar de ser estable, podrá sufrir de erosión o sedimentación, si ocurre una época donde se presente un aumento o disminución del gasto respectivamente.
- c) Las características de los materiales: Especialmente de las márgenes aquellos que son granulares muestran una resistencia menor a la erosión, por lo que, cuando un tramo esté en proceso de ajuste podrá cambiar el ancho provocando una variación significativa de éste, comparado a momentos anteriores
- d) De las perturbaciones: Si estas son naturales o artificiales, en especial las antrópicas provocan nuevas condiciones a las que el río debe ajustarse.

Algunos indicios de inestabilidad se mencionan a continuación.

3.5.1 Existencia de bifurcaciones y avulsiones

Estrictamente el concepto de bifurcación se refiere a cuando el cauce se divide en dos brazos, las bifurcaciones o difluencias junto con las confluencias que son puntos donde se une dos canales, constituyen el bloque constructivo de ríos trezados. Una bifurcación puede aparecer por procesos de erosión o sedimentación. El primero sucede cuando hay una deposición en medio del canal durante flujos bajos, que con el tiempo provoca la difluencia mientras que la erosión se ve involucrada en el desgaste de las márgenes lo cual puede provocar que se penetre un canal cercano y con ello provocar la separación del cauce. La bifurcación es un indicador de estabilidad de un tramo, si esta se presenta alrededor de una isla o barra donde el agua fluye por ambos brazos es una bifurcación estable, en caso contrario el agua cambia de un lado a otro, indica inestabilidad. Las bifurcaciones pueden aparecer en distintas escalas de tiempo que van de días a semanas, o décadas si estas se presentan alrededor de islas con vegetación. Un detonante de las bifurcaciones son las avenidas que como se ha mencionado provocan grandes cambios en ríos trezados, aunque su magnitud sea moderada (Ayala & Verdugo, 2015).

Otro proceso relacionado a las crecidas es la avulsión, que es el abandono súbito o paulatino, completo o parcial de un cauce. El cauce que se instala en otro sitio, ya que el flujo es desviado a un canal cercano de menor elevación. El proceso de avulsión se relaciona a una escala de tiempo corta ya que puede detonarse durante una crecida extraordinaria, pero también puede ser el resultado de un proceso de mediano a largo plazo, que corresponde al tiempo, en el cual el nuevo canal se hace dominante en la descarga, y esto puede variar de días a décadas (Ramonell, 1997).

Las inundaciones comunes son desencadenantes de la avulsión, aunque también puede ser provocada por el movimiento tectónico, o deslizamientos de tierra. Ocurren difícilmente en zonas altas donde el valle es estrecho, y se presentan únicamente donde el valle es ancho (Jones & Schumm, 1999).

En un río trezado la avulsión es muy similar a la bifurcación por erosión en los laterales, ya que la incisión del cauce provoca que se alcance una depresión topográfica que puede resultar en una bifurcación, que es una forma de avulsión parcial si el brazo nuevo domina la descarga del fluido. En una bifurcación inestable, la avulsión es común, porque se presenta cuando el cauce original es abandonado y el flujo migra al brazo nuevo (Ayala & Verdugo, 2015).

Existen 4 causas principales por las que se presenta una avulsión, en las cuales influye la pendiente del curso potencial de la avulsión (S_a) y la pendiente existente en el canal (S_c). Para que se presente éste fenómeno, el cociente de dichas pendiente debe ser mayor a la unidad ($S_a/S_c > 1$), resaltando que la pendiente del cauce S_c , siempre estará en una cota mayor al lugar donde se encuentra S_a (Jones & Schumm, 1999). Las causas de avulsión se pueden clasificar en 4 grupos:

- Grupo 1: Incluye los casos en que el valor de S_a no varía, pero si disminuye S_c . Puede suceder por incremento de la sinuosidad de los meandros, aumento en el nivel base, o por levantamientos tectónicos que disminuyen la pendiente del canal y resultan ser desencadenantes de una avulsión de manera indirecta.
- Grupo 2: Puede suceder que el movimiento tectónico favorezca el incremento de S_a y que durante el movimiento se favorezca la inclinación de los laterales desencadenando la avulsión.
- Grupo 3: En el caso del que el cociente S_a / S_c , no varíe, la avulsión puede ser desencadenada por cambios hidrológicos, los cuales propician una variación en el gasto máximo que puede provocar un aumento de las inundaciones. La avulsión también puede ser desencadenada por un aumento en la carga de sedimento, ya sea por erosión o por fallas masivas de las orillas o también puede suceder por troncos atascados en el cauce
- Grupo 4: Incluye otras causas no comunes, por ejemplo, que el agua se desvíe hacia senderos formados por el transitar de animales muy pesados.

3.5.2 Erosión

Para que sea posible una condición de equilibrio en el río, no deben existir procesos de erosión ni sedimentación de manera constante, los cuales son inversos y se ubican en los extremos si vemos la balanza de Lane. Enfocándonos en estos procesos, la sedimentación se da debido a que el río pierde capacidad de transporte, dicha capacidad está relacionada con el tirante, que en épocas de estiaje disminuye; y con la velocidad del fluido, que se ve disminuida cuando se reduce la pendiente, por ejemplo, al salir de una zona de montaña a una de transición, el aumento constante del nivel del río se le llama agradación (Rocha, 1998). La sedimentación tiene como consecuencia, la pérdida en la capacidad de desfogue del río, provocando que el cauce pueda desbordar con crecidas menores, mientras que la erosión se produce cuando la energía de la corriente supera en conjunto a la requerida para el transporte de sedimento y la fricción generada por las márgenes y lecho del río. Cuando la erosión se presenta en el lecho de una manera constante suele llamarse degradación o socavación (Rocha, 1998).

La erosión puede presentarse en tres direcciones (Rodríguez, 2012):

- Erosión Vertical: Conlleva la erosión provocada por la acción hidráulica, que es responsable del arrastre de sedimento, al existir una cantidad menor de sedimento que el cauce puede transportar, éste buscará desprenderlo del fondo. Dentro de este tipo de erosión se incluye la corrosión provocada por el agua, que provoca que se disuelvan materiales solubles y la abrasión, que es provocada por el material transportado por el río, y tiene como resultado la formación de estructuras como pilancones, que son depresiones redondeadas que se forman en un lecho rocoso.
- Erosión regresiva: Es un tipo de erosión que provoca un retroceso de la cota del fondo hacia aguas arriba. Es posible observar este tipo de erosión al pie de cascadas.

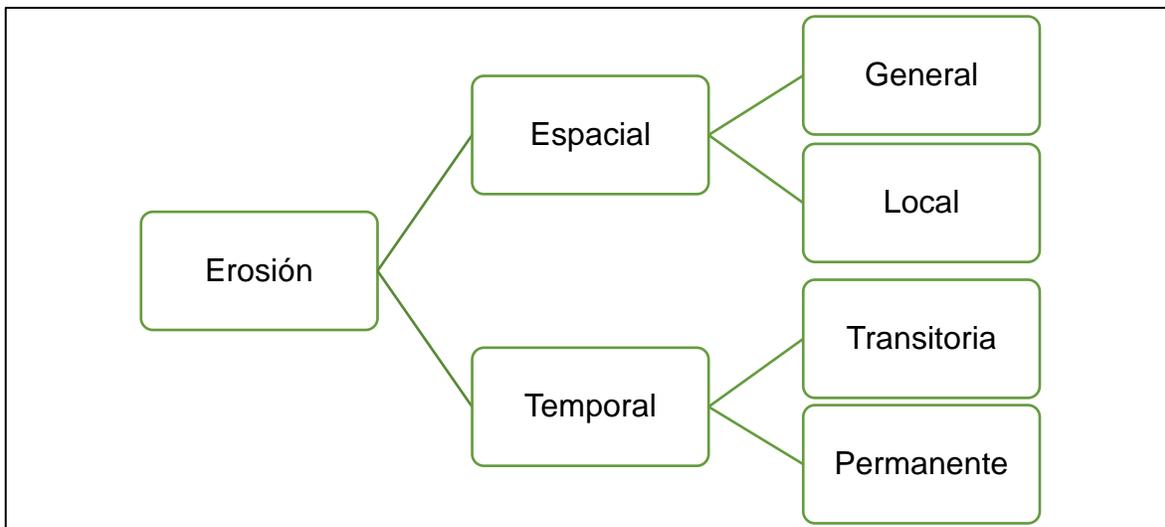


Figura 9 Clasificación de la erosión de acuerdo con una escala espacial y temporal (Lopez, 2018).

- Erosión lateral: Se presenta en las márgenes y produce un ensanchamiento del cauce. En momentos de crecidas, el agua puede erosionar tanto el fondo como las márgenes para obtener la cantidad de sedimento faltante.

Por otra parte, la erosión puede clasificarse de acuerdo a una escala espacial y temporal (Ver Figura 9). La erosión es general cuando involucra tramos largos de un cauce, mientras que la local se presenta en zonas puntuales que se caracterizan por la existencia de fuertes turbulencias y la aparición de remolinos.

En una escala temporal, la erosión puede actuar en un lapso de tiempo corto siendo un proceso transitorio resultado de un incremento de energía como en una avenida, mientras que la erosión permanente involucra que el proceso sea longevo, debido a una alteración drástica del cauce, por ejemplo la profundización del fondo, debido a la construcción de una presa (Lopez, 2018). La cantidad de erosión que es capaz de provocar un río puede verse afectada por los siguientes factores (González Ortega, 2004):

- Condiciones del flujo en el canal: El agua encauzada constituye en sí un factor erosivo, y la cantidad que transporta el río será equivalente a la magnitud de la erosión, ya que es un hecho que durante las crecidas el poder erosivo de la corriente aumenta, otro factor a considerar es la duración de la crecida, ya que las márgenes ofrecen una resistencia inicial, que una vez vencida, la acción erosiva se intensifica.
- Características de los materiales que forman la margen del cauce: Existen materiales más susceptibles a la erosión provocada por el agua, por ejemplo, en un lecho de arena o grava se puede alcanzar el grado máximo de erosión en un lapso de horas a días, mientras que en un lecho cohesivo esto puede tardar de semanas a meses (Basile, 2018).
- Vegetación existente: La vegetación que cubre las márgenes, también se conoce como vegetación de ribera, y se encuentra en la zona de transición de un medio terrestre a uno acuático. La presencia de vegetación de ribera aumenta la estabilidad de la orilla, y reducen el riesgo de erosión además de ayudar a frenar las crecidas. Sumado a ello, la vegetación aporta madera y hojas muertas, las cuales reducen la velocidad de la corriente (Sánchez, García, & Ríos, 2006)
- Estabilidad del lecho: Los cauces inestables están en un continuo proceso de erosión y sedimentación. La erosión del fondo trae consigo la pérdida de soporte de las márgenes, por lo que, éstas pueden fallar debido a la erosión. En casos en que el lecho sea lo suficientemente resistente, para soportar la erosión, ésta será mayor en las márgenes.

3.5.3 Estabilidad de la orilla y fallas en márgenes

Las márgenes de un río están expuestas a dos procesos de pérdida de material, que son la erosión lateral y las fallas masivas. La erosión lateral se puede dar de manera constante en épocas distintas a la de avenidas con una tasa de erosión

relativamente pequeña, por lo que, en una escala corta de tiempo, no podrían verse desplazamientos significativos, a diferencia de las fallas masivas que se presentan como una pérdida repentina de material que compone la margen, provocando un cambio súbito en la margen. Las tres formas de falla más comunes en márgenes de ríos aluviales son la falla superficial en materiales granulares, la rotacional en materiales cohesivos y por tubificación en márgenes formadas por materiales estratificados (Julien, 2002):

- La falla superficial es un deslizamiento somero del material granular, el cual se desplaza de manera paralela a la superficie de la margen (Ver Figura 10, "A"), al presentarse un flujo de agua (Orozco, 2009). Otro tipo de falla se presenta por la socavación del fondo, ya que cuando se pierde material proveniente de la base, se supera el ángulo de reposo del material y esto provoca un desprendimiento de material de la parte superior, el cual suele ser en bloques (Ver Figura 10, "B").
- La falla rotacional se forma en materiales cohesivos debido a la saturación del material y un ineficiente drenaje. El aumento en el nivel de agua propicia que el material se sature, al no poder evacuar la cantidad de agua absorbida una vez disminuye el nivel del río, provoca el aumento del peso del material y reduce la tensión interna de la masa de suelo, provocando que esta se desplace a lo largo de una superficie de falla (Ver Figura 10, "D"), por lo que la orilla puede perder estabilidad una vez se reduce el nivel del agua, y fallar posteriormente (González Ortega, 2004). Por otra parte, este plano de falla se relaciona a orillas altas de baja pendiente (Nardi, 2011).

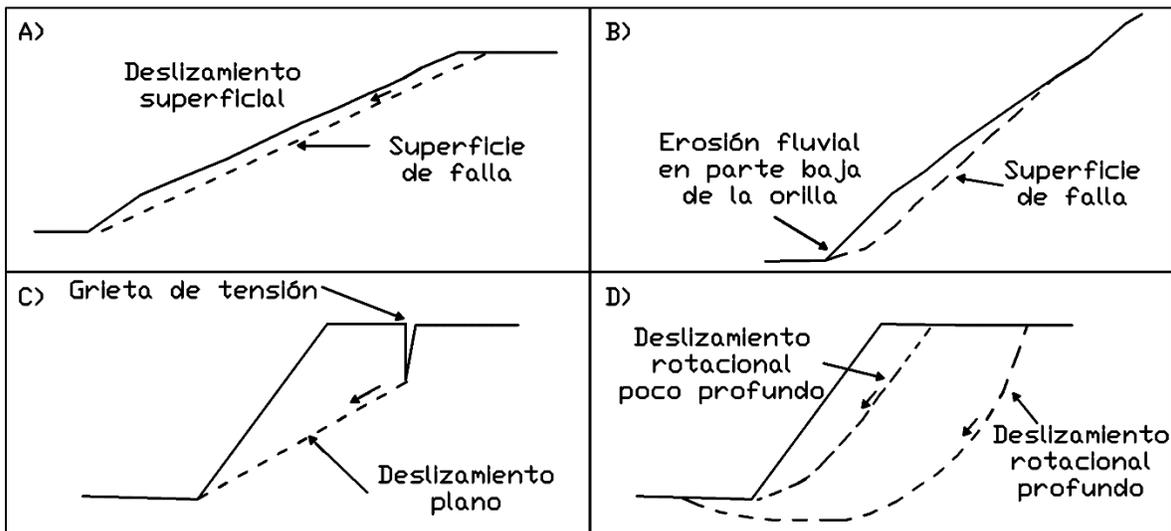


Figura 10 Los recuadros A y B, corresponde a fallas masivas en materiales granulares, mientras C y D a fallas en materiales cohesivos. Imagen modificada de (González Ortega, 2004)

- La falla por tubificación se produce porque los materiales granulares de una orilla estratificada, son más propensos a la erosión y durante crecidas pueden movilizarse, dejando las capas de material cohesivo superiores sin soporte, provocando que se formen grietas y posteriormente se desprendan bloques cuando el nivel de agua disminuye (Figura 11). Otro modo de falla que puede presentarse es la de voladizo, provocada por la pérdida del material granular en la base de la orilla, originando que la capa superior quede sin soporte, provocando la caída de un bloque de material.



Figura 11 Proceso de falla por tubificación. Imagen modificada de (Nardi, 2011).

En relación con las fallas mencionadas, la estabilidad de una orilla depende de (Thorne & Tovey, 1980):

- En una orilla formada por material granular, la estabilidad dependerá del ángulo de fricción interna y la pendiente, cuando esta última aumenta, provoca el deslizamiento del material. Las márgenes de materiales granulares son más susceptibles a la erosión por arrastre.
- La estabilidad en una orilla formada por materiales cohesivos depende del drenaje, siendo el agua el factor principal. En una orilla formada por este material, se forman superficies de falla circulares, como el mencionado anteriormente, aunque no es el único, también se puede formar una superficie de falla plana, que están asociadas a orillas cortas muy escarpadas (Nardi, 2011), en las cuales un bloque de material se desprende de la orilla y cae hacia el cauce (Ver Figura 10, "C"). Es importante recalcar que la pérdida de material en este tipo de márgenes se da sobre todo en fallas masivas, ya que resisten bien la erosión fluvial (Abernethy & Rutherford, 1998)
- De la vegetación existente, como ya se había mencionado ésta juega un papel importante ya que reduce la erosión superficial, pero hay que considerar que si bien, una margen puede estar cubierta de ella, si la especie

es de raíz corta no evitará que se produzca una de las fallas descritas con anterioridad, por lo que vegetación con raíces profundas, como las de algunas especies de árboles son las que realmente refuerzan las márgenes, y les dan una mayor estabilidad (Abernethy & Rutherford, 1998)

La estabilidad de la orilla puede analizarse usando un factor de seguridad (F_s), que es el cociente entre la resistencia al corte a lo largo de un plano de falla y la tensión cortante actuante en el mismo plano (Ver Ec. 5) o también puede considerarse como una relación entre los momentos o fuerzas resistentes, con las actuantes (Orozco, 2009):

$$F_s = \frac{\text{Momentos o fuerzas resistentes}}{\text{Momentos o fuerzas actuantes}} \quad \text{Ec. 5}$$

Si este factor es cercano a la unidad, indica un caso crítico en el cual la orilla fallará, si es superior a la unidad indica una mayor estabilidad, y si es menor sugiere una falla que ya debió haber ocurrido (Thorne & Tovey, 1980). Existen diversas formas de calcular el factor de seguridad, cuya descripción excede los objetivos de este trabajo, pero se menciona el uso del factor de seguridad en orillas de ríos, para mostrar que la hidráulica fluvial relaciona otras áreas de la ingeniería, como es la geotécnica.

4 Obras de protección de márgenes

Se han mencionado las características de un cauce estable, que se resumen en que las variables ancho y pendiente se mantienen constantes en un lapso largo de tiempo. También se mencionó que la estabilidad tiene un carácter dinámico en cauces aluviales, por lo que, a pesar de que un río mantenga constantes las variables mencionadas, existirán procesos de erosión y sedimentación de una manera controlado. La erosión provoca el desplazamiento lateral del cauce en las partes convexas o exteriores de las curvas, por lo que, es posible que en el futuro el río pueda causar problemas si se acerca cada vez más a un núcleo urbano, por lo que será necesario la construcción de una estructura para que la erosión no se presente más en ese punto y con ello evitar el desplazamiento horizontal. Los márgenes pueden ser protegidos con base a dos planteamientos, el primero de ellos consiste en desviar las líneas de corriente utilizando espigones, el segundo contempla aumentar la resistencia del perímetro mojado de una sección, por medio de muros y diques longitudinales.

Además de evitar la erosión lateral, estas estructuras pueden cumplir funciones como disminuir la probabilidad de inundación siempre que no reduzcan el ancho de la sección; fijar una sección que permita un óptimo transporte de sedimento durante una avenida; obtener una profundidad adecuada para la navegación; controlar la migración de meandros y contribuir en el manejo de problemas ambientales (Lopez, 2018). El propósito de estas obras es evitar el contacto directo del flujo de alta velocidad y el material de la margen, ya que guían el flujo a una dirección deseada (Flores & Álvarez, 1996).

4.1 Espigones

Los espigones son estructuras alargadas en forma de pantalla que se colocan interviniendo el paso del flujo, provocando que éste cambie de dirección, mientras que a la vez el espacio existente entre cada espigón se comienza a llenar de sedimento y con el tiempo se forma una nueva orilla (Figura 12). Pueden ser contruidos de diversos materiales como son enrocados, bloques prefabricados de concreto, geotubos rellenos de material, gaviones, productos orgánicos como troncos de árboles, con bloques de roca, pilotes de acero, entre otros (Buitrago & Parra, 2013). La ubicación del espigón respecto a la orilla puede variar, pueden estar en contacto con ella, o estar empotrados a cierta longitud (Flores & Álvarez, 1996).

Las ventajas que ofrecen los espigones frente a otro tipos de estructuras es que son de fácil construcción, y en caso de estar conformados por materiales pétreos, es más sencilla su conservación. Otra característica importante, es que en caso de fallar, el resto de espigones puede seguir funcionando, ya que la falla de uno, no

provoca un efecto en cadena. El espigón produce una reducción del ancho del cauce cuando se utiliza para proteger ambas márgenes, y puede que no proteja toda la orilla inicialmente, si llega a erosionarse el espacio entre cada espigón antes de que el río alcance el equilibrio (Flores & Álvarez, 1996). También puede suceder que aumente la erosión en el fondo, así como en las partes cóncavas o interiores de las curvas, que normalmente están afectadas por un proceso de sedimentación. Los espigones además, provocan una pérdida de energía en el río, y son vulnerables a los efectos de socavación, ya que su cimentación es poco profunda y al localizarse dentro del cauce, son vulnerables a los efectos erosivos del fondo (Díaz, 2001).

Los espigones pueden ser utilizados para canalizar un río y generar condiciones óptimas para navegación, o para la defensa de las márgenes. Si se usan con este último fin, los espigones se colocarán en los lados exteriores de las curvas. En el primer caso se colocarán espigones en ambos lados y se reducirá así el ancho del río, por lo que el tirante aumentará (Flores & Álvarez, 1996).



Figura 12 Ejemplo de Espigón formado por bolsa-cemento.
Obtenido de (Díaz J. S., 2001)

La información previa, necesaria para el diseño de una protección con espigones u alguna otra estructura es la siguiente (Díaz, 2001):

- Variables de flujo: Tirante en condiciones de gasto mínimo, normal y máximo.
- Parámetros del cauce: Pendiente de fondo, velocidad del flujo, granulometría del fondo y geometría del canal.
- Materiales disponibles para la construcción.
- Posibilidad de avalancha y otras amenazas: El diseño del espigón debe cumplir con las exigencias de resistencia y flexibilidad. De igual forma se

debe considerar el efecto de socavación para que la cimentación tenga una profundidad adecuada

Otro tipo de información requerida en el diseño, que se menciona en el Manual de Protección y Control de cauces (Vilchis, Liu, & Silvestre, 2000) es la siguiente:

- Planos topográficos y batimétricos actualizados de la zona a proteger
- Variables de flujo: Se sugiere conocer el gasto formativo y gasto asociado a un periodo de retorno de 50 a 10 años, para ambos se debe conocer el tirante asociado.
- Fotografías aéreas de distintas épocas para ver la evolución del río.

Al diseñar un espigón se determina su localización, longitud, forma en planta, separación, pendiente y elevación de la cresta, ángulo de orientación respecto al flujo, permeabilidad, material de construcción y la erosión que se podría presentar en la base del extremo ubicado en la corriente. En el diseño se busca no causar un cambio brusco en la dirección de la corriente, y que el espaciamiento entre cada espigón no sea muy grande (Flores & Álvarez, 1996).

4.2 Diques marginales

Los diques marginales son un tipo de estructura que se coloca dentro del cauce y son una alternativa al uso de espigones, ya que cuando se requiere una cantidad considerable de piezas, resulta más factible contruir solo una estructura que al igual que un espigón, redireccione la corriente y resista la velocidad del flujo, teniendo como diferencia que el dique actuará de forma paralela a las líneas de corriente, mientras que el funcionamiento de un espigón se basa, en que éste se interponga a dichas líneas. Sumado a ello, los espigones junto con los recubrimientos marginales, suelen utilizarse comúnmente con fines de protección, mientras que los diques para trabajos de encauzamientos y retificación (Flores & Álvarez, 1996).

Por otra parte, los diques son una buena opción cuando las márgenes a proteger son irregulares(Ver Figura 13), y al cuantificar espigones, la suma representa un mayor volumen de obra en comparación a utilizar solo una estructura. También se suelen utilizar diques, en lugares donde existen islas, o en zonas donde existen gran actividad morfológica que provoque que el río divague, de igual forma podrá utilizarse cuando se requiere formar una orilla nueva, con mayor tamaño que la actual. (Flores & Álvarez, 1996).

Los diques se pueden construir de roca, gaviones, materiales finos y granulares, teniendo una sección trapezoidal que posee cierta pendiente o ser totalmente verticales, en el caso de construirse con tabla estacas, pilotes metálicos o de concreto. Si el dique tiene una sección trapezoidal, el talud que está en contacto con la corriente debe de tener una protección especial, como si se tratara de un

recubrimiento marginal, además de que en su cimentación, se debe prever el efecto de la socavación, debido a la erosión provocada por la corriente al pie del talud (Flores & Álvarez, 1996).

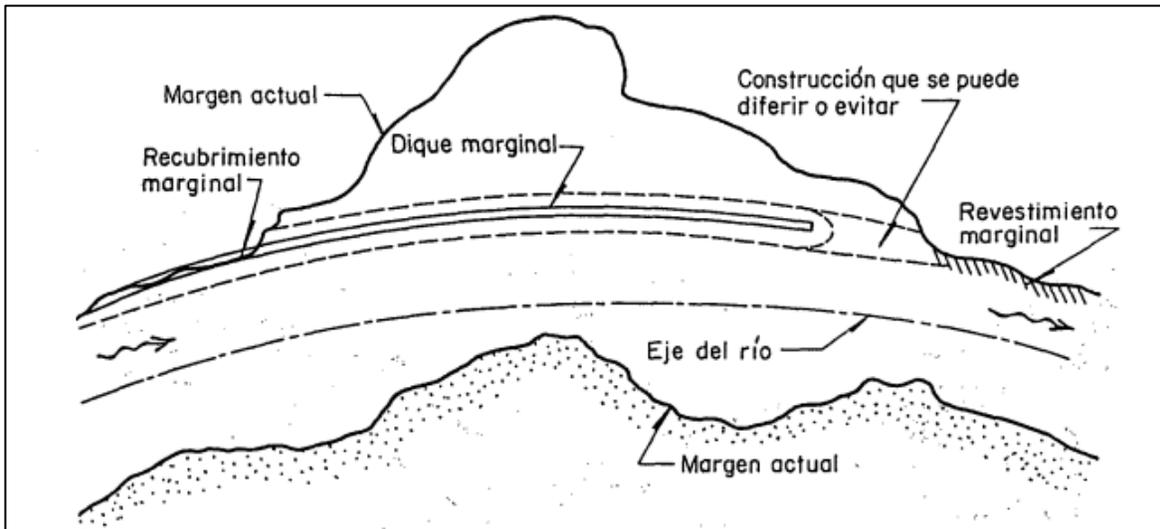


Figura 13 Dique marginal empleado en orilla irregular. Imagen obtenida de (Flores & Álvarez, 1996).

4.3 Protecciones marginales

Los recubrimientos marginales se construyen sobre la orilla con el objetivo de disminuir o evitar por completo la erosión sobre ésta, ya sea aislándola totalmente o reduciendo la velocidad que actúa sobre ella. Los recubrimientos se clasifican en tres rubros (Flores & Álvarez, 1996):

- **Permeables:** Permiten que la margen siga en contacto con el flujo, pero reducen la velocidad actuante. Algunos ejemplos son los jacks, pantallas de madera, troncos o pilotes, los cuales dejan un hueco entre cada elemento, permitiendo que en estos espacios la margen siga teniendo contacto con el agua. Suelen utilizarse en zonas donde el río arrastra una gran cantidad de vegetación.
- **Semipermeables:** Son aquellos que evitan el contacto de la corriente con la orilla, pero al tener pequeñas aberturas es posible que el agua fluya de manera perpendicular a la protección. Ejemplos de ello, son las protecciones de enrocamiento, gaviones o colchones de malla y roca, y de elementos prefabricados de concreto, que debido a la filtración requieren de un filtro entre la orilla y el revestimiento. Este tipo de revestimiento se puede emplear en cualquier tipo de río, siempre que exista el espacio necesario para formar un talud donde se apoyará la protección.
- **Impermeables:** Evitan por completo el contacto de la orilla con el agua, ya que no existen huecos en el elemento, ejemplo de ello son losas de concreto, recubrimientos asfálticos, muros de mampostería o concreto y

tablaestacados. Las protecciones verticales como muros se utilizan comúnmente en zonas urbanas donde el río cruza.

Los recubrimientos marginales al apoyarse sobre la orilla poseen el mismo talud que ésta, aunque también pueden construirse verticales en forma de muros. Al colocarse directamente en la orilla provocan que esta se fije y no sufra más erosión lateral, sumado a ello no reduce el área hidráulica de la sección. Tienen como desventaja ser más costosos que los espigones, y que su proceso constructivo es más complejo, por ejemplo, cuando el río lleva una cantidad considerable de agua todo el año. En el caso de que una parte falle, puede provocar que se pierda un tramo mayor de la estructura, por lo que deben tener un mantenimiento adecuado.

Por último, para algunos autores los gaviones son considerados recubrimientos permeables (Vide J. P., 2003), pero también son utilizados en espigones y diques longitudinales. Los gaviones son estructuras de alambre en forma de paralelepípedo rellenas de cantos, boleos o gravas. Cuando se utilizan para encauzamiento trabajan por gravedad y tienen una sección de 1 m x 1 m con una longitud de 4 m y cuando cumplen únicamente una función de revestimiento tienen una altura de 0.20 m o 0.30 m, y se les conoce como corazas o gaviones de revestimiento. Por último, se pueden utilizar como elemento de cimentación, con una altura de 0.50 m (Ver Figura 14)

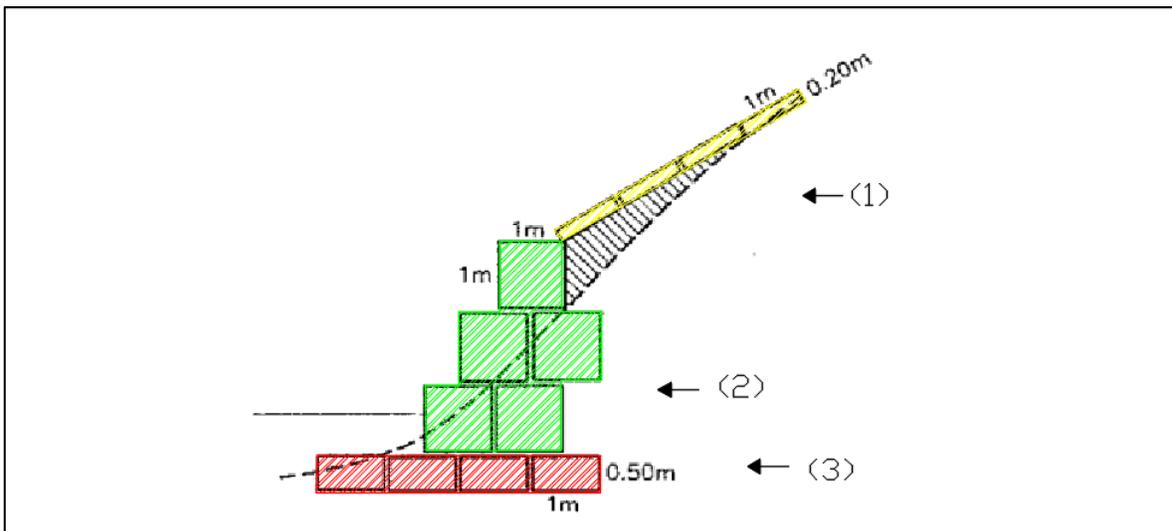


Figura 14 (1) Gaviones utilizados como cimentación, (2) Gaviones de cuerpo, (3) Gaviones de recubrimiento. Imagen modifica de (Vide J. P., 2003).

5 Características de la zona de estudio

En el siguiente capítulo se exponen las características del sitio, iniciando por una descripción de la zona arqueológica Vega de la Peña, haciendo énfasis en las características de las estructuras afectadas durante la crecida de octubre del 95, posteriormente se describe el Río Bobos y su trayectoria dentro de la cuenca, de la cual se muestran algunos parámetros de forma, así como características de clima, uso de suelo, hidrografía, topografía, entre otros.

5.1 Zona arqueológica Vega de la Peña

La zona arqueológica Vega de la Peña se ubica en Veracruz, en el municipio de Atzalan a unos kilómetros del límite con Tlapacoyan, mismo por el cual es posible acceder. Está ubicada en las coordenadas UTM (693732.3N, 2208543.8E) a una altitud cercana a 200 m.s.n.m. La zona abarca un área aproximada de 0.25 km² y se encuentra al costado derecho del Río Bobos.

Vega de la Peña se encuentra en la zona conocida como “Filobobos”, área de gran belleza natural, que alberga barreras naturales como son cañones y acantilados. El nombre que recibe ésta área se debe al talud casi vertical ubicado en el costado izquierdo del Río Bobos (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 16).

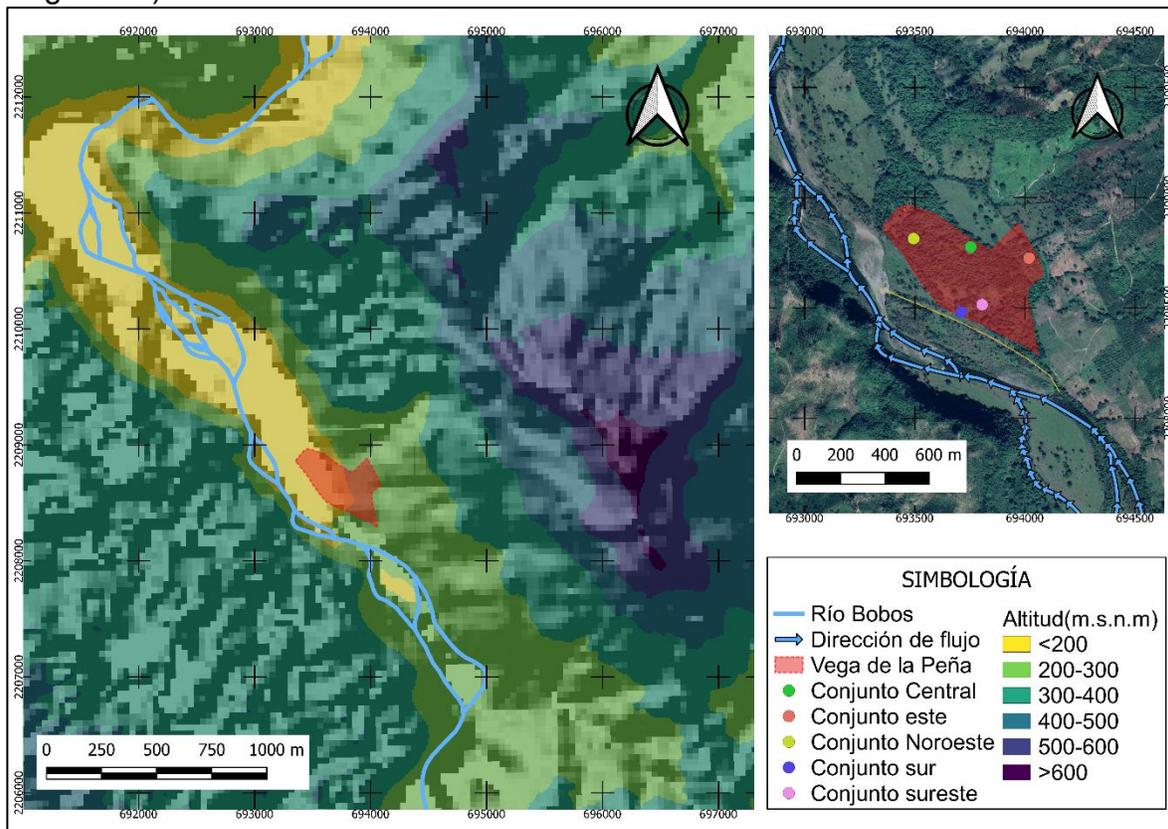


Figura 15 Mapa de ubicación de Vega de la Peña. Se observa del lado izquierdo del Río Bobos el talud vertical, con un desnivel cercano a los 50 m

Desde 1992 el área natural de Filobobos se encuentra protegida debido a sus características naturales, ya que es parte de la selva veracruzana, y en ella existen tres sitios arqueológicos: La palmilla, Vega de la Peña y el Cuajilote que tienen una antigüedad mayor a los 500 años. En agosto del 1992 la zona se declaró área natural protegida, por lo cual no puede destinarse a fines habitacionales o de comercio, además de que se resguarda la flora y fauna silvestre existente, permitiendo únicamente actividades orientadas a la conservación y restauración de la mismas, así como algunas actividades recreativas (Gaceta Oficial del estado de Veracruz, 1992).

La historia de Vega de la Peña se remonta a finales del periodo clásico, aproximadamente en el año 950 D.C, donde nació como una zona de ocupación totonaca, funcionando como un punto estratégico en el intercambio comercial entre pueblos del altiplano central y la costa del Golfo, además de ser un lugar fronterizo entre la costa y la Sierra Madre Oriental. Durante el periodo postclásico tardío que va de 1300 a 1500 D.C. alcanzó su máximo desarrollo, esto se debió a que entre 1000 a 1200 D.C. entró en decadencia el gobierno centralizado totonaca, ubicado en el Tajín (en la actualidad muy cerca de la Ciudad de Papantla, Veracruz) debido a la expansión mexicana y de otros grupos nahuas, por lo que, los gobernantes totonacas se sometieron y se reacomodaron política, social, cultural y económicamente. A causa de esto, sitios como Vega de la Peña adquirieron importancia y fungieron como centros de unidades político-territoriales, que estaban controlados por dinastías locales y aparatos militares-religiosos-administrativos a cargo de familias nobles de filiación totonaca o nahua, que se conocían como "altepemes". Vega de la Peña fue el centro de un "altépetl" y controlaba la zona central-norte de Veracruz y parte norte-este de Puebla (Moo J. M., 2011).

Después de la colonización cerca del 1600 D.C., Vega de la Peña fue abandonada junto con otros sitios prehispánicos y los terrenos aledaños se usaron como estancias, ranchos y haciendas (Moo J. M., 2011). El escrito más antiguo sobre la existencia y ubicación del sitio es un reporte elaborado por el Sr. Teófilo Vázquez en 1926. También existen testimonios que datan de 1935 donde se menciona una crecida que causó la avulsión de un tramo del río Bobos cercano a Vega de la Peña (Hernández J. C., 1994). En años posteriores existen diversos reportes de la zona, como el elaborado por el arqueólogo Alfonso Medellín Zenil en 1954; uno elaborado por un equipo proveniente de la Universidad Veracruzana en 1977 y por último uno por Eduardo Beristáin y Raúl de Villafranca pertenecientes a la Asociación Ecológica y Hábitat en 1986 (Matadamas, 2011). Aunque estos reportes no pudieron ser consultados para la elaboración de la presente tesis, debido a restricciones en el acceso al archivo del INAH, es de esperarse que dichos reportes estén orientados principalmente a las características de las estructuras prehispánicas y no a las características fisiográficas del entorno o el curso del río Bobos aledaño a la zona. La cronología indicada en los reportes que pudieron ser consultados, sugieren que

la zona estuvo abandonada por lo menos 300 años (de 1600 a 1926), siendo una de las causas el difícil acceso a la zona.

La restauración de la zona arqueológica de Vega de la Peña comenzó una vez el área de Filobobos se declaró zona protegida. Inicialmente se hizo una delimitación del sitio a través de un levantamiento topográfico y de igual forma se realizaron trabajos de limpieza de las 75 estructuras identificadas, las cuales corresponden en su mayoría a plataformas y basamentos con forma rectangular, aunque existen algunas de forma cuadrada, trapezoidal y circulares. Dichas estructuras se encontraron muy deterioradas, cubiertas por vegetación y algunas de ellas colapsas (Cruz & Hernández, 1994). Las estructuras encontradas, están hechas de material extraído del río (cantos rodados y material granular). El sistema constructivo se basa en su mayoría en un núcleo de forma rectangular formado por cantos rodados de no gran tamaño, por lo que, los antiguos pobladores de Vega de la Peña seguramente los podían mover con cierta facilidad. Éste material se colocaba perimetralmente para posteriormente llenar el centro con el mismo tipo de material. Esto se repetía hasta alcanzar la altura deseada, sin usar algún material extra para unir las piezas. El núcleo se revestía con pedacería de laja, estuco y piedra bola, mientras que la siguiente capa correspondía a un muro de laja que dotaba a la estructura de cierto talud, y finalmente, se le aplicaba una capa de estuco. Es importante resaltar que todas las estructuras compartían el mismo sistema constructivo, independientemente del uso que se les haya dado (Cruz & Hernández, 1994).

La mayoría de los materiales con los que se edificaron las estructuras de Vega de la Peña, provienen de los depósitos del Río Bobos, cuyo fondo está formado por arcilla, arena, grava, boleos y cantos rodados. Estos últimos varían desde los 30 cm hasta 3 metros, de los cuales, los de mayor tamaño y una forma no redondeada

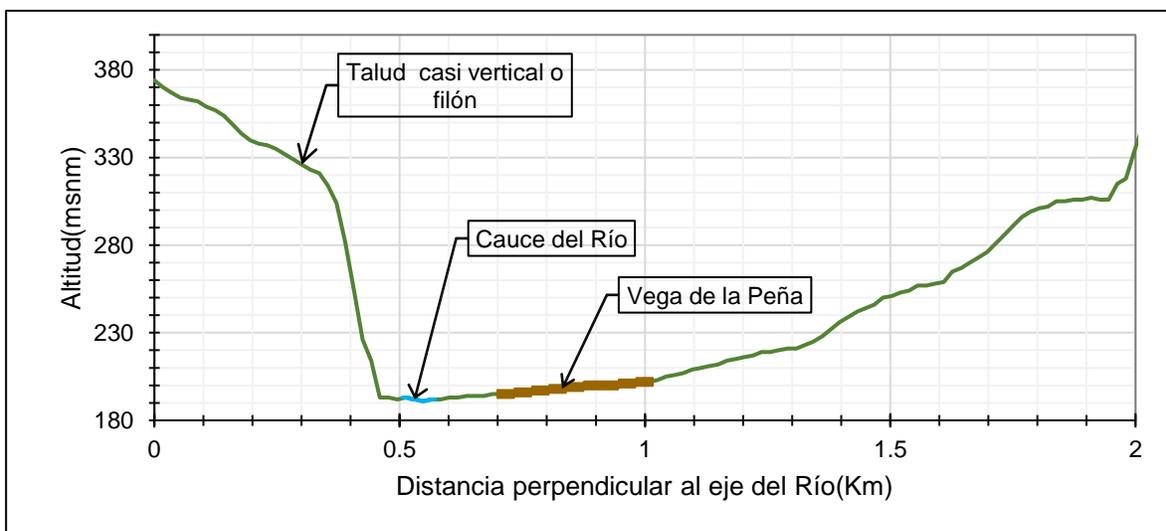


Figura 16 Posición actual del Río Bobos respecto a Vega de la Peña. El perfil de obtuvo perpendicular al eje del río, con un MDE resolución 15 m (CEM, 2013)

proviene del desprendimiento del talud ubicado en el lado izquierdo del río (Guerrero & Cortés, 1994)(Ver Figura 16). Las estructuras de Vega de la Peña se usaron con fines diversos, que van desde lo religioso a lo habitacional y tienen una orientación de 33° hacia el oeste (Hernández, 1994).

Para su descripción los arqueólogos agruparon las estructuras en 5 conjuntos principales, y dos anexos los cuales están divididos de este a oeste por un muro denominado “Coatepantli” (Moo J. M., 2011):

- Central: Se ubica en la parte media y se encuentran plataformas unidas entre sí, en las cuales se halla un adoratorio circular
- Este y anexo: Está formado por un conjunto habitacional con un espacio destinado para artesanos
- Noroeste: Está compuesto por estructuras cuadrangulares, unidos por un patio interno
- Sur: Comprende el juego de pelota, así como el edificio del Dintel y otros edificios cercanos
- Sureste y anexo: Tenía un fin religioso, y se encuentra el templo de Xicalcolihqui, el palacio, y dos adoratorios

El conjunto sur alberga 15 estructuras y era el más cercano al Río Bobos. Se tiene testimonio de que, en 1955, durante las lluvias ocasionadas por el huracán Janet, el cauce que discurría alejado de la zona, cambió su dirección y se posicionó a un costado del Juego de Pelota y el Edificio del Dintel, el cual perdió parte de su estructura durante dicho evento. (Goujon, 1994). De estos daños no existen informes, solo testimonios de pobladores de la zona recopilados por arqueólogos, que se mencionan en el capítulo 7.1.

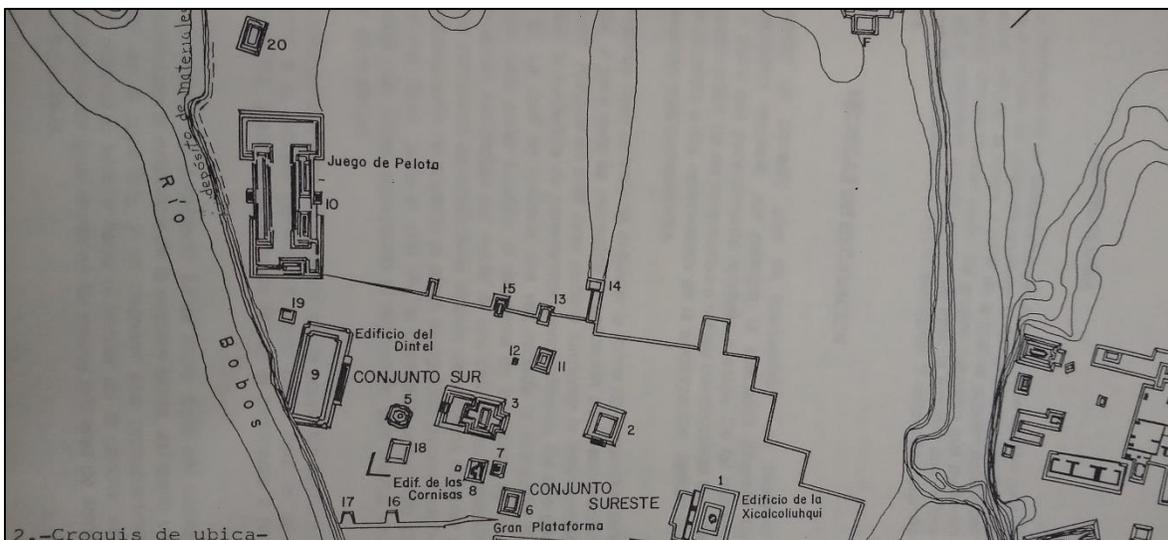


Figura 17 Croquis obtenido de (Goujon, 1994)

Posteriormente en 1995 se presentó un evento durante el mes de octubre, que volvió a afectar a las estructuras mencionadas, por lo que a partir de este suceso

comenzaron a realizarse trabajos para resguardar la zona, que consistieron en rehabilitar las estructuras dañadas y colocar una obra de desvío aguas arriba, para evitar que el río siguiera afectando al conjunto sur. Dichos trabajos se concluyeron en el 2015 (Hernández J. C., S.F.)

A continuación, se hace una breve descripción de las condiciones del Juego de Pelota y del Edificio del Dintel antes de 1995 de acuerdo con el informe de (Gooujon, 1994):

- Juego de la Pelota (Figura 18): Es una estructura que asemeja una “1” si se observa en planta. En los extremos tienes dos plataformas de forma rectangular de aproximadamente 14x28 m, que están delimitadas por un bordo perimetral somero, dichas estructuras son paralelas entre sí y están unidas por una especie de pasillo de 7x33 m, que a la vez está delimitado por dos muros con una ligera inclinación, que en la parte exterior poseen dos escalinatas que se culminan en una grada, las cuales además están delimitadas por alfardas. En la actualidad esta estructura conserva un buen estado a pesar de los daños del año 95.

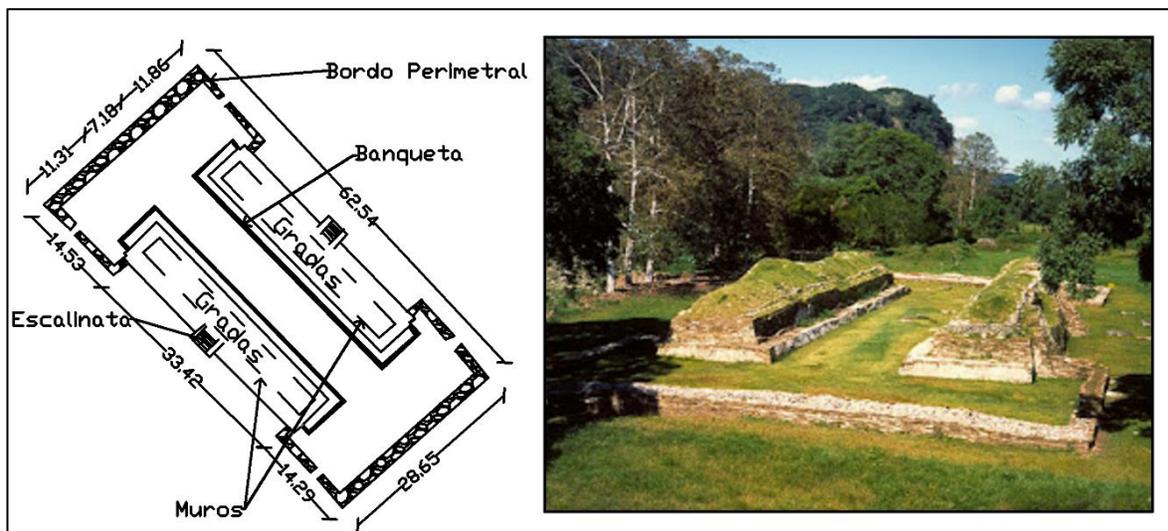


Figura 18 Dibujo modificado, elaborado por (Meza & Cortés, 2008)

- Edificio del Dintel (Figura 19): Es la estructura más alta del sitio, tiene una forma piramidal y posee 4 escalinatas, y de ellas conducía a un recinto muy vistoso. Se construyó en 5 fases, la primera constó de un basamento formado por cuerpos escalonados, el cual tenía una medida de 18.10x15 m con una altura de 10 m, cuyo acceso era por medio de una escalinata “E” con una longitud total de 8.10 m. En la segunda base constructiva, el basamento se amplió hasta alcanzar un ancho de 19 m y un largo de 38.80 m, cuyo objetivo fue la construcción de un recinto en la parte superior, al final de esta ampliación la elevación máxima del edificio alcanzó casi 2.50 m. El recinto E, mide cerca de 14x10.10 m, y dentro del existe un pasillo que dirige a un

santuario muy reducido del cual no se cuenta con medidas. El resto de las etapas constructivas corresponden a la ampliación al sur del edificio. En la Figura 20 se muestra un plano en planta de cómo pudo estar el edificio en sus mejores condiciones.

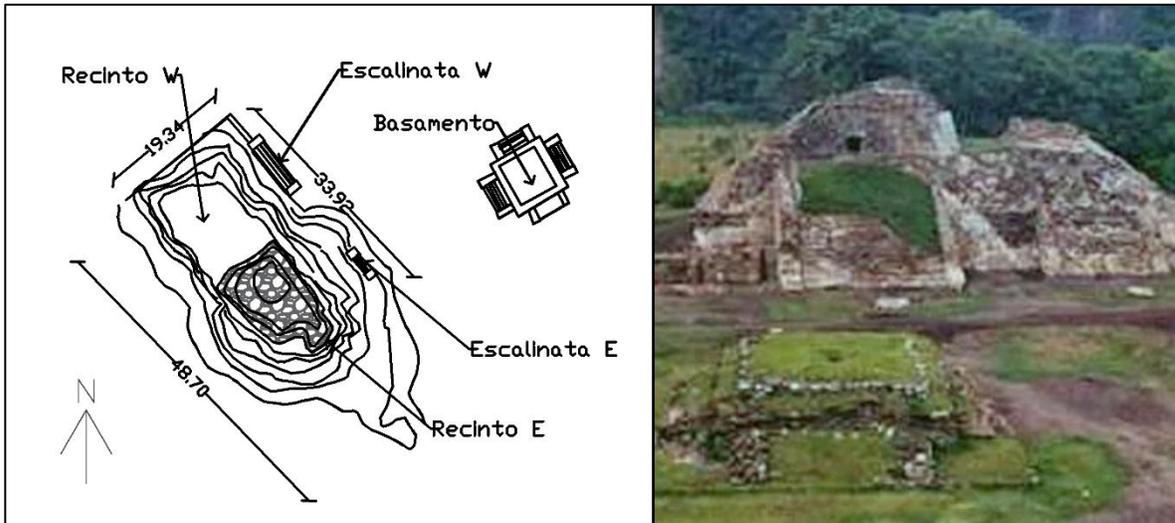


Figura 19 Foto del Edificio Dintel, tomada antes del evento del 95. Plano modificado, elaborado por (Meza & Cortés, 2008)

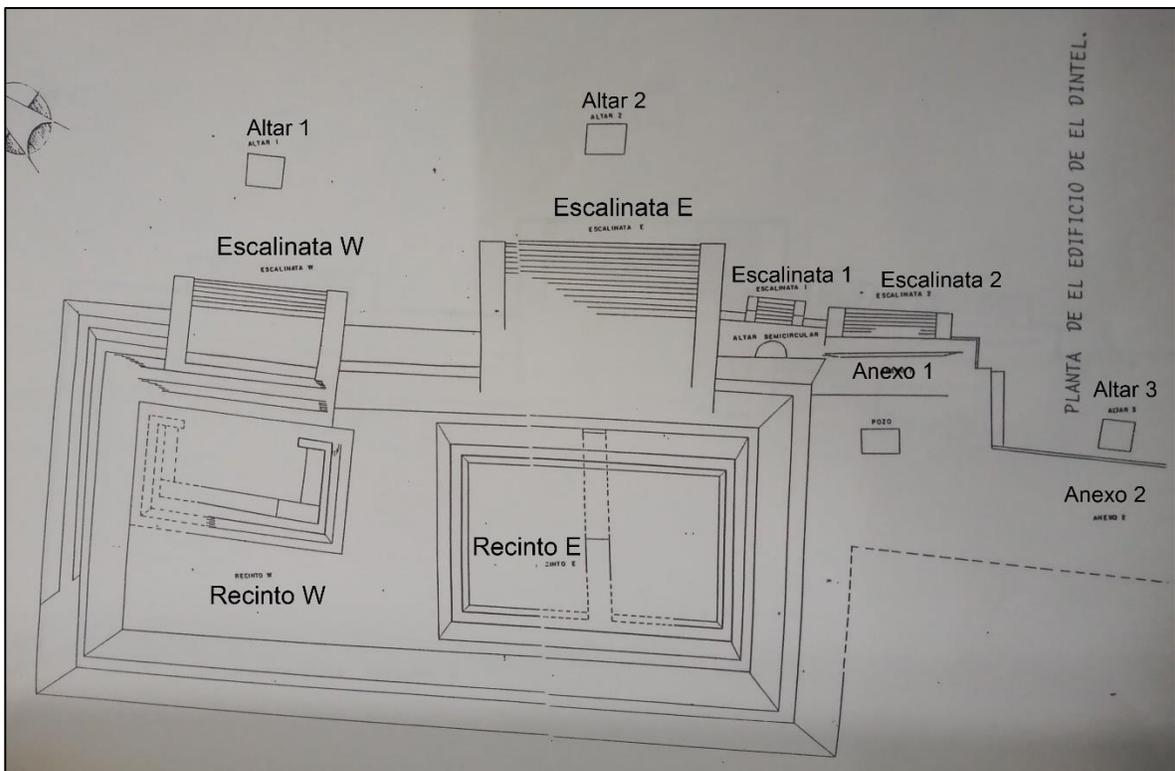


Figura 20 Plano del Edificio del Dintel, Obtenido de (Goujon, 1994)

5.2 Cuenca Nautla

La cuenca Nautla se ubica en la región hidrológica No. 27 según la clasificación de la CNA, tiene un área de 2,954.53 km² con un perímetro de 288.44 km. El 90.78% de su superficie total correspondiente a 2682.24 km² se encuentra en el estado de Veracruz, mientras que el restante 9.22% se ubica en el estado de Puebla abarcando 272.28 km². La cuenca está comprendida entre las latitudes 19°29'11.23" y 20°19'13.03", y longitudes -96°44'48.16" y -97°26'28.25". Limita con las cuencas del Río Cucharas, Río Tecolutla, Río Misantla y al sur con la región hidrológica No. 18 Balsas y Papalopan No. 28

Tiene una longitud máxima de 90.05 km medida en línea recta, desde el punto de desagüe al punto de mayor distancia topográfica (Asensio, Ramón, & Blanquer, 2011), tiene un ancho máximo de 30.47 km obtenido del cociente del área de la cuenca y la longitud máxima y un desnivel de 4.2 km. A partir de los parámetros mencionados, el factor de forma de Horton resultó en un valor de 0.33 que indica que la cuenca es ligeramente alargada (Chester, Sandra, Eduardo, & David, 2017) Por otra parte el cálculo del coeficiente de Gravelius resulta en un valor de 1.63 correspondiente a una cuenca de forma oval oblonga (Ver Tabla 2).

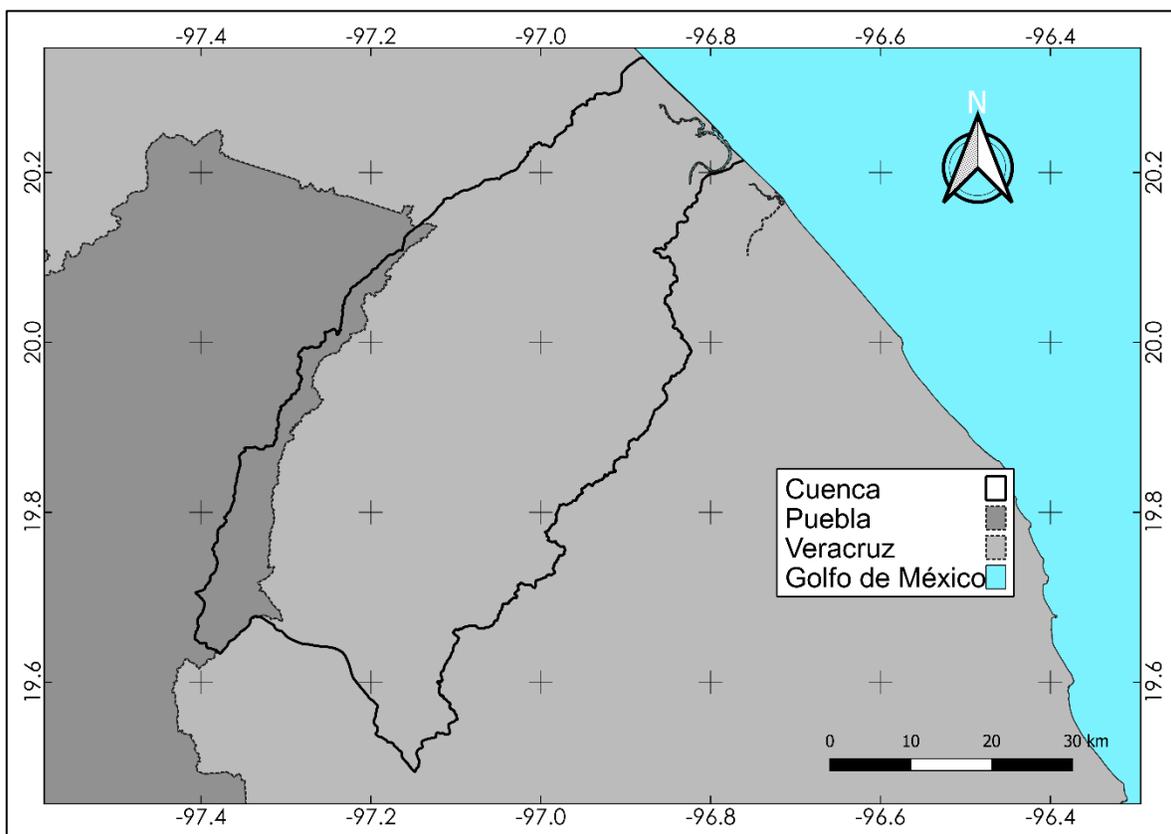


Figura 21 Cuenca Nautla

Tabla 2. Parámetros de la cuenca

Símbolo	Parámetro	Unidad	Valor	Fórmula empleada
A	Área	km ²	2804.95	-
P	Perímetro	km	306.87	-
L	Longitud	km	92.05	-
W	Ancho	km	30.47	$W = A/L$
HM	Cota más alta	km	4.20	-
Hm	Cota más baja (Hm)	km	0.00	-
DA	Desnivel (DA)	km	4.20	$DA = HM - Hm$
Cg	Coeficiente De Gravelius	-	1.63	$Cg = P / (2\sqrt{\pi A})$
Hf	Factor de forma	-	0.33	$Hf = A/L^2$

Fuente: Elaboración propia. Delimitación de la cuenca dada por S.I.N.A. de Conagua correspondiente al 2010

5.2.1 Relieve

En la Figura 22 se muestra la distribución de pendientes en porcentaje de la cuenca, y en la Tabla 3 se observa el porcentaje ocupado de cada rango respecto al área total, dónde el mayor porcentaje de ocupación corresponde a un tipo de relieve que va de plano a suave, caracterizado por baja pendiente, que en su mayoría se ubican cerca de la desembocadura.

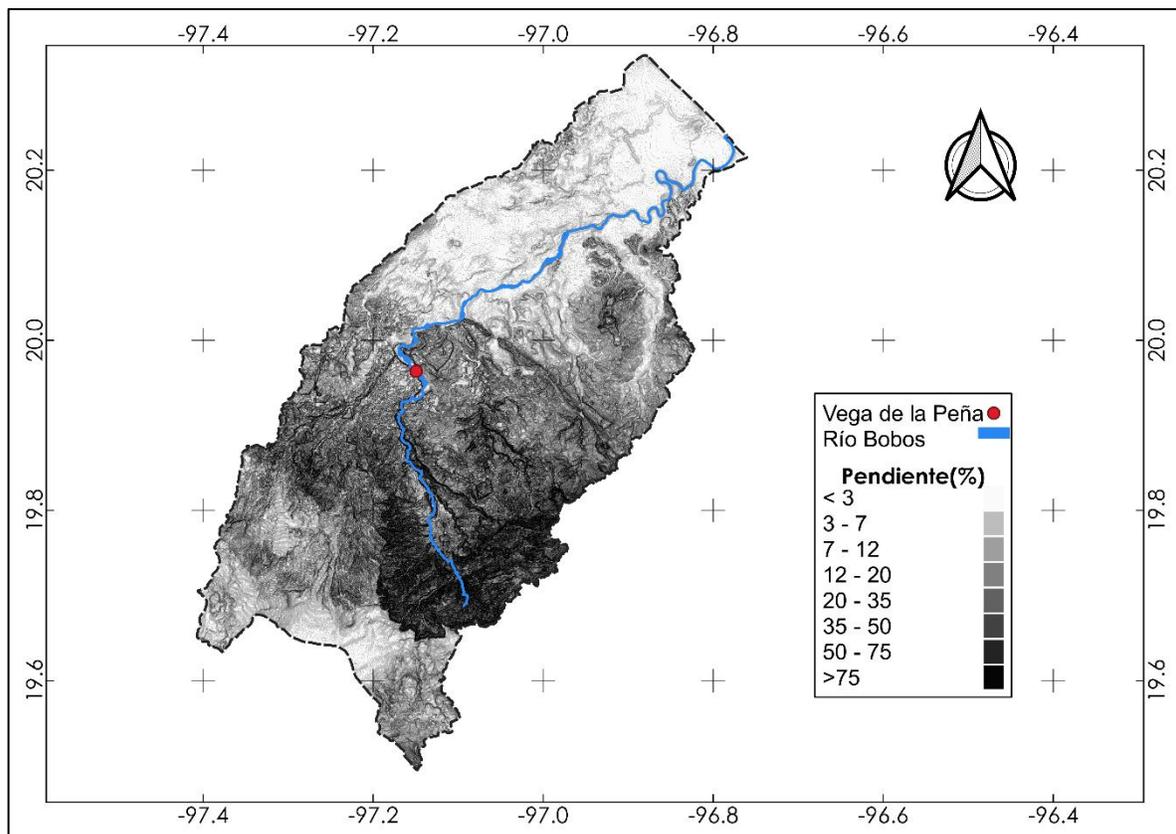


Figura 22 Mapa de pendientes

Tabla 3. Distribución de pendientes en la cuenca

Pendiente (%)	Tipo de relieve	Área(km2)	%
< 3	Plano	529.73	18.93
3-7	Suave	572.68	20.46
7-12	Medianamente accidentado	337.38	12.05
12-20	Accidentado	320.65	11.46
20-35	Fuertemente accidentado	401.63	14.35
35-50	Muy fuertemente accidentado	249.31	8.91
50-75	Escarpado	234.25	8.37
>75	Muy escarpado	153.23	5.47

Fuente elaboración propia

Otro parámetro importante dentro de la caracterización de la cuenca es la distribución de altitudes, siendo 4200 m.s.n.m. la mayor elevación (Figura 23).

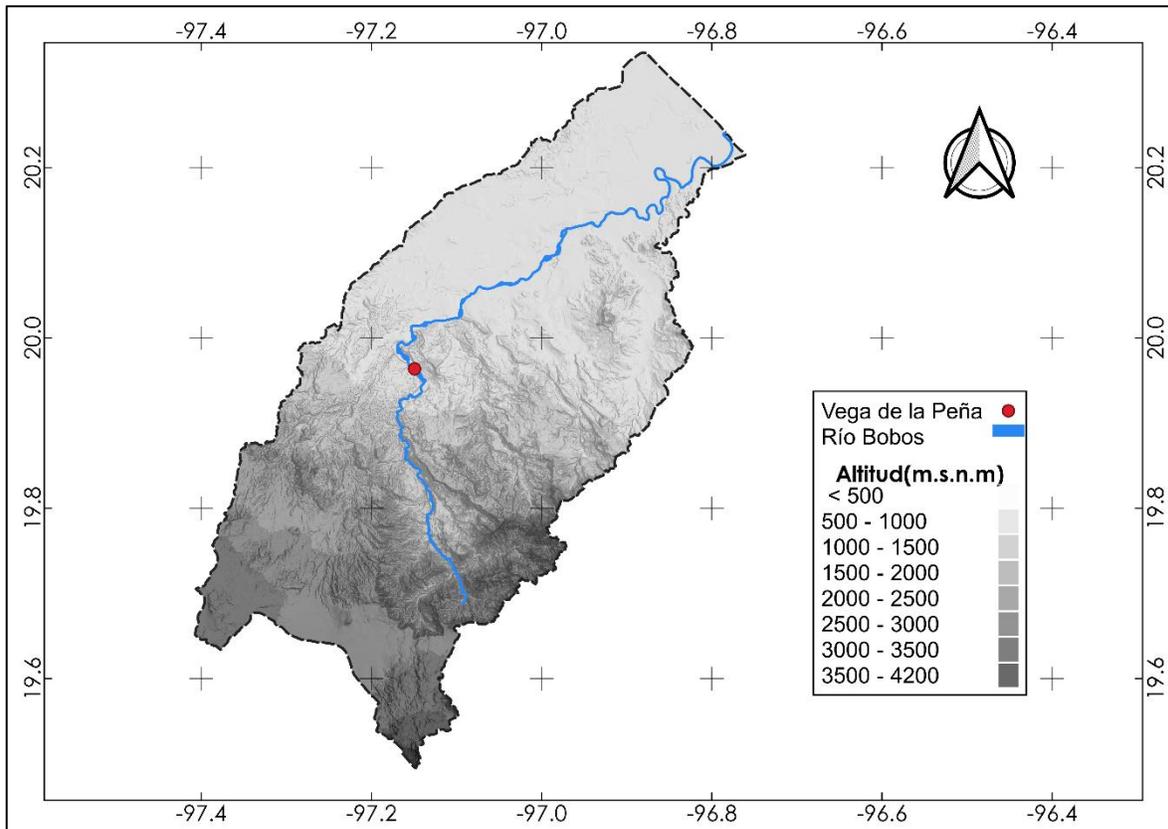


Figura 23 Variación de altitudes

Para cuantificar la distribución de altitudes se realizó la curva hipsométrica (Ver Figura 24). También se calculó la elevación media, y resultó ser cercana a 1000 m.s.n.m. mientras que, la elevación mediana es igual a 500 m.s.n.m. La diferencia entre ambos valores es que el primero de ellos corresponde a un promedio de las altitudes tomando en cuenta el área ocupada, mientras que la mediana es la

elevación “para la cual el 50% del área de la cuenca, se encuentra por debajo de la misma” (Trujillo, Barroso, & Escobar, 2010), es decir, la mitad del área de la cuenca corresponde a elevaciones menores a los 500 m.s.n.m., además de ello la curva nos indica que la cuenca está en un periodo de vejez, donde el proceso predominante será el de sedimentación

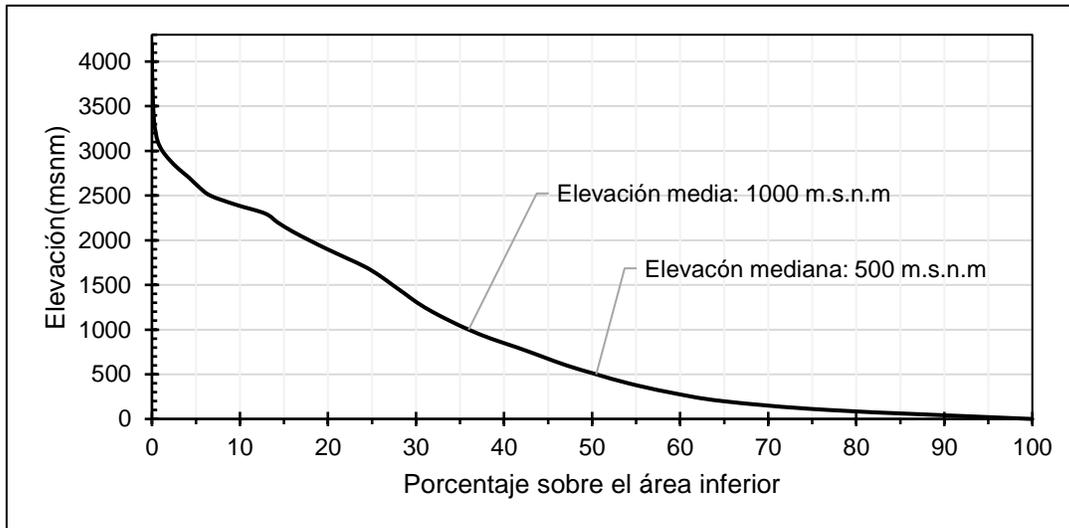
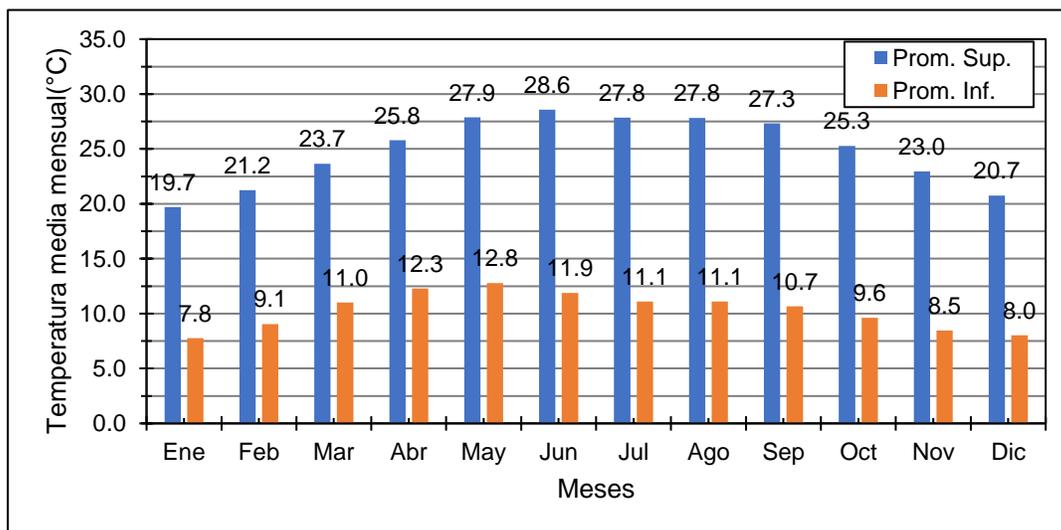


Figura 24 Curva hipsométrica

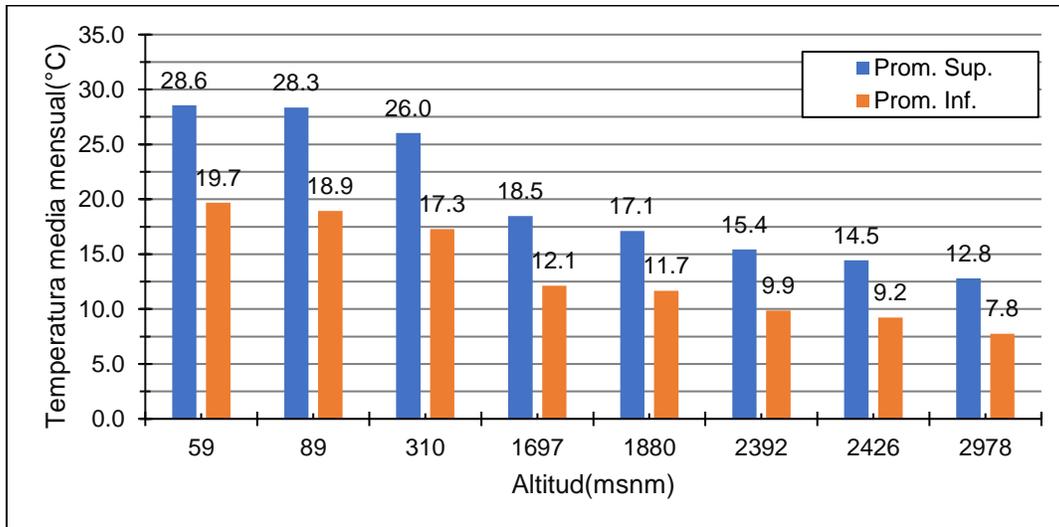
5.2.2 Temperatura

De acuerdo con el registro históricos de series que varían de 29 a 57 años, se obtuvieron las gráficas que nos muestran la variación altitudinal y temporal de la temperatura promedio en la cuenca. En el caso de la variación temporal (Ver Gráfica 1), se muestran dos barras, una indica el valor promedio máximo registrado en cualquiera de las 8 estaciones y otra el promedio mínimo, correspondientes a un mes. Se observa que a partir del mes de enero la temperatura promedio aumenta gradualmente hasta llegar a los 28.6°C en el mes de junio y posteriormente



Gráfica 1 Variación temporal de la temperatura promedio

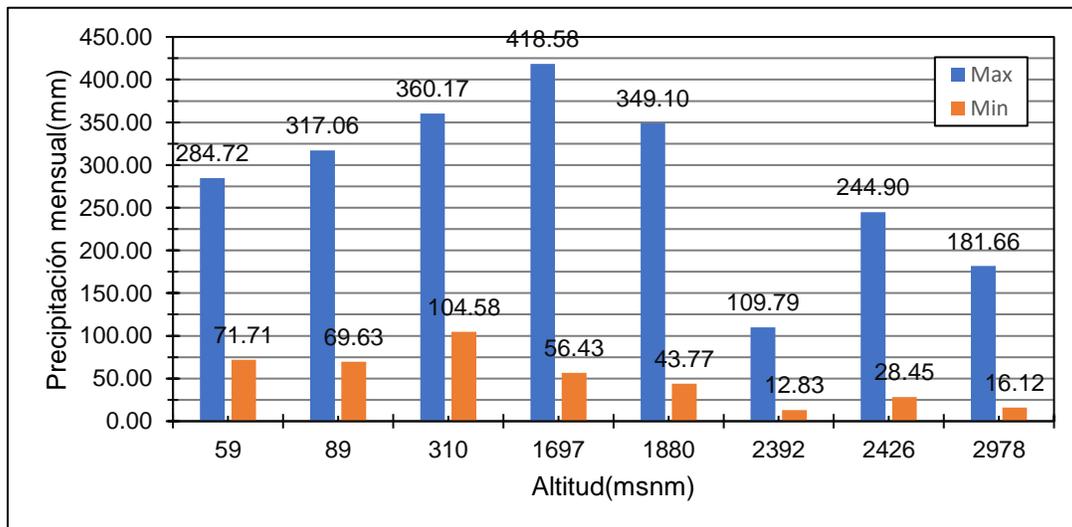
desciende. En la Gráfica 2, se observa la variación altitudinal de la temperatura, los promedios más altos se encuentran en una cercanía al mar, comprendidos en altitudes menores a los 310 msnm. Los promedios menores se registran en altitudes mayores a los 1600 msnm.



Gráfica 2 Variación altitudinal de la temperatura promedio

5.2.3 Lluvia

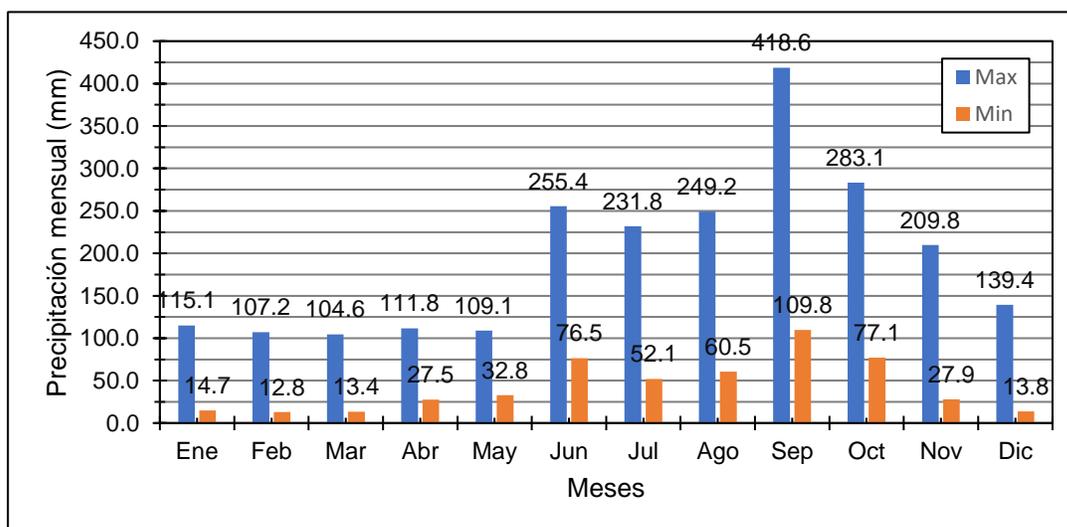
Por la cuenca escurren 2184.96 hm³ en promedio cada año (D.O.F, 2010). Los rangos de precipitación media anual están en el orden de 500 mm a 3500 mm. Por medio del método de las isoyetas se calculó la precipitación media anual resultando en 1785.38 mm.



Gráfica 3 Variación altitudinal de la precipitación mensual

En los meses de enero a abril y octubre a diciembre se presentan en promedio de 0 a 2 días con tormenta, mientras que en los meses de mayo a septiembre el

promedio es de 7 a 9 días con lluvia, por otra parte, en dichos meses se han registrado como máximo un rango de 20 a 28 días, el último valor mencionado correspondiente al mes de agosto. Respecto a los valores de precipitación mensual, los promedios máximos registrados en cada estación oscilan entre los 115.11 a 418.58 mm de lluvia(Ver Gráfica 4) y de acuerdo con ello, en los meses de junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre son los meses en los que se registra una mayor cantidad de lluvia al mes, siendo de mayor relevancia el mes de septiembre, donde el promedio llega a un valor de 418.58 mm, correspondiente a una altitud de 1697 msnm(Ver Gráfica 3)



Gráfica 4 Variación temporal de la precipitación mensual

5.2.4 Hidrografía

El cauce principal (Ver Figura 25) inicia en las cercanías del volcán Perote, dónde es conocido como río Valsequillo. Trece kilómetros aguas abajo cambia su nombre a río Puerco, el cual a lo largo de su trayecto recibe afluentes del río Churrero y arroyo el Nenecuilco. Diez kilómetros aguas abajo, descarga sus aguas junto con el arroyo los Romerillos en el río Las Minas (17), el cual a su vez, intercepta de una manera casi perpendicular al río Bobos, que nace de la unión del arroyo el Valiente y río Santa Rita.

El río Bobos sigue su trayecto hacia el golfo, recibiendo aguas del lado izquierdo del río de Limontita(15), subsecuentemente del río Ixtoteno(1) y Apaxteno(8), aproximadamente 7 km después, en una intercepción recibe efluentes del río Las Truchas(9) por la derecha y por la izquierda del río de la Barranca(2); el río Bobos sigue un trayecto hacia el noroeste recibiendo aguas del arroyo Tiopana(18), río Tazolapa(3), y río Cascajal(16), punto a partir del cual comienza a hacer una curva con dirección al noreste, recibe efluentes del arroyo Guapototes(7) por la derecha, el río Axoxohuil(14) por la izquierda. Algunos ríos importantes de los que recibe efluentes son el río San Pedro (26), río dos arroyos (23), río Kilate(22), río María de

la Torre(21) y río Chapachapa(25), al recibir aguas de éste último, cambia su nombre a Río Nautla, mismo que mantiene hasta su desembocadura en el Golfo de México. La zona de Vega de la Peña se encuentra entre los afluentes Guapotes (7) y río Axoxohuil(14).

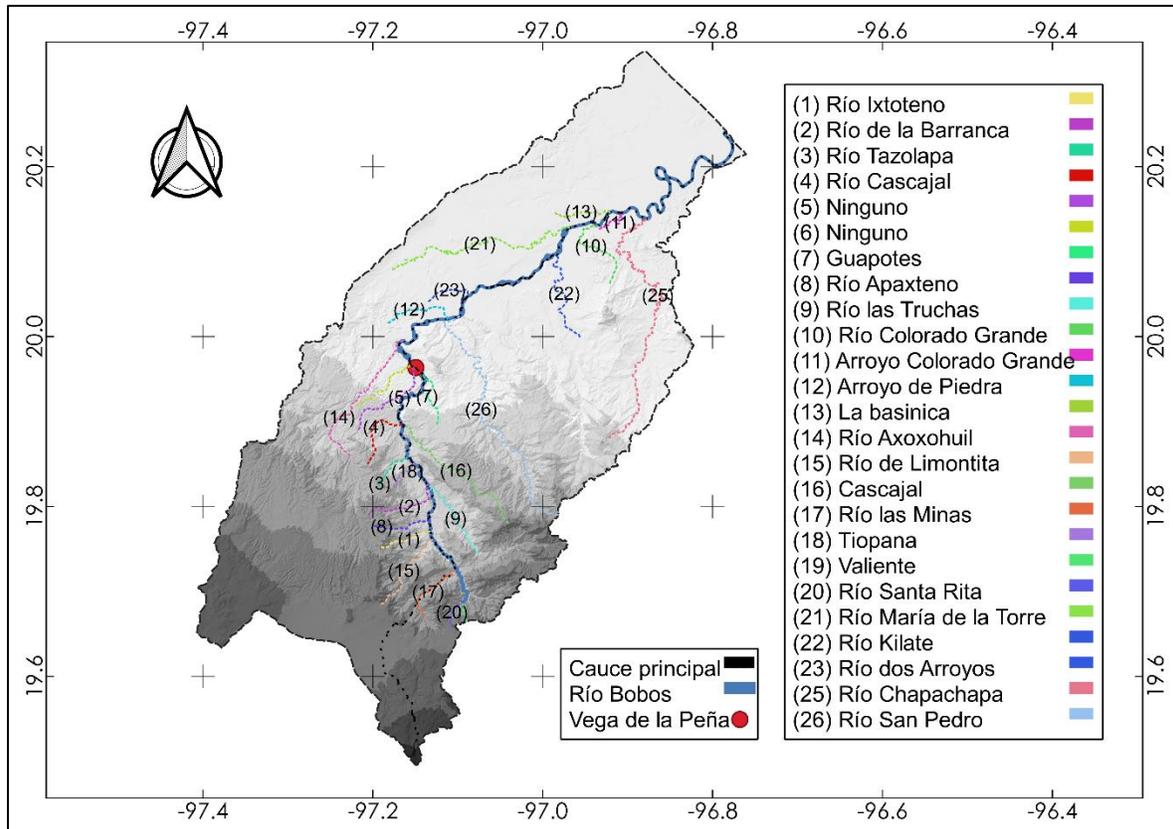


Figura 25 Río Bobos, cauce principal y afluentes tributarios

La cuenca Nautla contiene 3 subcuencas: Río María de la Torre, Río Nautla y Río Bobos, las cuales abarcan un área de 294.62 km², 719.93 km² y 1789.85 km² respectivamente, siendo la cuenca del Río Bobos la que tiene mayor capacidad de drenaje, que junto con la cuenca Río María de la Torre, drenan a la cuenca del Río Nautla.

Por otra parte, la densidad de drenaje para la cuenca en conjunto corresponde a un valor de 1.68, mientras que la densidad relativa por subcuenca de acuerdo con el orden ya mencionado resulta en 1.77, 1.31 y 1.8, teniendo la cuenca del Río Bobos un valor ligeramente mayor al de la cuenca María de la Torre. Entre mayor densidad tenga una cuenca, teóricamente evacuará el agua en menos tiempo (aunque se deben tomar en cuenta otros parámetros, como tipo suelo, existencia de vegetación, entre otros), valores próximos a 0.5 indican un drenaje ineficiente, mientras que valores cercanos a 3.5 indican que la red de drenaje es eficiente, lo que provocará un ascenso rápido del nivel de agua y con ello una mayor capacidad de erosión (Trujillo, Barroso, & Escobar, 2010). Con respecto a la forma de la red de drenaje,

ésta es dendrítica, ya que se forma una red ramificada que se une al cauce principal (Ver Figura 26).

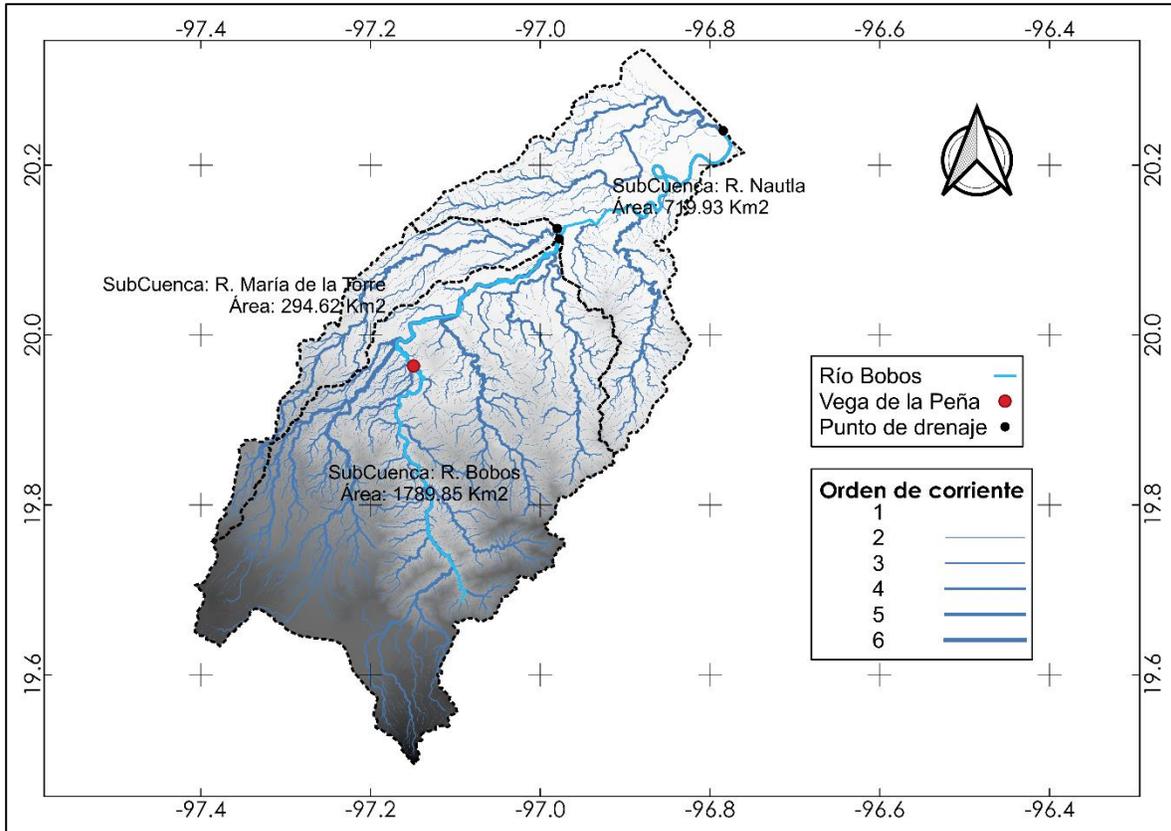


Figura 26 Drenaje de la cuenca

Por último, en la desembocadura se forma un estuario, que se desarrolla paralelo a una barra litoral.

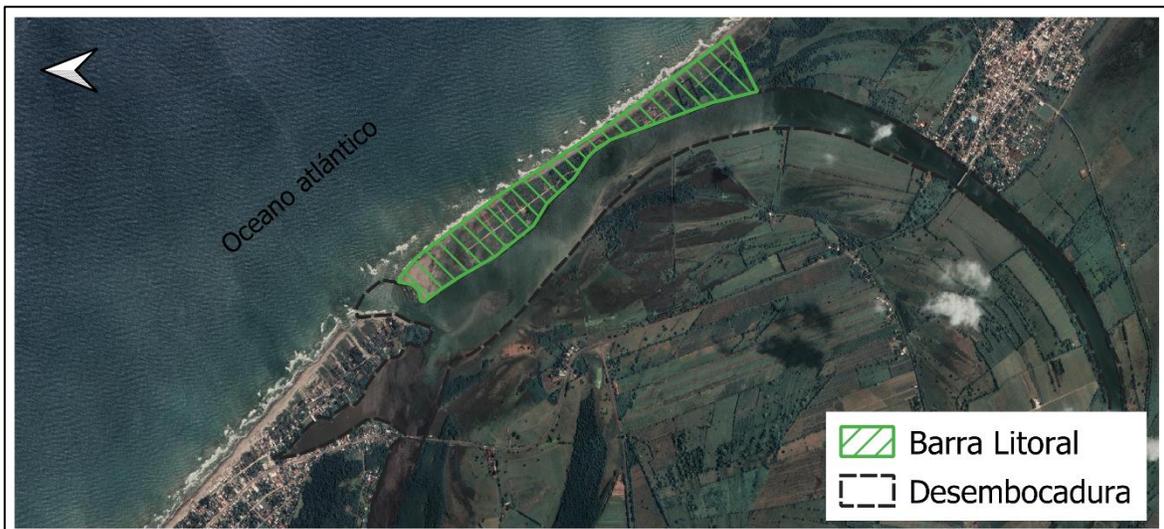


Figura 27 Desembocadura de la cuenca Nautla.

5.2.5 Uso de suelo

Se cuantificó el cambio en el uso de suelo con base en la información disponible en INEGI para los años 1984 y 1997. El primero de ellos corresponde al año con datos más antiguos, mientras que 1997 es el año con información más próxima a 1995. El pastizal cultivado hace referencia a especies inducidas por el hombre e incluye pastos de diversas partes del mundo, que normalmente son usados con fines ganaderos. Respecto al pastizal inducido, corresponde a una fase de sucesión normal que concluye con la aparición de un bosque o matorral, aunque también aparece en áreas donde hubo desmonte de vegetación, en áreas agrícolas abandonadas y áreas donde se producen incendios con frecuencia.

Por otra parte, al calcular el área de ocupación, se encontró que la mayoría de la cuenca en 1984 se encontraba ocupada por pastizal cultivado, lo que para 1997 se redujo, dando pie a que el área fuera utilizada para la agricultura temporal (Ver Figura 28). También es posible observar el crecimiento urbano. Cerca del 80% del área de la cuenca se destinaba en 1984 a actividades agrícolas, y en las partes altas se observa que entre 1984 y 1997 se perdieron áreas de bosque de pino, que se destinaron a la agricultura (Ver Tabla 4).

En la actualidad algunos cultivos perennes de la zona son naranja, limón, café y cereza, los primeros dos cultivados principalmente en el municipio de Atzalan y

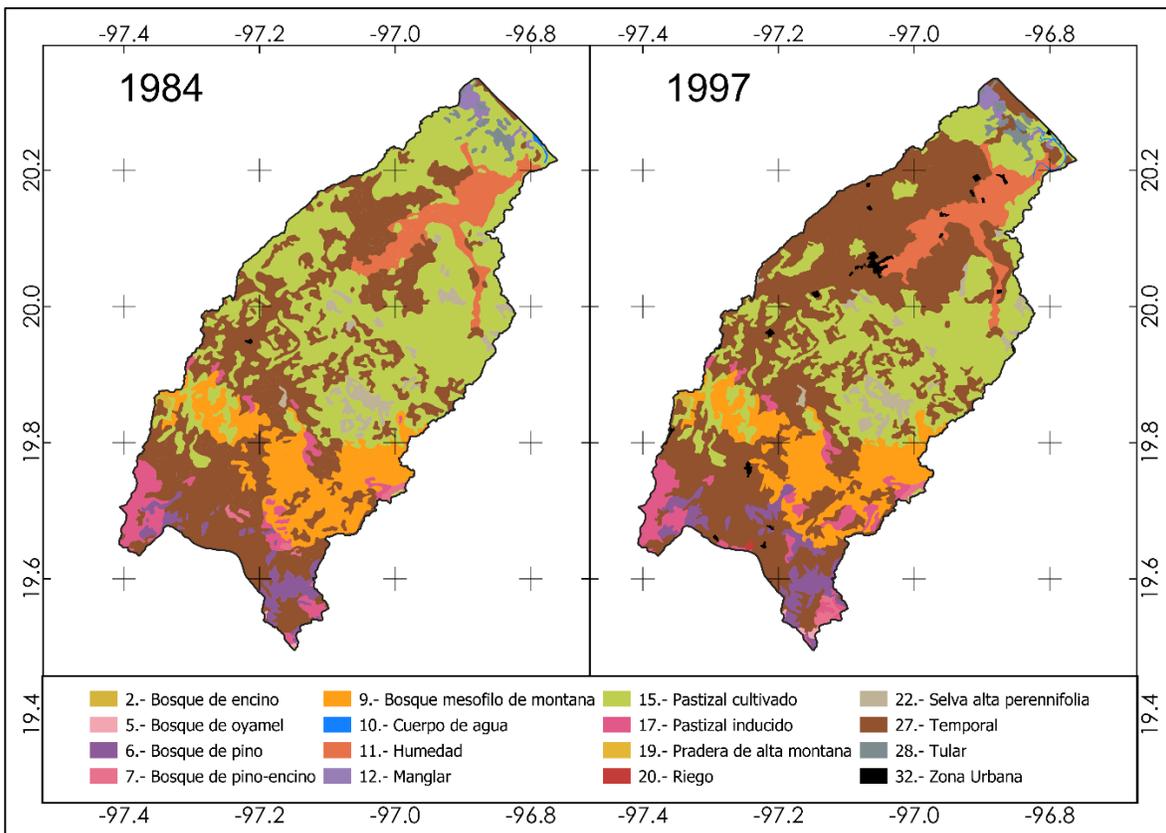


Figura 28 Uso de suelo de la cuenca en 1984 y 1997

Martínez de la Torre, y el último en Misantla, que también es productor de maíz de grano; algunos cultivos cíclicos, estos son maíz de grano, papa y frijol, son producidos principalmente en Altotonga, Atzalan y Perote.

Tabla 4. Cambio en el uso de suelo de la cuenca

Uso de suelo	1984 Área(km ²)	1997 Área(km ²)	Variación(km ²)	Variación (%)
Pastizal cultivado	1049.10	746.71	0.71	-29
*Agricultura	1159.77	1422.32	1.23	+23
Bosque	315.24	303.12	0.96	-4
Pastizal inducido	100.50	110.37	1.10	+10
Selva alta perennifolia	68.59	58.24	0.85	-15
Tular	21.87	20.13	0.92	-8
Manglar	16.51	14.03	0.85	-15
Zona Urbana	0.71	22.19	31.06	>100
Pradera de alta montana	0.21	0.09	0.45	-55

Nota. *Incluye agricultura temporal, de humedad y riego. Se omite el área ocupada por cuerpos de agua

5.2.6 Interpretación de los datos compilados

La cuenca Nautla tiene un área de 2804.95 km², y está compuesta a su vez por 3 subcuencas: Río Bobos con 1789.85 km²; Río Nautla con 719.93 km²; y Río María de la Torre con 294.62 km². Posee una longitud de 92.05 km y un ancho de 30.47 km, y tiene las siguientes características:

- Forma: La cuenca entra en la categoría de cuenca alargada por tener un factor de forma (Hf) de 0.33 que está relacionado con una baja susceptibilidad a las avenidas, y un coeficiente de Gravelius(Cg) igual a 1.63, por lo que entra en la clasificación de cuenca oval oblonga a rectangular oblonga, que en este caso se asemeja mejor a la forma rectangular oblonga.
- Drenaje: El cauce principal tiene una longitud cercana a los 117 Km y está conformado en su mayoría por el Río Bobos, mientras que la red de drenaje tiene una forma dendrítica, con una densidad de 1.68 km/km², que es menor a lo que se le considera una red de drenaje eficiente con un valor de 3.5 km/km², pero mucho mayor al valor de una cuenca pobremente drenada que es 0.5 km² (Trujillo, Barroso, & Escobar, 2010)
- Pendiente y altitud: La cuenca tiene una pendiente promedio del 21.86%, mientras que la altitud varía de 4200 m.s.n.m. a un nivel base, ubicado en la salida al mar, la altitud mediana es cercana a los 500 m.s.n.m., es decir al menos el 50% del área total de la cuenca corresponde a elevaciones menores a este valor. Retomando la curva hipsométrica de la Figura 24 ésta corresponde a una cuenca en etapa de vejez, que tendría como proceso dominante la sedimentación.

- Temperatura: En los gráficos Gráfica 1 y Gráfica 2, se observa que durante los meses de abril a octubre se alcanza un promedio mayor a los 25 °C y puede variar hasta los 9.6 °C, mientras que en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero los promedios menores son menores a los 10 °C y llegan hasta los 21.2 °C. En cuanto a la variación altitudinal de la temperatura, es claro que rumbo a la desembocadura la temperatura media aumenta, alcanzando a nivel base una temperatura promedio de 28.6 °C, mientras que en las mayores altitudes solo 12.8 °C.
- Precipitación: En la precipitación mensual se han registrados láminas mayores a los 200 mm durante los meses de junio a noviembre, registrando en septiembre el mayor valor de 418.16 mm a una altitud cercana a los 1697 m.s.n.m. Considerando la elevación no se observa ninguna tendencia.
- Uso de suelo: En el periodo analizado de 1984 a 1997 se observa la pérdida de bosque en la parte alta, y una expansión de zonas urbanas, además de cambios en el uso de suelo, de pastizal cultivado a agricultura temporal, ambas actividades antrópicas.

5.3 Río Bobos

El río Bobos nace en medio de un relieve escarpado cerca de los 1400 m.s.n.m. Tiene una longitud total de 117 Km, y en él encontramos las tres formas en planta de Figura 2(Ver pág. 10)es decir, un tramo alto que corresponde a un río encañado cuya topografía restringe su movimiento lateral, que al salir de la zona de montaña se trenza y finaliza su recorrido formando grandes meandros.

Para la caracterización de los tramos el río se empleó un análisis visual cualitativo, con el cual, se identificaron zonas donde el río Bobos transcurría por un único canal y otras donde se bifurcaba (Figura 29); y en base a ello, se realizaron medidas cuantitativas utilizando el índice de sinuosidad y el índice de bifurcación descritos en el punto 3.2.2(Ver pág. 9). El primer tramo identificado, se ubica en la parte alta, entre las altitudes de 1400 a 200 m.s.n.m., y corresponde a un cauce que transcurre por un único canal, que está confinado por los laterales y en el cual no se observan bifurcaciones. Este tramo tiene una longitud de 38 km y sinuosidad de 1.16, que entra en el rango de un río poco sinuoso (Ver Figura 2, página 10). Posteriormente,

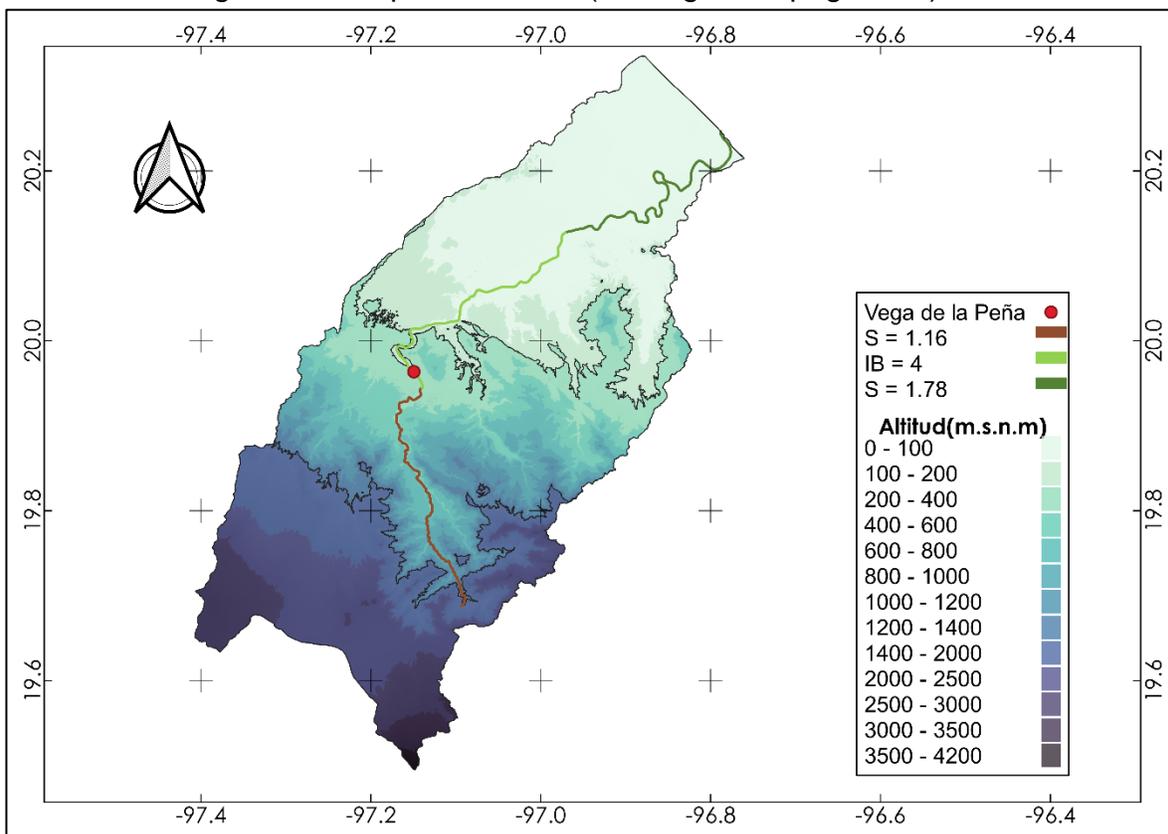


Figura 29 Río Bobos dividido en tres zonas. Río encañado(café), río trezado (verde claro) y río meandriforme (verde oscuro). Para las zonas donde el cauce transcurre por único canal se emplea el índice de sinuosidad (Río meandriforme y encañado) y donde se bifurca se emplea el número de canales activos (río trezado).

aguas abajo el valle comienza a abrirse, y a pie de montaña, el río cambia su forma en planta, y se pueden observar diversas bifurcaciones alrededor de islas, en algunos casos el cauce llega a trenzarse, hasta formar cuatro canales. Este tramo tiene una longitud cercana a los 36 km, y se ubica entre los 200 m.s.n.m. y el nivel base. El último tramo tiene mayor longitud, la cual es cercana 103 km esto se debe a que el río transcurre en una zona de llanura donde existen pendientes bajas que propician la formación de grandes meandros. Conforme el río se acerca a la desembocadura la curvatura de los meandros aumenta y se observan depósitos de sedimento en la parte cóncavas. El aumento de la curvatura se ve reflejado en el índice de sinuosidad igual a 1.78, valor que entra en el rango de los ríos meandriiformes que tienen como característica principal una alta sinuosidad.

De una manera general, en la parte alta existen mayores pendientes, y el río se desarrolla por un único cauce, por lo que se clasifica como recto o de baja sinuosidad, posteriormente las pendientes disminuyen, provocando que el cauce se bifurque, el río en este punto se asemeja mejor a las características de río trenzado, y al entrar a la zona de llanura donde las pendientes son muy bajas, y el río retoma un único canal, para formar meandros. Vega de la Peña se encuentra a la salida de la zona montañosa, dónde el cauce se bifurca hasta en 4 canales (Ver Figura 29 y Figura 30).

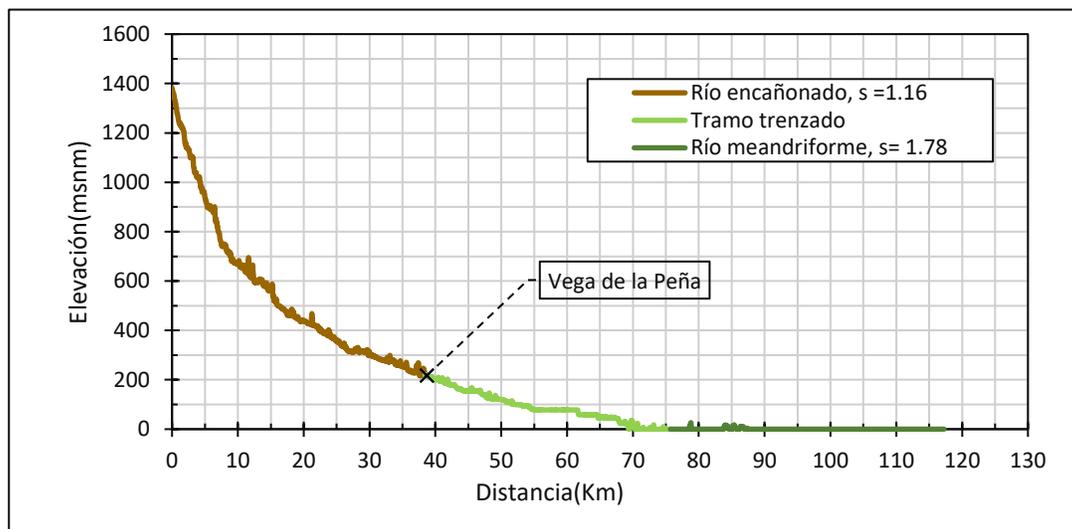


Figura 30 Perfil del Río Bobos a partir de un MDE resolución 15 m (CEM, 2013). Se observa que el tramo donde el río está encañado tiene una mayor inclinación o pendiente, y conforme se acerca a la desembocadura la pendiente disminuye hasta quedar en un terreno plano

6 Descripción del evento de 1995 que provocó daños severos en la zona arqueológica

En el presente capítulo se describen los fenómenos meteorológicos que tienen relación con las crecidas del río Bobos, tales como tormentas tropicales y huracanes de diversas categorías. Se mencionan también los valores de lluvia típicos registrados durante dichos eventos, para posteriormente hacer una comparación entre las tormentas denominadas Janet de septiembre de 1955 y Roxanne de octubre de 1995, mostrando las trayectorias que siguieron y los daños que ocasionaron, tanto en Vega de la Peña como en municipios cercanos

6.1 Fenómenos naturales asociados a crecidas

Un ciclón tropical es un fenómeno meteorológico de gran escala, el cual nace en aguas tropicales cuando el mar alcanza una temperatura mayor a los 26°C. Se clasifican de acuerdo con la velocidad de la corriente de aire que generan, tal y como se muestra en la Tabla 5 (CENAPRED, 2014).

Tabla 5. Clasificación de ciclones

Fenómeno	Velocidad del viento (km/hr)
Depresión tropical	< 63
Tormenta tropical	63-118
Huracán Categoría 1	118-152
Huracán Categoría 2	153-178
Huracán Categoría 3	179-209
Huracán Categoría 4	210-250
Huracán Categoría 5	> 250

Datos obtenidos de (CENAPRED, 2014)

Los ciclones que tienen influencia en la zona de estudio se originan en la cuenca tropical de ciclones del Atlántico, que incluye al océano con el mismo nombre, Mar Caribe y el Golfo de México, siendo la zona del Atlántico norte la de mayor actividad (SEMAR, 2001). Por ello el estado de Veracruz, que alberga el río estudiado se

Tabla 6. Fenómenos naturales que afectaron la zona de estudio

Año	Nombre	Periodo	Categoría	Vel. viento (km/hr)
1954	Florence	10-12 sept.	Tormenta tropical	101.86
1955	Janet	21-30 sept.	Huracán 5	277.8
1966	Hallie	20-21 sept.	Tormenta tropical	83.34
1978	Bess	05-08 ag.	Tormenta tropical	83.34
1988	Debby	31 ag.-08 sept.	Huracán 1	120.38
1995	Roxanne	10-20 oct.	Huracán 3	185.2
1995	Opal	27 sept. -06 oct.	Huracán 4	240.76

Fuente. Elaboración a partir de datos (CENAPRED, 2019)

encuentra expuesta al impacto de ciclones tropicales que propician un aumento en la precipitación durante los meses de junio a octubre.

Para fines de este trabajo, se recabó información correspondiente a eventos meteorológicos y gastos en el periodo de 1954 a 1995, para puntualizar la relación entre ambas variables. En la Tabla 6 se muestra la lista de eventos, que han causado inundaciones en zonas cercanas a Vega de la Peña (CENAPRED, 2019), mientras que en la Tabla 7 se muestran los gastos máximos anuales asociados con los años de ocurrencia de fenómenos meteorológicos, en la estación hidrométrica de Martínez de la Torre, que es la más cercana a la zona de estudio. La mayoría de estos fenómenos están asociados al gasto máximo anual ($Q_{m\acute{a}x}$), a excepción del fenómeno Bess el cual registró un $Q_{m\acute{a}x}$ distinto a la fecha en que se presentó este fenómeno.

Tabla 7. Relación de eventos y gastos anuales máximos

Año	Fenómeno	Periodo	$Q_{m\acute{a}x}(m^3/s)$	Registro	*Nivel(m)
1954	Florence	10-12 sept.	2240.00	12-sep-54	5.1
1955	Janet	21-30 sept.	4540.00	29-sep-55	6.4
1966	Hallie	20-21 sept.	1382.00	21-sep-66	4.8
1978	Bess	05-08 ag.	187.50	08-ago-78	-
1988	Debby	31 ag.-08 sept.	1692.19	05-sep-88	7.05
1995	Roxanne	10-20 oct.	3730.00	20-oct-95	8.25

Fuente: Elaboración propia. El nivel hace referencia al tirante alcanzado en la estación Martínez de la Torre.

6.2 Huracán Janet, fenómeno de 1955

El año de 1955 fue crítico para el estado de Veracruz, ya que se presentaron 2 huracanes en el mismo mes antes que Janet. El primero de ellos, Gladys de categoría 1, afectó la zona entre el 4 y 6 de septiembre. Posteriormente, Hilda causó afectaciones del 10 al 30 de septiembre (Ramírez, 2006). Es importante mencionar que Janet es considerado uno de los 10 huracanes más intensos de la cuenca del océano Atlántico (CENAPRED, 2006).

Janet se formó como tormenta tropical el 21 de septiembre en el océano Atlántico (Ver trayectoria en la Figura 31) alcanzó una velocidad de 92.6 km/hr y se dirigió hacia el noroeste, para el 22 de septiembre alcanza la categoría de Huracán grado 1, con vientos de 129.64 km/hr de velocidad. Las condiciones cambiaron en días subsecuentes, alcanzando el 23 de septiembre, cerca de las costas de Venezuela alcanzó la categoría de huracán grado 2 con una velocidad de 166.68 km/hr y para el 24 del mismo mes, se debilitó como tormenta tropical entrando al Mar Caribe, el día 25 de septiembre. Cerca de las costas Colombia, entre el límite con Venezuela, el fenómeno alcanzaría una mayor velocidad para convertirse nuevamente en huracán categoría 1. El día 26 de septiembre alcanzó el grado 3 en medio del mar

Caribe, y el día 27 cerca de Honduras y Guatemala alcanzó la categoría 4 con una velocidad de 222.24 km/hr. El día 28 entró al territorio mexicano por las costas de Quintana Roo como un huracán categoría 5, alcanzando una velocidad máxima del viento de 277.8 km/hr. Atravesó el territorio mexicano por las localidades más pobladas, una de ellas Chetumal, donde causó el deceso de por lo menos 74 personas y la destrucción de varias casas (Alarcón, 2019). Janet atravesó parte de Campeche como huracán categoría 5, al salir por sus costas se debilitó a categoría 3. Después siguió la misma trayectoria hacia al noroeste y en su camino se debilitó a huracán categoría 2, condición que mantendría hasta tocar nuevamente tierra el 29 de septiembre por las costas de Veracruz con una velocidad de viento máxima de 175.94 km/hr. Para el día 30 se debilitaría hasta catalogarse como una tormenta tropical, la cual tuvo como área de influencia Hidalgo y Querétaro. Janet es recordada por las numerosas muertas ocasionadas y las pérdidas materiales, principalmente en Campeche y Quintana Roo, ya que en Chetumal llegó a 97 muertos, y zonas como Xcalak y Bakalar quedaron totalmente destruidas (Alarcón, 2019)

En Veracruz, los impactos provocados por Janet se sumaron a las afectaciones de los huracanes Gladys e Hilda que como se mencionó, aparecieron a inicios de mes. Las lluvias ocasionadas por Janet causaron que diversos ríos desbordaran, como el

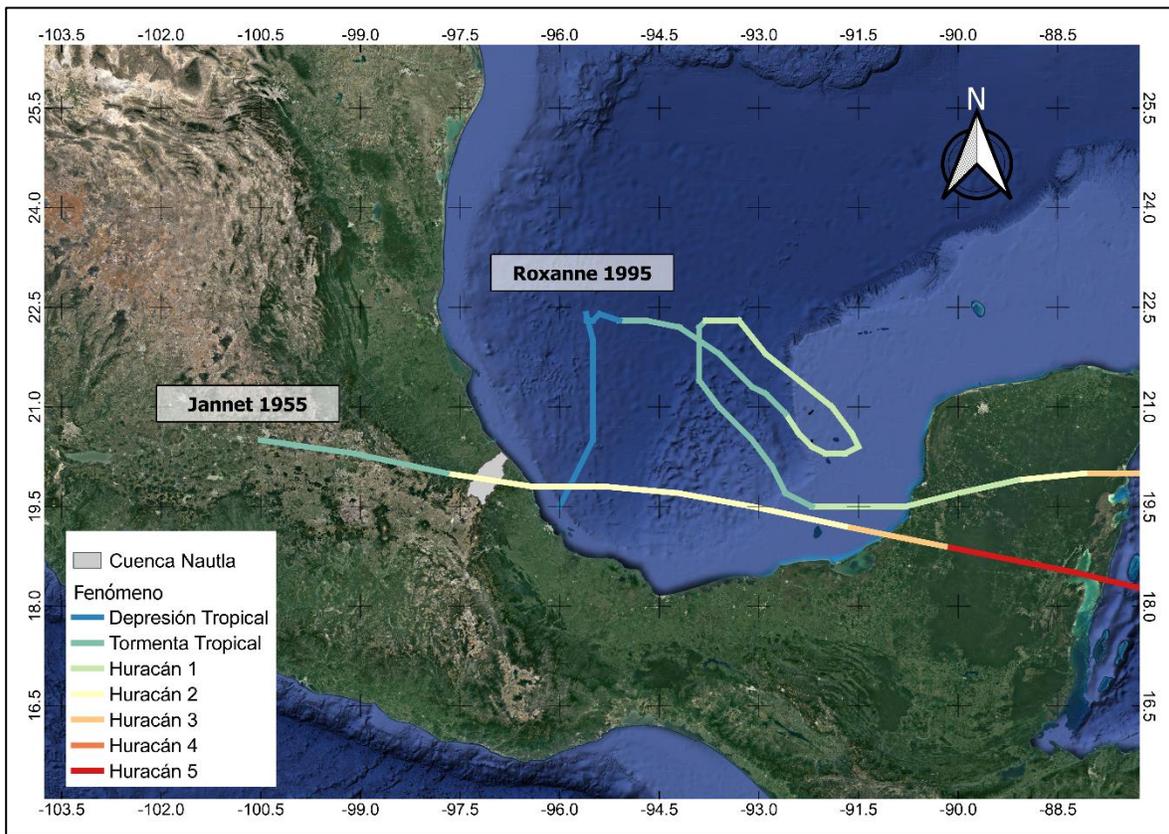


Figura 31 Trayectoria de Janet y Roxanne

Misantla ubicado en la cuenca vecina. En la cuenca Nautla hubo pérdidas humanas, deslaves e inundaciones, ya que el río alcanzó un gasto de pico de 4540.00 m³/s, en la estación en Martínez de la Torre. Uno de los municipios más afectados fue Martínez de la Torre, ya que cuando el río desbordó arrastró a un número considerable de personas, así como docenas de casas e inundó la parte baja del pueblo, que además se encontraba incomunicada, ya que los vientos asociados a Janet lograron derribar postes telegráficos y telefónicos (EL INFORMADOR, 1955)

6.3 Huracán Roxanne, fenómeno de 1995

El año de 1995 fue particular en todo el país debido a la presencia de 32 ciclones, de los cuales 21 se presentaron en el océano Atlántico, por lo que se rebasó por mucho el promedio anual de esa época, que era de 9 ciclones para el Atlántico y de 23 para todo el territorio (CENAPRED, 1996). Dos eventos en especial provocaron daños en conjunto, Opal y Roxanne.

Roxanne se considera como un ciclón errático, debido a su comportamiento poco común (Ver trayectoria en la Figura 31). Nació como una depresión tropical que siguió una trayectoria curva hacia el norte, con dirección a la Península de Yucatán, convirtiéndose en una tormenta tropical el 9 de octubre. Posteriormente pasó a ser un Huracán de categoría 1 por la mañana del día 10 del mismo mes, y horas después adquirió la categoría 2 al alcanzar vientos con una velocidad de 175.94 km/hr. Cerca de las costas de Quintana Roo alcanzó la categoría 3 con una velocidad de viento de 185 km/hr e ingresó al territorio por Tulum en Quintana Roo causando la pérdida de varias hectáreas de selva.

Siguió su trayectoria hacia el oeste, afectó a Yucatán y salió de tierra por Campeche, donde causó graves daños, entre ellas se encuentran inundaciones y la ruptura del acueducto del sistema de abastecimiento de Ciudad del Carmen (Bitrán, 2001). El huracán Roxanne tiene como peculiaridad que retornó parcialmente a las costas de Campeche y subsecuentemente retomó su trayectoria hacia el noroeste hasta acercarse a la costa de Yucatán. El 20 de octubre el huracán se debilitó a depresión tropical. En este punto se encontraba a 225 kilómetros del puerto de Tuxpam(Veracruz) y al interactuar con un frente frío proveniente del Norte provocó que se desencadenaran lluvias con una lámina máxima de 312 mm. Algunas afectaciones provocadas por Roxanne fueron a poblaciones costeras debido a los fuertes oleajes, algunas de ellas fueron (CENAPRED, 1996):

- Coatzacoalcos: Destrucción parcial del malecón y viviendas inundadas en la zona ribereña
- Alvarado: Se evacuaron cerca de 430 personas, cuyas viviendas estaban expuestas al oleaje
- Boca del Río: Fracturación de muro de contención del boulevard Ávila Camacho

- Puerto de Veracruz: Destrucción del muelle de pescadores, daños a las cimentaciones de playa en el área restaurantera de la Barra de Chachalacas
- Diversos municipios dentro de la cuenca se vieron afectados por inundaciones, debidas a las crecidas del río Bobos, como Tlacopayan, Martínez de la Torre, Nautla, Atzalan y Misantla que fue afectada por las crecidas del río Misantla cuyo curso se encuentra fuera de la cuenca (CENAPRED, 1996). Algunas afectaciones fueron:
 - Martínez de la Torre: Resultaron afectadas seis colonias, además se registró un tirante de hasta 3 m
 - Tlapacoyan: Las inundaciones afectaron a 3 comunidades y se tuvo que evacuar a por lo menos unas mil personas, sumado a ello el agua provocó afectaciones en tramos carreteros
 - Misantla: Se vio afectada por el curso del río Misantla que se encuentra a las afueras de la cuenca, y se afectaron 158 casas
 - Nautla: Se vio afectada por las crecidas del río Bobos (Nautla en ese tramo), fueron afectadas 8 casas.

6.4 Comparación entre Janet y Roxanne

Las afectaciones más severas a la zona arqueológica Vega de la Peña, fueron resultado de la crecida provocada por las lluvias asociadas al Huracán Roxanne, que como se puede observar en la Tabla 7 causó un gasto máximo, cercano al registrado en 1955. En cuanto a la precipitación máxima en 24 hr, los valores alcanzados fueron los siguientes:

Tabla 8. Relación de eventos y precipitación

Año	Fenómeno	Periodo	P _{máx24h}	Registro
1954	Florence	10-12 sept.	203.5	11/09/1954
1955	Janet	21-30 sept.	324	29/09/1955
1966	Hallie	20-21 sept.	220	20/09/1966
1978	Bess	05-08 ag.	102	07/08/1978
1988	Debby	31 ag.-08 sept.	174	04/09/1988
1995	Opal	27 sept. -06 oct.	37.6	06/10/1995
1995	Roxanne	10-20 oct.	312	20/10/1995

Fuente. Elaboración propia

Los fenómenos meteorológicos más representativos en la cuenca son de 1955 y 1995, los cuales tienen una precipitación máxima similar. Estos valores se registraron en estaciones cercanas una con la otra, ubicadas a una altitud de 1880 m.s.n.m. y 1745 m.s.n.m. respectivamente, y se encuentran a una distancia aproximada de 23 km del sitio arqueológico. Consultando el registro del resto de

estaciones, solo tres de ellas guardan datos para ambos años, que se comparan en la Tabla 9.

Las estaciones 30074 y 30089 se ubican en una parte alta de la cuenca, mientras que la 30102 en la parte baja, e indican que las lluvias del año 55 registraron láminas mayores en las partes altas, a diferencia del 95 que aparentemente tiene un registro más homogéneo. Consultado el resto de las estaciones, éstas muestran que en los años 55 y 95 existieron láminas mayores a 300 mm en partes altas, mientras que las estaciones más cercanas a la desembocadura registraron láminas menores a 200 mm, por lo que para ambos eventos las lluvias se concentraron en zonas altas, teniendo registros similares. Pese a esto, no se cuenta con información referente a intensidad para validar que las tormentas en ambos eventos fueran similares

Tabla 9. Precipitación máxima en 24 hr en mm

Estación	30074	30089	30102
29/09/1955	324	305	131.5
20/10/1995	275	271.2	296.9

Elaboración propia

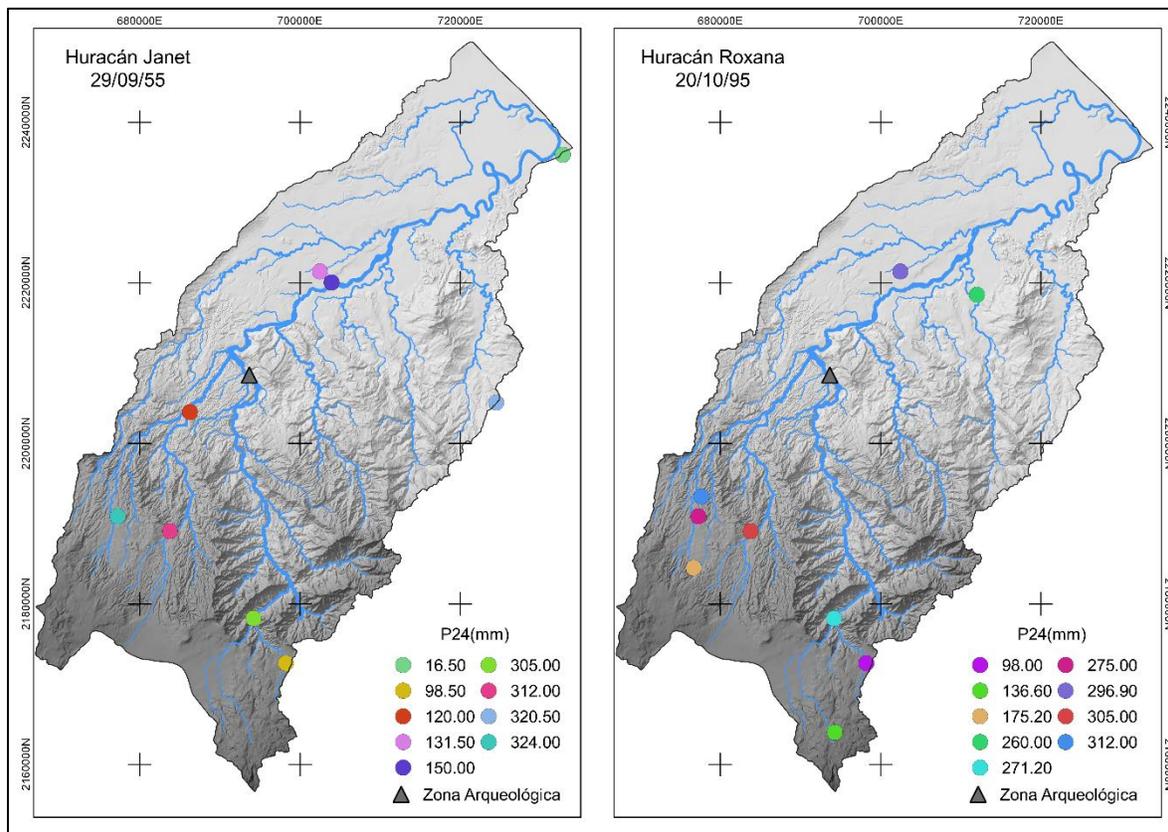
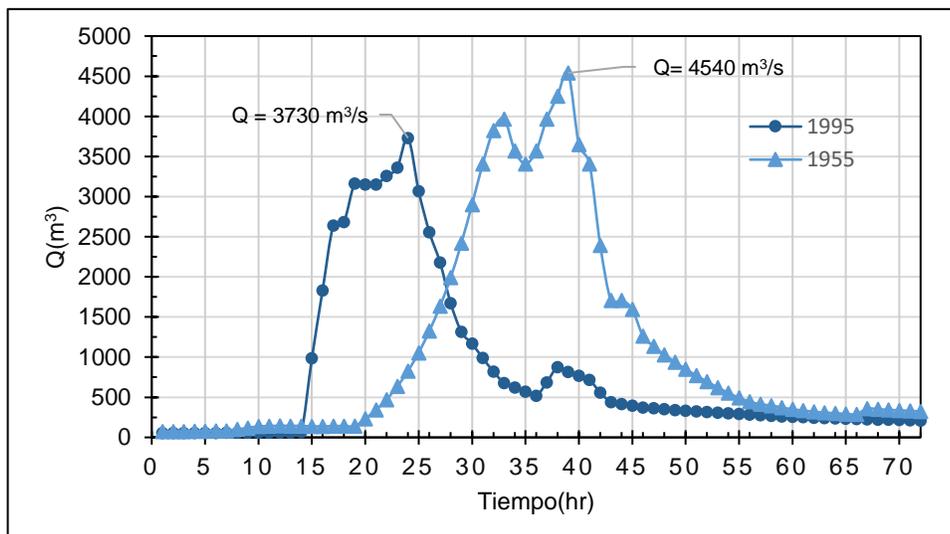


Figura 32 Comparación de precipitación registrada en 24 h, para 1955 y el 1995

En cuanto a gasto, por medio de los hidrogramas (Gráfica 5) podemos aproximar el volumen evacuado en un mismo periodo tiempo. Debido al evento del año 55 en por lo menos dos días, se evacuaron 12,779 millones de m^3 , mientras que para el evento del año 95 se evacuaron cerca de 9,275 millones de m^3 , siendo el volumen de 1955 un 37% mayor al año 1995.

Si bien, ambos eventos cuentan aparentemente con características similares de lluvia, el del 1955 evacuó una mayor cantidad de agua, posiblemente relacionado con las tormentas asociadas a otros fenómenos en fechas anteriores, ya que cuando el suelo de una cuenca se encuentra sobresaturado, éste no es capaz de absorber más líquido, el cual termina fluyendo de manera superficial. Por lo que no es descabellado pensar en áreas de inundación de mayor tamaño en 1955 comparado con el evento de 1995. En cuanto daños a zonas urbanas, el del 1995 probablemente causó mayores daños materiales ya que para esta fecha el núcleo urbano había crecido notablemente, como se mencionó en la descripción de la cuenca. Por otra parte, la pendiente de los dos hidrogramas es distinta, el evento del 95 muestra una pendiente más abrupta en cuestión de 10 hr se alcanzó el gasto pico, mientras que en el evento del 55 se alcanzó un valor máximo en cuestión de 20 horas.



Gráfica 5 Hidrogramas de las crecidas de 1995 y 1955

7 Condiciones previas al evento de 1995

Como ya se ha mencionado, las zonas bajas de una cuenca son más susceptibles a inundaciones, y en las zonas donde el cauce se trenza existe una mayor dinámica fluvial. Está última condición se presenta, en el tramo estudiado y se verifica por los testimonios de pobladores, recopilados por arqueólogos quienes describen los daños causados al edificio del Dintel en la zona arqueológica antes del evento de 1995:

- a) *A pesar de que ha sido el edificio más dañado en continuas ocasiones por las crecientes del río, su prominencia y el dintel que enmarcan la ventana que le caracteriza, le siguen destacando del resto. Construido a unos veinte metros alejado del río junto. [...] La creciente de 1935 se llevó parte de su costado suroeste” (Yolanda Aguilar López, 1994).*
- b) *“El edificio limita con la margen este del río Bobos, cuyas crecientes a través del tiempo han contribuido notablemente al deterioro general del monumento. En especial, el huracán Janet, ocasionó con torrenciales lluvias entre los días 22 y 27 de septiembre el desbordamiento y la modificación del cauce del río, el cuál con anterioridad discurría más al suroeste, paralelamente a la peña”. Esto trajo como consecuencia que el nivel del agua alcanzara su máximo crítico inundándose la plaza y registrándose la destrucción de cerca de 50% del volumen constructivo del Anexo 2 y la pérdida de gran parte de material en la esquina S...” (Gooujon, 1994).*

El primer testimonio hace mención de que el río pudo desplazarse por lo menos 20 m, por lo que la magnitud del desplazamiento del cauce nos hace pensar que ocurrió una avulsión, que se caracteriza por el abandono brusco del canal a una cota inferior, que en este caso se encontraba cerca del edificio del Dintel, posteriormente en 1955 el cauce vuelve a acercarse a Vega de la Peña. Estos testimonios y los

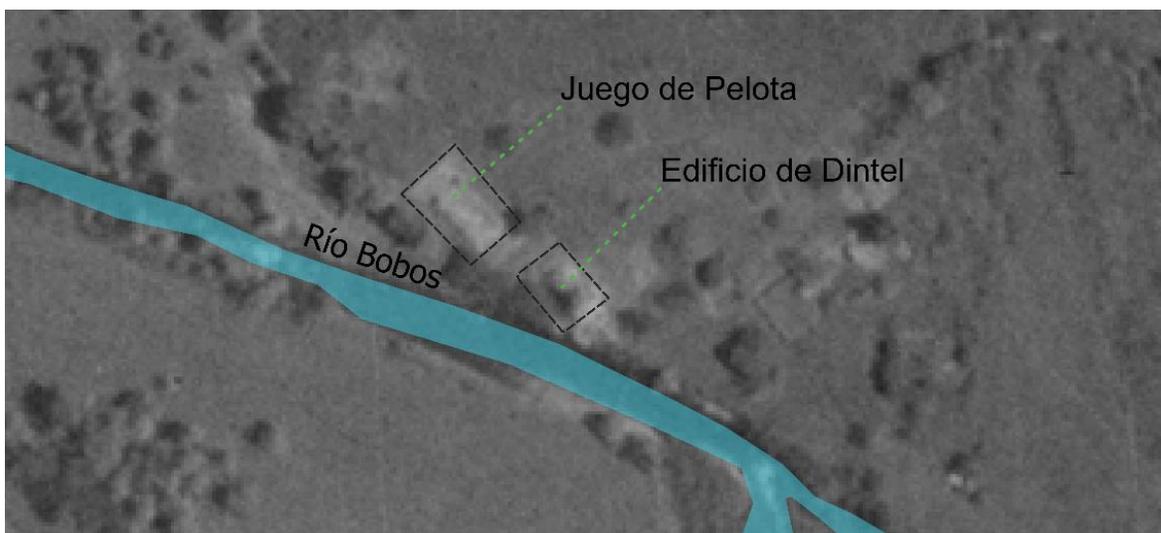


Figura 33 Posición del cauce antes de la crecida (marzo del 95)

datos hidrométricos descritos anteriormente nos indican que lo ocurrido en Vega de la Peña no fue casualidad, ya que el río en este tramo ha demostrado ser inestable a las constantes crecidas, las cuales han modificado su trayectoria en por lo menos dos ocasiones.

En base a lo expuesto se puede inferir que la morfología vista en una foto aérea tomada en marzo de 1995(Figura 33), es producto de eventos pasados, que provocaron que el cauce del río se posicionara a un costado del Edificio del Dintel, ésta fotografía junto con algunas tomas provenientes de documentales nos dan una perspectiva de la ubicación del cauce previo al evento(Figura 34), que seguía una trayectoria curva y era tangente al Edificio del Dintel y posteriormente se apartaba del sitio.



Figura 34 Edificio del Dintel y Juego de la Pelota (INAH, 1994)

Por otra parte, en la Figura 35 se muestran las condiciones de la margen previo a la crecida. El río tenía un tirante cercano a los 6 m, y la orilla tenía una inclinación



Figura 35 Foto tomada previo a los daños del 95

cercana a los 30°, en el exterior poseía material granular de gran tamaño que probablemente provenía del desgajamiento del Edificio del Dintel, a su vez poseía vegetación arbórea en distintos puntos, la cual es capaz de aumentar el grado de cohesión y hacer más estable la orilla.

En la Figura 36 se observa un corte transversal del edificio del Dintel, que estaba ubicado en la corona del talud, esto implica un aporte de peso extra que afecta la estabilidad de la margen, ya que el factor descrito en el apartado “Estabilidad de la orilla y fallas en márgenes” está en función de las fuerzas resistentes que dependen principalmente de la cohesión del material, entre las fuerzas actuantes, en las que se considera el peso propio de una cuña de falla y el peso aportado por el Edificio del dintel.

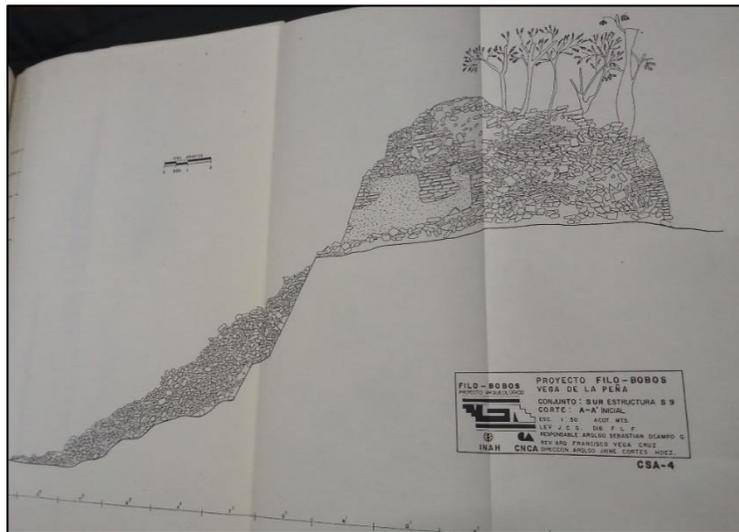
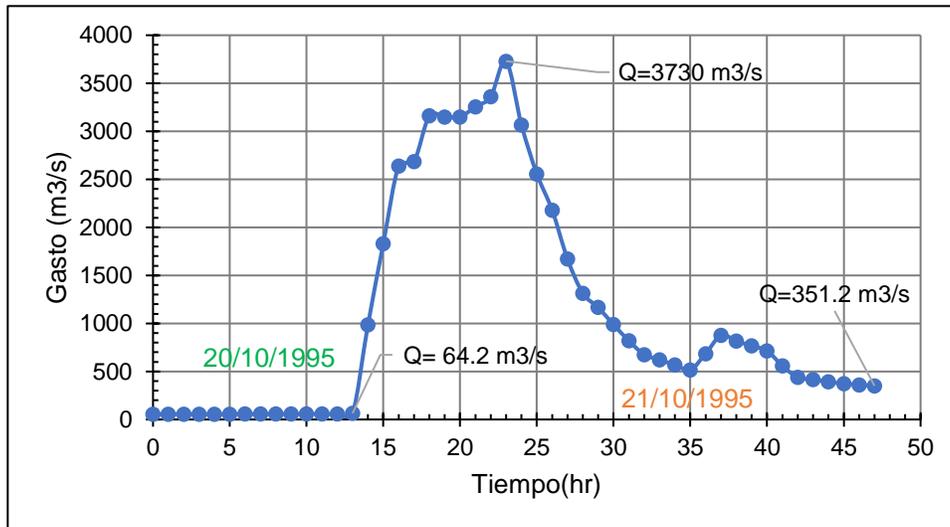


Figura 36 Perfil transversal de la margen (INAH, 1996)

Probablemente las condiciones climáticas durante la avenida provocaron un aumento en la humedad de la margen, y con ello una disminución de la cohesión, y al reducir la suma de fuerzas resistentes se produjo una falla masiva.

7.1 Efectos provocados por la crecida

El evento del 1995 tuvo su origen el 20 de octubre con una tormenta que provocó una lámina total promedio de 220 mm, y una máxima de 312 mm registrado en la estación ubicada en Jalancingo (Municipio colindante a Atzalan), no se cuentan con datos de intensidad para precisar en qué momento se alcanzó el valor máximo durante la tormenta, pese a eso con los datos de gastos existentes en la estación Martínez de la Torre, indican que la crecida inició cerca de las 13 horas del día 20 de octubre y a las 23 horas del mismo día alcanzó un gasto pico de 3730 m³/s, y disminuyó hasta alcanzar los 351.20 m³/s (Ver Gráfica 6).



Gráfica 6 Hidrograma de la crecida

Durante la crecida el río Bobos cambió nuevamente su curso afectando severamente al edificio del Dintel que se ubicaba a un costado de la margen del río, otra estructura afectada fue el juego de la Pelota que anteriormente se posicionaba a unos metros alejado del río. La fuerza de la corriente fue tal, que posterior al evento se podía observar que el agua arrastró rocas de gran tamaño. (Echavarría & García, 1996). A continuación, se hace una descripción de los daños provocados:

Juego de la Pelota: La esquina sur que se ubica en dirección al cauce resultó dañada por la fuerza de arrastre del agua, se observa pérdida de material en dirección al centro de la estructura. En la Figura 38 se muestra el perímetro irregular afectado, que incluye una de las esquinas, parte de un muro y una escalinata. Los daños ocasionados a esta estructura no fueron graves, ya que meses después se harían trabajos de restauración, por lo que hoy en día, la estructura se mantiene en buenas condiciones.

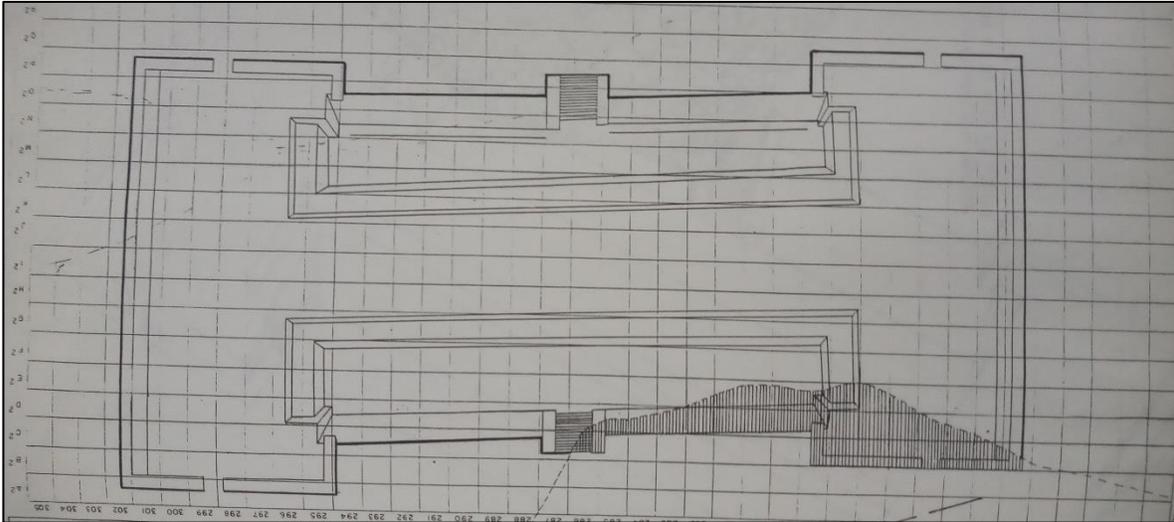


Figura 38 Daños ocasionados al Juego de la Pelota

Edificio del Dintel: Perdió la mayoría de su estructura quedando únicamente dos escalinatas, y parte de la estructura nuclear, como se observa en la figura, el área dañada abarca más del 50% del total de la estructura (Figura 38). Margen. Como ya se mencionó, la estructura se constituye a base de material granular y cantos rodados, y se ubicaba en la margen del río, por lo que aportaba un peso extra. Si consideramos que el factor de seguridad de la margen está en función de las características del material que la constituye y la tensión de corte actuante, a la que se le suma el peso del edificio, se dieron las condiciones para una falla masiva de la margen junto con parte del edificio, que se asemejan a una falla por socavación del fondo, que se caracteriza por la pérdida de material en el fondo, que provoca que el material superior pierda estabilidad y se desencadene un movimiento en bloque, dejando a la margen con el ángulo de reposo natural. Posterior al evento se realizaron trabajos para asegurar su estabilidad, que consistieron en una base de

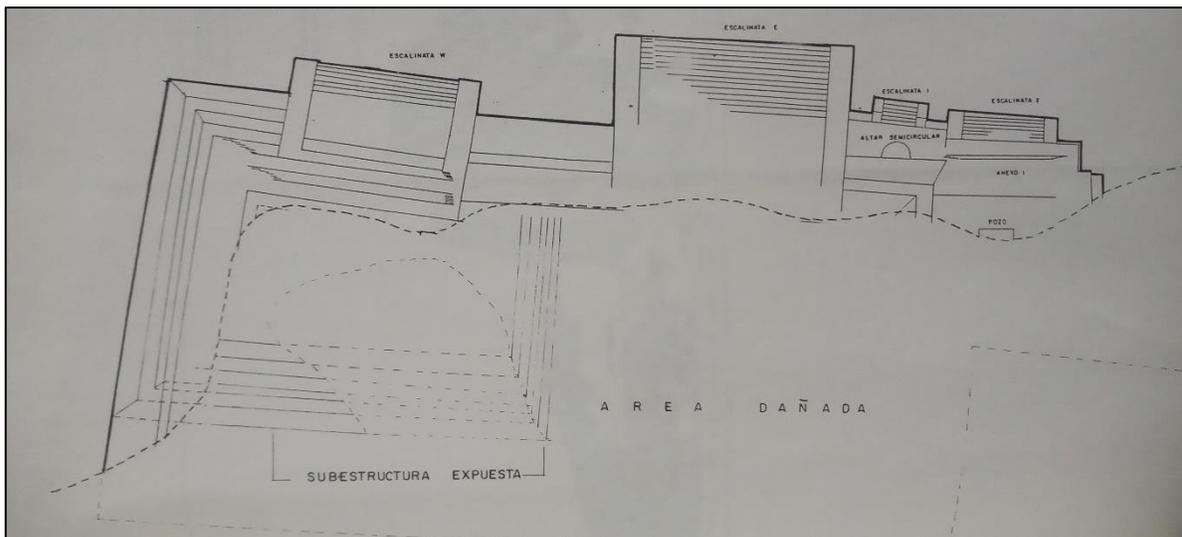


Figura 37 Daños ocasionados al Edificio del Dintel

espigones colocados en la parte colindante con el cauce, peso a ello, el edificio perdió por completo su forma quedando únicamente restos.

Otras estructuras fueron dañadas, como pequeñas, como un adoratorio entre el Juego de la Pelota y el Edificio Dintel fue arrastrado por la corriente; y aguas arriba, dos estructuras resultaron dañadas.

Como consecuencia de la crecida el cauce se bifurcó, y aumento su ancho y disminuyó su tirante, **“Aparte de las pérdidas a la zona arqueológica de Vega de la Peña, como resultado de ello, se amplió y modificó el cauce del río Bobos, quedando pocos rápidos y corto calado, reduciendo con ello la posibilidad del desplazamiento de las balsas”** por lo que fue posible tomar la fotografía de la Figura 39, ya que también se iniciaron trabajos de restauración de las estructuras afectadas, que involucraron un dique de provisional **“varios intentos por contener y retener las avenidas repentinas y sus consecuentes inundaciones del área de intervención con total anegamiento de la cala, efectuando provisionalmente diques con costales rellenos de arena; y la insuficiente capacidad así como constante reparación del equipo de bombeo”**. Este testimonio es importante, ya que nos indica una alteración antrópica al río, que provocó un cambio en su trayecto, esta vez redireccionando el flujo al brazo izquierdo, cuyo funcionamiento se limitó a unos cuantos eventos descritos en el capítulo “Cambios morfológicos”.



Figura 39 Se muestra las condiciones de la margen posteriores al evento del 1995. (1) Juego de la Pelota, (2) y (3) altares, (4) y (5) subestructura y edificio principal del Dintel.

8 Cambios morfológicos del río Bobos

En el siguiente apartado se hace un análisis de las imágenes satelitales, haciendo énfasis en los cambios morfológicos que tuvo el cauce cerca de Vega de la Peña antes del evento del 95, de igual forma se relacionaran dichas imágenes con los gastos registrados con el fin de destacar que la morfología de un río es principalmente la respuesta a la variación del gasto.

8.1 Periodo de 1972 a 1980

De 1972 a 1982 las imágenes existentes tienen una resolución espacial de 80 m, por lo que no es posible apreciar detalles del cauce, solo que este transcurría a un costado de Vega de la Peña.

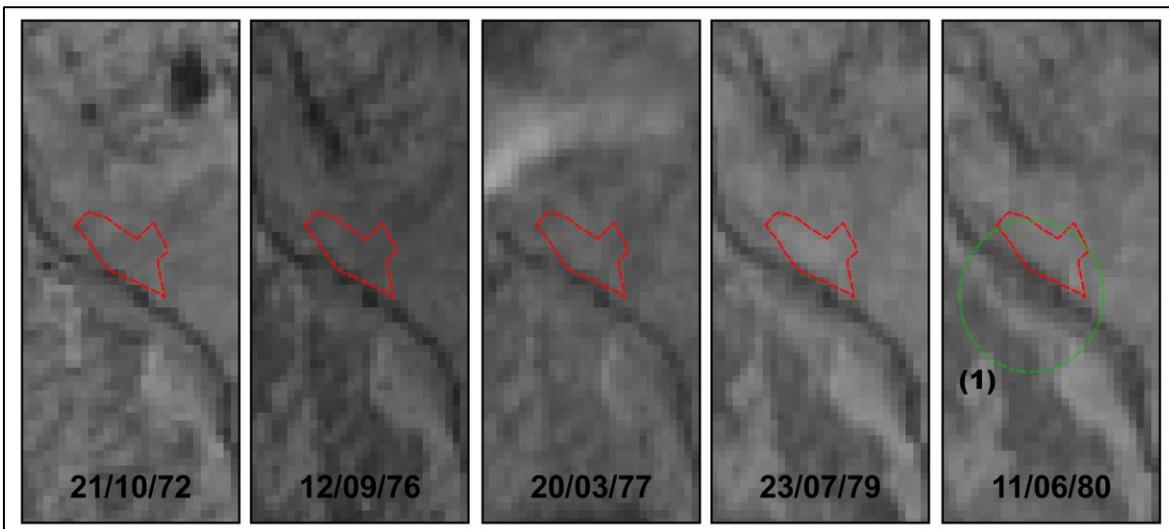
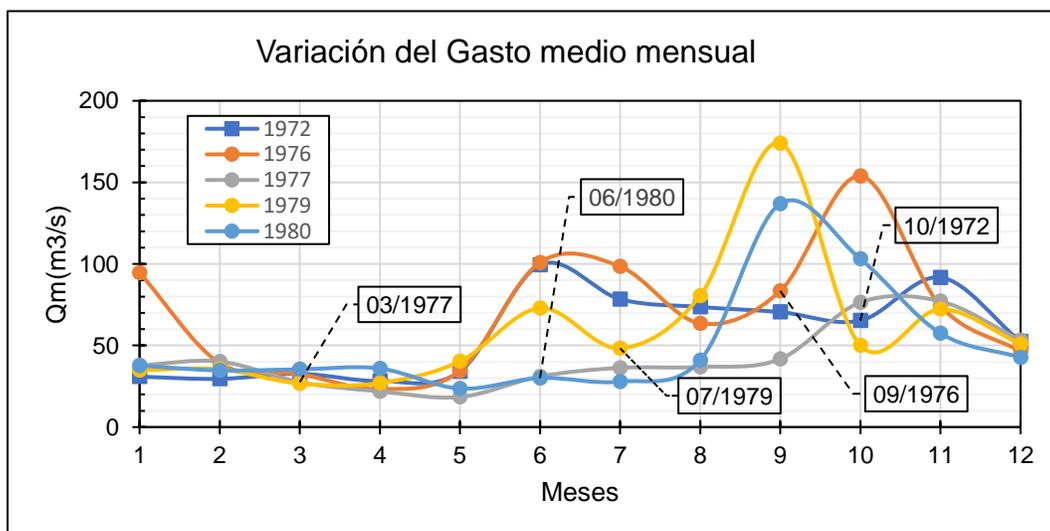


Figura 40 Imágenes satelitales para el periodo de 1972 a 1980



Gráfica 7 Variación del caudal mensual medio 1970 a 1980

En el numeral 1 correspondiente a 1980 se observa un cambio en el cauce, que parece ser una bifurcación si se compara con la imagen de 1979, al consultar el gasto medio mensual para ambos años, el de 1979 es mayor con un valor de 50 m³/s mientras que 1980 registró 30 m³/s (Ver Gráfica 7), y al revisar el promedio diario para las fechas de las imágenes, el año de 1979 tiene un gasto promedio casi cuatro veces mayor a 1980(¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), por lo que se descarta que la imagen de 1980(1) muestre una bifurcación activa.

8.2 Periodo de 1981 a 1987

Desde 1985 se cuenta con imágenes de mayor resolución espacial, correspondiente a 30 metros, sumado a ello tienen un mayor número de bandas, que permiten hacer combinaciones, en este caso resaltar la diferencia entre suelo y agua, usando las bandas 3,4 y 5 (INEGI, 2021).

A partir de 1981 comienza a hacerse visible una bifurcación en la zona antes mencionada (1), en la cual se observa que ambos brazos se mantienen activos alrededor de una isla de aproximadamente 500 m, el brazo derecho tiene longitud aproximada de 600 m, y 670 m el izquierdo. En 1987 el brazo izquierdo disminuye (4) en relación la imagen de 1985(2) aunque se hallan tomado en meses similares, esto se ve reflejado en la Gráfica 8 en la cual, septiembre de 1987 tiene un gasto menor de 80 m³/s en promedio por mes, en comparación a 1985 y 1986, los cuales tienen un gasto muy cercano 110 m³/s en promedio en el mes de octubre.

Otro rasgo que tiene el cauce es una pequeña bifurcación (3) alrededor de una isla de aproximadamente 200 m de largo, la cual se puede observar desde la imagen de 1985 sin descartar que esta existiera en años anteriores y no fuese posible distinguir.

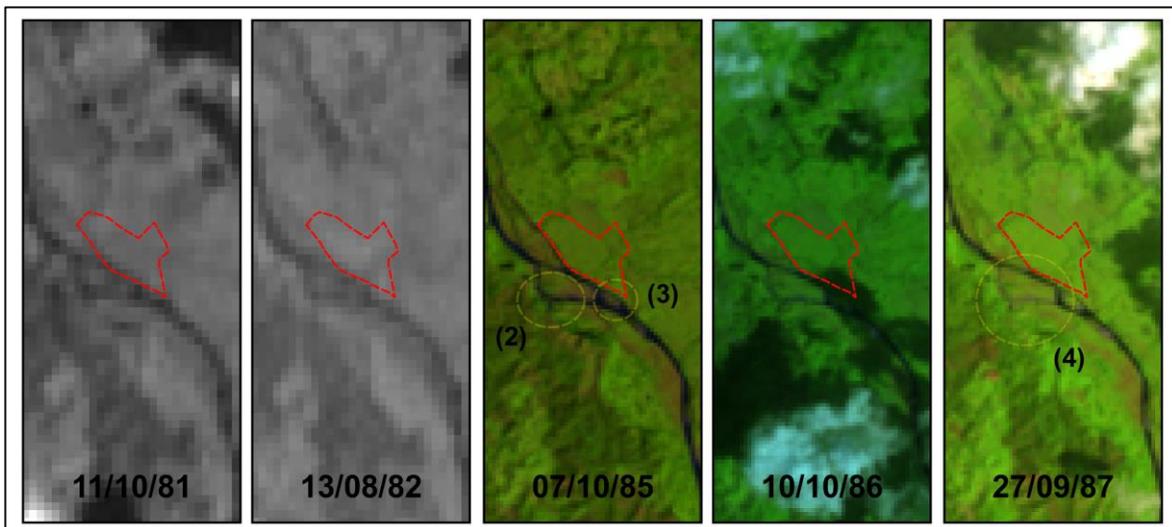
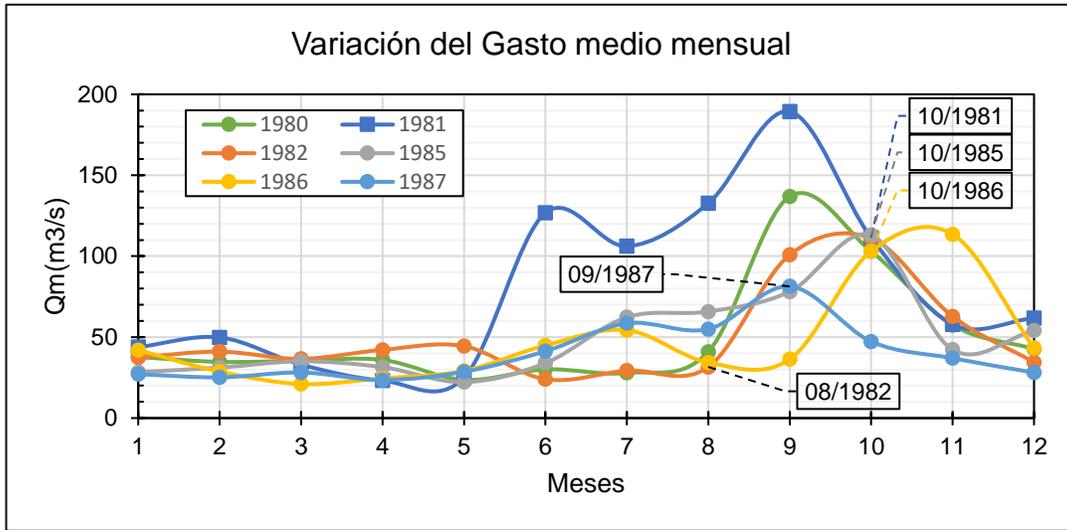


Figura 41 Variación del cauce de 1981 a 1987



Gráfica 8 Gasto mensual de 1980 a 1987. Se observa que, para el mes de octubre de 1981, 1985 y 1986 se te registraron valores similares, que podrían indicar que la bifurcación se mantuvo activa.

8.3 Periodo de 1988 a 1994

Durante 1988 y 1989 el cauce mantiene la misma forma, ya que el brazo izquierdo se ve disminuido y la bifurcación con numeral 3 sigue presente. De 1990 a 1994 se usaron imágenes provenientes de INEGI, denominadas “Geomedianas landsat” las cuales resumen las imágenes existentes para un año conservando una consistencia espacial (INEGI, 2020), por lo que muestran cómo se comportó el cauce del río la mayor parte del año, en el caso de 1990 a 1992 solo se cuenta con una imagen representante para ese periodo.

De 1990 a 1994 el cauce mantiene una forma similar y desde 1990 se comienza a notar, que el brazo derecho de la bifurcación más pequeña transporta menos agua

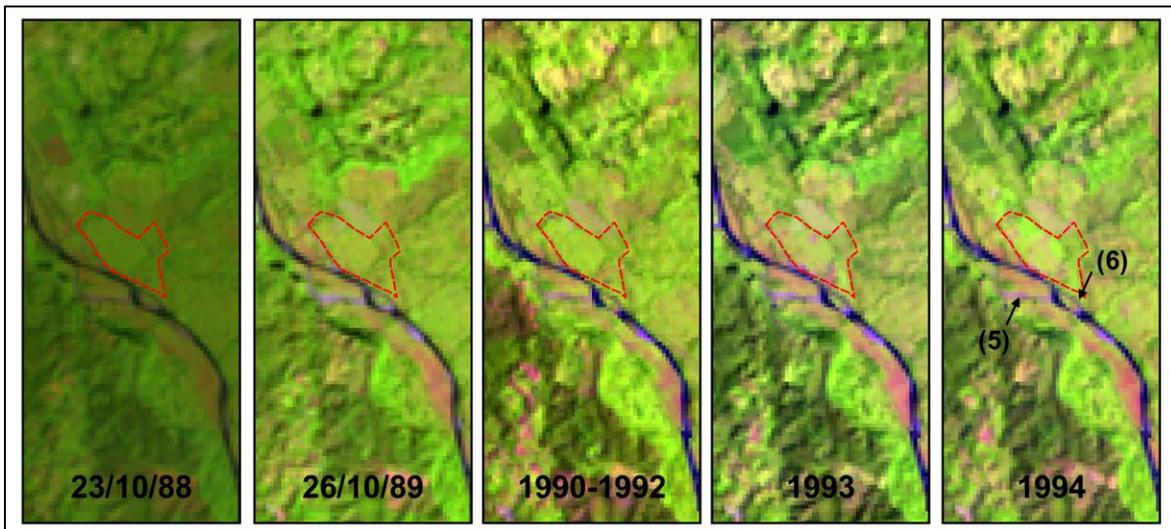


Figura 42 Variación del cauce de 1988 a 1994

(6). Por otra parte, si comparamos la intensidad del brazo izquierdo de la bifurcación mayor (5) entre las imágenes del 93 y 94, hay un cambio de tono por lo que dicho brazo pudo estar seco en este último año (Figura 42).

Al graficar la variación del gasto medio anual, después de 1985 se observa cierta tendencia al aumento, que podría estar relacionada con la activación del brazo izquierdo, ya que en imágenes posteriores es posible observar una franja delgada, que podría ser agua, o sedimento húmedo (Figura 43), pero al ser un cauce trezado esta aseveración resulta precipitada, ya que se tiene que verificar el promedio diario para imágenes tomadas en fechas distintas, lo cual es complicado de hacer debido a la ausencia de datos.

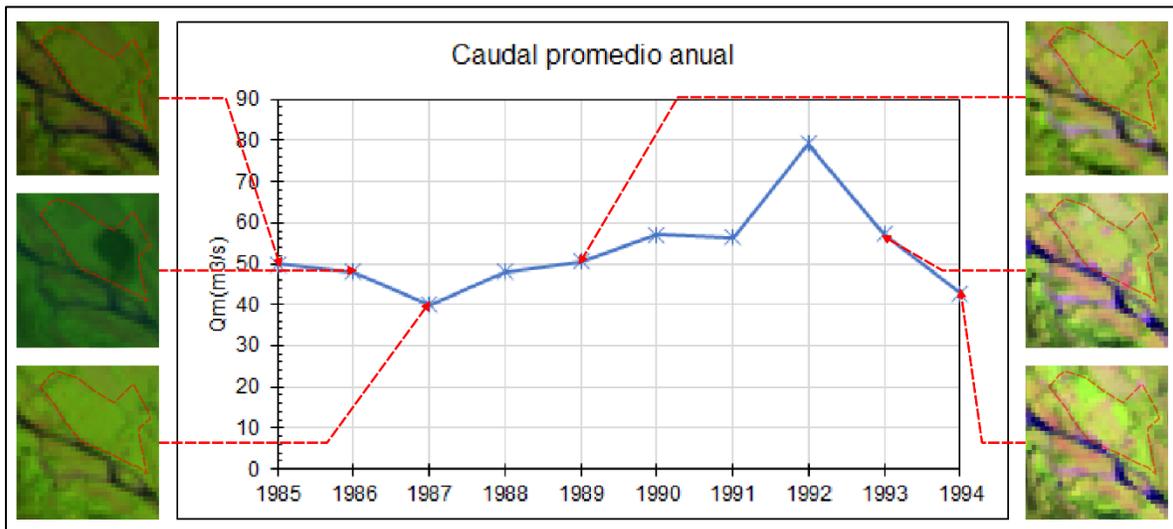


Figura 43 Variación del caudal medio anual en diversos años

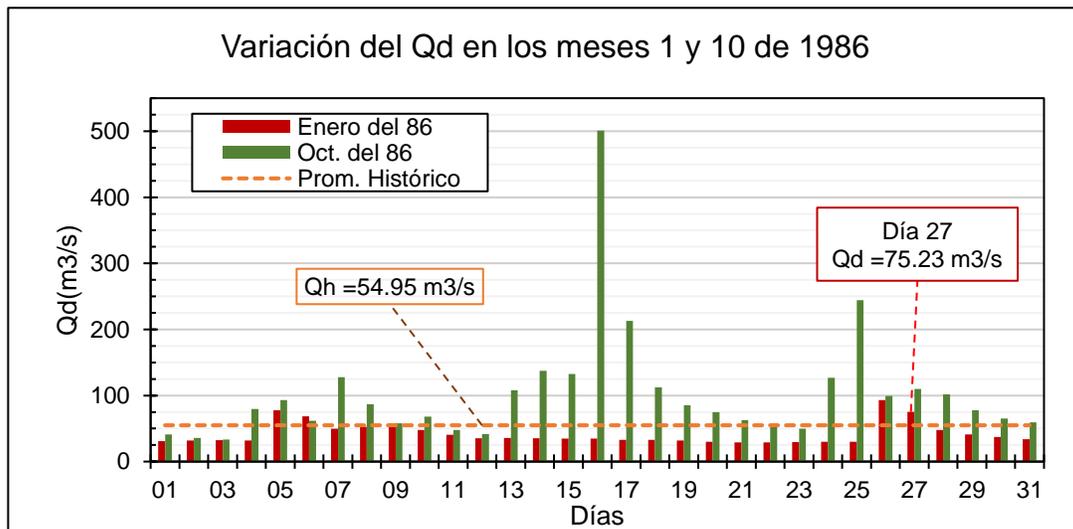
Otro punto importante es que se cuenta con una fotografía aérea tomada en marzo del 95, en la cual el brazo izquierdo de la bifurcación mayor (Ver numeral 16 de la Figura 45) se encuentra totalmente seco, por lo que, si bien no se pudo puntualizar que gasto promedio diario provoca la reactivación del brazo izquierdo, podemos saber que si es cercano a $51.85 \text{ m}^3/\text{s}$ o menor, seguramente se encontrará inactivo como en las imágenes de 1980, 1982, 1987, 1988, 1989, 1994 y 1995 donde los gastos promedios diarios son menores al de julio del 95 (Figura 43). En contraste con 1981, 1985, 1986 y 1993 donde es muy probable que ambos brazos se encontraban activos.

Relacionando las fechas de avenidas máximas anuales, varias de ellas pueden ser las causantes de activar el brazo izquierdo de la bifurcación, aunque realmente no siguen un patrón exacto.

- En la imagen del 7 de octubre de 1985, se observan los dos brazos activos, esto se debe a que un día antes se registró el gasto máximo instantáneo de ese año, que corresponde a un valor de $586 \text{ m}^3/\text{s}$. Por ello el gasto promedio

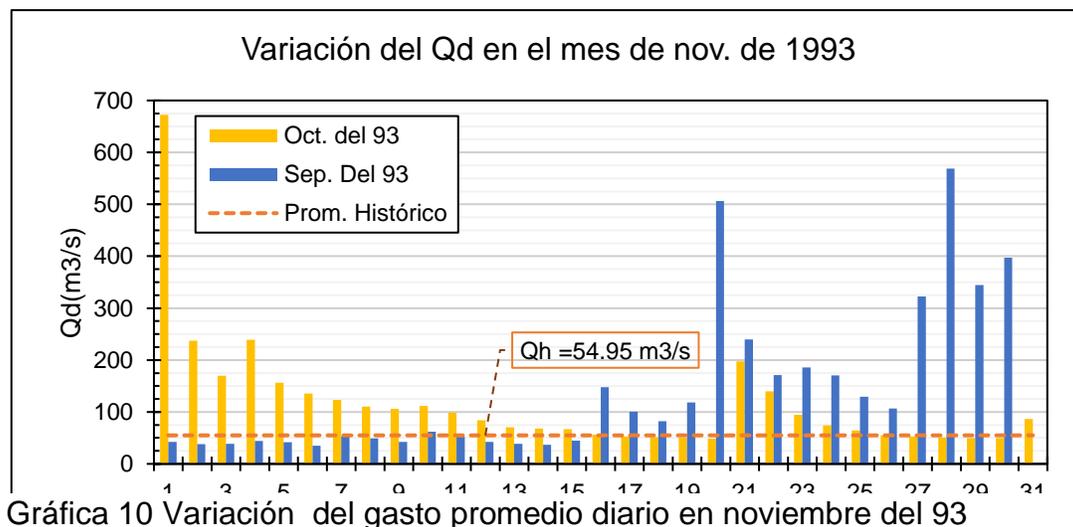
diario es mucho mayor en relación con otros años (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

- En 1986 la bifurcación se puede observar a inicios y finales del año (Figura 44), pese a que el gasto máximo anual se registró el 16 noviembre, es decir después de la fecha en que se tomaron las imágenes, por lo que no está ligado a la bifurcación observable en esas imágenes. La existencia de la bifurcación en el mes de enero se involucra con un aumento del gasto durante los días 26 y 27, en el caso de octubre se debe a un aumento entre los días 4 y 10, todo esto se puede apreciar en la Gráfica 9, donde además se puede identificar el día que se registró la avenida.



Gráfica 9 Variación del gasto promedio diario en 1986

- En el caso de 1993 se registra una avenida el 27 de septiembre de 1993, la cual provocó un gasto máximo instantáneo 980.50 m³/s, posteriormente el primero de octubre se registró una crecida similar con un valor de 949 m³/s, esta avenida fue de mayor intensidad en el sentido que el promedio diario es



Gráfica 10 Variación del gasto promedio diario en noviembre del 93

mayor a la avenida del 27 de septiembre (Gráfica 10). El aumento del gasto disminuyó en días posteriores, donde seguramente la bifurcación estuvo

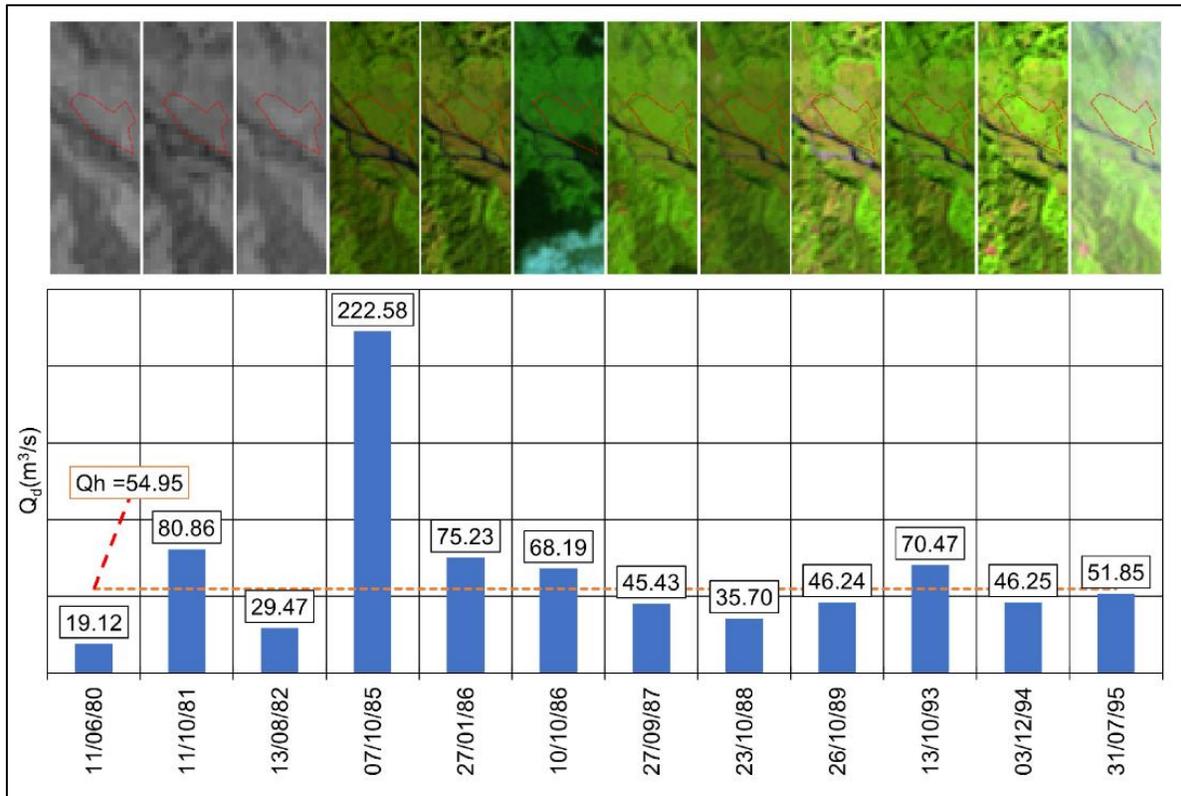


Figura 44 Caudal medio diario para diversas fechas

completamente activa.

En base a lo mencionado, la bifurcación cercana a Vega de la Peña, tiene una escala de activación de días, en la que ocasionalmente el brazo izquierdo funciona. Esta condición es un indicio de inestabilidad, ya que el cauce cambia su forma en un periodo corto de tiempo, aunque no se presenten avenidas representativas como en el 1986. Es importante relacionar toda la información existente, ya que consultando solo imágenes satelitales, aparentemente el brazo izquierdo fue quedando inactivo de una forma paulatina, pero relacionando el registro hidrométrico corresponde a un comportamiento ocasional.

8.4 Evento de 1995

En la foto aérea de marzo del 95 anterior a la crecida de octubre, se puede visualizar de mejor manera las condiciones del cauce, iniciando por el brazo derecho de la bifurcación mayor, cuyo ancho estaba cerca de los 30 m, y se posicionaba muy cerca del Juego de Pelota y Edificio del Dintel (15). Por otra parte, la pequeña bifurcación marcada en el numeral 6 de la Figura 45, se encuentra casi inactiva con un ancho superficial de aproximadamente 6 m. La crecida que se presentó el 20 de octubre de 1995 con un gasto instantáneo máximo de 3730 m^3/s , asociado a las

lluvias provocadas por Janet, provocó grandes cambios en el cauce, en un lapso corto de tiempo, algunos de ellos fueron (Ver Figura 46):

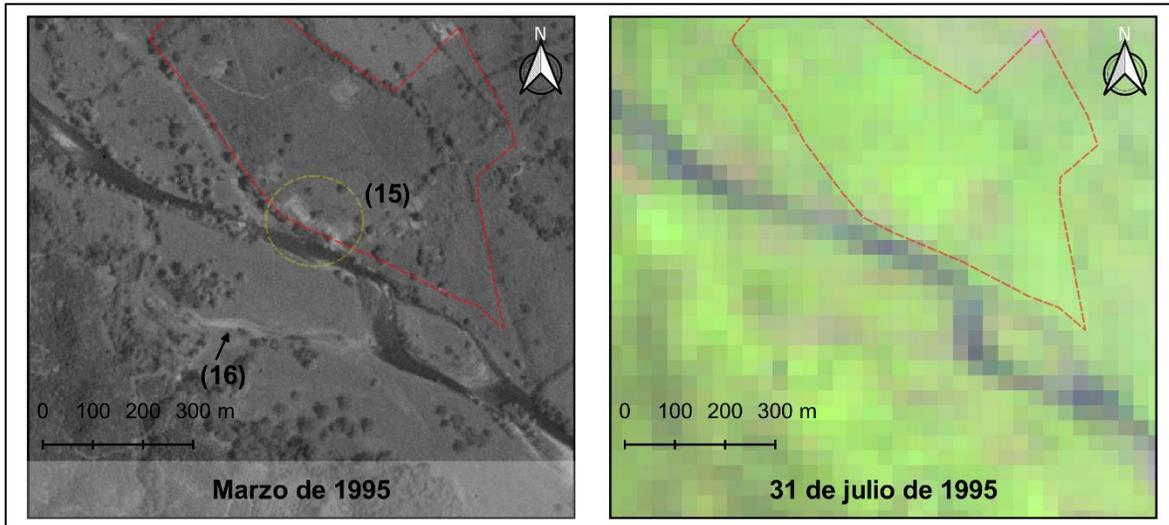


Figura 45 Estado del cauce antes de la crecida del 20 de octubre del 95

- Una mancha de sedimento depositada durante la avenida que corresponde al ancho que tomó el cauce, que abarca cerca de 300 m, perpendicular al eje del río en el tramo que afectó la zona arqueológica.
- Se reactivó el brazo antes mencionado (7), el cual muestra un ancho mayor en comparación al derecho debido a los trabajos mencionados anteriormente (Ver página 5)
- La bifurcación pequeña que se resalta con el numeral 8 en la imagen del 95, desaparece completamente (10) y forma un solo canal que se ubica del lado derecho, el cual es la continuación de una bifurcación que inicia aguas arriba (11), que se formó alrededor de una barra de longitud cercana a los 600 m

- Aguas arriba del cauce se forma una bifurcación (12) en torno a una barra de aproximadamente 530 m. De esta bifurcación, el brazo izquierdo aguas abajo vuelve a dividirse (11) y el derecho se nota ligeramente más ancho.

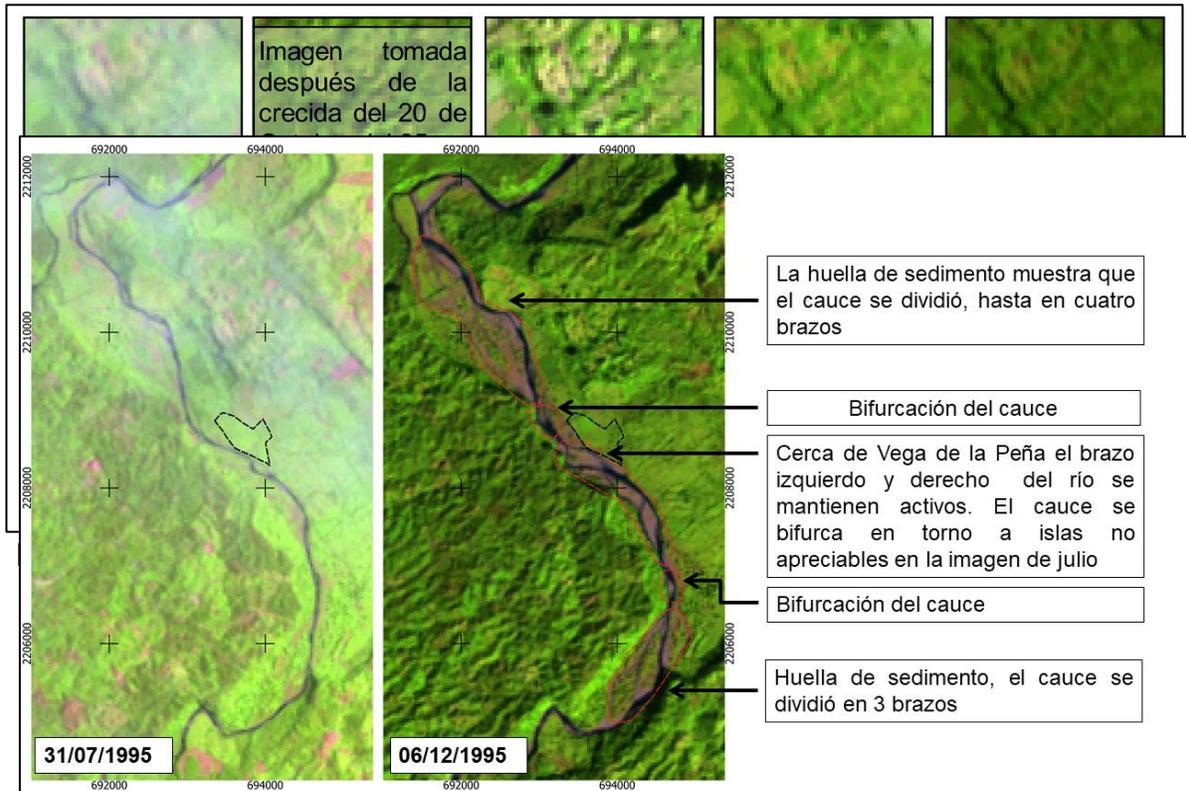


Figura 47 Cambios en el cauce aguas abajo y arriba de la zona arqueológica

En la Figura 47 se muestran otros cambios, ubicados aguas arriba y abajo de la zona, entre de las cuales está la aparición de bifurcaciones alrededor de barras de aproximadamente 500 m.

A inicios de 1996 es posible ver la bifurcación activa, cuando el río transportaba un caudal promedio diario de $46.35 \text{ m}^3/\text{s}$, mostrando un comportamiento distinto, ya que, con valores de gasto similares, la bifurcación no era visible del todo, esto podría deberse al aumento en el ancho del cauce, mencionado por los arqueólogos del sitio (Ver página 61), o por un registro erróneo del gasto.

8.5 Periodo de 1996 a 1998

El brazo derecho de la bifurcación cercana a Vega de la Peña comenzó a secarse desde abril del 96, ya que el cauce muestra una ligera franja de agua (Ver numeral 13 de la Figura 46) y para mayo del mismo año, se observa completamente seco al igual que en la imagen de octubre (Ver numeral 14 de la Figura 46 y Figura 48).

Podría pensarse que el abandono del canal derecho fue gradual hasta quedar completamente seco a final de octubre, pero en noviembre del mismo año, se puede visualizar una ligera franja de agua (15), al igual que en octubre del 97 y noviembre

del 98(16). En noviembre del 96 y 98, fechas en las que el canal derecho vuelva a activarse, el río transportaba un gasto mayor al promedio diario histórico, que en

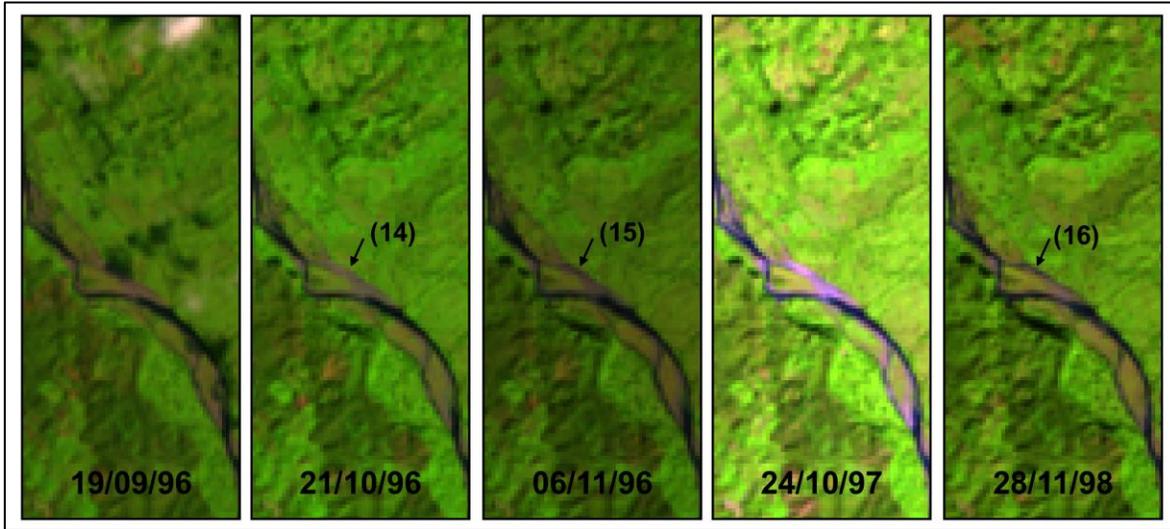
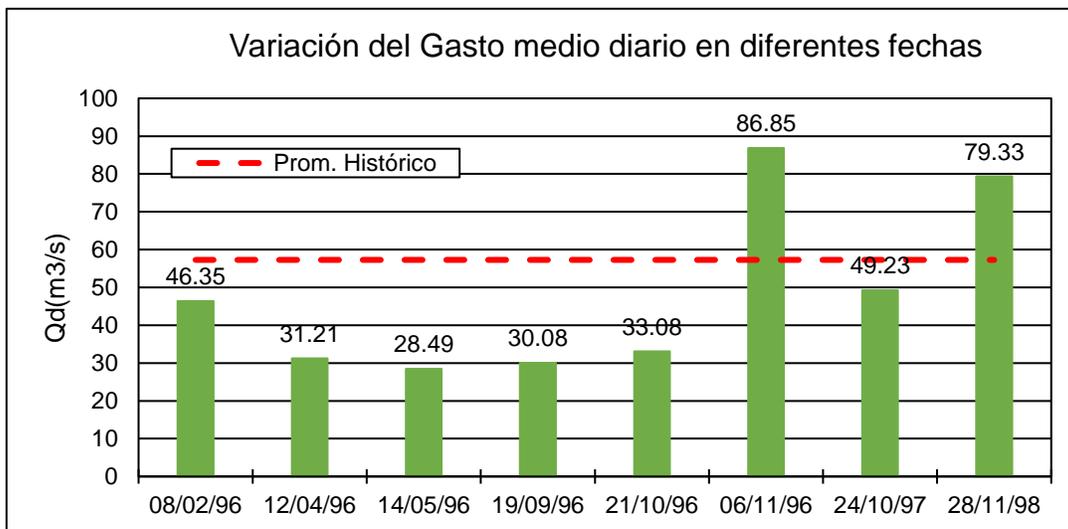


Figura 48 Variación del cauce entre 1996 y 1998



Gráfica 11 Variación del Gasto medio diario de 1996 a 1998

datos posteriores al 95, se empleó el promedio histórico generado por todos los datos hidrométricos existentes, que van de 1953 a 2014. Como se muestran en la Gráfica 11, durante noviembre del 96 y 98, el gasto supera el promedio, por lo que, existe congruencia con lo que muestran las imágenes satelitales, por otra parte, en octubre del 97 se observan delgadas franjas, que indican que posiblemente el río transportaba una cantidad mínima de agua en el brazo derecho.

8.6 Periodo de 1999 a 2001

Desde 1998 comienzan los trabajos en la zona para resguardar Vega de la Peña, de las posibles crecidas del río Bobos, la estructura de protección que se construyó

fue un muro de retención formado por gaviones, el cual desvió el cauce y provocó un cambio morfológico en planta entre junio y diciembre del 99(Ver numeral 17 y 18

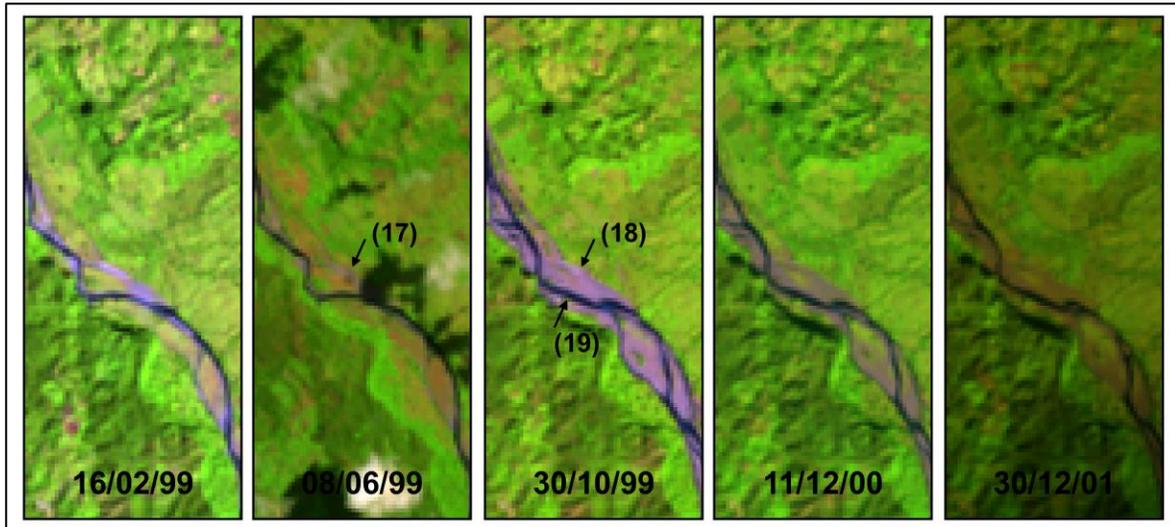
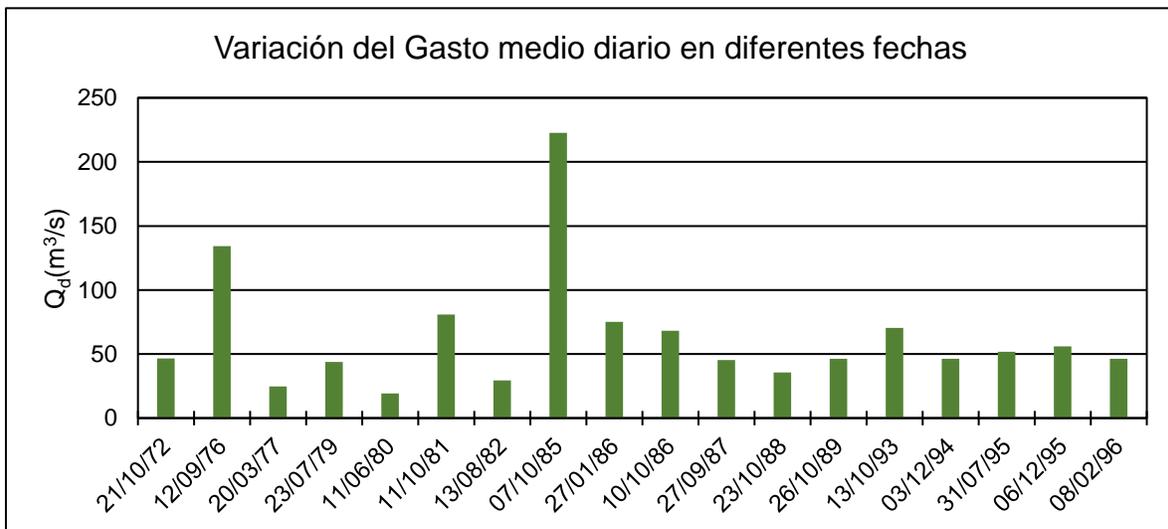


Figura 49



Gráfica 12 Gasto medio diario en diversas fechas (En las que existen imágenes satelitales)

de la Figura 49), donde se puede observar en la imagen de junio, que el cauce formaba una curva similar a un semicírculo, después de los trabajos dicha curva se alarga(19). La construcción del muro fue gradual, y actualmente no es posible encontrar información referente al diseño de este, así como una bitácora que sea de utilidad para separar cambios naturales a cambios provocados directamente por la acción del hombre.

9 Análisis previo de los datos

Previo al análisis de gastos máximos, se verificó la homogeneidad de la serie por medio de la prueba de Helmert, cuyo procedimiento se describe en el “Anexo: Aplicación de distribuciones de probabilidad” de la pág. 84, obteniendo como producto la siguiente tabla:

Tabla 10 Valores calculados para la prueba de Helmert		
Descripción	Literal	Valor
Tamaño de la muestra	n_j	60 datos
Promedio	\bar{x}	1239.02 m ³ /s
Núm. De Cambios	C	30
Núm. De secuencias	S	29
Diferencia	S-C	1
Límites	$\pm\sqrt{(n_j-1)}$	7.68

Nota: Se cumple con $-7.68 \leq (S-C) \leq 7.68$

La diferencia del número de cambios(C) y de secuencias(S) se encuentra dentro del límite calculado por lo que la serie es homogénea. Por otra parte, se empleó la prueba de Anderson(Tabla 13) descrita en el anexo mencionado. Al sustituir valores en la Ec. 12 la variable r_k^j toma la siguiente forma:

$$r_k^{60} = \frac{\sum_{i=1}^{60-k} (Q_i^{60} - \bar{Q}^{60})(Q_{i+k}^{60} - \bar{Q}^{60})}{\sum_{i=1}^{60} (Q_i^{60} - \bar{Q}^{60})^2} \quad \text{Ec. 6}$$

El valor de k varía de 1 a 20, que corresponde a un tercio del tamaño total de la serie, mientras que los límites se calcularon empleando la Ec. 13 :

Tabla 11. Prueba de Anderson para verificar la independendencia de eventos

k	LimInf	r_k^j	LimSup	k	LimInf	r_k^j	LimSup
1	-0.270	-0.055	0.236	11	-0.298	0.017	0.257
2	-0.272	0.016	0.238	12	-0.301	0.158	0.259
3	-0.275	-0.015	0.240	13	-0.304	-0.030	0.262
4	-0.277	-0.090	0.242	14	-0.308	0.089	0.264
5	-0.280	-0.096	0.244	15	-0.311	-0.062	0.267
6	-0.283	-0.088	0.246	16	-0.315	0.045	0.269
7	-0.286	-0.004	0.248	17	-0.319	-0.081	0.272
8	-0.288	-0.135	0.250	18	-0.323	-0.017	0.275

9	-0.291	-0.063	0.252	19	-0.327	0.096	0.278
10	-0.294	-0.146	0.254	20	-0.331	-0.074	0.281

Nota: Los valores de r'_k , no sobrepasan los límites, para ningún valor de k

Debido a que el valor r'_k se encuentra dentro de los límites calculados para cada valor de k respectivamente, la serie es independiente.

10 Análisis de gastos máximos

Para saber que función de probabilidad se ajusta mejor a los gastos máximos, se usa la prueba de Kolmogorov-Smirnov, que compara la probabilidad o periodo de retorno observado proveniente de la fórmula de Weibull, con el periodo de retorno teórico, calculado con alguna de las funciones de probabilidad descritas en la pág. 86 y 87.

$$Tr = \frac{n + 1}{m} \quad \text{Ec. 7}$$

Dónde:

Tr = Periodo de retorno en años

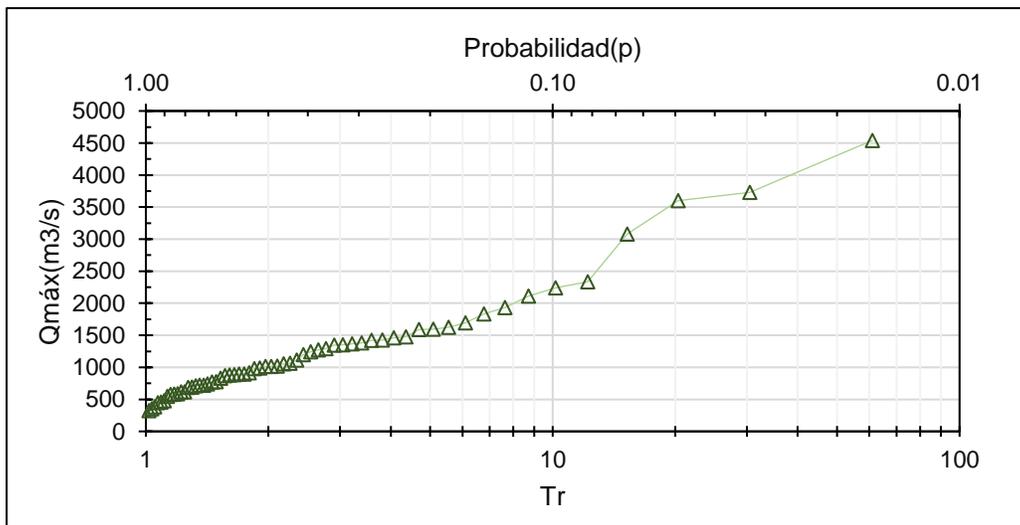
n = Número de años del registro

m = Número de orden

La frecuencia o probabilidad p es el inverso del periodo de retorno:

$$p = \frac{1}{Tr} \quad \text{Ec. 8}$$

Sustituyendo valores, el periodo de retorno observado se obtiene con m igual a 60, que corresponde a la cantidad total de datos, mientras que n varía de 1 a 60. Los gastos máximos ($Q_{m\acute{a}x}$) se ordenan de mayor a menor, por lo que el valor más



grande tendrá un periodo de retorno de 61 años, con $n=1$ (Ver Tabla 12). Mientras que la probabilidad (ρ) se obtiene del inverso del periodo de retorno (Tr). Por último, en una gráfica se coloca Tr y ρ en el eje de las abscisas en una escala logarítmica, y en las ordenadas se coloca el valor de los gastos máximos (Gráfica 13):

Gráfica 13 Periodo de retorno medido, utilizando la fórmula de Weibull En base a la probabilidad de ocurrencia obtenida con la fórmula de Weibull(“P(%)” de la Tabla 12), se calculó el gasto máximo con diferentes distribuciones de probabilidad: Gumbel, Log-Gumbel, Log-Pearson y Log-Normal, que tienen en común su uso para valores máximos.

Tabla 12 Gastos máximos mayores para distintas distribuciones de probabilidad

n	Año	Q _{máx} (m ³ /s)	W		G	LG	LP	LN
			P(%)	Tr	Q(m ³ /s)			
1	1955	4540.0	1.64	61.00	3524.74	5051.80	3965.35	3552.93
2	1995	3730.0	3.28	30.50	3069.91	3691.39	3227.57	3002.62
3	1967	3600.0	4.92	20.33	2801.52	3067.52	2836.56	2694.86
4	2013	3077.9	6.56	15.25	2609.42	2686.82	2575.50	2482.19
5	1969	2334.5	8.20	12.20	2459.08	2422.14	2381.68	2320.15
6	1954	2240.0	9.84	10.17	2335.12	2223.64	2228.58	2189.47
7	1999	2111.4	11.48	8.71	2229.34	2067.17	2102.60	2080.04
8	1974	1932.6	13.11	7.63	2136.84	1939.39	1995.90	1985.95
9	1977	1833.6	14.75	6.78	2054.45	1832.24	1903.56	1903.41
10	1988	1692.2	16.39	6.10	1980.03	1740.55	1822.27	1829.89

Nota: Weibull(W), Gumbel(G), Log-Gumbel (LG), Log-Pearson (LP) y Log-Normal(LN). La tabla completa se encuentra en los anexos

Se puede hacer el procedimiento inverso de las ecuaciones del anexo (pág. 86 y 87), esta vez calculando el periodo de retorno asociado al gasto máximo medido por

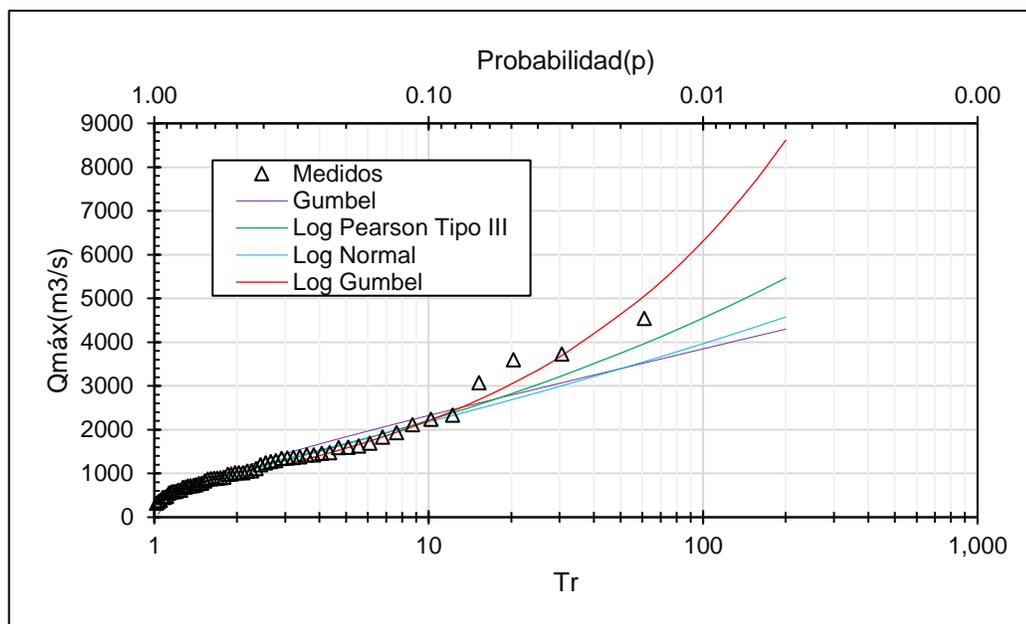
medio de las funciones de distribución acumulada¹ de frecuencias, cuya descripción se omite en éste trabajo

Tabla 13 Periodos de retorno para distintas distribuciones

n	Año	Q _{máx} (m ³ /s)	Tr				
			W	G	LG	LP	LN
1	1955	4540.00	61.00	289.54	48.15	99.01	192.47
2	1995	3730.00	30.50	83.41	31.21	49.50	75.69
3	1967	3600.00	20.33	68.35	28.86	43.86	64.68
4	2013	3077.94	15.25	30.84	20.48	26.25	33.65
5	1969	2334.50	12.20	10.15	11.28	11.53	12.45
6	1954	2240.00	10.17	8.85	10.33	10.30	10.92
7	1999	2111.40	8.71	7.35	9.11	8.80	9.11
8	1974	1932.60	7.63	5.71	7.57	7.03	7.07
9	1977	1833.63	6.78	4.97	6.79	6.19	6.13
10	1988	1692.19	6.10	4.11	5.76	5.13	5.00

Nota: Weibull(W), Gumbel(G), Log-Gumbel (LG), Log-Pearson (LP) y Log-Normal(LN). La tabla completa se encuentra en los anexos

Los periodos de retorno teóricos y los datos medidos (gastos máximos de la serie) se colocan en la Gráfica 14, de la cual se puede hacer una inspección visual para saber que función se adapta mejor a los datos medidos. En base a esto, las funciones Log-Gumbel o Log Pearson Tipo III se asemejan al comportamiento de la serie de



gastos máximos.

¹ Con dichas funciones se obtiene la probabilidad de que un evento no sea igualado o excedido, por lo que es necesario restar una unidad, para obtener la probabilidad de excedencia.

Gráfica 14 Comparación entre distintas distribuciones de probabilidad

Para la elección de una distribución de probabilidad, se empleó la prueba de Kolmogorov-Smirnov que es una prueba aproximada aplicable a cualquier distribución teórica, que consiste en comparar el valor máximo absoluto de la diferencia entre probabilidad observada y la calculada en cada distribución (Villion, 2006):

$$\Delta = \text{máx}|F(x) - P(x)| \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde:

$F(x)$ = Probabilidad de la distribución observada

$P(x)$ = Probabilidad estimada

El valor de Δ debe cumplir lo siguiente (Villion, 2006):

$\left\{ \begin{array}{l} \Delta < \Delta_0, \text{ Se ajusta adecuadamente} \\ \Delta \geq \Delta_0 \text{ No se ajusta, por lo que se debe usar otra distribución} \end{array} \right.$

El valor de Δ_0 depende del tamaño de la serie de datos, que es igual a 60 y del nivel de significación elegido, este caso igual a 0.05, por lo que Δ_0 se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta_0 = \frac{1.36}{\sqrt{N}} = \frac{1.36}{\sqrt{60}} = 0.1755 \quad \text{Ec. 10}$$

La probabilidad $F(x)$ de la Ec. 9 se calcula con la Ec. 8 y se puede observar en la columna 4 de la Tabla 12. Por otra parte, la probabilidad estimada $P(x)$ se calcula con el inverso de los periodos de retorno de la Tabla 13(De la columna 5 a 8), con ello se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 14 Frecuencia para distintas distribuciones

n	Año	Q _{máx} (m ³ /s)	ρ (%)				
			W	G	LG	LP	LN
1	1955	4540.00	1.64	0.35	2.08	1.01	0.52
2	1995	3730.00	3.28	1.20	3.20	2.02	1.32
3	1967	3600.00	4.92	1.46	3.46	2.28	1.55
4	2013	3077.94	6.56	3.24	4.88	3.81	2.97
5	1969	2334.50	8.20	9.85	8.87	8.67	8.03
6	1954	2240.00	9.84	11.31	9.68	9.71	9.16
7	1999	2111.40	11.48	13.61	10.98	11.36	10.98
8	1974	1932.60	13.11	17.53	13.21	14.22	14.15
9	1977	1833.63	14.75	20.11	14.73	16.16	16.31
10	1988	1692.19	16.39	24.36	17.36	19.48	19.99

Nota: Weibull(W), Gumbel(G), Log-Gumbel (LG), Log-Pearson(LP) y Log-Normal(LN). La tabla completa se encuentra en los anexos

El valor Δ se calcula para todos los valores de la serie, con las diferentes funciones de probabilidad empleadas, de los resultados obtenidos se busca el valor más grande:

$$\Delta_{máx} = 0.09418 \text{ para Gumbel}$$

$$\Delta_{máx} = 0.07819 \text{ para Log Gumbel}$$

$$\Delta_{máx} = 0.04492 \text{ para Log Normal}$$

$$\Delta_{máx} = 0.03274 \text{ para Log Pearson}$$

Cada valor cumple la condición mencionada: $\Delta < \Delta_0$ y se elegirá el valor de Δ menor, que corresponde a la distribución Log Pearson, por lo que la crecida de 1995 con Q_{máx} de 3730.00 m³/s tiene un periodo de retorno de aproximadamente 50 años, mientras el Q_{máx} de 4540.00 m³/s registrado en 1955, tiene un periodo de retorno cercano a 100 años (Ver Tabla 13)

11 Conclusiones

Vega de la Peña es un sitio arqueológico ubicado en Atzalán, municipio perteneciente a Veracruz. Se encuentra en el costado derecho del río Bobos, a una altitud cercana a los 200 msnm, esta zona es conocida como “Filobobos” debido a la existencia de un talud casi vertical ubicado al este de Vega de la Peña. La posición de Vega de la Peña con respecto al río y el relieve que la rodea provocó que en el

pasado fuera susceptible a las crecidas del río, ya que se encuentra en el área de inundación. En la actualidad existen estructuras que se construyeron con el fin de desviar el cauce del río y alejarlo lo suficiente, para evitar futuros daños al sitio. Como objetivo del presente escrito se buscó determinar las causas por las cuales el río Bobos desbordó durante las lluvias asociadas al huracán Roxanne en octubre de 1995, durante dicho evento se registraron caudales extraordinarios, los cuales tuvieron como consecuencia daños a la zona, principalmente a dos estructuras, la primera y más afectada el edificio del Dintel, el cual perdió más del 50% de toda su estructura (Ver figura 38) y el juego de la pelota, el cual resultó afectado en un porcentaje menor (Ver figura 39).

Para determinar las causas por las cuales el río Bobos desbordó fue necesario consultar libros especializados en hidráulica fluvial e hidrología, información hidrométrica y pluviométrica de la cuenca, y por último información documental correspondiente a informes técnicos y periódicos de la época. La secuencia de trabajo fue la siguiente, inicialmente se realizó una compilación teórica de conceptos de hidráulica fluvial, posteriormente se analizó el registro histórico de caudales en una estación hidrométrica ubicada aguas abajo, a partir de dicho análisis se encontró que además del evento de 1995 existió uno en 1955 con características similares, por lo que ambos eventos se describieron, después se realizó un análisis del comportamiento morfológico del río y por último se hizo un análisis estadístico de gastos máximos, con el fin de determinar el periodo de retorno asociado. A continuación, se describen los resultados obtenidos de la secuencia descrita.

Al consultar diversas fuentes de información, se encontró que la hidráulica fluvial puede ser estudiada desde dos perspectivas, como rama de la geomorfología, que se centra en el estudio de la forma y los procesos relacionados a la misma; y como parte de la ingeniería hidráulica, que tiene un enfoque dirigido al estudio de transporte de sedimento, así como también el comportamiento de las variables velocidad, tirante, pendiente de fondo, entre otras. Ambos enfoques tienen como objeto de estudio los ríos aluviales, los cuales son sistemas naturales capaces de transportar material suelto proveniente de la erosión de márgenes y del fondo del cauce. Como se explicó anteriormente, dichos sistemas pueden clasificarse partiendo de la duración de la corriente, de su forma en planta, de los materiales que constituyen el cauce, y por su edad. Estas clasificaciones están ligadas con las características de la cuenca, si esta tiene aporte de agua subterránea en épocas de estiaje el cauce principal será perenné en cualquiera de sus tramos. En cuanto las formas en planta, en las partes altas la forma estará condicionada a la topografía y el relieve, por lo que es posible encontrar tramos con una sinuosidad baja o alta, debido a la existencia de márgenes rocosos que impiden el desplazamiento libre del cauce. Conforme el cauce desciende y el valle se abre, éste entrará en una zona de transición, la cual marca una frontera imaginaria entre una zona de pendientes de elevadas y otra de valle, la cual tendrá pendientes muy bajas. En la zona de transición, el cauce tendrá una tendencia a dividirse formando un cauce trenzado, y

en la zona de valle, se formarán grandes meandros cuya sinuosidad aumenta conforme se acerca al punto de drenaje. Por lo que, en base a la información recopilada, el río Bobos se clasifica de las siguientes formas (Ver Tabla 15).

Tabla 15 Clasificación del río Bobos

Tipo de clasificación	Clasificación	Sustento
Por su duración de la corriente	Perenne	El río Bobos forma parte del cauce principal, que transporta agua y sedimento todo el año, inclusive en épocas de estiaje. Esto se puede comprobar con el registro de estaciones hidrométrica y al consultar imágenes satelitales en diversos periodos
Por su forma en planta	Entrelazado	Por la revisión de imágenes satelitales en un periodo cercano a los 30 años, se observa que la forma dominante del tramo del río cercano a Vega de la Peña es entrelazado (Ver capítulo 8).
De acuerdo con su edad y posición de la cuenca.	Río de montaña (Joven) – Río de llanura(viejo)	El tramo cercano a Vega de la Peña corresponde a una transición entre un río de montaña y otro de llanura, por lo que se forma un cauce entrelazado, que es característico en zonas medias.
Por los materiales constituyentes de la margen y el fondo	Granular	Si bien no fue posible obtener granulometría de las márgenes y fondo, se infiere que de acuerdo a su posición, el tipo de material predominante es granular.

Otro aspecto que considerar son los parámetros morfométricos de drenaje de la cuenca que en conjunto ayudan a identificar tendencias de comportamiento del cauce principal. En el caso de la cuenca Nautla, tiene un factor de forma de 0.33, por lo que entra en la categoría de cuenca alargada, con baja susceptibilidad a las avenidas, respecto al drenaje la densidad de drenaje calculada refleja que la cuenca no tiene un drenaje eficiente, pero no al grado de ser considerada pobremente drenada. Por último, la curva hipsométrica nos muestra que la cuenca se encuentra en una etapa de vejez, y tiene como proceso dominante la sedimentación.

Por otra parte, en el cauce principal se pueden encontrar tres formas(figura 29), la primera de ellas se ubica en la parte alta, donde el río transcurre por un único canal, y se observan tramos rectos de sinuosidad baja de 1.15, aunque también se forman

curvas pronunciadas debido al relieve, en la segunda zona existente bifurcaciones, y se observa un río trenzado en hasta 4 canales, destacando que Vega de la Peña se encuentra en esta zona, y por último, la zona de valle donde se alcanza una sinuosidad de 1.78 y se observan grandes meandros.

Los registros pluviométricos e hidrométricos reflejan la existencia de dos eventos relevantes en la cuenca. El primero de ellos, en septiembre de 1955 asociado a Janet, cuyos efectos tuvieron una duración cercana a los 9 días, y provocó una precipitación máxima diaria de 324 mm, junto con un gasto pico de 4540 m³/s que, de acuerdo con periódicos de la época, provocó inundaciones en diversos poblados cercanos al cauce, principalmente en aquellos cercanos al punto de drenaje. Aunque no se cuenta con informes técnicos sobre daños a Vega de la Peña debido a que ésta no había sido explorada formalmente y se encontraba en un relativo abandono, no se debe descartar que la morfología vista en la imagen satelital de 1972, que es la más antigua que se pudo recopilar (Ver figura 42) es el resultado del cambio morfológico provocado de dicho evento, idea que se refuerza por testimonios recabados por arqueólogos durante 1994, en los cuales se menciona que el cauce discurría alejado de la zona, y que durante dicho se desbordó y modificó su trayecto, destruyendo estructuras anexas al edificio del Dintel.

Respecto a Roxanne tuvo influencia en la cuenca de aproximadamente 10 días en el mes de octubre de 1995, se registró un gasto pico de 3730 m³/s, con una precipitación máxima de 312 mm. El desborde del cauce principal en diversos tramos de la cuenca provocó daños en poblados cercanos a Vega de la Peña, como Martínez de la Torre, Tlacopayan, Misantla y Nautla, los cuales sufrieron de inundaciones. En el tramo cercano a Vega de la Peña, la crecida provocó la avulsión del río, el cual al cambiar de trayectoria afectó gravemente el sitio arqueológico. El edificio del Dintel perdió la mayoría de su estructura quedando únicamente dos escalinatas y parte de la estructura nuclear, el daño provocado por la acción erosiva del río es mayor al 50% del total de la superficie construida, mientras que el Juego de la Pelota, perdió la esquina sur, además de que se dañó uno de sus muros y se perdió parte de una escalinata. Otras estructuras que se perdieron fueron pequeños adoratorios de forma circular, los cuales fueron arrastrados por la corriente. El daño provocado por la avulsión del río se puede catalogar como catastrófico debido a la pérdida de gran parte del edificio del Dintel, el cual no se pudo restaurar.

Al comparar los hidrogramas de ambas crecidas, es notorio que la crecida de 1955 fue de mayor magnitud respecto a la de 1995, un aspecto a destacar es que la crecida del 95 muestra una pendiente más abrupta, ya que el gasto pico se alcanzó en un lapso de 10 horas, mientras que la del 55 demoró 20 horas. Por otra parte, se hizo el análisis estadístico del registro de caudales máximos en otros años, con la finalidad de utilizar una función de probabilidad y con ello conocer el periodo de retorno asociado, en el caso de este trabajo se empleó la distribución Log Pearson, la cual mostró un ajuste correcto a los datos medidos, resultando en una periodo de retorno de 100 años para la crecida de 1955 y de 50 años para la de 1995.

En cuanto a la distribución espacial de la lluvia no se cuentan con registros de intensidad que nos permitan validar el comportamiento de las tormentas en ambos periodos, teniendo certeza únicamente que la precipitación máxima alcanza en ambas tormentas es similar de 324 mm para 1955, y de 312 mm para 1995.

Por medio de imágenes satelitales se determinó la forma en planta dominante del río, así como su posición respecto a Vega de la Peña, las imágenes más antiguas corresponden a un periodo entre 1972 a 1980, en las cuales debido a la resolución no es posible apreciar detalles del cauce, como son posibles bifurcaciones de menor ancho que del cauce principal. A partir de 1980 existen imágenes satelitales de mayor resolución, en las cuales es posible apreciar que cerca de Vega de la Peña, el cauce se bifurca, y su brazo izquierdo muestra un comportamiento intermitente, condicionado a episodios de pequeñas crecidas, y al comparar los gastos medios diarios se encontró, que tiene una escala de activación de días. Esta condición es un indicio de inestabilidad, ya que el cauce cambia su forma en un periodo corto de tiempo, aunque no se presenten avenidas representativas. Fue importante relacionar las imágenes satelitales con los gastos mensuales, y medios diarios para identificar correctamente el comportamiento del cauce, ya que el brazo de la bifurcación mencionado aparentemente fue quedando inactivo de una forma paulatina, pero relacionando el registro hidrométrico corresponde a un funcionamiento intermitente. Existe una fotografía aérea correspondiente a marzo de 1995, en la cual se pudo observar las características puntuales del cauce previo a la crecida de ese mismo año. El ancho del cauce era cercano a 30 m y discurría a un costado de Vega de la Peña, a tal grado de que el edificio del Dintel era parte de la margen del río (Ver figura 36). En la Figura 50 se observa la posición del río antes y después del evento, es posible identificar el grado de afectación al edificio del Dintel provocado por el brazo derecho, que en años posteriores desaparecería por una obra de desvío, que consistió en un muro de contención a base de gaviones (Echavarría & García, 1996).

En base a la información recopilada, se puede determinar que la zona se encontraba en peligro desde 1955, cuando el río se acercó al sitio arqueológico y se ubicó muy cerca del edificio del Dintel, ya que era susceptible a inundaciones, debido a su ubicación dentro de la llanura de inundación. Posteriormente cuando el cauce sufrió una avulsión, el edificio del Dintel se ubicó muy cerca de la margen del río, lo cual es un factor importante, ya que la estabilidad de la margen se ve afectada si existe peso sobre ella, lo cual pudo inducir una falla masiva en la margen durante la crecida, lo que provocó la pérdida del edificio dintel construido a base de material granular.

Lo sucedido en Vega de la Peña es producto de la dinámica morfológica del río, junto con un evento extraordinario que provocó la avulsión del cauce, sumado a factores que por si solos ponían en peligro la zona, como la ubicación del sitio arqueológico dentro de la llanura de inundación del río y que, el tramo cercano era trezado, que como se ha mencionado caracteriza por una gran actividad

morfológica, de la cual, se encontraron indicios de inestabilidad, como la activación del brazo izquierdo de la bifurcación en una escala corta de tiempo. A estas condiciones locales, se le suma la posición de Vega de la Peña en la cuenca, ubicándola una zona de transición, caracterizada por cambios morfológicos constantes. En la actualidad el sitio cuenta con las estructuras de protección necesarias para salvaguardar la zona, pero, es importante mencionar que en otros lugares la revisión de registros hidrométricos, e imágenes satélites son de gran ayuda para predecir el comportamiento dinámico de cauces, que pueda desencadenar pérdidas humanas o daños materiales.

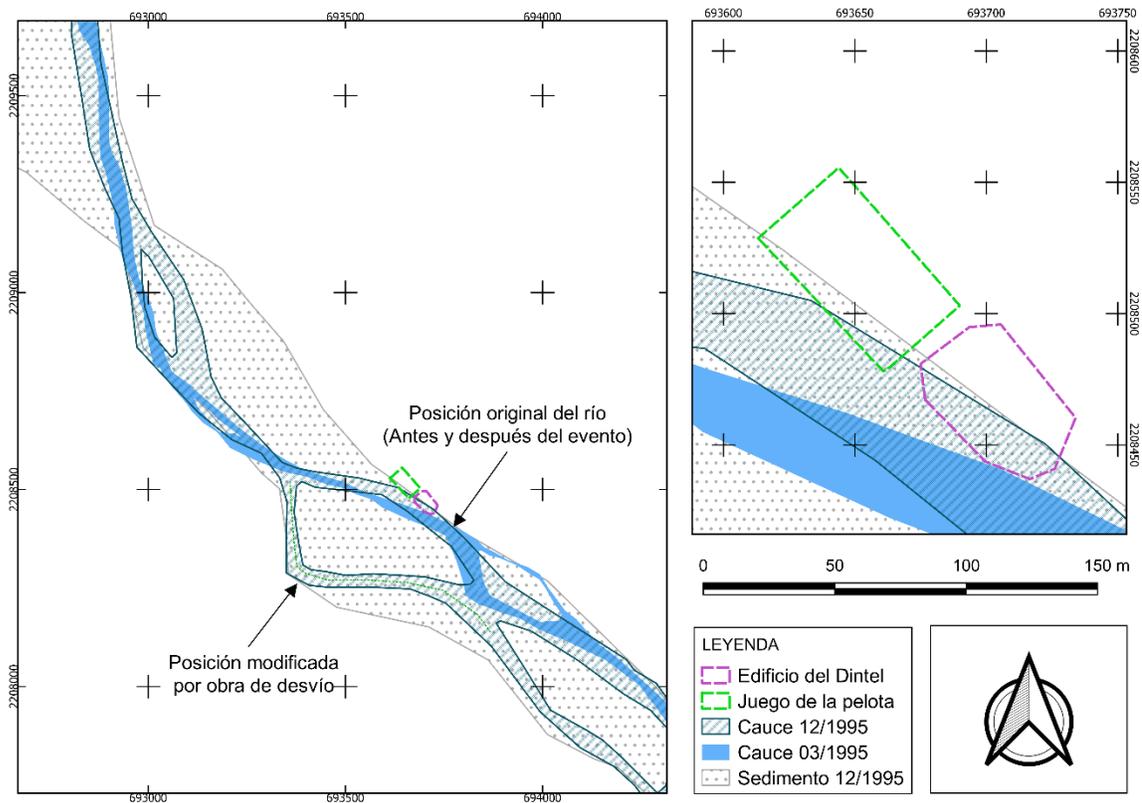


Figura 50 Posición del cauce en dos periodos, el primero de ellos se digitalizó en base a una ortofoto, mientras que la de diciembre del 95 por medio de una imagen satelital

12 Anexo: Aplicación de distribuciones de probabilidad

Previo al análisis de frecuencias de los gastos máximos, la información existente debe de someterse a ciertas pruebas para saber si esta es fiable, por lo que se deben cumplir estos puntos:

- 1.- Verificar la calidad y cantidad de información

2.- Verificar la homogeneidad de la serie, en este caso se muestra la prueba Helmert, que utiliza la siguiente expresión:

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1} \quad \text{Ec. 11}$$

Dónde S representa una secuencia y C un cambio de signo, esto se hace con la serie de datos ordenados de acuerdo con el año de registro, posteriormente se calcula el promedio y se hace de este valor con cada gasto, y se cuentan los cambios de signo respecto al valor de la diferencia anterior,

3.-Verificar la independencia de eventos de la serie, se empleará la prueba de Anderson:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (Q_i^j - \bar{Q}^j)(Q_{i+k}^j - \bar{Q}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2} \quad \text{Ec. 12}$$

Debe cumplirse que el valor de r_k^j , esté dentro de los límites de la Ec. 13, la cual es para un 95% de confianza. Si solo el 10% de los valores de r_k^j sobre pasa los límites de confianza la serie analizada es independiente.

$$r_k^{j'} = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n_j - k - 1}}{n_j - k} \quad \text{Ec. 13}$$

Dónde:

$\bar{Q}^j = \text{Promedio de la serie, en } m^3/s$

$n_j = \text{Tamaño de la serie}$

$k = 1, 2 \dots \frac{n_j}{3} \text{ (Toma valores hasta un tercio del tamaño de la serie)}$

1.1 Cálculo de periodo de retorno

En casos de diseño se necesita conocer el gasto máximo en base a un periodo de retorno, por lo que se requiere que la función de distribución de probabilidad se invierta, lo que resulta para algunas distribuciones complicado, por lo que se puede emplear este método alternativo, en el cual la magnitud de un evento hidrológico extremo (x_T) se puede calcular a partir de la media (μ) más un incremento que depende de la desviación estándar del registro (σ) y un factor de frecuencia que es distinto para cada distribución (K_T) (Chow, R.Maidment, & Mays, 1994):

$$x_T = \mu + K_T \cdot \sigma \quad \text{Ec. 14}$$

Dónde:

$x_T = \text{Gasto de diseño o máximo, asociado a un periodo de retorno } Tr \text{ o frecuencia}$

Por otra parte, los valores de la media aritmética(μ) y desviación estándar(σ) se obtienen con:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad \text{Ec. 15}$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Ec. 16}$$

1.2 Distribución Normal

Si bien, la distribución normal no es empleada para series de datos máximos y suele usarse para Gastos promedios diarios, el factor de frecuencia (K_T) de esta distribución es usado para otras distribuciones, por lo que se muestra a continuación:

$$K_T = z = w - \frac{2.525517 + 0.802853w + 0.010328w^2}{1 + 1.432788w + 0.189269w^2 + 0.001308w^3} \quad \text{Ec. 17}$$

Dónde w , se obtiene de la frecuencia con la cual se busca calcular el $Q_{m\acute{a}x}$:

$$w = \left[\ln \left(\frac{1}{p^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Siempre que } (0 < \rho \leq 0.5) \quad \text{Ec. 18}$$

Si la frecuencia es mayor a 0.5, es decir con periodos de retorno menores a 2 años, ρ se reemplaza con $(1-\rho)$ y z adquiere un valor negativo:

$$w = \left[\ln \left(\frac{1}{(1-p)^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Siempre que } (\rho > 0.5) \quad \text{Ec. 19}$$

1.3 Distribución Log Normal

Se aplica el mismo procedimiento que la distribución normal, utilizando logaritmos naturales de los datos, por lo que la Ec. 14 queda reescrita:

$$y = \mu_y + K_T \cdot \sigma_y \quad \text{Ec. 20}$$

Una vez calculado y , se debe despejar el gasto máximo de la siguiente forma:

$$y = \ln x, Q_{m\acute{a}x} = 10^y \quad \text{Ec. 21}$$

La media(μ_y) y desviación estándar(σ_y) se obtienen de la siguiente forma:

$$\mu_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log x_i \quad \text{Ec. 22}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log x_i - \mu_y)^2} \quad \text{Ec. 23}$$

1.4 Distribución Log-Pearson

Se emplea la Ec. 20 y Ec. 21 al igual que la Ec. 22 y Ec. 23 para el cálculo de la media aritmética (μ_y) y desviación estándar (σ_y). El factor de frecuencia K_T se calcula de la siguiente forma:

$$K_T = z + (z^2 - 1)k + \frac{1}{3}(z^3 - 6z)k^2 - (z^2 - 1)k^3 + z \cdot k^4 + \frac{1}{3} \cdot k^5 \quad \text{Ec. 24}$$

Dónde k se calcula con el coeficiente de asimetría (Cv) de los logaritmos de x_i , mientras que z se calcula con la Ec. 23.

$$k = \frac{Cv}{6}, Cv = \frac{n \sum_{i=1}^n (\log x_i - \mu_y)^3}{(n-1)(n-2)\sigma_y^3} \quad \text{Ec. 25}$$

Si Cv es igual a cero, K_T es igual a z , como se muestra en la Ec. 24.

1.5 Distribución Gumbel

Para el cálculo del Gasto se emplea la ecuación Ec. 14, mientras que para la media aritmética (μ) y desviación estándar (σ) de la Ec. 15 y Ec. 16. El factor de frecuencia K_T se calcula por medio del periodo de retorno:

$$K_T = \frac{-\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0.5772 + \ln \left[\ln \left(\frac{Tr}{Tr - 1} \right) \right] \right\} \quad \text{Ec. 26}$$

1.6 Distribución Log-Gumbel

Para estimar el gasto máximo con esta distribución, se emplea la ecuación Ec. 20 y Ec. 21 de la misma forma que fue descrita con anterioridad, es decir la media aritmética (μ_y) y desviación estándar (σ_y) están en función del logaritmo de x_i , por lo que se deben usar las ecuaciones Ec. 22 y Ec. 23, teniendo como diferencia que el factor de frecuencia (K_T) será el correspondiente a la ecuación Ec. 26 de la distribución Gumbel.

13 Bibliografía

Alarcón, M. N. (07 de Mayo de 2019). *El huracán Janet y el desastre de 1955 en Quintana Roo: estudio de una coyuntura crítica*. Obtenido de <https://antropica.com.mx/ojs2/index.php/AntropicaRCSH/article/view/196/18>

- Aldana, P. A. (20 de Julio de 2015). *Curso básico de hidráulica fluvial*. Obtenido de <https://www.imta.gob.mx/potamologia/images/potamologia/CV-profesores-curso/DR.%20PEDRO%20ANTONIO%20GUIDO%20ALDANA.pdf>
- Álvarez, J. A., & Flores, M. G. (1996). *Estabilidad de cauces*. Obtenido de Capítulo 12 del Manual de Ingeniería de Ríos: http://eias.usalca.cl/isi/publicaciones/unam/estabilidad_de%20cauces.pdf
- Álvarez, J. A., & Flores, M. G. (1996). *Manual de Ingeniería de Ríos, Capítulo 12: Estabilidad de cauces*.
- Asensio, S. I., Ramón, H. M., & Blanquer, J. M. (20 de Abril de 2011). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfolog%C3%ADa%20de%20una%20cuenca.pdf>
- Ayala, J. E. (2000). Estabilidad de cauces. En *Protección y control de cauces*. México: CNA-IMTA.
- Ayala, J. E. (2000). *Morfología de ríos*. México : CNA-IMTA.
- Ayala, M. J., & Verdugo, J. A. (Diciembre de 2015). *ESTUDIO DE BIFURCACIONES EN RÍOS*. Obtenido de <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1781/HC-1510.1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Basile, P. A. (2018). Capítulo 1: Caracterización de sistemas fluviales. En *Transporte de sedimento y morfodinámica de ríos aluviales*. Universidad Nacional del Rosario.
- Bitrán, D. B. (Octubre de 2001). *Características del impacto socioeconómico de los desastres ocurridos en México en el periodo 190-99*. Obtenido de <http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Junio2006/CD2/pdf/spa/doc13843/doc13843-1d.pdf>
- CENAPRED. (Enero de 1996). *Huracán Roxanne*. Obtenido de https://www.files.cenapred.unam.mx/es/BibliotecaVirtual/BibliotecaVirtualSINANPROC/revistas/R_163_13Doc.pdf
- CENAPRED. (2014). *Ciclones tropicales*. Obtenido de <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/5-FASCCULOCICLONESTROPICALES.PDF>
- CENAPRED. (2019). *Inundaciones*. Obtenido de <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF>
- Chester, S., Sandra, B., Eduardo, C., & David, M. (2017). *Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río*

Paute en Ecuador. Obtenido de Métodos y análisis con Tecnologías de la Información Geográfica Ponencia 9.

Chow, V. T., R.Maidment, D., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogota, Colombia: McGRAW-HILL.

CONAGUA. (20 de Abril de 2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Costero de Veracruz*. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/273078/DR_3006_COSTERA_DE_VERACRUZ.pdf

D.O.F. (31 de Diciembre de 2010). *ACUERDO POR EL QUE SE ACTUALIZA LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE LAS AGUAS SUPERFICIALES EN LAS CUENCAS HIDROLOGICAS RIO TUXPAN, RIO CAZONES, RIO TECOLUTLA, RIO NAUTLA, RIO MISANTLA, RIO COLIPA Y LLANURAS DE TUXPAN, MISMAS QUE FORMAN PARTE DE LA SUBREGION*. Obtenido de http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5218725

Díaz, D. P., Sesma, J. A., & Ortega, M. d. (s.f.). *Hidrología*.

Echavarría, A., & García, F. (Noviembre de 1996). *INFORME DE LA VISITA TÉCNICA EFECTUADA A LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE VEGA DE LA PEÑA, EN LA RIBERA DE LA CAÑADA DE FILO-BOBOS, EN VERACRUZ*. (CENAPRED, Ed.) Obtenido de <https://www.files.cenapred.unam.mx/es/BibliotecaVirtual/BibliotecaVirtualSINANPROC/Informes%20Blancos/1996/Veracruz,segurid.estruc.zonaArqueol.1996.pdf>

Farías, H. D. (Noviembre de 2005). *Análisis del concepto de Gasto dominante en ríos aluviales y evaluación de metodologías de cálculo*. Obtenido de http://irh-fce.unse.edu.ar/TC/TC_Farias_Gasto_Dominante.pdf

Farias, H. D., & Ruben, L. G. (2015). *ANÁLISIS CONCEPTUAL Y CUANTIFICACIÓN DE LA RELACIÓN DE LANE PARA PREDECIR TENDENCIAS EVOLUTIVAS DE CAUCES FLUVIALES*. Obtenido de http://ponce.sdsu.edu/farias_lane_2015.pdf

Gaceta Oficial del estado de Veracruz. (11 de Agosto de 1992). *Gaceta oficial: Declaratoria de área natural protegida de la zona del río Filo-Bobos y su entorno, ubicado en los municipios de Tlapacoyan y Atzalan, Ver*. Obtenido de http://siaversedema.org.mx/wp-content/uploads/2018/05/Decretos_ANP/R%C3%ADo%20Filobobos%20y%20su%20entorno%2011-08-1992.pdf

García, C. C. (1999). Cambio ambiental y equilibrio dinámico de los cauces. *Papeles de Geografía*(30), 31-46.

- García, E. (1964). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen (Para adaptarla a las condiciones de la república mexicana)*. Obtenido de <https://www.igg.unam.mx/geoigg/biblioteca/archivos/memoria/20190917100949.pdf>
- González Ortega, J. M. (2004). *Análisis de procesos de erosión local en márgenes de cauces fluviales con curvatura en planta*. Obtenido de <https://oa.upm.es/1038/1/04200407.pdf>
- Gooujon, A. S. (1994). *FILO-BOBOS, PROYECTO ESPECIAL DE ARQUEOLOGÍA: Informe de los trabajos de excavación en la estructura 9 del conjunto sur, de Vega de la Peña*. INAH.
- Guerrero, F. M., & Cortés, J. (1994). *FILO-BOBOS, PROYECTO ESPECIAL DE ARQUEOLOGÍA: Informe del estado geológico y geohidrológico (Vol. II y III)*. INAH.
- Hernández, A. S. (1995). *Metodología para la estimación de la cota de inundación y cálculo de los Gastos máximos en corrientes sin información hidrométrica*. Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/011643/011643.pdf>
- INECC. (15 de Noviembre de 2007). *Capítulo II. Caracterización ambiental de México y su correlación con la clasificación y la nomenclatura de las comunidades vegetales*. Obtenido de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/421/cap2.html>
- INEGI. (2020). *Cubo de Datos Geoespaciales de México (CDGM)*. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/contenidos/investigacion/geomediana/doc/cubo_de_datos.pdf
- INEGI. (2021). *ASPECTOS TÉCNICOS DE LAS IMÁGENES LADSAT*. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/doc/Aspectos_tecnicos_landsat.pdf
- Jones, L., & Schumm, S. (1999). Causes of avulsion: an overview. 171-178.
- Julien, P. Y. (2002). *River mechanics*. New York: Cambridge University .
- Ley de aguas nacionales*. (1 de Diciembre de 1992). Obtenido de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_060120.pdf
- Martínez, G. A. (Diciembre de 2017). *CÁLCULO MATEMÁTICO DEL CAMBIO A LARGO PLAZO DE LA PENDIENTE DE UN RÍO AGUAS ABAJO DE UNA PRESA*. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/14211/tesis.pdf?sequence=1>

- Mas, F. M. (01 de Septiembre de 2013). *Las riberas fluviales*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/256993717_Las_riberas_fluviales
- Matadamas, M. E. (2011). *La historia extraviada: Arqueología mexicana en el umbral del siglo XXI*. México, D.F: CONACULTA.
- MEVyT. (s.f.). *Regiones fisiograficas del país*. Obtenido de http://www.cursosinea.conevyt.org.mx/cursos/pcn/antologia/cnant_4_11.htm
- Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidráulica de superficie*. México, D.F.: LIMUSA.
- Moo, J. J. (2011). *El Palacio de Vega de la Peña*. Obtenido de https://mediateca.inah.gob.mx/islandora_74/islandora/object/tesis%3A829
- Moo, J. M. (2011). EL PALACIO DE VEGA DE LA PEÑA: Exploración arqueológica en Filobobos, Veracruz. México, D.F.
- Nardi, L. (2011). *Numerical and physical modelling of bank retreat in gravel-bed rivers*. Florence, Italy: Faculty of Engineering, University of Florence.
- Ramírez, M. G. (1 de Agosto de 2006). *TRAYECTORIAS HISTÓRICAS DE LOS CICLONES TROPICALES QUE IMPACTARON EL ESTADO DE VERACRUZ DE 1930 AL 2005*. Obtenido de <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-218-15.htm>
- Ramonell, C. G. (1997). *Geomorfología de cauces aluviales*. Obtenido de <http://infofich.unl.edu.ar/upload/494513ade4aaa90a561fa4ebba346dbb068e045f.pdf>
- Riemann, H. (2015). La cuenca del Nautla y la conservación de sus recursos naturales. En L. C. Monjardón, & A. C. Bello, *Bases para la construcción de un modelo de gobernanza: La cuenca del Río Nautla* (págs. 143-168). Veracruz: El Colegio de Veracruz. Obtenido de La cuenca del Río Nautla.
- Rocha, A. (1998). *Introducción a la hidráulica fluvial*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rodríguez, M. G. (01 de Enero de 2012). *El modelado fluvial. Procesos de erosión, transporte y sedimentación fluvial. Formas resultantes*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/263925569_El_modelado_fluvial_Procesos_de_erosion_transporte_y_sedimentacion_fluvial_Formas_resultantes_Riesgos_de_avenidas_e_inundacion_medicion_prediccion_y_prevenccion_Los_fenomenos_de_ladera_Riesgos_asociado
- Rubio, T. O. (2011). *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*.

- Sabater, S., & Elosegí, A. (Abril de 2009). *Presentación: Importancia de los ríos*. Obtenido de Conceptos y técnicas de ecología fluvial: https://www.fbbva.es/microsites/ecologia_fluvial/pdf/cap_01.pdf
- Sánchez Moya, Y., & Sopeña, A. (2010). *Sedimentología Del proceso físico a la cuenca sedimentaria: Sistemas aluviales de baja sinuosidad*. Madrid.
- Sánchez, D. G., García, M. H., & Ríos, G. L. (16 de Diciembre de 2006). *Ecología de las Zonas Ribereñas*. Obtenido de Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, vol. 12, núm. 1: <https://www.redalyc.org/pdf/629/62912107.pdf>
- Sánchez, J. G., & Álvarez, J. A. (1996). Capítulo 11: Morfología de Ríos. En *Manual de Ingeniería de Ríos*.
- SCT. (1992). *Métodos hidrológicos para previsión de escurrimientos*. México: SCT.
- SEMAR. (2001). *¿Está usted enterado de qué es un Huracán?* Recuperado el 03 de Marzo de 2021, de https://meteorologia.semar.gob.mx/fenomenos_hidromet/huracanes.htm#:~:text=En%20la%20cuenca%20tropical%20de,la%20costa%20occidental%20de%20M%C3%A9xico.
- SEMARNAP. (1997). *Estadísticas del medio ambiente*. Obtenido de Suelos: <http://www.paot.org.mx/centro/inegi/amb1997/capitulo2-1-6.pdf>
- Sopeña, A., & Moya, Y. S. (2010). *Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria: Los sistemas aluviales*. Madrid.
- Thorne, C. R., & Tovey, N. K. (18 de Agosto de 1980). Stability of composite river banks. *Earth surface processes and landforms*, 6, 469-484.
- Trejo, F. R., Us, F. U., Cortés, G. S., & Flores, L. L. (Abril de 2013). *Inspección de cauces: guía de reconocimiento en campo*. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v4n2/v4n2a10.pdf>
- Trejo, F. R., Us, F. U., Cortés, G. S., & Flores, L. L. (Abril de 2013). *Inspección de cauces: guía de reconocimiento en campo*. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v4n2/v4n2a10.pdf>
- Vide, J. P. (2003). *Ingeniería de ríos*. Barcelona, España : Alfaomega.
- Villion, M. B. (2006). *Hidrología Estadística*. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.