



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARACTERIZACIÓN FLUVIAL Y ANÁLISIS  
MULTIVARIADO, APLICADO A LA MIGRACIÓN  
DE MEANDROS

**T E S I S**

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
(HIDRÁULICA)**

**PRESENTA:  
VLADIMIR CONTRERAS GONZÁLEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:  
Dr. M. ALFONSO GUTIÉRREZ LÓPEZ**



JIUTEPEC, MORELOS.

2009

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por haberme dado la oportunidad de formarme en sus filas académicas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico que me otorgó para la realización de mis estudios de maestría.

Al Dr. Alfonso Gutiérrez López, por tomar de su valioso tiempo para la dirección y revisión de este trabajo. Por sus aportaciones siempre novedosas, las cuales fueron de mucha ayuda para la realización y culminación exitosa de este trabajo. Así como por su amistad; le doy las gracias sinceramente.

A los investigadores del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), por el apoyo otorgado para realizar un trabajo como este.

Al M.I. Roberto Mejía Zermeño por su dedicación en la revisión de este trabajo, por abrirme las puertas al trabajo en el instituto y por iniciarme en un tema que tanto le apasiona como es la hidráulica fluvial.

A mis profesores del posgrado de ingeniería de la UNAM, Dr. Felipe Arreguín Cortés, Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares, Dr. Álvaro Alberto Aldama Rodríguez, Dr. Carlos Fuentes Ruíz, Dr. Alfonso Gutiérrez López, Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco, Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka, M.I. Juan Francisco Gómez Martínez, Dr. Heber Saucedo Rojas, M.I. Alfredo R. Ocón Gutiérrez, Dr. Ariosto Aguilar Chávez, Víctor Manuel Arroyo Correa, M.I. Roberto Mejía Zermeño, Dr. Nahúm Hamed García Villanueva, M.I. Edmundo Pedroza; que gracias a ellos aprendí diversos aspectos del aula, del trabajo y de la vida.

A la Sra. Marilú Barba Córdova e hija Marilú Pineda Barba, por los múltiples favores que me hicieron durante toda mi estancia en el instituto.

A la M.I. Edith Salcedo por su apoyo y motivación; también al coordinador del posgrado de ingeniería hidráulica de la UNAM, Dr. Carlos Escalante Sandoval. Y al excoordinador de los posgrados del campus Morelos, M.I. José Alfredo González Verdugo y al actual coordinador Dr. José Raúl Flores Berrones, gracias.



## **DEDICADO A:**

A nuestro Padre, por haberme hecho como soy, por enseñarme su camino, por darme una familia y por todo lo que nos da a cada instante.

A mi compañera de vida Hélène por su exceso de apoyo, tiempo y amor. Por ser de quien continuamente aprendo y por hacerme muy feliz. A nuestro pequeño y cariñoso Noé, y los que siguen también están incluidos.

A mis padres Francisco y Enriqueta, por ser un pilar muy importante en mi vida. Por su tiempo, amor, apoyo y ejemplo durante mi vida.

A mis hermanos Nadia Lizette, Alberto, Francisco e Yvonne por estar conmigo siempre.

A mi tío Julián González, por sus consejos.

A mis compañeros y amigos de generación, Daniel Díaz y Ana Palacios, por su amistad y compañía.

## INDICE GENERAL

- Introduccion
  - Antecedentes
  - Problematica
  - Objetivos
- Zona de estudio
  - Descripcion de la zona de estudio
- Analisis de informacion de precipitacion e hidrometrica
  - Distribucion y seleccion de estaciones climatologicas
  - Informacion hidrometrica
  - Caracteristicas de las cuencas de toda la zona
  - Analisis de frecuencias de gastos maximos anuales
- Morfologia de los cauces
  - Generalidades
  - Descripcion morfologica de los cauces de la zona de estudio
  - Analisis de siete cauces de la zona
- Tecnicas de analisis multivariado
  - Analisis de componentes principales
  - Aplicacion del ACP a los datos del rio Cahuacan
  - Recomendaciones
- Pronostico de la zona de riesgo en meandros
  - Introduccion
  - Descripcion del area en estudio
  - Desarrollo
  - Discusion
  - Resumen de la metodologia propuesta
- Conclusiones
- Referencias
- Anexo A
  - Parametros de las f. d. p. ajustadas
  - Error estandar de los ajustes de las funciones de distribucion de probabilidad
- Anexo B
  - Figuras de los meandros analizados

## **Capítulo 1    Introducción**

### ***1.1.    Antecedentes***

Huracanes, sismos, incendios, erupciones volcánicas y, sobre todo sequías e inundaciones periódicas, suceden en el territorio mexicano, donde las zonas áridas del norte y las regiones húmedas del sur son extremos de variados matices que se extienden por todo el territorio.

Diversos esfuerzos científicos se multiplican en México para enfrentar las emergencias de un terremoto o de una erupción volcánica. Menos soluciones hay ante sequías e inundaciones que arrasan cada año con vidas humanas, viviendas, animales y cosechas agrícolas del país. En la búsqueda de respuestas para enfrentar esos fenómenos naturales, las investigaciones a veces siguen caminos tan especializados que las aíslan entre sí. Para combatir ese aislamiento, se debe trabajar de manera conjunta y eficientar la detección y los resultados de diversos trabajos científicos. Muchos resultados científicos

enfatan que los graves efectos de un desastre natural podrían disminuir si la gente dejara de habitar en zonas de alto riesgo.

Como hemos visto últimamente, la naturaleza ha castigado, y con particular severidad, el sureste de México de manera cíclica en los últimos años. Poco más de 800 mil damnificados principalmente en los estados de Chiapas, Oaxaca, Veracruz, Quintana Roo y Yucatán; cuantiosos daños a la infraestructura turística, de comunicaciones y productiva y enormes pérdidas económicas como resultado del paso de los huracanes Stan y Wilma en 2005 (CENAPRED).

Estos fenómenos dejaron al descubierto varios desastres importantes, los cuales se describen a continuación:

El desastre de la gestión de los recursos forestales. Stan reafirmó que la acelerada deforestación de las zonas montañosas de Chiapas, y del resto de México, aumenta la vulnerabilidad a huracanes, inundaciones y otros fenómenos climáticos. Los enormes torrentes de agua que destruyeron las ciudades de la costa y sierra de Chiapas, no hubieran descendido con tal violencia si hubiera existido todavía la capa boscosa que ni el gobierno ni las propias comunidades dueñas del recurso, han sido capaces de preservar.

El desastre del crecimiento urbano. Los huracanes ratificó la evidencia del desastroso crecimiento de los asentamientos humanos. Colonias que no tenían que estar ubicadas en el cauce de los ríos; zonas habitacionales construidas en zonas bajas o inundables completamente anegadas. Las ciudades han crecido sin orden, sin obedecer a una planeación mínima que garantice su expansión segura y sustentable. Hoy, el dilema es prácticamente tener que rediseñar las ciudades destruidas, las preguntas son ¿con qué dinero? ¿con qué criterios?.

El desastre de la protección civil. En México se estima que aproximadamente el 70% de la población nacional habita en zonas expuestas al riesgo de sismos, huracanes, inundaciones y accidentes de origen industrial, entre otros (La Jornada, 2006). Esta sola

dimensión y las experiencias históricas por las que se ha atravesado, debieron haber llevado hace un buen rato a conformar un sólido sistema nacional de protección civil para trabajar la prevención y mitigación y respaldo gubernamental y social para reordenación del territorio. Lo cierto es que una proporción importante de la población carece todavía de cultura de prevención y respuesta ante estos fenómenos, no se cuenta con mapas detallados de riesgo y los fondos para afrontar las emergencias son a todas luces insuficientes, haciendo necesario recurrir a recursos contingentes.

El desastre de la pobreza. Los desastres naturales ponen en evidencia la dimensión y profundidad de la pobreza que afecta a millones de mexicanos. En Chiapas la inmensa mayoría de los afectados fueron los pobres, aquellos que carecen de suelo y financiamiento para construir sus casas en zonas más seguras y no a orilla de los ríos; aquellos que no cuentan con redes familiares que les ayuden a recuperar lo perdido; aquellos que no saben de seguros contra daños, contra el desempleo o la pérdida de sus activos productivos.

La costa de Chiapas es sumamente vulnerable a fenómenos naturales como los huracanes y a aquellos ocasionados principalmente por exceso de agua. Con las lluvias, los ríos que bajan de la montaña, al no tener un cauce definido, inundan las planicies con los daños consecuentes: infraestructura que se fractura o se rompe, interrumpiendo las comunicaciones y daño a las zonas urbanas.

Si bien los escurrimientos juegan un factor fundamental en los desastres que acontecen en la costa de Chiapas, también tienen que ver en ellos aspectos como la geomorfología o las formas del relieve; el clima y la meteorología; el uso del suelo y las características económicas y sociales de la región.

De hecho, en esos litorales existen pocos lugares en donde pudiera haber asentamientos sin entrañar un riesgo, estar expuestos o sin ser vulnerables a un evento natural.

Así poblaciones como Tapachula y Huixtla, por sus condiciones topográficas y fluviales, son más proclives a padecer catástrofes por corrientes hídricas. Aunado a ello, está la alteración del uso del suelo, lo cual ha traído un comportamiento hidrológico mucho más torrencial en los ríos y, por lo tanto, más peligroso.

Los desastres se presentan por la combinación de estos factores del entorno, pero además por aspectos económicos y sociales, que favorecen la vulnerabilidad y hacen de esta zona una de las más peligrosas del país.

## **1.2. Problemática**

Hasta los años de 1960, desde la parte alta de la sierra de Chiapas hasta los manglares había una continuidad en la cobertura vegetal, un mosaico de comunidades vegetales que iniciaban con bosques de pino encino por arriba de los 1,800 msnm, seguido de asociaciones de bosque mesófilo en las zonas lluviosas del Soconusco y selvas bajas subcaducifolias en los municipios de Tonalá y Arriaga. A partir de los 1,000 m y hacia abajo, grandes extensiones de selva alta cubrían los municipios de Tapachula, Cacahoatán, Huehuetán, Tuzantán, Huixtla, Villa de Comaltitlán, Escuintla y Mapastepec. Sobre la planicie costera, esta vegetación era sustituida por selva mediana, donde las lluvias disminuían su frecuencia. Finalmente en la zona de las llanuras (planicie), existían asociaciones de vegetación acuática como palmares, cyperaceas, popales, tulares y pastizales y en las partes más elevadas existían manchones de selva mediana. Actualmente todavía se pueden ver restos de esa vegetación en la zona de la Reserva de la Encrucijada en Acapetahua, Villa Comaltitlán y Huixtla. Un componente arbóreo muy importante de la vegetación acuática está constituido por el Zapatón de agua (*Pachira aquatica*), en las llanuras de los municipios Huixtla y Mazatán con un área cercana a las 2,750 has. Otro componente arbóreo en la ribera de los ríos de antaño eran los bosques de galería, de los cuales aún quedan algunos restos en río Huixtla y Huehuetán. Finalmente la zona estuarina de la costa estaba cubierta por una gran franja de manglar, que se inicia en la zona de Mar Muerto con franjas angostas de árboles de no más de 8 m de altura, y que alcanza su máximo esplendor y extensión en los municipios de

Acapetahua, Villa Comaltitlán y Huixtla, con árboles de hasta 35 m de altura y una extensión cercana a las 59,000 has.

A partir de los años 70 con el continuo poblamiento de la planicie costera, este panorama ha cambiado en forma drástica debido al impacto de las actividades humanas sobre los ecosistemas, tanto que en la actualidad queda menos del 18% de la vegetación original que cubría parte de la sierra (CNA, 2000, 2003). Y la situación es más crítica sobre la planicie, donde queda menos del 2% de la cobertura vegetal original y sólo en pequeños manchones. Esto ha provocado la pérdida del hábitat de muchas especies y reduce fuertemente la biodiversidad dentro de las Reservas de la Biosfera La Sepultura, El Triunfo y la Encrucijada. Las zonas alta y media padecen un grave proceso erosivo que va de 200 a 415 ton/ha/año, lo que provoca la pérdida de suelo de 10-20 mm/año por arriba de los 500 msnm (CNA 2000, 2002), siendo más notorio en las partes altas de los municipios de Tonalá, Mapastepec, Acacoyahua y Huehuetán (JICA 1999, CNA 2000 y 2002). La erosión ha provocado la pérdida acelerada de suelos en las partes medias y altas de la costa, aumentando la carga de sedimentos sobre todos los ríos y arroyos. Este proceso ya demostró sus efectos sobre las cuencas bajas y la población en octubre de 1998 y octubre de 2005 (con los huracanes Mitch y Stan), cuando lluvias torrenciales facilitaron el desgajamiento de los cerros, provocando grandes avalanchas de agua, lodo y rocas que se abatieron sobre algunas poblaciones como Valdivia, Mapastepec y Pijijiapan, con la consecuente pérdida de vidas humanas. Esta carga de sedimentos continuamente se ha ido a depositar en todos los sistemas lagunares y estuarinos (JICA 1999, CNA 2002).

Aunado a lo anterior, los ríos de la costa de Chiapas padecen una severa deforestación en sus márgenes, fenómeno que provoca una excesiva evaporación y calentamiento del agua, así como la erosión de las riberas facilitadas por el sobrepastoreo y los incendios. Esto ha provocado que durante los últimos cinco años, 18 de los ríos más importantes en los municipios de Arriaga, Tonalá, Pijijiapan y Mapastepec, estén agónicos o secos de febrero a mayo, como sucede con los ríos Zanatenco, De Jesús, Los Patos y San Isidro. En la zona de Pijijiapan, Mapastepec y Acacoyahua esta problemática la padecen todos los ríos que fueron encauzados por la Comisión Nacional del Agua (CNA) a

partir de 1999, como sucede con los ríos San Diego, Urbina, Pijijiapan, Bobo, Arenal, Novillero, Madre Vieja y Bonanza. Además en los ríos Lagartero, Zanatenco, San Nicolás, Vado Ancho, Huixtla, Coatán, Cahoacán y Suchiate, existe una descarga de gran cantidad de basura y desechos sólidos.

Todos los sistemas lagunares y estuarios padecen diferentes grados de asolvamiento, el cual es crónico en las lagunas de Buenavista, La Joya, Chantuto, Campón, Cerritos-Panzacola y Cabildos. Este proceso se ha acelerado debido a las obras de dragado con fines acuícolas financiadas por la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA) y la Secretaría de Pesca del Estado. Por otro lado, la descarga en poblados y ciudades de aguas residuales sin tratamiento a los ríos, lagunas, estuarios y zona marina, están provocando una alteración de dimensiones alarmantes.

Esto es crítico en los ríos Suchiate, Cahoacán, Coatán, Huehuetán, Huixtla, Zanatenco y Lagartero (CNA 2000 y 2003, PROFEPA 2002), los cuales además reciben desde la parte alta hasta la cuenca baja, las descargas de las fincas cafetaleras, de agricultores, de ranchos ganaderos y del ingenio azucarero, quienes tiran pulpa de café, desechos orgánicos diversos, estiércol y fertilizantes, a los ríos.

Las descargas están provocando la eutrofización de los ríos, con la consecuente eliminación de muchas especies residentes y migratorias en los pantanos, esteros y lagunas costeras. Esto es muy evidente en la zona límite con el mar, donde estos cuerpos de agua ya no presentan corrientes que oxigenen, diluyan y distribuyan la carga de nutrientes que arrastran. En la zona se pueden ver algunos ejemplos de plantas indicadoras de perturbación, como son el lirio acuático (*Eichornia Crassipes*), la lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), la lenteja de agua (*Lemna minor*) y el tule (*Tipha domingensis*).

El uso del agua de los mantos freáticos y de los ríos, asociados con la deforestación, ya muestran indicios de agotamiento en perjuicio de las ciudades de

Tonalá, Arriaga, Pijijiapan, Mapastepec y Escuintla, en los ríos Zanatenco, Lagartero, Pijijiapan, San Nicolás y Cintalapa.

El establecimiento de grandes áreas de monocultivos fuertemente demandantes de agua como las plantaciones de banano, papaya, mango, sorgo, maíz y soya a lo largo de la ribera de los ríos Coatán, Cahoacán, Cosalapa y Suchiate, la mayoría de ellas con un manejo deficiente y abusivo en la cantidad, uso y horario de riego, están desecando a estos cuatro ríos, los cuales ya muestran signos de agotamiento prematuro por abajo del nivel de la cota de 10 msnm. Esto es crítico entre enero-mayo, cuando grandes áreas de la desembocadura de los ríos Coatán (Barra San Simón), Caohacán (La Cigüeña-Sajío) y Barra de Suchiate, quedan expuestos. La reducción provoca una elevación de la temperatura y de la salinidad de todo el sistema lagunar, con la consiguiente pérdida de hábitat para la fauna. Este fenómeno ya es palpable en las lagunas de Cabildo y Pampa Murillo (ECOSUR, 2005).

Todos los años, en los meses de enero-mayo, se registran más de 4,000 incendios forestales, otra problemática que enfrenta la zona costera del estado de Chiapas, desde el límite con Oaxaca hasta el Suchiate. Muchos de los incendios han tenido grandes dimensiones a lo largo de la parte media de la sierra, como sucedió en los años 1987, 1989, 1998 y 2002, cuando siniestros provocados por la quema de pastizales y áreas deforestadas en la zona de Tonalá se extendieron a lo largo de toda la costa hasta el municipio de Escuintla, arrasando extensas áreas de la reservas de la Sepultura, El Triunfo y La Encrucijada.

Los incendios también son frecuentes en la zona de pantanos y manglares inmediatos a la zona marina. Sólo en 2003 y 2004 se contabilizaron más de 80/año en la zona del Castaño-Laguna de Chantuto dentro de la Reserva de la Encrucijada.

De no detenerse este proceso e iniciar una campaña de uso racional del agua de los ríos y un plan de restauración de las cuencas de al menos 22 ríos de la costa de Chiapas, en el futuro cercano se agotará su agua, provocando la desaparición de todos los

sistemas lagunares y los pantanos de agua dulce a lo largo de 200 km, como ya se observa en los municipios de Arriaga, Tonalá, Pijijiapan, Mapastepec y Acapetahua.

### **1.3. Objetivos**

Los objetivos de este trabajo pretenden colaborar de alguna forma, a mitigar la problemática mencionada.

Como primer objetivo se plantea la descripción detallada de la región en estudio, se presentan las regiones hidrológicas, su división municipal, la geología y los suelos presentes en la zona, el clima, la temperatura, la agricultura y vegetación, y por último la hidrografía (Capítulo 1).

Como segundo objetivo se propone describir el régimen hidrológico de la zona. Para cumplir con esto, se hace un análisis con la información de lluvia y con la obtenida de las estaciones de medición, instaladas en algunos cauces. El análisis para la información de lluvia consiste en su distribución y comportamiento, tanto espacial como temporal; el análisis para la información hidrométrica consiste en un análisis de frecuencias de gastos máximos anuales (Capítulo 3).

Como tercer objetivo se busca caracterizar la dinámica fluvial de la zona; así se lleva a cabo un estudio fluvial, de 35 corrientes de la zona; este estudio primeramente se introduce con las definiciones de los parámetros clasificatorios, a continuación se hace una descripción morfológica de estas corrientes; posteriormente se aplican algunas relaciones empíricas de la evolución de meandros, a siete cauces seleccionados (con meandro visible); y finalmente se muestra un resumen con las funciones obtenidas de las variables (con factores de correlación altos), en cada cauce; así como funciones generales aplicables a todos los cauces (Capítulo 4).

Como cuarto objetivo se tiene la introducción de una técnica multivariada y su posterior aplicación a las variables de meandro de un cauce, las cuales van a ser medidas y descritas en el apartado anterior. Todo esto con objeto de entender la relación que

existe entre los componentes principales y las variables involucradas en el mecanismo de meandro. Así mismo, el método multivariado aplicado al análisis de los datos, es el llamado *Análisis de Componentes Principales* (ACP); este se usa para que del conjunto de variables del fenómeno en estudio, seleccionar las más influyentes (Capítulo 5).

Como objetivo final se tiene la obtención de ecuaciones para el pronóstico y la descripción del meandro de ríos y más específicamente pronosticar las zonas de riesgo y vulnerabilidad derivadas de éste mecanismo (Capítulo 6).

En el apartado final se presentan las conclusiones, comentarios y recomendaciones finales (Capítulo 7).



## **Capítulo 2 Zona de estudio**

### ***2.1 Descripción de la zona de estudio***

El estado de Chiapas se encuentra ubicado en la base del sureste de la República Mexicana, limitando al norte con el estado de Tabasco, al este con la república de Guatemala, al sur con el océano Pacífico y al oeste con los estados de Oaxaca y Veracruz. El estado cuenta con una superficie de 73,724 km<sup>2</sup>, lo cual representa el 3.8% de la superficie del territorio nacional.

La gran abundancia de agua en el estado es notoria por la vertiente de algunos de los ríos más caudalosos y largos del país, como el Grijalva, en donde se han construido maravillosas presas que generan hasta el 13% de toda la energía eléctrica nacional y aportan el 52% de la energía generada por este medio. Otros ríos importantes son el Usumacinta, navegable y utilizado como medio de comunicación, y el Suchiate, que sirve de frontera entre México y Guatemala. El sistema se completa con lagunas interiores, humedales y lagunas costeras.

Debido a su ubicación y la heterogeneidad de su relieve, Chiapas presenta una gran riqueza de climas. Varía desde un cálido húmedo al norte del estado, con lluvias todo el año y una temperatura media de 20° C, hasta los Altos de Chiapas la zona más fría con un clima templado subhúmedo, lluvias en verano y una media de 14° C. En la vertiente del Pacífico el clima es cálido, con temperaturas de hasta 28°C y abundantes lluvias en verano. El estado de Chiapas se encuentra compuesto de tres regiones hidrológicas: Costa de Chiapas, Grijalva - Usumacinta y Coatzacoalcos (Tabla 2.1).

Prácticamente la representatividad de la región Coatzacoalcos es sólo simbólica con 0.03% de la superficie estatal.

<b>Región</b>	<b>Cuenca</b>	<b>% de la superficie estatal</b>
<b>Costa de Chiapas</b>	R. Suchiate y otros	2.81
	R. Huixtla y otros	5.86
	R. Pijijiapan y otros	3.81
	Mar Muerto	1.96
<b>Coatzacoalcos</b>	R. Tonalá y Lagunas del Carmen y Machona	0.02
	R. Coatzacoalcos	0.01
<b>Grijalva-Usumacinta</b>	R. Usumacinta	6.3
	R. Chixoy	0.77
	R. Grijalva-Villahermosa	15.78
	R. Grijalva-Tuxtla Gutiérrez	22.28
	R. Grijalva-La Concordia	17.58
	R. Lacantún	22.82

Tabla 2.1 Regiones de la Conagua que componen el estado de Chiapas

### 2.1.1 Región hidrológica Costa de Chiapas

Se ubica como su nombre lo refiere a lo largo de la costa del estado y tiene varias cuencas, entre ellas la del río Suchiate, Coatán, Huixtla, Cacaluta y Novillero, los primeros nacen en la zona norte en Guatemala; la cuenca río Huixtla se compone del río Cintalapa y el cuerpo de agua Los Cerritos; también la cuenca del Pijijiapan, que tiene sólo el río Pijijiapan y los cuerpos de agua La Joya y Buenavista; después se tiene varios cauces intermedios y por último para esta región está la cuenca de la laguna costera Mar Muerto.

Cuenta con una superficie aproximada de 11,748 km<sup>2</sup>, de los cuales 10,566 pertenecen al estado de Chiapas y 1,182 km<sup>2</sup> pertenecen al estado de Oaxaca. Para este estudio sólo se considera la parte del estado de Chiapas.

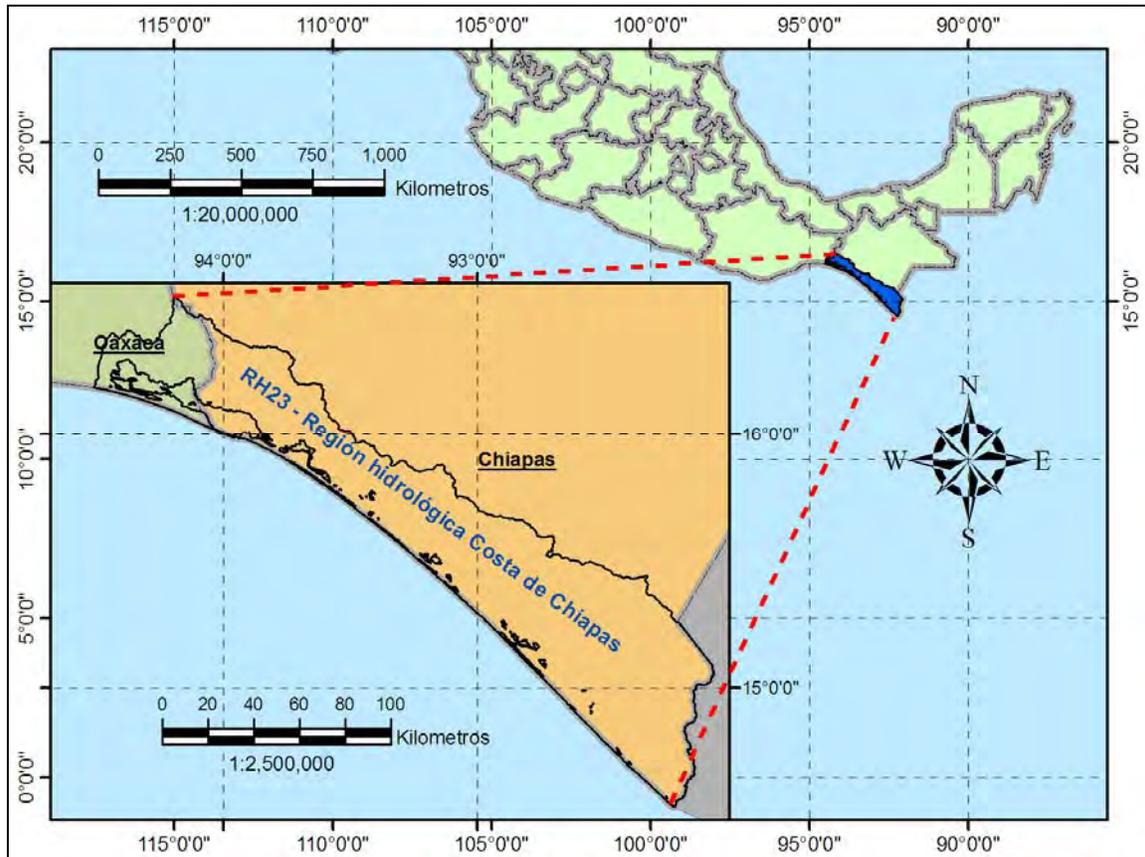


Figura 2.1 Región Costa de Chiapas

### 2.1.2 Población y municipios

Con base en los resultados del Censo de Población y Vivienda del 2005, el estado de Chiapas tiene aproximadamente una población de 4'100,000 habitantes distribuidos en 111 municipios; el 11.1% de ellos se encuentra en el municipio de Tuxtla Gutiérrez y el 9% en los municipios costeros.

En la Tabla 2.2, se tienen los 28 municipios que se encuentran dentro de la región hidrológica Costa de Chiapas.

Las principales poblaciones de la zona y, que también se ven sujetas a problemas con los sedimentos, de sur a norte son las siguientes: Tapachula, Huixtla, Tonalá, Mapastepec, Pijijiapan, Tonalá y Arriaga.

<b>No.</b>	<b>Municipio</b>	<b>Estado</b>
1	Acapetahua	Chiapas
2	Acapoyagua	Chiapas
3	Arriaga	Chiapas
4	Cacahuatán	Chiapas
5	Chahuities	Oaxaca
6	Cintalapa	Chiapas
7	Escuintla	Chiapas
8	Frontera Hidalgo	Chiapas
9	Huehuetán	Chiapas
10	Huixtla	Chiapas
11	La Concordia	Chiapas
12	Mapastepec	Chiapas
13	Mazatán	Chiapas
14	Metapa	Chiapas
15	Motozintla	Chiapas
16	Pijijiapan	Chiapas
17	San Domingo Zanatepec	Oaxaca
18	San Francisco del Mar	Oaxaca
19	San Francisco Ixhuatán	Oaxaca
20	San Pedro Tapanatepec	Oaxaca
21	Suchiate	Chiapas
22	Tapachula	Chiapas
23	Tonalá	Chiapas
24	Tuxtla Chico	Chiapas
25	Tuzantán	Chiapas
26	Unión Juárez	Chiapas
27	Villa Comaltitlán	Chiapas
28	Villa Corzo	Oaxaca

Tabla 2.2 Municipios dentro de la región hidrológica



Figura 2.2 Municipios dentro de la región Costa de Chiapas

### 2.1.3 Geología y suelos

El afloramiento rocoso en el estado de Chiapas es de origen sedimentario con 64%, el suelo ocupa 18.5%, las rocas ígneas intrusivas 14.6%, las ígneas extrusivas con 2.15% y las rocas metamórficas con 0.22% de la superficie estatal; con lo que respecta a la región de estudio se tiene aproximadamente el 38.8% de rocas ígneas intrusivas ácidas en la parte alta de la costa, el 3.4% rocas ígneas extrusivas en el sur de la costa, el 4% metamórficas en el norte y sur y el 3.14% rocas sedimentarias al sur.

Las rocas más antiguas son de aproximadamente 375 millones de años, correspondiendo a la Era del Paleozoico, cubren 16.09% del estado y son del tipo ígnea intrusiva, sedimentarias y metamórficas; se localizan en una franja con dirección noroeste-sureste paralela a la línea de costa.

La era del Mesozoico abarca la mayor parte de la entidad, entre sus periodos, el Jurásico (180 millones de años) es el menos extenso, con 0.16%, es del tipo sedimentario y se ubica al noroeste del estado; el Triásico-Jurásico (200 millones de años) cubre 2.69% del territorio chiapaneco, de origen sedimentario, ambos están alineadas de noroeste-sureste siguiendo una línea paralela a la costa y, el Cretácico (135 millones de años) el más extenso con 42.49%; sus rocas son sedimentarias y se encuentran principalmente del centro hacia el norte y del oeste al este, intercalándose con rocas del Terciario y Cuaternario; dichos periodos pertenecen a la era del Cenozoico (63 millones de años), el primero de ellos está representado por rocas sedimentarias e ígneas extrusivas con una cobertura de 20.03%, se localizan en la parte central y norte de la entidad con dirección noroeste-sureste; el segundo ocupa una superficie de 18.54%, sus afloramientos son generalmente suelos y rocas ígneas extrusivas, diseminadas por toda la entidad, sin embargo las unidades litológicas más representativas se sitúan en el oriente y en una franja paralela a la línea costera.

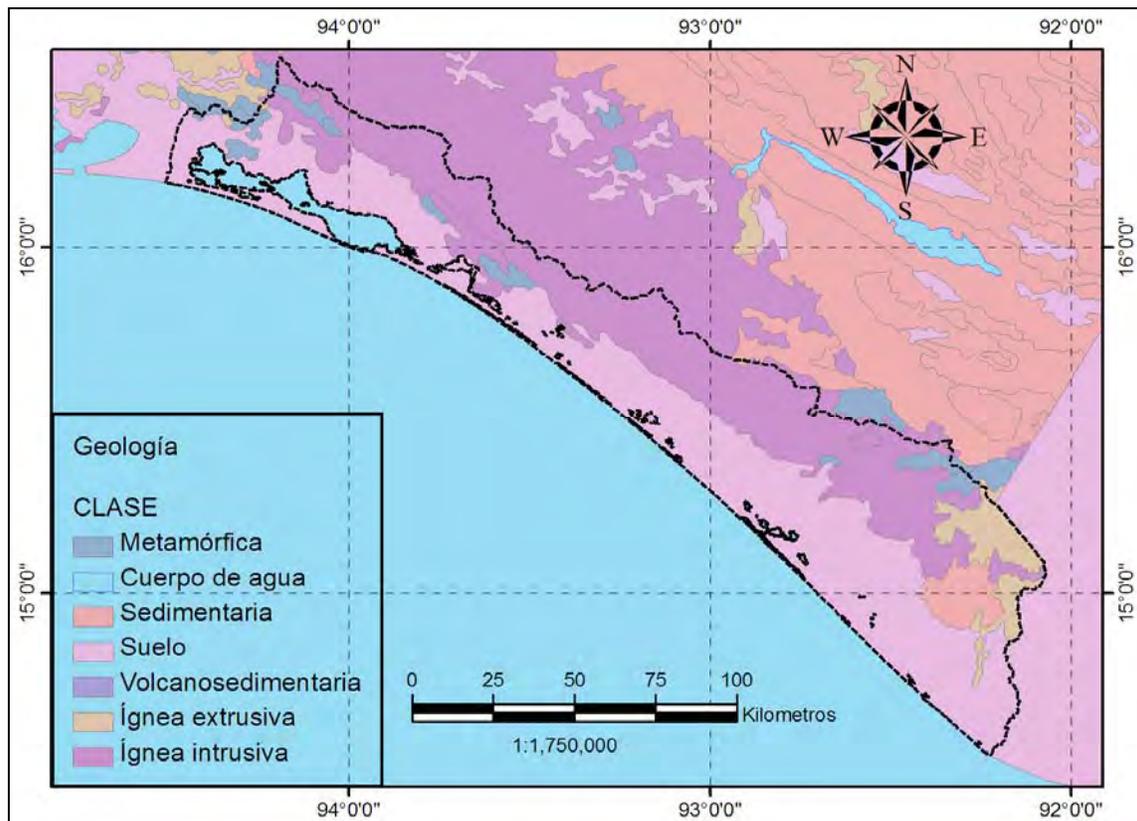


Figura 2.3 Geología presente de la zona de estudio

### **2.1.3.1 Provincia fisiográfica**

El estado de Chiapas comprende tres provincias fisiográficas:

- I. Llanura Costera del Golfo Sur;
- II. Sierras de Chiapas y Guatemala;
- III. Cordillera Centroamericana que se extiende por toda la línea de costa en las discontinuidades Llanura Costera de Chiapas y Guatemala y la Llanura del Istmo; también en esta provincia cubren la franja contigua a la de costa las subprovincias Sierras del Sur de Chiapas y Volcanes de Centro América. En esta se encuentra la región hidrológica Costa de Chiapas.

Esta provincia abarca mayor territorio en los países septentrionales de la América Central, pero tiene una importante extensión en México. La parte centroamericana es predominantemente volcánica, siendo el Tacaná, sobre la frontera México-Guatemala el último de sus volcanes hacia el norte de la cordillera. La parte chiapaneca de esta cordillera está formada primordialmente por roca granítica, no volcánica, excepto por el Tacaná. Hay dos discontinuidades fisiográficas, la Llanura del Istmo con sus grandes lagunas de litoral y la delgada Llanura costera de Chiapas en el Océano Pacífico.

Esta porción de la planicie costera del Pacífico del Estado de Chiapas, está limitada al sureste por el Océano Pacífico y al noroeste por la Sierra Cristalina de Chiapas o Macizo granítico de Chiapas.

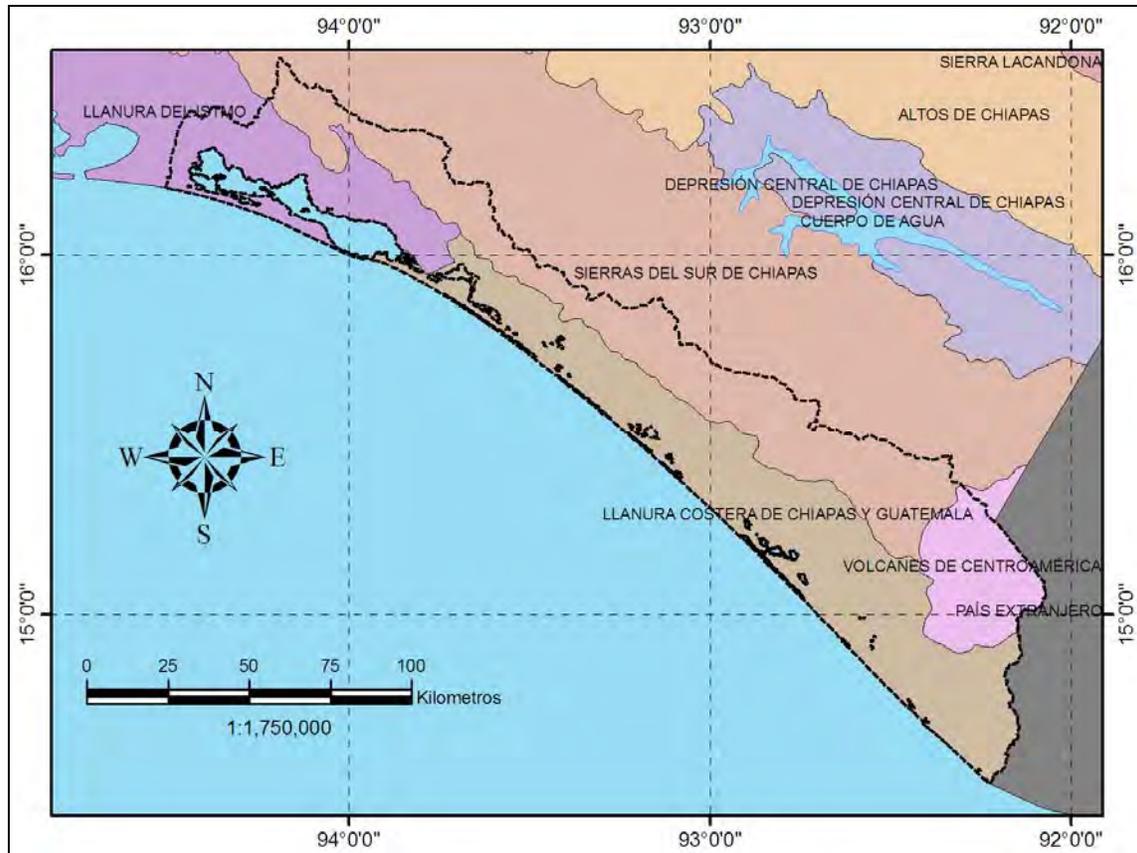


Figura 2.4 Fisiografía de la zona de estudio

### 2.1.3.2 Estratigrafía

De acuerdo con la geología que se presenta en esta zona, se puede definir que existen fundamentalmente dos grupos de formaciones de edades muy distintas, que corresponden el primero a rocas antiguas paleozoicas el segundo a rocas más jóvenes del Terciario y cuaternario. A continuación se describen las formaciones antes descritas de la más antigua a la más reciente.

Paleozoico.- Se observan principalmente en la parte norte de la costa de Chiapas, y está representando por un sistema de rocas cristalinas del tipo de granitos y granodioritas; estas rocas, se definieron como barreras impermeables al flujo del agua subterránea. Estas rocas cristalinas, constituyen una de las fuentes importantes para la formación de los depósitos aluviales.

Terciario.- Están representadas fundamentalmente, por rocas volcánicas, ya sea del tipo ácido o bien del tipo básico. La mayoría de las rocas que afloran en región sur y otra parte en el norte, son del tipo intermedio a básico, correspondiente a andesitas y basalto respectivamente, mismas que se localizan en la parte norte y oriente de la primera zona, y evidentemente, están ligados con los productos del volcán Tacaná. Su permeabilidad, es relativamente baja, por tratarse de rocas bastantes compactas.

Cuaternario.- Este grupo de formaciones geológicas, está constituido fundamentalmente por materiales no consolidados clásticos, arenas, gravas, cantos rodados y sedimentos finos, tales como arcillas y limos, que se depositaron sobre la Planicie Costera desde el pie de la Sierra Cristalina o Volcánica hasta la línea de la costa, estos sedimentos son los que constituyen la costa de Chiapas.

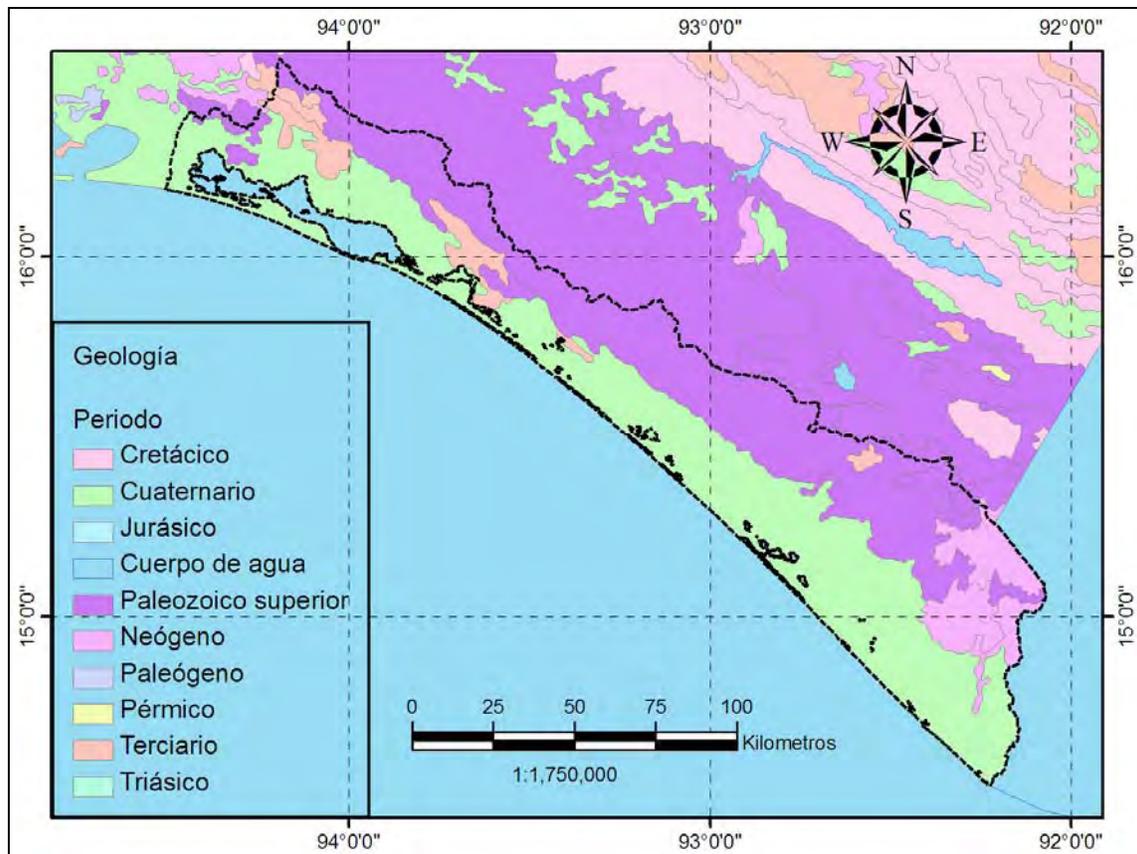


Figura 2.5 Mapa de periodos o sistemas geológicos presentes en la zona de estudio

En ésta última zona como se dijo tenemos generalmente presencia de suelos; los cuales se generan por el rompimiento de las rocas en fragmentos cada vez más pequeños, los cuales se componen de arena, plantas y de animales en descomposición. Éste suelo tiene muchos nombres incluyendo: arcilla, fango, suciedad, tierra vegetal y humus.

Si mira la arena en un microscopio, verá que la arena está compuesta de los mismos minerales que las rocas de las cuales dicha arena proviene. Ya que cuando las plantas comienzan a brotar sobre la arena, está pasa de apenas ser pequeños pedacitos de roca a convertirse en suelo.

### **2.1.3.3 Edafología**

El suelo se origina a partir de la materia madre producida por los procesos químicos y mecánicos de transformación de las rocas de la superficie terrestre. A esta materia madre se agregan el agua, los gases, sobre todo el dióxido de carbono, el tiempo transcurrido, los animales y las plantas que descomponen y transforman el humus, dando por resultado una compleja mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos.

Los granitos, basaltos, areniscas, gujarros y calizas son las más comunes. Dependiendo de si las rocas que dan origen al suelo son sedimentarias como la arenisca, metamórficas como la filita o ígneas como el basalto y el granito, el color y composición de la mezcla será muy diferente. Hay que observar que como el suelo es un espacio limitado entre la roca madre y el humus por tanto es importante saber qué clase de estas hay en cada nivel.

#### **2.1.3.3.1 Factores formadores del suelo**

Los factores formadores del suelo son los siguientes:

- Material parental                      material pasivo
- Clima                                        material activo
- Tiempo                                     material neutro
- Biota u organismos                    material activo

- Relieve material pasivo

Las rocas y el clima crean unas condiciones particulares que hacen posible el crecimiento de unas plantas y otras no, estas a su vez transforman el suelo en la medida de sus posibilidades. Las zonas de bosque muy húmedo crean suelos normalmente pobres o muy lixiviados, pero tal cantidad de plantas ayudan a fijar con fuerza el terreno. La falta de éstas, por ejemplo en regiones áridas, provoca una fuerte erosión de suelos que puede que sean fértiles, si no fuera por estas condiciones extremas.

### **2.1.3.3.2 Horizontes del suelo**

La estructura del suelo suele estar dividida en cuatro horizontes A, B, C, y D. La zona D es la roca madre. La C es roca madre erosionada y no tiene material orgánico. La B es una zona de deposición (iluvación) y dependiendo del suelo con poca o muy poca materia orgánica. La zona A es donde más material orgánico se deposita (aluviones) y por tanto la que más intercambia con la flora y fauna. Por tanto las zonas que más nos interesan son la A y B. Los colores más oscuros como negros, rojos y marrones se dan en las capas A y B mientras que los naranjas, amarillos y blancos se dan en C y D.

Se denomina horizontes del suelo a una serie de niveles horizontales que se desarrollan en el interior del mismo y que presentan diferentes caracteres de composición, textura, adherencia, etc. El perfil del suelo es la ordenación vertical de todos estos horizontes.

Clásicamente, se distingue en los suelos completos o evolucionados tres horizontes fundamentales que desde la superficie hacia abajo son:

- Horizonte A, o zona de lavado vertical: Es el más superficial y en él enraíza la vegetación herbácea. Su color es generalmente oscuro por la abundancia de materia orgánica descompuesta o humus elaborado, determinando el paso del agua y al mismo tiempo el arrastre hacia abajo, de fragmentos de tamaño fino y de compuestos solubles.

- Horizonte B o zona de precipitación: Carece prácticamente de humus, por lo que su color es más claro, en él se depositan los materiales arrastrados desde arriba, principalmente, materiales arcillosos, óxidos e hidróxidos metálicos, carbonatos, etc., situándose en este nivel los encostramientos calcáreos áridos y las corazas lateríticas tropicales.
- Horizonte C o roca madre, o subsuelo: Está constituido por la parte más alta del material rocoso in situ, sobre el que se apoya el suelo, más o menos fragmentado por la alteración mecánica y la química, pero en él aún pueden reconocerse las características originales del mismo.
- Horizonte D u horizonte R o material rocoso: es el material rocoso subyacente que no ha sufrido ninguna alteración química o física significativa. Algunos distinguen entre D, cuando el suelo es autóctono y el horizonte representa a la roca madre, y R, cuando el suelo es alóctono y la roca representa sólo una base física sin una relación especial con la composición mineral del suelo que tiene encima.

Los caracteres, textura y estructura de los horizontes pueden variar ampliamente, pudiendo llegar de un horizonte A de centímetros a metros.

### ***2.1.3.3 Grupos principales de suelos y unidades de suelos.***

#### **Base de Referencia para los Suelos del Mundo. FAO/UNESCO, 1998.**

Se han definido 30 grupos de suelos, de ellos 27 permanecen de la anterior Leyenda del Mapa Mundial de Suelos (Clasificación FAO / UNESCO de 1990). La gran mayoría de los nombres de los Grupos Principales terminan en "sol" (soles, en plural) y le antecede un prefijo que corresponde a un importante carácter del suelo.

El nombre de estas Unidades de Suelos está constituido por dos palabras. La primera es la del Grupo Principal al que pertenecen y la segunda refleja el Carácter Principal que define a cada unidad y la diferencia del concepto central del Grupo Principal.

Los diferentes tipos de suelos presentes en la zona de estudio son: andosoles, cambisoles, feozem, fluvisoles, gleysoles, litosoles, luvisoles, regosoles y solonchak, quizá con predominación de litosoles y regosoles. Y su clasificación con respecto a que horizonte pertenece cada uno, se muestra a continuación.

➤ **Suelos de baja evolución condicionados por el material originario**

*Andosoles.* Con un alto contenido en materiales amorfos. Casi siempre a partir de materiales volcánicos piroclásticos (derivados de vidrio volcánico). Perfil A-Bw-C ó A-C.

*Regosoles.* Sobre materiales originales sueltos (o con roca dura a + de 25 cm). Textura gruesa, sin acumulaciones de arcilla y muy baja evolución. Se caracterizan por no presentar capas distintas. En general son de tono claro. Se encuentran en las playas, dunas y, en mayor o menor grado, en las laderas de las sierras, muchas veces acompañados de litosoles y de roca o tepetate que aflora. Su fertilidad es variable, y su uso agrícola está condicionado principalmente a su profundidad y a la pedregosidad que presenten. En este tipo de suelo se pueden desarrollar diferentes tipos de vegetación. Perfil A-C.

➤ **Suelos de baja evolución condicionados por la topografía**

*Fluvisoles.* A partir de materiales flúvicos recientes conocidos como depósitos aluviales (o en ríos represados si todavía el material original no ha evolucionado). Perfil estratificado. Materia orgánica decrece irregularmente o es abundante en zonas muy profundas. Están constituidos por materiales disgregados, es decir, son suelos poco desarrollados. Se encuentran en todos los climas y regiones de México, cercanos siempre a los lagos o sierras, desde donde escurre el agua a los llanos, así como en los lechos de los ríos. Muchas veces presentan capas alternadas de arena, arcilla o gravas. Pueden ser someros o profundos, arenosos o arcillosos, fértiles o infértiles, en función del tipo de materiales que lo forman. Perfil típico estratificado A-C-Ab-C2-Ab2-C3-Ab3-C4.

*Gleysoles*. Suelos con hidromorfía (por manto freático) permanente (o casi) en los primeros 50 cm. Horizontes grises, verdosos o azulados. Sobre materiales no consolidados. Perfil A-B-C (ó R).

*Litosoles*. Suelo con profundidad menor a 10 cm. Se localizan en las sierras, en laderas, barrancas y malpais, así como en lomeríos y algunos terrenos planos. Tiene características muy variables, pues pueden ser fértiles o infértiles, arenosos o arcillosos. Su susceptibilidad a la erosión depende de la zona en donde se encuentren, de la topografía y del mismo suelo.

➤ **Suelos típicamente de clima árido o semiárido**

*Solonchak*. Se caracterizan por presentar un alto contenido de sales en alguna porción del suelo o en su totalidad (sales solubles). Su uso agrícola está limitado a cultivos muy resistentes a las sales. El uso pecuario de estos suelos depende de la vegetación que sostienen; sin embargo, los rendimientos son bajos. Algunos de estos suelos se utilizan como salinas. Tienen poca susceptibilidad a la erosión. Perfil A-C, A-B-C.

➤ **Suelos típicamente de clima estepario**

*Feozem o Phaeozems*. Su principal distintivo es una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes. Son suelos abundantes en nuestro país, y los usos de que son objeto son variados, en función del clima, relieve y algunas condiciones del suelo. Muchos feozem son profundos y están situados en terrenos planos, que se utilizan para agricultura de riego o de temporal, con altos rendimientos. Los menos profundos, o los que se presentan en laderas y pendientes, tienen rendimientos más bajos y se erosionan con mucha facilidad. Se pueden utilizar para ganadería. Perfil A-B-C ó A-C.

➤ **Suelos típicamente de clima templado húmedo**

*Cambisoles*. Horizonte B cámbico ó A úmbrico mayor a 25 cm de espesor. Perfil A-Bw-C ó R.

- **Suelos típicamente de clima mediterráneo húmedo (son estación seca intensa).**

*Luvísolos*. En cualquier clima excluidos los tropicales y subtropicales. Arcillas normales (con cálcico profundo). Suelos con horizonte B.

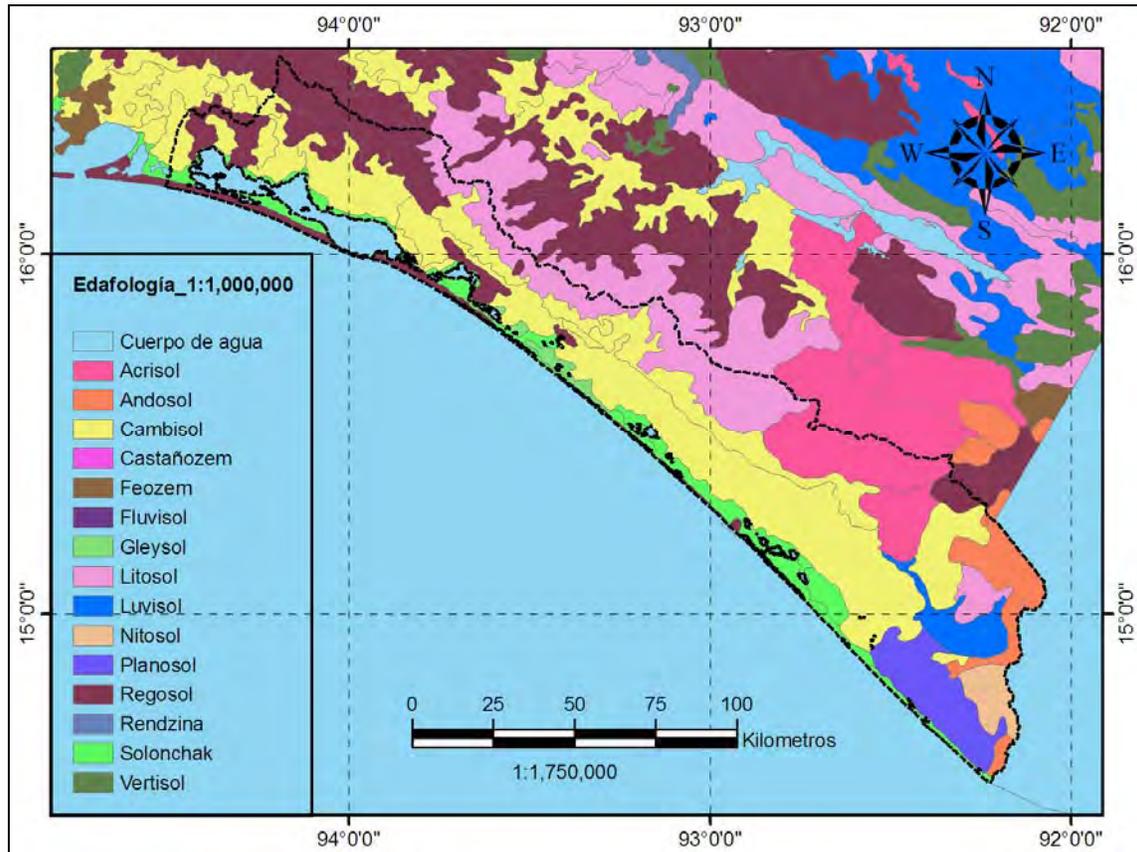


Figura 2.6 Mapa edafológico de la región Costa de Chiapas

## 2.1.4 Clima

El estado de Chiapas presenta climas cálidos, semicálidos, templados y fríos en mucha menor proporción. Sus subtipos de climas correspondientes predominantes en la zona son: cálido húmedo, cálido subhúmedo, semicálido húmedo, templado húmedo, templado subhúmedo y frío. A continuación se describen brevemente los tipos y subtipos de climas encontrados en la costa de Chiapas.

#### **2.1.4.1 Clima cálido**

Se distribuye en terrenos cuya altitud va del nivel del mar a los 1,000 m, abarca cerca del 74% de la superficie de la entidad; en ellos la temperatura media anual va de 22° a 30°C y la temperatura media del mes más frío es de 18°C o más. Estos climas, con base en su humedad y su régimen de lluvia, se dividen en cálido subhúmedo con lluvias en verano, cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y cálido húmedo con lluvias todo el año.

- **Subtipo cálido subhúmedo con lluvias en verano.** Es el que ocupa mayor extensión en Chiapas, comprende – *la zona costera* – y se interna al centro-sur del estado por el occidente; es el menos húmedo, pues su precipitación total anual es menor de 2,000 mm y en el mes más seco tiene menos de 60 mm de lluvia.
- **Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano.** En una franja más o menos paralela a la línea de costa, entre Tapachula y Arriaga, y en otra situada en el centro-norte con una orientación noroeste-este, así como en dos zonas del extremo norte, se distribuye el clima cálido con abundantes lluvias en verano; en estos terrenos la precipitación total anual varía entre 2 000 y 3 000 mm principalmente y el mes más seco suma menos de 60 mm.

#### **2.1.4.2 Clima semicálido**

Cubre cerca del 20% de superficie del estado. Se manifiesta en terrenos cuya altitud varía entre 1,000 y 2,000 m; presentan temperaturas medias anuales que van de 18° a 22°C. De acuerdo con su humedad y su régimen de lluvias se encuentran.

- **Subtipo semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano.** Cuyas áreas más amplias se localizan en las proximidades de Ocosingo, donde la precipitación total anual varía entre 1,000 y 2,000 mm, y al sureste y suroeste de la Frontera Comalapa y llanura costera de Chiapas, lugares en que la precipitación total anual va de 2 000 a 3 000 mm.

### 2.1.4.3 Clima templado

Caracterizado por temperaturas medias anuales entre 12° y 18°C y una temperatura media del mes más frío entre -3° y 18°C, abarca los terrenos de mayor altitud (por arriba de los 2,000 m), los cuales representan aproximadamente 6% de la entidad.

- **Subtipo templado húmedo con lluvias en verano.** Se localiza al norte de Huixtla y al norte y noreste de San Cristóbal de las Casas, entre otros lugares, en la primera zona la precipitación va de 3,000 a 4,500 mm; y en la segunda de 1,000 a 2,000 mm.
- **Subtipo templado subhúmedo con lluvias en verano.** Comprende de San Cristóbal de las Casas al norte de Comitán de Domínguez, ahí la lluvia total anual se encuentra en el rango de 1,000 a 2,000 mm. En áreas de poca extensión, se presenta el clima templado húmedo con lluvias todo el año, éste se distribuye en las partes más altas situadas al sureste de Pichucalco.

En cuanto al área que cubre cada uno y su porcentaje correspondiente tenemos lo siguiente:

Clasificación	Tipo de Clima	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje
Aw1,2(w)	Cálido subhúmedo	6384.39	54.58%
Am(w)	Cálido húmedo	3773.69	32.26%
A(C)m(w)	Semicálido húmedo	1027.29	8.78%
C(m)(w)	Templado húmedo	463.42	3.96%
(A)C(w2)(w)	Templado subhúmedo	40.56	0.35%
C(E)(m)(w)	Frío	7.04	0.06%

Tabla 2.3 Clasificación de los climas presentes en la región hidrológica Costa de Chiapas

Con respecto a la ubicación de estos últimos, se presentan en la Figura 2.7.

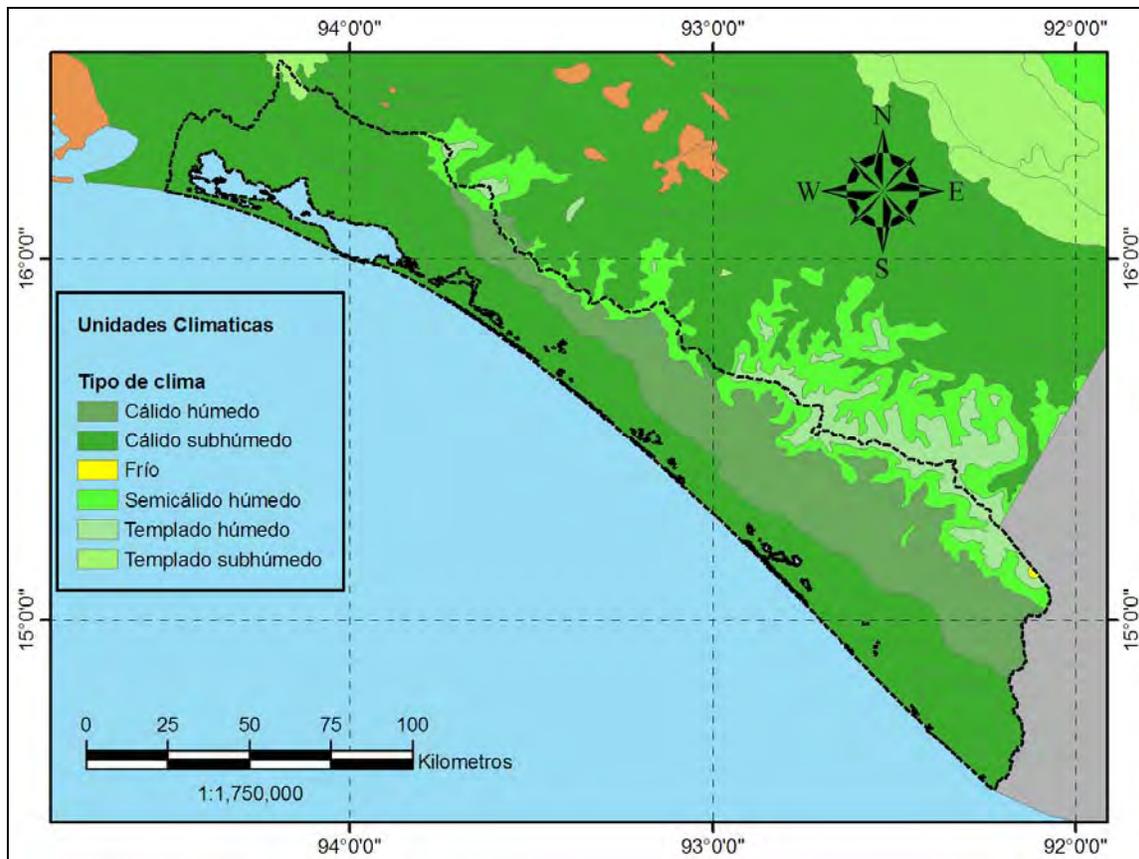


Figura 2.7 Distribución del clima en la región Costa de Chiapas

### 2.1.5 Temperatura

Con respecto a la temperatura en la región hidrológica Costa de Chiapas se presenta un patrón de temperaturas característico paralelo a la línea costera, el cual disminuye a medida que nos adentramos desde la llanura costera de Chiapas hacia las sierras del sur de Chiapas y volcanes de Centroamérica.

El patrón antes descrito se muestra con una disminución de temperatura más o menos uniforme comenzando con una temperatura mayor a 28°C a lo largo de toda la costa. Teniendo como límite la carretera costera, excepto la costa sur abarcando los municipios de Acapetahua, Villa Comaltitlán, Huixtla, Mazatán, Tapachula y Suchiate, donde se presentan temperaturas entre 26 a 28°C.

Otra zona muy marcada es la que se encuentra precisamente entre la misma carretera costera y que tiene como límite la zona de planicie; la cual presenta temperaturas comprendidas entre los 26 a 28°C. A partir de aquí las temperaturas disminuyen hasta lograr sus mínimos en las zonas altas de las llanuras.

Con respecto a éstas tenemos que en la parte norte la temperatura mínima alcanzada es de 22°C, mientras que en la zona centro es de 20°C y en la zona sur de 16°C aunque puntualmente haya temperaturas inferiores; este fenómeno se da por la fisiografía de la zona, la cual tiene mayores elevaciones a medida que nos dirigimos hacia el sur favoreciendo la disminución de temperaturas.

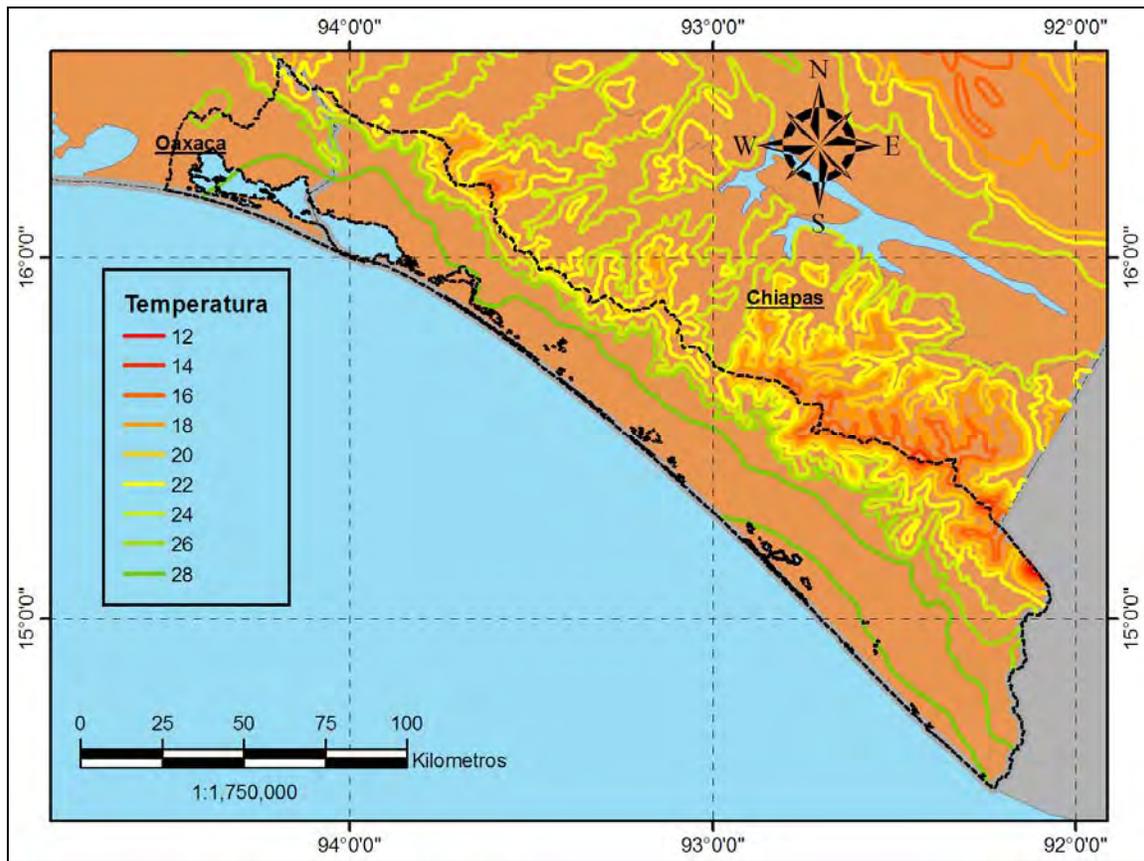


Figura 2.8 Distribución de la temperatura en la región Costa de Chiapas

### 2.1.6 Agricultura y vegetación

La vegetación en el estado de Chiapas corresponde en su mayor parte a selva y bosque, además de los tipos de vegetación propia de zonas inundables o humedales constituidas básicamente por manglar y popal, en el resto del territorio la vegetación natural ha sido sustituida para dar lugar a las actividades agrícolas y ganaderas.

La selva representa en la entidad el tipo de vegetación más abundante, cubre aproximadamente 35% de la superficie chiapaneca y presenta dos modalidades: la selva alta siempre verde (perenifolia) y la selva baja caducifolia. La primera de ellas es la más extensa, se localiza al norte, noreste, noroeste del estado, hacia la porción oriental (región lacandona) con el mejor desarrollo; también se presenta como una delgada franja discontinua que cubre las laderas del pie de la sierra, paralela a la línea de costa al sur del estado. Estas poblaciones se desarrollan bajo la influencia de climas cálido húmedos, y se caracterizan por presentar una gran variedad de especies, con elementos arbóreos que por lo general sobrepasan los 30 m de altura; algunas especies distintivas de estas comunidades son: *Terminalia amazonia*, *Dialium guianense* (guapaque), *Brosimum alicastrum* (ramón), *Guatteria anomala*, *Swietenia macrophylla* (caoba), *Cedrela* spp. (Cedro), entre muchas más, también es común la presencia de plantas trepadoras y epífitas. El disturbio que presentan estas poblaciones es intenso y cada vez son menos los lugares que se encuentran libres de la influencia negativa del hombre. El segundo tipo de selva, denominada baja caducifolia, se localiza hacia la parte central del estado, ocupa las partes bajas de las montañas que rodean los valles interiores del estado, presenta menos exuberancia que la selva anterior, porque el clima aunque cálido, es menos húmedo con un periodo seco al año, durante el cual la mayor parte de las especies pierden sus hojas. Algunos elementos representativos de estas comunidades son: *Guazuma ulmifolia* (guácima), *Bursera* spp., *Lysiloma* sp., entre otros.

El bosque cubre casi el 30% de la superficie de Chiapas, ocupa las partes altas y templadas de las montañas chiapanecas, sobre todo en el centro, sur y poniente del territorio. Estas comunidades están caracterizadas por la presencia de masas puras de pinos (*Pinus* spp.), de encinos (*Quercus* spp.) y mezclas de ambos. En general los bosques

poseen menos diversidad florística que la selva, pero tienen mayor importancia forestal; algunos elementos más frecuentes en los bosques del estado son: *Pinus oocarpa*, *Pinus michoacana* y *Quercus peduncularis*.

El manglar presenta una amplia distribución a lo largo del litoral chiapaneco, ocupa casi 2% de la superficie y forman comunidades densas con elementos no muy altos que prosperan en las márgenes de esteros y lagunas de la región costera. Algunas especies presentes en el estado son: *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle negro) y *Laguncularia racemosa* (mangle blanco). Compartiendo hábitats similares que el mangle se encuentra el popal, la cual es una comunidad propia de lugares pantanosos, formada por plantas herbáceas, flotantes, que forman masas densas en la superficie de los cuerpos de agua que cubren; en la entidad *Thalia geniculata* es uno de los elementos más representativos.

La agricultura en la entidad tiene un fuerte desarrollo hacia los valles interiores y hacia la porción sureste de la llanura costera. La mayor parte de ella tiene carácter temporal, excepto en algunos valles al norte de la presa La Angostura y hacia las inmediaciones de Tapachula en la parte sur. En la región interior del estado se cultiva principalmente maíz, caña de azúcar y frijol, hacia la costa se cultiva plátano y café en la zona de montaña.

El pastizal tiene gran importancia en la entidad, la ganadería se desarrolla principalmente en las llanuras del norte del estado, en los alrededores de Pichucalco y Catazajá, donde existen amplias extensiones con praderas cultivadas, también hacia la llanura costera se cuentan con valiosos recursos forrajeros; las principales especies cultivadas en el estado son: *Estrella africana*, *Pangola* y *Guinea*. Hacia el interior del estado los pastizales son inducidos al eliminar la cubierta natural de bosque o selva y éstos, se mantienen mediante el empleo del fuego aplicado de manera periódica.

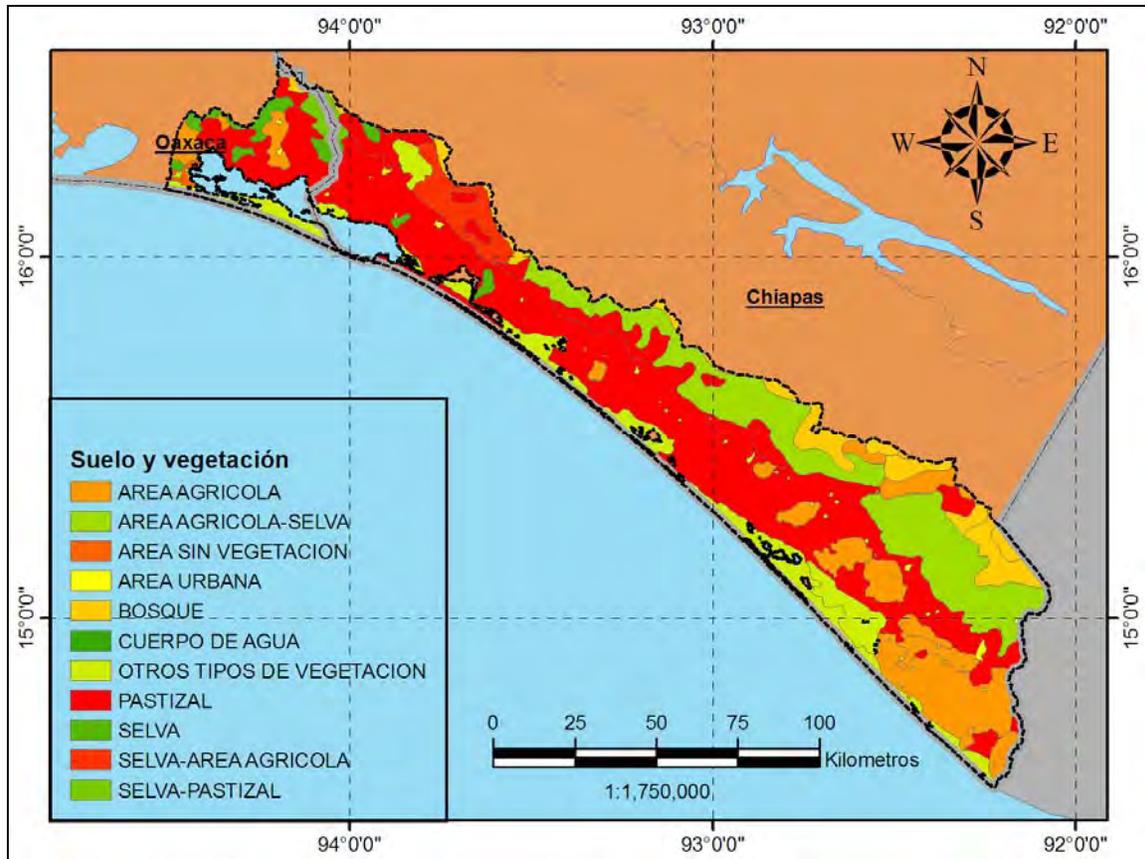


Figura 2.9 Distribución del uso de suelo y vegetación en la región Costa de Chiapas

### 2.1.7 Hidrografía

Aproximadamente 48 ríos se originan en la parte alta de la Sierra Madre de Chiapas, por arriba de los 2,800 msnm, siendo los más importantes el río Lagartero, Zanatenco, Pijijiapan, Coapa, Margaritas, Novillero, San Nicolás, Bonanza, Cintalapa, Vado Ancho, Fortuna, Huixtla, Huehuetán, Coatán, Cahuacán y Suchiate.

En los primeros kilómetros, estos ríos presentan un curso estrecho, sinuoso y un caudal reducido, lo que origina pequeñas caídas de agua. A medida que los ríos descienden de la sierra, se les agregan numerosos afluentes, aumentando el caudal hasta llegar al pie de monte. A partir de la cota de 200 a 150 msnm, y debido a la incorporación de nuevos afluentes y a lo moderado de la pendiente (a menos de 100 msnm), los ríos presentan un volumen de agua considerable y al entrar a la planicie costera se incrementa más la amplitud de su cauce. A medida que de la planicie nos

acercamos al mar, los ríos pierden velocidad y su cauce se amplía, formando algunos meandros, muchos de los cuales cambian su deriva entre un año lluvioso y otro. En los últimos 8 km, los ríos se extienden sobre la planicie formando muchas áreas inundables, localmente denominadas “pampas”, ubicadas por abajo de la cota de 10 msnm. Estos sitios constituyen pantanos de agua dulce de gran importancia para la flora y fauna regional, siendo extensos en los municipios de Pijijiapan, Mapastepec, Acapetahua y Villa de Comaltitlán. Su mayor desarrollo se da en la zona denominada la Cantileña-Maragato, en los municipios de Huixtla, Huehuetán y Mazatán, con una extensión de 27,000 has. Algunos ríos diluyen su caudal en las llanuras, como sucede con el río Coapa, Bobo, Cintalapa y Huehuetán; mientras que otros mantienen su curso principal ingresando a los sistemas lagunares, como sucede con los ríos Lagartero, Zanatenco, Tiltepec, Margaritas, San Nicolás, Madrevieja, Bonanza, Vado Ancho, Fortuna y Huixtla. La importancia de estos aportes hacia los sistemas lagunares es que ayudan a mantener el nivel de agua, y en época de estiaje disminuyen la salinidad, la cual bajo otras circunstancias se elevaría a más del 50%, como sucede en Mar Muerto y Buenavista, La Joya entre febrero y mayo.

Por último están aquellos ríos que desembocan directamente en el mar, como sucede con los ríos: Novillero, Coatán, Cahuacán y Suchiate.

Con la información de la red hidrográfica y fisiográfica de la región se definieron las cuencas de aportación hasta las estaciones de medición de cada uno de los cauces. Mismas que se presentan a continuación agrupadas en función de la división de las regiones hidrológicas existente.

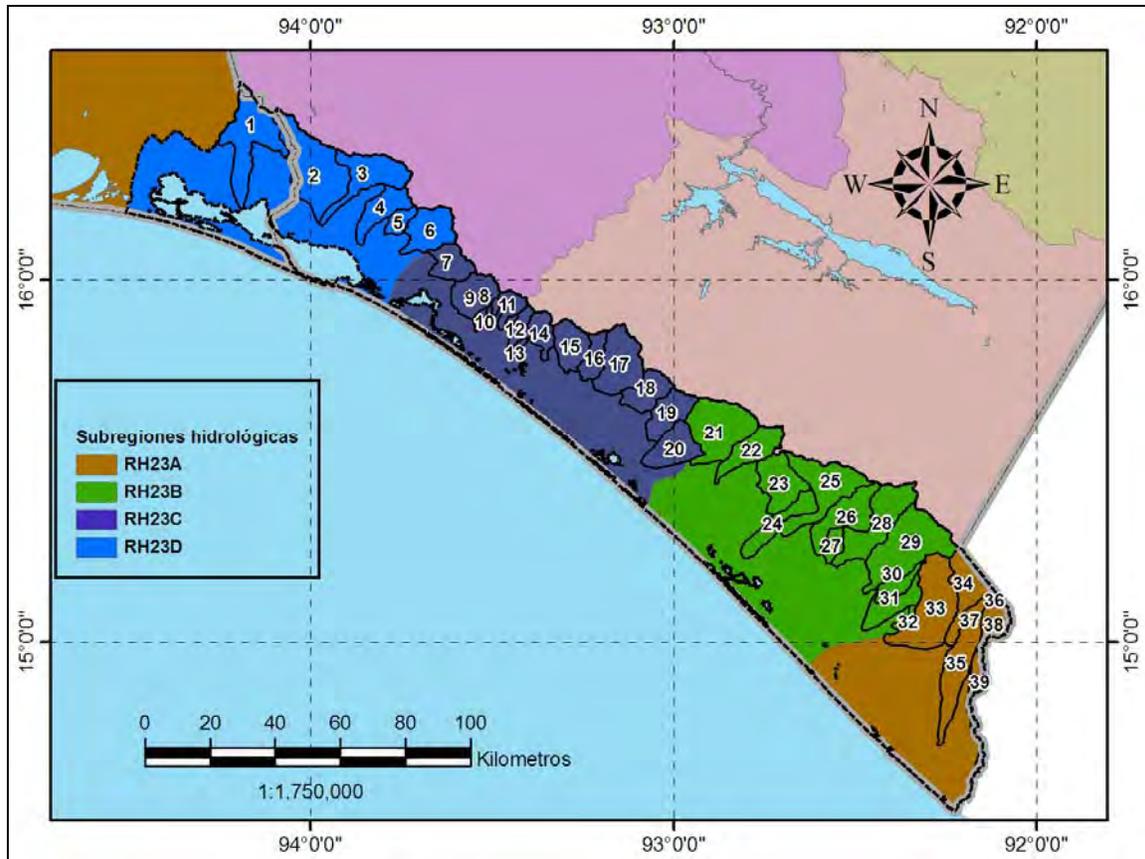


Figura 2.10 Subdivisión hidrológica de la región 23 y cuencas hasta estación de medición

La región hidrológica Costa de Chiapas está dividida a su vez en 4 subregiones (R.H. 23 A, R.H. 23 B, R.H. 23 C y R.H. 23 D) llamadas: río Suchiate y otros, río Huixtla y otros, río Pijijiapan y otros y Mar Muerto.

En esta figura se puede ver de manera clara la distribución y forma de las cuencas en la región hidrológica así como su misma subdivisión. También vemos que la cuenca 1 es la única cuenca que no pertenece al estado de Chiapas.

Considerando sólo las corrientes principales se estudian 31 ríos de la región, de norte a sur, que se muestran en la Tabla 2.4. Entre los principales, debido a su ubicación respecto a poblaciones principales se encuentran los ríos Pijijiapan, Coapa, Novillero, Huixtla, Coatán, Cahuacán y Suchiate. En la Figura 2.11 se muestra la red hidrográfica dentro de la región hidrológica Costa de Chiapas.

No cauce	Corriente	Cuenca	Superficie (km <sup>2</sup> )
1	Tapanatepec	Tapanatepec	293.08
2	Las Arenas - Azteca	Las Arenas	351.35
3	Lagartero - La Mica	Lagartero	205.81
4	El Rosario	El Rosario	126.87
5	Tiltepec	Tiltepec	47.90
6	Zanatengo - San Isidro	Zanatengo	163.39
7	Ocuilapa - Agua Dulce	Ocuilapa	107.43
8	El Pedregal - Buena Vista - Yerba Santa	El Pedregal	136.77
9	Los Horcones	El Pedregal	152.63
10	Las Hermanas - El Mico	Las Hermanas	9.89
11	De Jesús - El Jobo - Manguito	Río de Jesús	59.09
12	Los Patos	Los Patos	51.95
13	Siete Cigarros	Siete Cigarros	7.95
14	La Flor - Arroyo Escondido	La Flor	75.13
15	San Diego - Alta Peña - Río Frío	San Diego	126.20
16	Urbina (La Cueva/La Unidad)	Urbina	77.46
17	Pijijiapan - Hoja Blanca	Pijijiapan	212.63
18	Coapa (Río Grande) - Echegaray - El Chorro	Coapa	115.77
19	Las Margaritas - Los Cuaches	Las Margaritas	133.17
20	Aroyo Bobos - El Progreso	Arroyo Bobos	150.64
21	Novillero - Las Flores - San Juan - Gobierno	Novillero	287.26
22	San Nicolás (Mapastepec)	San Nicolás	144.14
23	Cacaluta - Boquerón	Cacaluta	175.92
24	Doña María (Jalapa)	Doña María	121.61
25	Cintalapa - Agua Caliente - El Rosario	Cintalapa	258.23
26	Vado ancho - Río Negro - Acacoyagua	Cintalapa	182.03
27	Arroyo Compoapa	Cintalapa	50.02
28	Despoblado - Fortuna	Despoblado	244.69
29	Huixtla (Tuzantán) - Jerónimo - Los Negros - Etzumú	Huixtla	353.90
30	Tepuzapa	Huixtla	65.49
31	Islamapa	Huixtla	174.48
32	Cuyamiapa	Cuyamiapa	19.11
33	Huehuetan - Cuilco - Escocia - Chalón - La Joya - Santo Domingo - Nexapa - Vejapa	Huehuetan	325.55
34	Coatán (Mazatán) - Buenavista	Coatán	172.41
35	Cahuacán (Cacahoacán) - Zapote	Cahuacán	242.63
36	Suchiate - Maxcum - Mala (Talismán I)	Suchiate	96.11
37	Suchiate - Maxcum - Mala (Talismán II)	Suchiate	130.39
38	Suchiate - Maxcum - Mala (Suchiate II)	Suchiate	168.06
39	Suchiate - Maxcum - Mala (Suchiate I)	Suchiate	175.43

Tabla 2.4 Listado de corrientes y cuencas hasta la estación de medición en la zona de estudio

En este estudio no se analizan a detalle los cauces de la costa de Oaxaca y sur de Chiapas como son los ríos Tepanatepec y el Suchiate; éste último por ser un cauce internacional y presentar otra problemática.

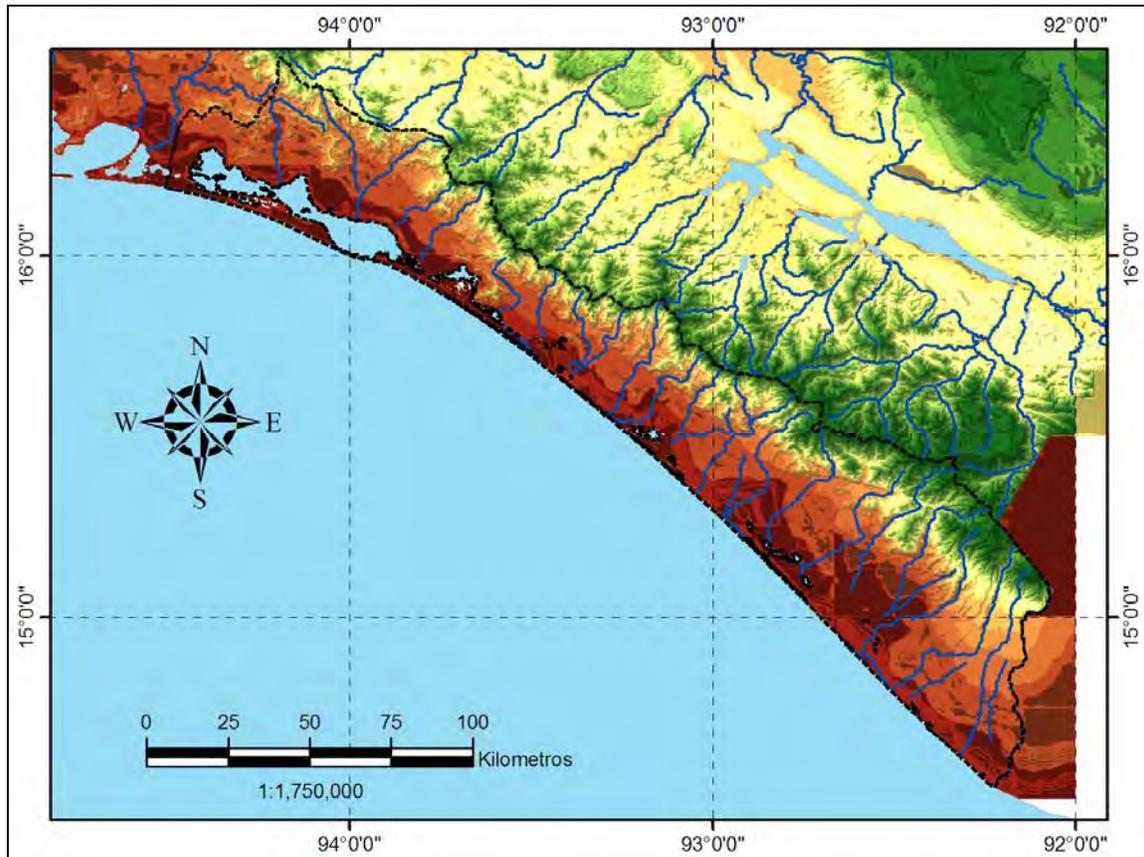


Figura 2.11. Red hidrográfica principal de la Costa de Chiapas

## **Capítulo 3    Análisis de información de precipitación e hidrometrica**

### ***3.1 Distribución y selección de estaciones climatológicas***

Dentro de la costa de Chiapas se localizan cerca de 99 estaciones climatológicas. Se estimó que 52 de ellas cuentan con información confiable y lo suficientemente amplia para llevar a cabo un análisis de las precipitaciones (Figura 3.1). La Tabla 3.1, muestra la relación de estas 52 estaciones, la respectiva lluvia media anual, localización y el registro de datos disponible.

La selección de las estaciones se llevo a cabo desechando aquellas que cuentan con un registro menor a 10 años (*Viessman et al. 1989*), así como aquellas que se encuentran en cauces naturales por lo que no todas las estaciones fueron tomadas en cuenta.

Una vez seleccionadas, por cada subregión hidrológica se tomaron las siguientes.

- S.R.H. 23 D – 6 estaciones climatológicas
- S.R.H. 23 C – 7 estaciones climatológicas
- S.R.H. 23 B – 16 estaciones climatológicas
- S.R.H. 23 A – 23 estaciones climatológicas

El motivo por el que se toman las subregiones hidrológicas de la D a la A es porque en ese orden se encuentran ubicadas de norte a sur en la zona de estudio, y de esa manera se van a presentar a lo largo de todo el trabajo tanto estaciones climatológicas, como hidrométricas y cuencas.

Clave	Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Registro	P máx anual acumulada
1	20300	REFORMA, REFORMA DE P.	16.4	-94.45	1980 1990	720.09
2	20148	SAN PEDRO TAPANATEPEC,	16.3667	-94.2167	1961 2003	1627.51
3	20328	CHAHUITES, CHAHUITES	16.2833	-94.2	1980 2003	682.2
4	7182	ARRIAGA, ARRIAGA (DGE)	16.2333	-93.9	1961 1975	1211.87
5	7168	TONALA, TONALA (DGE)	16.0833	-93.75	1961 2004	1524.61
6	7201	TONALA, TONALA (SMN)	16.0833	-93.7	1959 1999	1642.66
7	7073	HACIENDA SAN CRISTOBAL	15.9833	-93.7167	1940 1970	1316.81
8	7074	HORCONES, TONALA	15.9333	-93.5667	1964 1999	2010.01
9	7098	LA TIGRERA, TONALA	15.8833	-93.5167	1962 1973	1017.98
10	7228	TRES PICOS, TONALA	15.8333	-93.5167	1976 1998	1876.88
11	7352	SAN DIEGO, PIJIAPAN	15.7333	-93.3	1982 1996	2064.75
12	7347	GUADALUPE VICTORIA	15.55	-92.8833	1982 2004	2254.95
13	7115	MARGARITAS, PIJIAPAN	15.5	-93.0667	1965 2004	2417.44
14	7208	EL NOVILLERO,MAPASTEPEC	15.5	-92.9833	1963 2003	2174.1
15	7113	MALPASTEPEC, MALPAST.	15.4333	-92.9	1961 2004	1820.14
16	7334	FRANCISCO SARABIA	15.4333	-92.9833	1980 2004	2584.13
17	7339	EL PORVENIR, EL PORV.	15.4167	-92.3333	1980 2004	1546.15
18	7348	INDEPENDENCIA, CHIAPAS	15.3667	-92.6	1981 2004	2863.63
19	7344	EJIDO IBARRA,MAPASTEPEC	15.35	-92.9333	1982 2004	1401.27
20	7048	FINCA EL TRIUNFO	15.3333	-92.5167	1963 2001	3112.51
21	7092	LA ESPERANZA,MOTOZINTLA	15.3333	-92.5	1962 1970	2246.04
22	7185	ESCUINTLA, MAPAXTEPEC	15.3167	-92.6667	1945 1979	2833.82
23	7333	BUENOS AIRES,MOTOZINTLA	15.3167	-92.2833	1980 2004	1054.23
24	7014	BELIZARIO DOMINGUEZ	15.2833	-92.3667	1962 2001	1952.18
25	7053	ESCUINTLA, ESCUINTLA	15.2667	-92.6333	1954 2004	3017.46
26	7038	DESPOBLADO	15.2167	-92.5667	1964 2004	2909.14
27	7056	FINCA CHIRIPA,TAPACHULA	15.1833	-92.2833	1954 1981	3776.41

Clave	Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Registro		P máx anual acumulada
28	7060	FINCA GENOVA, TAPACHULA	15.1667	-92.3167	1955	1978	3440.09
29	7012	FINCA ARGOVIA, TAPACHULA	15.15	-92.3	1955	1978	1142.01
30	7320	SALVACION, V.COMALTITLAN	15.15	-92.6833	1978	2004	3293.17
31	7061	FINCA HAMBURGO, TAPACH.	15.1333	-92.3333	1954	1968	3196.22
32	7066	FINCA SAN ENRIQUE	15.1333	-92.3	1961	1978	3510.77
33	7077	HUIXTLA, HUIXTLA	15.1333	-92.4667	1954	2002	3267.47
34	7057	FINCA CHICHARRAS	15.1	-92.25	1961	2000	4225.27
35	7058	EL PERU, TAPACHULA	15.1	-92.2667	1954	1983	4084.09
36	7072	HACIENDA LAS MARAVILLAS	15.1	-92.2833	1954	1978	4153.63
37	7187	FCA. LA PATRIA, TAPACH.	15.1	-92.2167	1961	1973	2296.77
38	7146	SAN JERONIMO, UNION J.	15.05	-92.1667	1949	2004	4200.76
39	7075	HUEHUETAN, HUEHUETAN	15.0167	-92.4	1964	2000	2229.68
40	7018	CACAHOATAN, CACAHOATAN	14.9833	-92.1667	1944	2004	1237.38
41	7336	PLAN DE IGUALA, HUEHUET.	14.9833	-92.4833	1980	2004	4276.34
42	7191	MALPASO, TAPACHULA	14.95	-92.2667	1961	2004	3656.6
43	7200	TAPACHULA, TAPACHULA	14.9333	-92.2667	1952	2004	2152.84
44	7116	MEDIO MONTE, TUXTLA CHco	14.8833	-92.1833	1961	2004	3719.74
45	7199	TANQUE REGULADOR	14.8833	-92.3	1966	1983	3008.95
46	7117	METAPA, METAPA	14.85	-92.2	1944	2000	1593.47
47	7326	MAZATAN, MAZATAN	14.85	-92.4333	1980	2004	2209.49
48	7019	CAHUACAN, SUCHIATE	14.8	-92.25	1962	2002	1381.85
49	7068	FRONTERA HIDALGO	14.7833	-92.1833	1944	2000	1971.11
50	7136	PTO.MADERO, TAPACHULA	14.75	-92.4167	1944	2004	1087.76
51	7045	EL DORADO, SUCHIATE	14.6667	-92.1833	1951	2000	1237.15
52	7078	IGNACIO LOPEZ RAYON	14.6167	-92.2	1951	2000	1181.71

Tabla 3.1 Estaciones climatológicas y su periodo de registro

Se estimo que las 52 estaciones en conjunto, cuentan con un promedio de 31 años de registro.

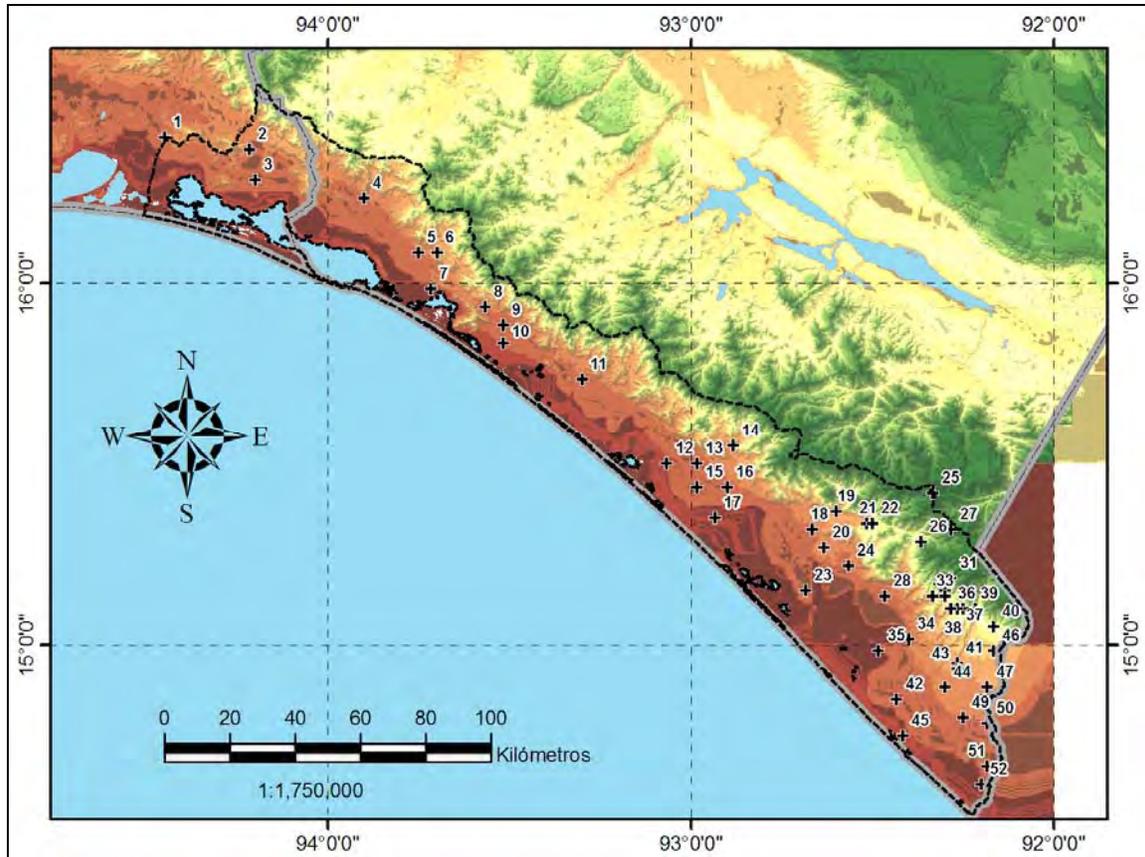


Figura 3.1 Ubicación de las estaciones climatológicas dentro de la región Costa de Chiapas

La Figura 3.2, muestra la magnitud de la lluvia media anual acumulada, para las 52 estaciones que se consideran tienen influencia en la cuenca.

La precipitación media anual para toda la región hidrológica 23 es de 2335 mm. En la figura citada, se puede apreciar claramente el aumento gradual en la precipitación acumulada, lo que dice que entre más hacia al sur en la zona de estudio, más llueve. Esto se valida rápidamente por el hecho de que a medida que se desplaza en esa dirección, las elevaciones en la cordillera son mayores; favoreciendo al mismo tiempo los eventos de lluvia por causa del fenómeno de convección.

### 3.1.1 Distribución espacial de la precipitación

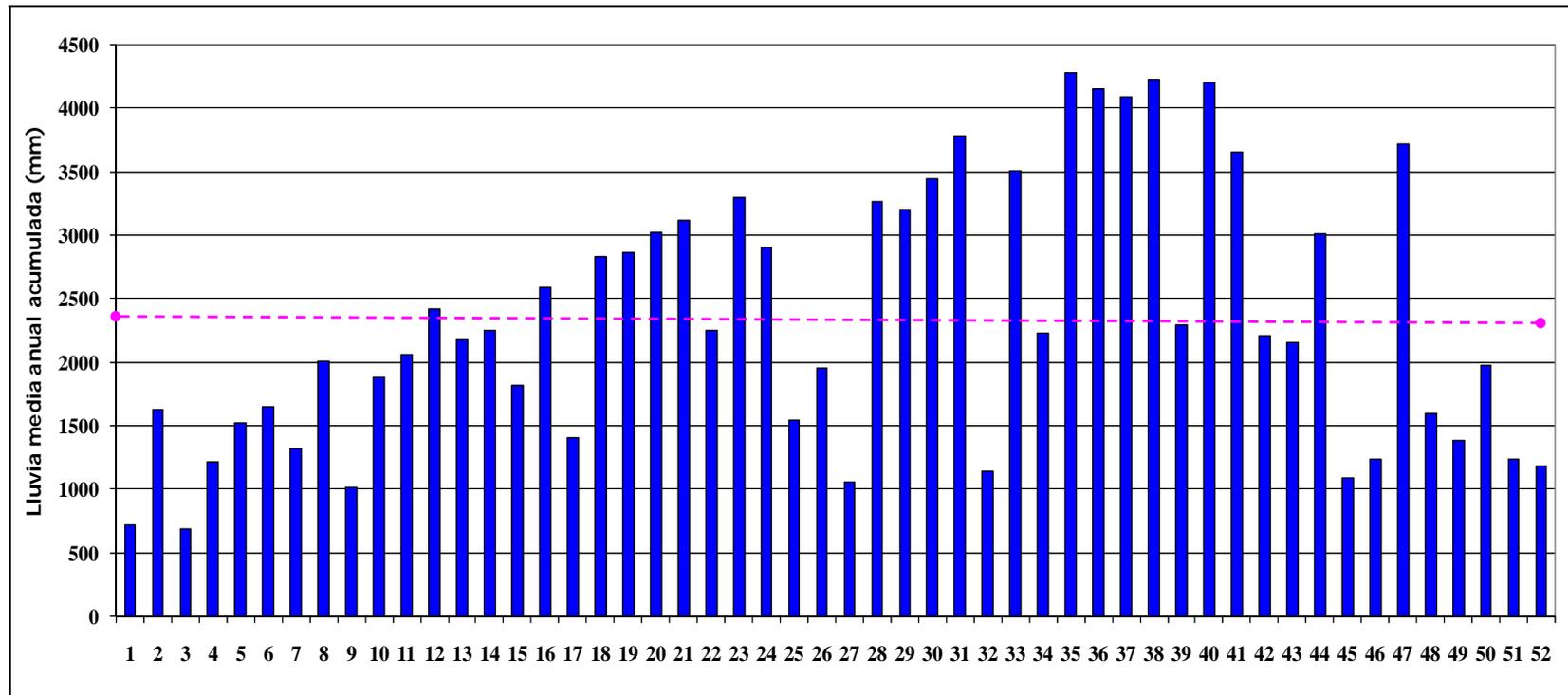


Figura 3.2 Lluvia anual acumulada por estación para toda la región (mm)

En la Figura 3.2 el comportamiento anual de la lluvia en la zona de estudio. Los registros de izquierda a derecha en la figura, corresponden en la realidad a la distribución de norte a sur. La línea punteada es la precipitación media anual.

Otro fenómeno que se ve claramente es el descenso abrupto de la precipitación en algunos puntos; esto debido a la ubicación geográfica que tienen las estaciones, ya que representan a los sitios ubicados a lo largo de la planicie costera. Al representar lo anterior de acuerdo al mapa de subregiones hidrológicas se tiene lo siguiente:

- **Subregión hidrológica 23 D.** En la figura se puede apreciar precipitaciones que oscilan en un rango de 700 a 1650 mm, presentándose como precipitación media anual de esa zona un valor del orden de 1235 mm (con línea punteada).

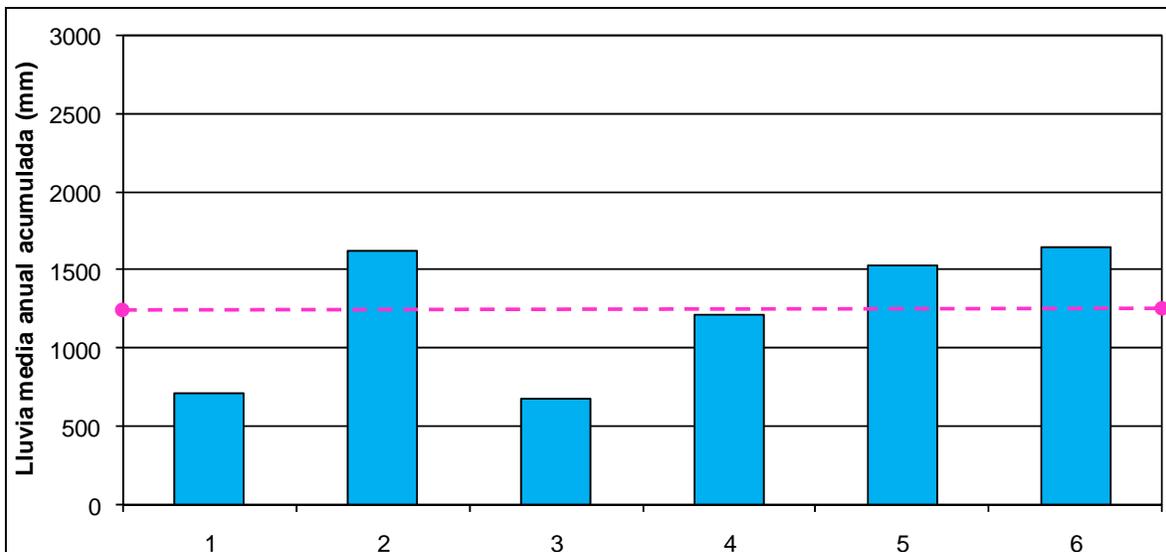


Figura 3.3 Distribución espacial de la lluvia en la subregión hidrológica 23 D

- **Subregión hidrológica 23 C.** Aquí se muestran rangos del orden de 1000 a 2400 mm., teniendo como precipitación media anual aproximadamente 1840 mm (con línea punteada).

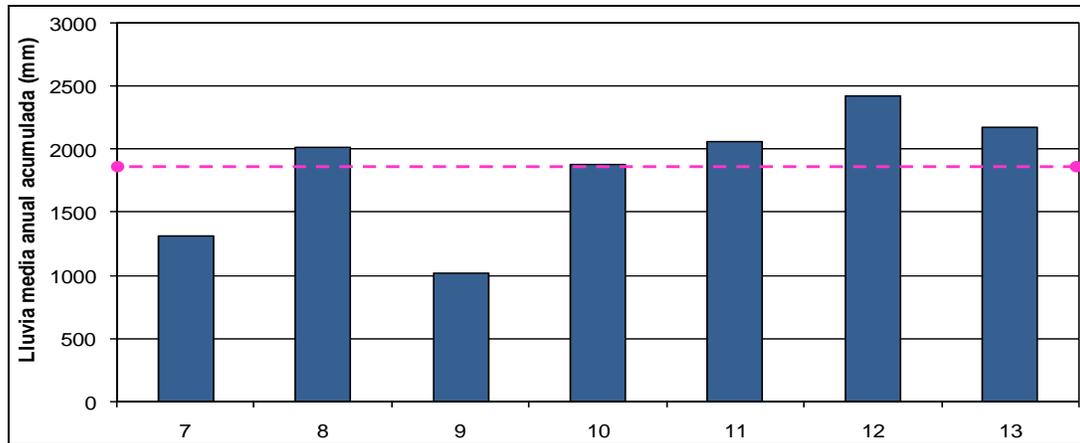


Figura 3.4 Distribución espacial de la lluvia en la subregión hidrológica 23 C

**Subregión hidrológica 23 B.** Por su parte en esta zona los rangos de precipitación van de 1050 hasta 3300 mm., en algunas zonas específicas; y su promedio se encuentra en 2460 mm aproximadamente (línea punteada).

En la Figura 3.5 se ve claramente que las estaciones 25 y 26 (7339 y 7333) que se localizan al norte de Huixtla, específicamente en la parte alta de los municipios de Motozintla y El Porvenir, no siguen el patrón descrito anteriormente; esto se debe al clima presente en esos sitios (templado húmedo con lluvias en verano) que como se dijo anteriormente trae consigo precipitaciones del orden de 1000 a 2000 mm.

- **Subregión hidrológica 23 A.** Finalmente en esta zona los rangos de precipitación van de 1100 hasta 4300 mm y su promedio se encuentra en 2652 mm aproximadamente (línea punteada).

Con base en estos resultados y el análisis espacial obtenido de las curvas isoyetas (Figura 3.7), podemos decir que la precipitación se concentra en las cabeceras de las cuencas sureñas como son Huixtla, Tepuzapa, Islamapa, Cuyamiapa, Huehuetán, Malpaso y las del río Suchiate, de ahí disminuye a medida que nos movemos al noroeste; por lo que el efecto de la barrera montañosa se refleja claramente en este comportamiento al ir disminuyendo tanto la elevación de las montañas como las precipitaciones, en esa misma dirección.

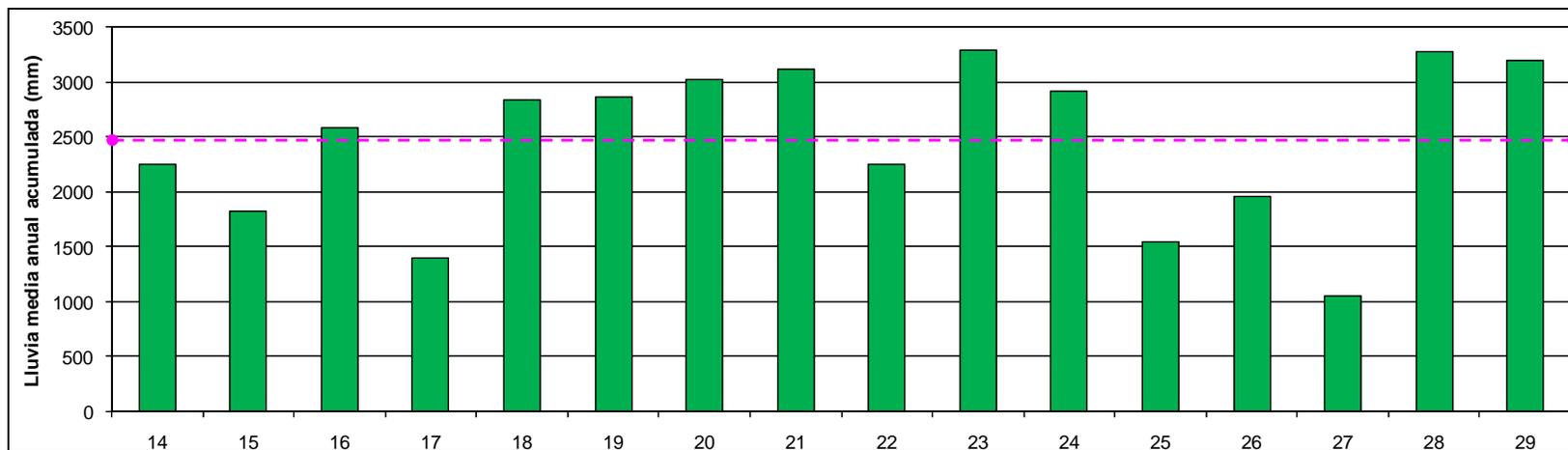


Figura 3.5 Distribución espacial de la lluvia en la subregión hidrológica 23 B

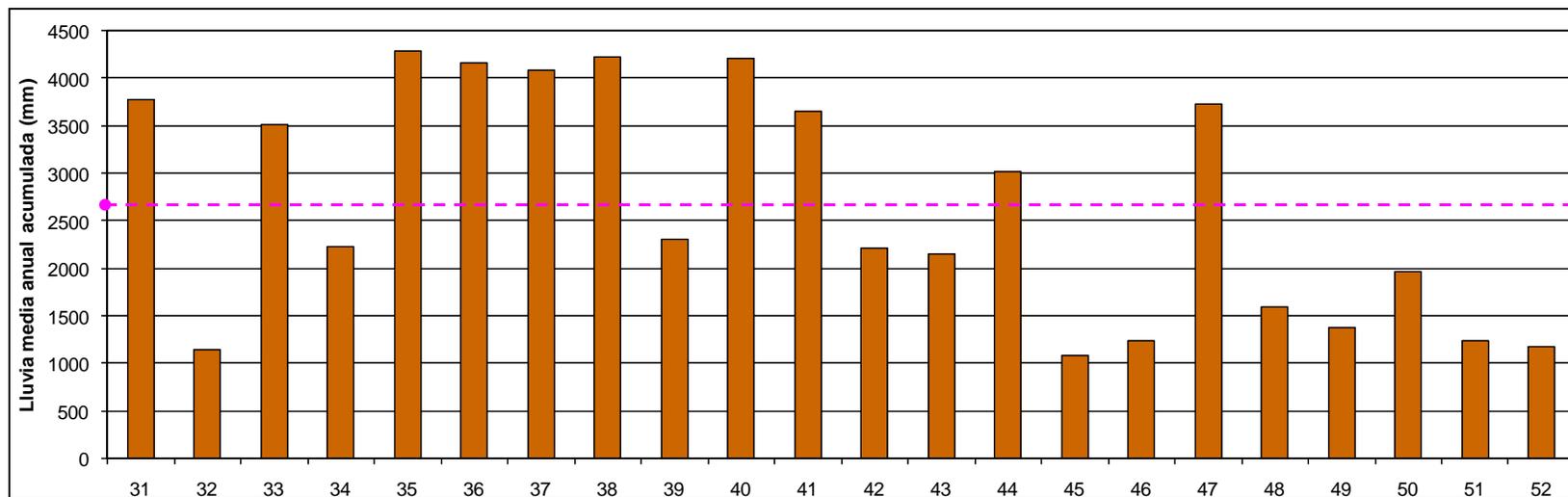


Figura 3.6 Distribución espacial de la lluvia en la subregión hidrológica 23 A

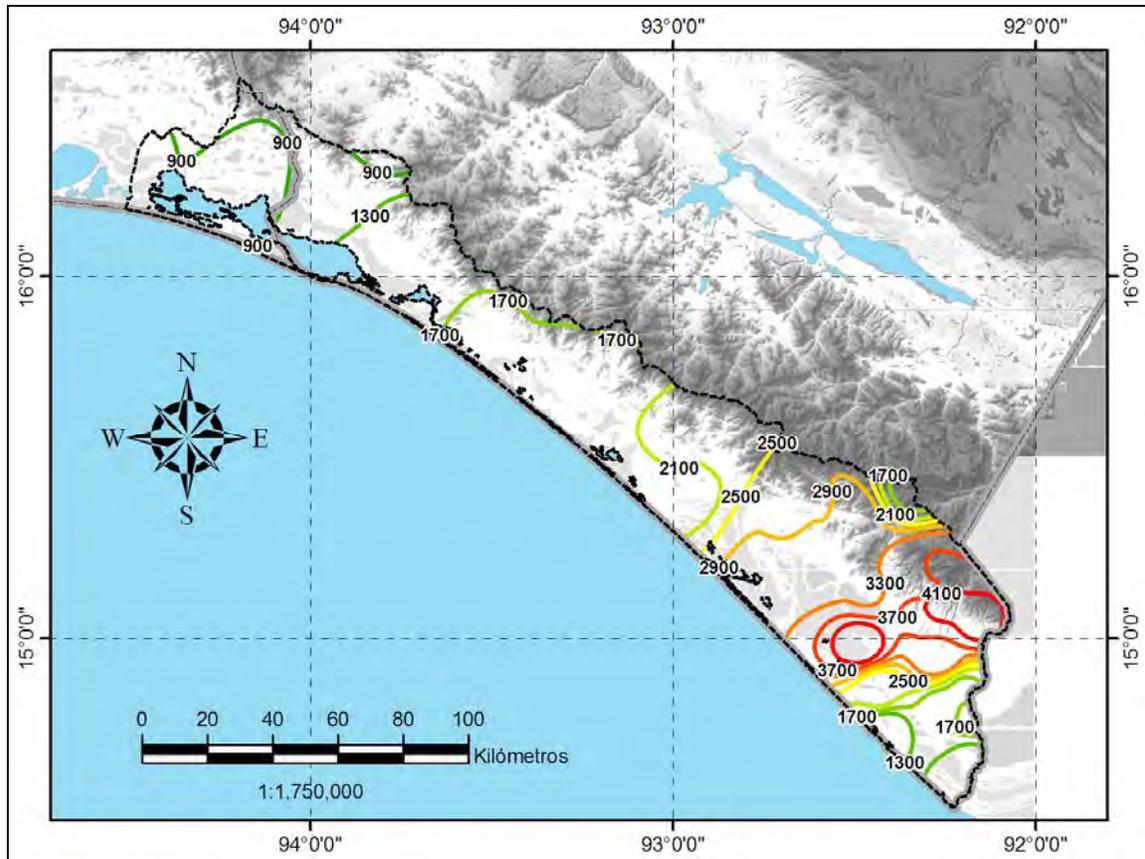


Figura 3.7 Curvas isoyetas anuales

### 3.1.2 Distribución temporal de la precipitación

En cuanto a las precipitaciones a través del tiempo, se puede dividir también de acuerdo al mismo criterio usado con la distribución espacial; es decir, de acuerdo a cada una de las subregiones hidrológicas.

Para determinar un régimen de precipitación, es de gran utilidad estudiar los registros históricos de precipitaciones y estimar su rango de variación temporal. De los registros históricos de las 52 estaciones climatológicas empleadas en este estudio se estimó el porcentaje de precipitación mensual así como su cantidad de lluvia media mensual. En la Figura 3.8 se muestra la distribución temporal de la precipitación; posteriormente se continuó con la división en cada una de las cuatro subregiones en que está dividida la zona de estudio.

Se muestra que la precipitación tiene su máximo mensual en septiembre con 502 mm y con desviaciones respecto de ese valor de 167 mm, lo primero representa aproximadamente el 20% de la lluvia total anual media.

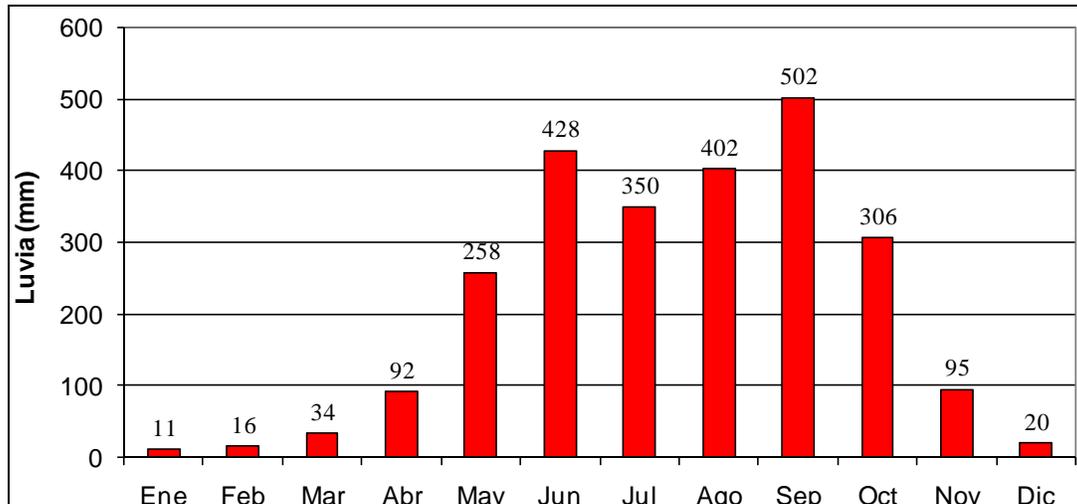


Figura 3.8 Distribución mensual de la lluvia en la región hidrológica Costa de Chiapas

Por su parte en la subregión hidrológica 23 D, de las precipitaciones medias históricas medidas, la máxima que se presenta es también en el mes de septiembre con 361 mm y desviaciones respecto de ese valor de 100 mm. El primer dato representa el 26 % de la lluvia total media en un año.

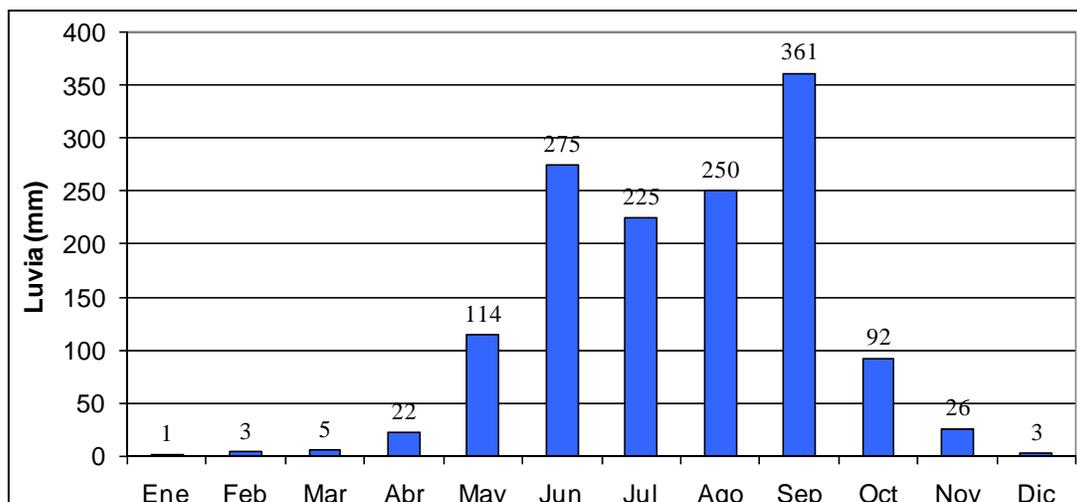


Figura 3.9 Distribución mensual de la lluvia en la subregión hidrológica 23 D

Con lo que respecta a la subregión hidrológica 23 C; de las precipitaciones medias históricas medidas, la máxima que se presenta es también en el mes de septiembre con 422 mm y desviaciones respecto de ese valor de 100 mm también. El primer dato representa el 22 % de la lluvia total media en un año.

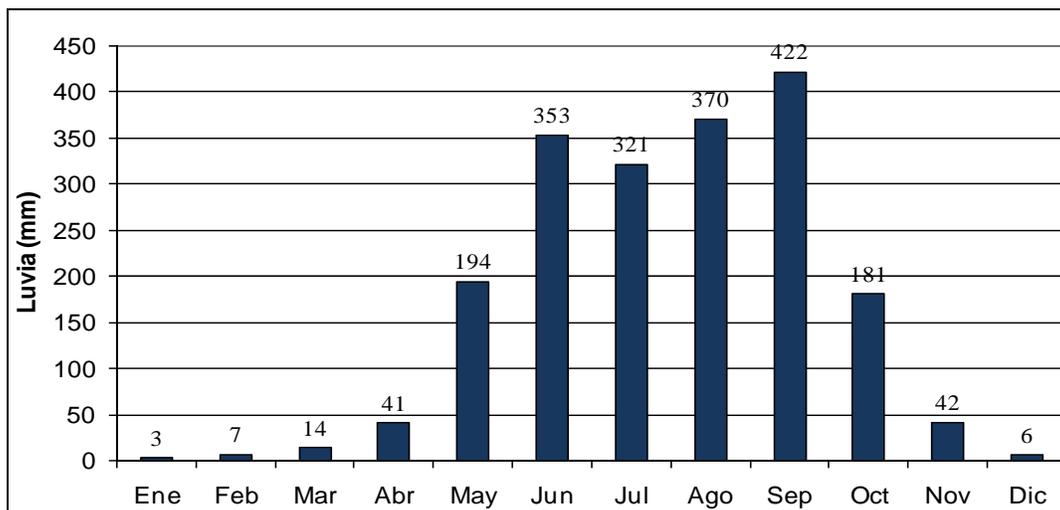


Figura 3.10 Distribución mensual de la lluvia en la subregión hidrológica 23 C

En la subregión hidrológica 23 B (Figura 3.11); de las precipitaciones medias históricas medidas, la máxima que se presenta es también en el mes de septiembre con 520 mm y desviaciones respecto de ese valor de 150 mm. El primer dato representa el 20 % de la lluvia total media en un año.

Finalmente en la subregión hidrológica 23 A (Figura 3.12); de las precipitaciones medias históricas medidas, la máxima que se presenta es también en el mes de septiembre con 550 mm y desviaciones respecto de ese valor de 185 mm. El primer dato representa el 19 % de la lluvia total media en un año.

En general podemos decir que de las figuras mostradas se observa que en los meses de junio a septiembre se concentra toda la lluvia anual representando poco más del 70%; sin embargo en la subregión hidrológica 23 D la lluvia acumulada en esos meses representa el 85%, en la subregión hidrológica 23 C representa el 75% y en la subregión hidrológica 23 B y A representa el 70%.

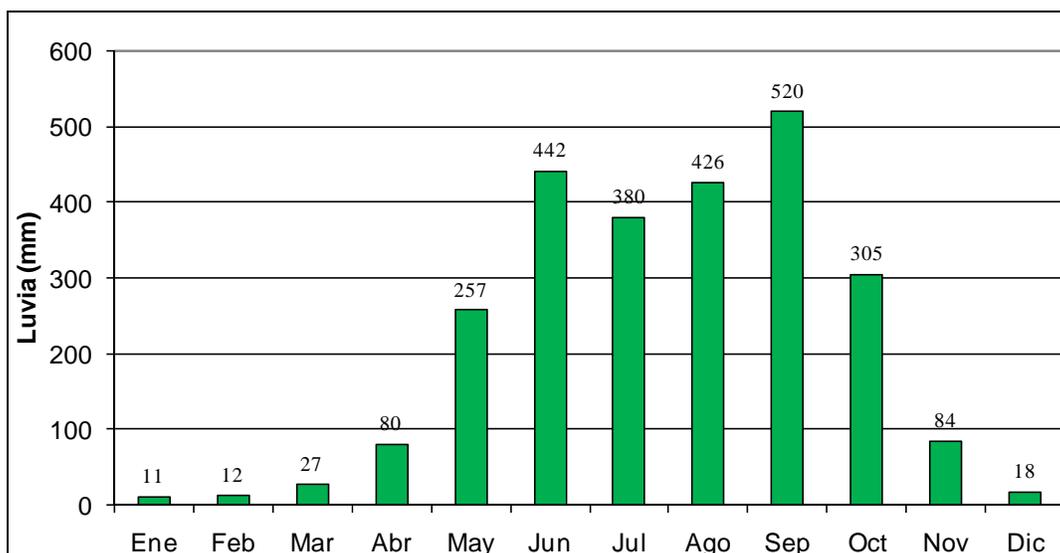


Figura 3.11 Distribución mensual de la lluvia en la subregión hidrológica 23 B

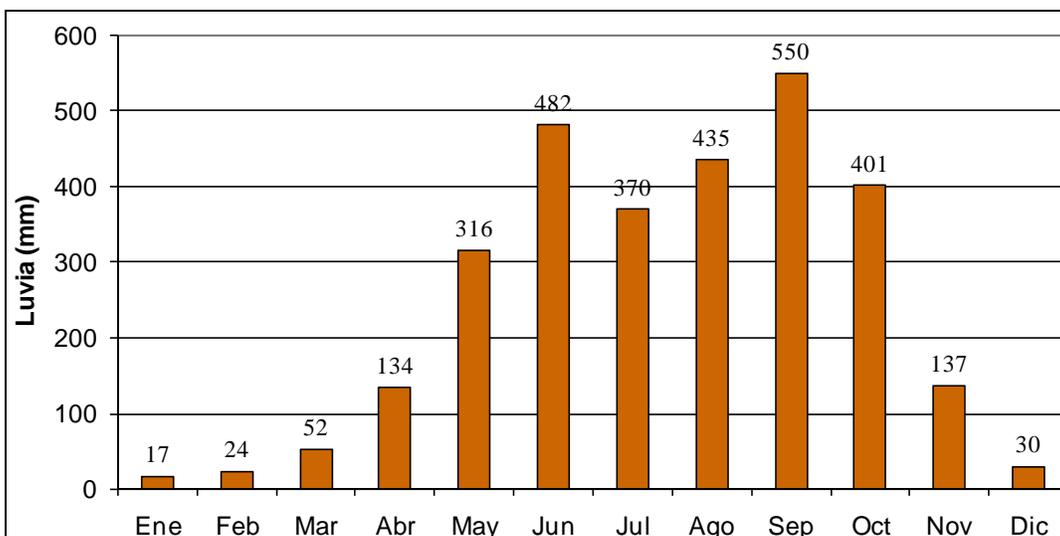


Figura 3.12 Distribución mensual de la lluvia en la subregión hidrológica 23 A

Sin embargo si ampliamos un poco más el registro tomando ahora del mes de mayo a octubre, la representación anterior se convierte en el 95% de la lluvia total acumulada para las subregiones hidrológicas 23 D y 23 C, mientras que para las otras 2 (S.R.H. 23 B y A) es de 90%.

### 3.2 Información hidrométrica

No Cuenca	Clave	Estación	Corriente	Cuenca	Latitud	Longitud	Registro
1*	23026	Tapanatepec	Tapanatepec	Tapanatepec			1978 2003
4	23041	El Rosario	El Rosario	El Rosario	16.09	-93.85	1976 1985
5	23040	Tiltepec	Tiltepec	Tiltepec	16.12	-93.79	1976 1987
6	23011	Tonala	Zanatengo - San Isidro	Zanatengo	16.07	-93.75	1961 2002
8	23036	Tres Picos	Pedregal - Buena Vista - yerba Santa	El Pedregal	15.86	-93.54	1976 1998
11	23013	De Jesús	De Jesús - El Jobo - Manguito	Río de Jesús	15.86	-93.48	1964 2002
13	23046	Siete Cigarros	Siete Cigarros	Siete Cigarros	15.85	-93.44	1970 1982
15	23014	San Diego	San Diego - Alta Peña - Río Frio	San Diego	15.75	-93.33	1964 1997
16	23030	Urbina	Urbina (La Cueva / La Unidad)	Urbina	15.72	-93.26	1974 1983
17	23009	Pijijiapan	Pijijiapan - Hoja Blanca	Pijijiapan	15.7	-93.21	1961 2002
18	23017	Coapa	Coapa (Río Grande) - Echegaray - El Chorro	Coapa	15.66	-93.16	1964 1997
19	23018	Margaritas	Las Margaritas	Las Margaritas	15.55	-93.06	1964 2001
21	23012	Novillero	Novillero -Las Flores - San Juan - Gobierno	Novillero	15.48	-92.95	1962 1990
22	23022	San Nicolás	San Nicolás (Mapastepec)	San Nicolás	15.45	-92.89	1964 1992
23	23015	Cacaluta	Cacaluta - Boquerón	Cacaluta	15.35	-92.71	1964 2002
24*	23044	Doña María	Doña María (Jalapa)	Doña María	15.25	-92.86	1978 1986
25	23016	Cintalapa	Cintalapa - Agua Caliente -El Rosario	Cintalapa	15.3	-92.73	1964 1997
26*	23032	Vado Ancho	Vado ancho - Río Negro - Acacoyagua	Cintalapa	15.24	-92.6	1974 1983
27	23031	Compoapa	Arroyo Compoapa	Contalapa	15.21	-92.57	1974 1983
28	23019	Despoblado	Despoblado - Fortuna	Despoblado	15.21	-92.56	1964 2002
29	23008	Huixtla	Huixtla (Tuzantán) - San Jerónimo - Los Negros- Etzumú	Huixtla	15.13	-92.46	1935 1996
31*	23991	Islamapa	Islamapa	Huixtla	15.02	-92.47	1978 1986
32	23037	Cuyamiapa	Cuyamiapa	Cuyamiapa	15.03	-92.39	1976 1985
33	23020	Huehuetan	Huehuetan - Cuilco - Escocia - Chalón - La Joya - Santo Domingo - Nexapa - Vejapa	Huehuetan	15	-92.41	1964 1998
34	23006	Malpaso	Coatán (Mazatán) - Buena Vista	Coatán	14.99	-92.19	1954 2002
35	23003	Cahuacan	Cahuacan (Cacahoacán) - Zapote	Cahuacan	14.71	-92.27	1948 2000
36	23005	Talismán I	Suchiate - Maxcum - Mala (Talismán I)	Suchiate	14.96	-92.15	1950 1964
37	23023/23034	Talismán II y III	Suchiate - Maxcum - Mala (Talismán II y Talismán III)	Suchiate	14.88	-92.15	1965 1985
38	23007	Suchiate II	Suchiate - Maxcum - Mala (Suchiate II)	Suchiate	14.68	-92.13	1955 1992
39	23002	Suchiate I	Suchiate - Maxcum - Mala (Suchiate I)	Suchiate	14.65	-92.11	1945 1962

Tabla 3.2 Estaciones hidrométricas dentro de la región hidrológica Costa de Chiapas

Dentro de la Costa de Chiapas se encontraron 41 estaciones hidrométricas, de las cuales sólo 28 cuentan con registros mayores o iguales a 10 años y de esas solo 26 cuentan con información para su georreferenciación. El conjunto de éstas tienen una longitud de registro promedio de 27 años; por lo que podemos decir que se tiene una muestra confiable.

- 1\* - La estación climatológica no tiene información para su georreferenciación.
- 24\*, 26\* y 31\* - El registro histórico es inferior a 10 años.

A continuación en la Figura 3.13 se muestran la ubicación de las estaciones hidrométricas correspondientes a esta tabla.

En la subregión hidrológica 23 D se encuentran 4 estaciones hidrométricas, de las cuales sólo 3 tienen información para su georreferenciación. Así mismo la longitud de registro promedio de las 4 estaciones hidrométricas es de 18 años.

En la subregión hidrológica 23 C se encuentran 8 estaciones hidrométricas, con una longitud de registro promedio de 27 años.

En la subregión hidrológica 23 B se encuentran 11 estaciones hidrométricas, de las cuales sólo 9 tienen información para su georreferenciación. Donde la longitud de registro promedio de las 9 estaciones hidrométricas es de 28 años. Así mismo las estaciones 31021 y 21037 (Tablazón y Cuyamiapa) tienen registros mayores a 10 años pero no se tiene su ubicación geográfica.

En la subregión hidrológica 23 A se encuentran 7 estaciones hidrométricas, con una longitud de registro promedio de 31 años.

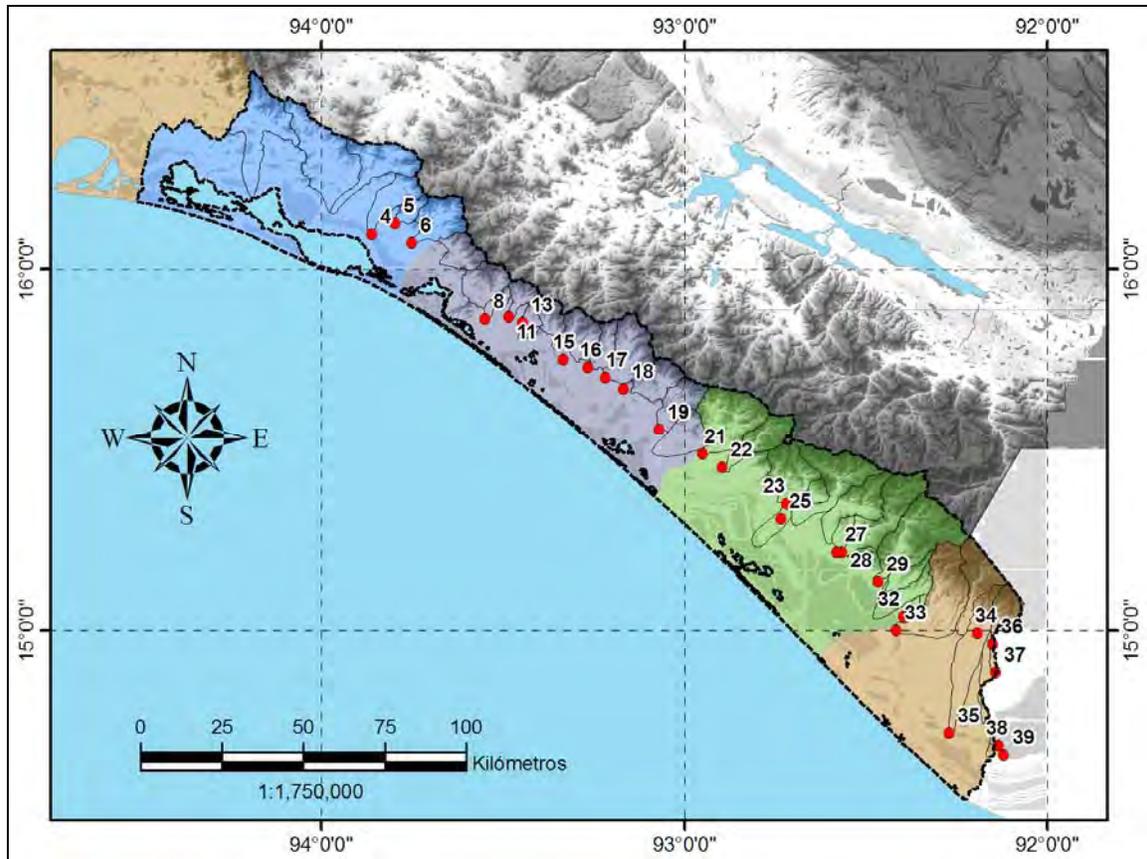


Figura 3.13 Estaciones hidrométricas seleccionadas dentro de las subregiones hidrológicas

Con objeto de conocer el comportamiento del escurrimiento máximo histórico, tanto espacial como temporalmente en esta región, a continuación se presenta una tabla resumen con los escurrimientos máximos y sus fecha de ocurrencia.

No	Clave	Estación	Q med (m <sup>3</sup> /s)	Q min (m <sup>3</sup> /s)	Q max (m <sup>3</sup> /s)	Año	Mes	Día	Región hidrológica
1	23026	Tepanatepec	145.4	1.8	1714.45	1980	Septiembre	24	23 D
4	23041	El Rosario	7.8	2.9	20.4	1981	Agosto	29	23 D
5	23040	Tiltepec	6.6	2.2	18.7	1981	Agosto	29	23 D
6	23011	Tonala	50.5	2.0	741.2	1963	Septiembre	23	23 D
8	23036	Tres Picos	21.0	4.3	176.7	1989	Septiembre	21	23 D
11	23013	De Jesús	21.7	4.8	140.0	1989	Septiembre	21	23 C
13	23046	Siete Cigarros	0.8	0.3	2.6	1973	Septiembre	3	23 C
15	23014	San Diego	9.7	2.9	480.7	1972	Julio	25	23 C
16	23030	Urbina	6.1	1.3	225.0	1982	Junio	16	23 C
17	23009	Pijijiapan	54.5	23.3	1004.8	1973	Agosto	24	23 C
18	23017	Coapa	19.0	7.8	481.4	1979	Agosto	25	23 C
19	23018	Margaritas	21.8	6.8	703.1	1995	Julio	25	23 C

No	Clave	Estación	Q med (m <sup>3</sup> /s)	Q min (m <sup>3</sup> /s)	Q max (m <sup>3</sup> /s)	Año	Mes	Día	Región hidrológica
21	23012	Novillero	104.6	66.8	450.0	1981	Agosto	21	23 B
22	23022	San Nicolás	27.9	12.7	339.7	1965	Octubre	16	23 B
23	23015	Cacaluta	83.7	29.8	479.7	1988	Septiembre	3	23 B
24	23044	Doña María	12.8	4.2	73.8	1981	Octubre	1	23 B
25	23016	Cintalapa	29.0	5.5	738.9	1979	Agosto	31	23 B
26	23032	Vado Ancho	50.2	11.7	114.0	1982	Octubre	1	23 B
27	23031	Compoapa	13.8	3.8	34.1	1982	Octubre	5	23 B
28	23019	Despoblado	17.3	5.7	591.2	1978	Agosto	26	23 B
29	23008	Huixtla	72.1	14.4	702.0	1963	Septiembre	22	23 A
31	23991	Islamapa	27.9	11.3	166.2	1981	Octubre	11	23 A
32	23037	Cuyamiapa	4.1	1.5	41.6	1983	Septiembre	19	23 A
33	23020	Huehuetan	1502.0	24.8	1032.2	1998	Diciembre	4	23 A
34	23006	Malpaso	51.7	18.4	1327.0	1973	Agosto	31	23 A
35	23003	Cahuacan	58.6	21.2	498.9	1963	Septiembre	27	23 A
36	23005	Talismán I	85.7	28.7	445.0	1959	Octubre	17	23 A
37	23023 23034	Talismán II y III	84.4	0.0	1362.0	1984	Septiembre	26	23 A
38	23007	Suchiate II	246.9	66.4	2200.0	1963	Septiembre	27	23 A
39	23002	Suchiate I	237.5	120.0	2890.0	1949	Septiembre	30	23 A

Tabla 3.3 Fechas y registros de los escurrimientos en las estaciones de medición

El escurrimiento se presenta en correspondencia con la época de precipitación, de junio a septiembre, siendo mayo y octubre meses de transición que de todos modos ingresan un escurrimiento importante.

### 3.3 Características de las cuencas de toda la zona

No	Clave CNA	Estación	Corriente	Cuenca	Area (km <sup>2</sup> )	L cauce (km)	S cauce (%)	tc (h)
1	23026	Tapanatepec	Tapanatepec	Tapanatepec	293	52.37	2.16	6.12
2	S/N	S/N	Las Arenas - Azteca	Las Arenas	351	41.87	2.18	5.13
3	S/N	S/N	Lagartero - La Mica	Lagartero	206	36.82	4.33	3.57
4	23041	El Rosario	El Rosario	El Rosario	127	29.78	6.82	2.55
5	23040	Tiltepec	Tiltepec	Tiltepec	48	14.86	12.47	1.18
6	23011	Tonalá	Zanatengo - San Isidro	Zanatengo	163	23.02	11.04	1.73
7	23027	Ocuilapa	Ocuilapa - Agua Dulce	Ocuilapa	107	15.76	13.31	1.21
8	23036	Tres Picos	El Pedregal - Buena Vista - Yerba Santa	El Pedregal	137	20.97	7.15	1.91
9	S/N	S/N	Los Horcones	El Pedregal	153	26.93	5.52	2.56
10	S/N	S/N	Las Hermanas - El Mico	Las Hermanas	10	5.69	13.54	0.55
11	23013	Jesús	De Jesús - El Jobo - Manguito	Río de Jesús	59	14.16	11.69	1.17
12	23028	Los Patos	Los Patos	Los Patos	52	17.54	8.24	1.57
13	23046	Siete Cigarros	Siete Cigarros	Siete Cigarros	8	6.11	11.18	0.62
14		La Flor	La Flor - Arroyo Escondido	La Flor	75	19.29	6.48	1.86
15	23014	San Diego	San Diego - Alta Peña - Río Frio	San Diego	126	20.06	8.26	1.74
16	23030	Urbina	Urbina (La Cueva/La Unidad)	Urbina	77	19.50	9.47	1.62
17	23009	Pijijiapan	Pijijiapan - Hoja Blanca	Pijijiapan	213	26.41	9.40	2.05
18	23017	Coapa	Coapa (Río Grande) - Echegaray - El Chorro	Coapa	116	22.34	16.20	1.46
19	23018	Margaritas	Las Margaritas - Los Cuaches	Las Margaritas	133	26.97	9.22	2.10
20		S/N	Arroyo Bobos - El Progreso	Arroyo Bobos	151	22.33	7.26	1.99
21	23012	Novillero	Novillero - Las Flores - San Juan - Gobierno	Novillero	287	31.89	8.66	2.45
22	23022	San Nicolás	San Nicolás (Mapastepec)	San Nicolás	144	28.94	9.26	2.21
23	23015	Cacaluta	Cacaluta - Boquerón	Cacaluta	176	29.28	10.65	2.12
24	23044	Doña María	Doña María (Jalapa)	Doña María	122	33.34	6.57	2.82
25	23016	Cintalapa	Cintalapa - Agua Caliente - El Rosario	Cintalapa	258	43.39	8.36	3.14
26	23032	Vado Ancho	Vado ancho - Río Negro - Acacoyagua	Cintalapa	182	36.28	8.50	2.72
27	23031	Compoapa	Arroyo Compoapa	Cintalapa	50	13.92	7.05	1.40
28	23019	Despoblado	Despoblado - Fortuna	Despoblado	245	46.91	7.20	3.54
29	23008	Huixtla	Huixtla (Tuzantán) - Jerónimo - Los Negros - Etzumú	Huixtla	354	45.86	8.71	3.23
30	S/N	S/N	Tepuzapa	Huixtla	65	20.20	9.49	1.66
31	23991	Islamapa	Islamapa	Huixtla	174	27.74	5.59	2.60
32	23037	Cuyamiapa	Cuyamiapa	Cuyamiapa	19	12.25	5.91	1.36
33	23020	Huehuetan	Huehuetan - Cuilco - Escocia - Chalón - La Joya - Santo Domingo - Nexapa - Vejapa	Huehuetan	326	43.16	7.99	3.19
34	23006	Malpaso	Coatán (Mazatán) - Buenavista - La Joya	Coatán	172	34.17	6.48	2.89
35	23003	Cahuacan	Cahuacán (Cacahoacán) - Zapote	Cahuacán	243	57.93	1.47	7.68

Tabla 3.4 Parámetros de las subcuencas de las estaciones hidrométricas

Aparte de la información climatológica e hidrométrica, también se obtuvo la información más básica de las cuencas de la zona de estudio; como es: su área, longitud de su cauce principal, pendiente del cauce y el tiempo de concentración de la lluvia. Estos valores son resumidos en la tabla siguiente.

El tiempo de concentración  $t_c$ , es el tiempo requerido por el escurrimiento para viajar desde el punto más distante hidráulicamente a la salida de la cuenca (ASCE, 1996, p.579). Pero tal definición es la distancia de viaje dividida por la velocidad media, propiamente particionada en tramos de características hidráulicas racionalmente uniformes. El método Racional tradicional usado emplea esta definición.

El tiempo de concentración es un parámetro hidráulico y no hidrográfico. Aunque desafortunadamente a la literatura hidrológica a menudo le falta hacer la distinción. Finalmente se puede decir que el tiempo de concentración del agua sobre una cuenca se define como la duración máxima necesaria de una gota de agua para recorrer el camino hidrológico entre el punto más lejano y la salida de la misma.

Éste parámetro está compuesto de tres términos diferentes:

- $t_h$ : tiempo de humectación. Es el tiempo necesario de la absorción del suelo por el agua que cae antes de que ella no escurra.
- $t_r$ : tiempo de escurrimiento. Es el tiempo que corresponde a la duración del escurrimiento del agua en la superficie o en los primeros horizontes del suelo hasta un sistema de colecta (curso de agua natural o colector).
- $t_a$ : tiempo de recorrido. Es el tiempo ocupado por el agua para desplazarse en el sistema de colecta hasta la salida de la cuenca.

El tiempo de concentración es entonces igual a la suma de éstos tres términos:

$$t_c = t_h + t_r + t_a \quad (3.1)$$

Teóricamente estimamos que el  $t_c$  es la duración máxima comprendida entre el final de la lluvia neta y el fin del escurrimiento. Prácticamente el tiempo de concentración puede ser deducido de medidas sobre el terreno o estimarse con la ayuda de las fórmulas empíricas más usuales.

En este trabajo se utilizó una de las fórmulas empíricas más comunes en nuestro país. Es la fórmula de Kirpich (1940) o también llamada fórmula de California Culverts Price (1942), transformada al sistema métrico; la cual fue desarrollada a partir de información del SCS (Soil Conservation Service) en siete cuencas rurales de Tennessee con canales bien definidos y pendientes empinadas (3 a 10 %).

$$t_c = 0.0195 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (3.2)$$

donde:

$t_c$  = tiempo de concentración [minutos],

$L$  = longitud del curso de agua desde aguas arriba hasta su salida [m],

$S$  = pendiente promedio de la cuenca [adimensional].

El criterio por el cual se ha elegido esta fórmula, es debido a la facilidad en su aplicación.

### ***3.4 Análisis de frecuencias de gastos máximos anuales***

Cuando se quiere diseñar cualquier tipo de estructura u obra hidráulica es necesario contar con un valor de diseño, en este caso avenida de diseño; la cual para ser obtenida tenemos que valernos de extrapolaciones a partir de los registros existentes (gastos máximos anuales) en la zona proyectada, asociadas a una probabilidad en años de no excedencia. Esta probabilidad de no excedencia es el llamado periodo de retorno.

El periodo de retorno se define como el número de años en que un evento puede ser igualado o excedido en promedio y a la larga. También es conocido como intervalo de recurrencia.

Si se tienen  $n$  datos de una muestra, para asignar un periodo de retorno a cada evento se puede utilizar la ecuación (Gumbel, 1958) siguiente.

$$Tr = \frac{n+1}{m} \quad (3.3)$$

donde:

$m$  es el número de orden que ocupa un cierto valor en una lista de registros.

La probabilidad de que un evento sea igualado o excedido está asociada al periodo de retorno de la siguiente manera:

$$Tr = \frac{1}{P} \quad (3.4)$$

Ahora bien, sabiendo que la función de distribución acumulada es probabilidad de que una variable  $X$  tome un valor menor o igual a  $x$ , es decir:  $F(x) = P(X < x)$ . Por lo que definiendo el periodo de retorno en la función de distribución acumulada, queda así:

$$Tr = \frac{1}{a - F(x)} \quad (3.5)$$

Para tener una buena estimación de la avenida de diseño es necesario ajustar adecuadamente los gastos máximos anuales medidos, a una función de distribución de probabilidad teórica. De entre las diversas funciones de distribución que existen, en este caso para el análisis de frecuencias de gastos máximos usamos las funciones de distribución: Normal, Lognormal, Pearson III o Gamma de tres parámetros, Exponencial,

Gumbel y Gumbel para dos poblaciones, que son las que trae consigo el programa mencionado a continuación.

Para la finalidad de éste capítulo se pensó convenientemente en utilizar el software para ajuste de funciones de distribución de probabilidad univariada Ax versión 1.05 elaborado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred).

En conclusión se puede decir que este análisis se realiza con objeto de conocer el comportamiento de los gastos en los cauces para diferentes situaciones de riesgo, asociadas al periodo de retorno (Tr).

### **3.4.1 Estimación de parámetros**

Primeramente se debe definir la función de distribución de probabilidad teórica que se usará y posteriormente se deben estimar sus parámetros para poder calcular los gastos de diseño.

Para poder estimar los parámetros de una función de distribución necesitamos utilizar algún método que nos ayude a minimizar la suma de los errores estándar. Existen varios métodos para tal fin, como son: *el método de momentos, máxima verosimilitud, momentos de probabilidad pesada, mínimos cuadrados, método de los momentos-L, principio de máxima entropía y sextiles* (Escalante, 2005); sin embargo los que se incluyen en el software Ax V.105 son el método de momentos y el de máxima verosimilitud.

Aunque el software hace prácticamente todo el trabajo pesado, a continuación se mencionan las bases para el cálculo de la estimación de los parámetros con cada uno de los métodos que trae consigo el programa.

### 3.4.1.1 Método de momentos

Este método es un procedimiento muy sencillo para estimar uno o más parámetros de una función.

El K-ésimo momento de la distribución, tomado respecto al origen y a la media son (Mendenhall 1994).

$$M'_k = \int_D x^k f(x) dx \quad (3.6)$$

con respecto al origen y

$$M'_k = \int_D (x - \mu)^k f(x) dx \quad (3.7)$$

con respecto a la media

Los primeros cuatro momentos de la muestra son:

$$M_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x} \quad (3.8)$$

$$M_2 = S^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.9)$$

$$M_3 = S^3 Cs \quad (3.10)$$

donde Cs es el coeficiente de sesgo definido como:

$$C_s = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{S^3} \quad (3.11)$$

$$M_4 = S^4 K \quad (3.12)$$

donde  $K$  es la Curtosis y que se calcula así:

$$K = \frac{n^3}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^4}{S^4} \quad (3.13)$$

La estimación de los parámetros desconocidos por este método se logra al igualar los momentos correspondientes de la población y de la muestra, obteniendo así  $n$  ecuaciones con  $n$  incógnitas que son los parámetros buscados. Este método a pesar de ser de fácil aplicación es un método que requiere del cálculo de integrales que contienen a la función de densidad  $f(x)$ , las cuales no siempre se resuelven fácilmente.

### 3.4.1.2 Método de máxima verosimilitud

Si se tienen  $n$  observaciones aleatorias  $x_1, x_2, \dots, x_n$  su distribución conjunta es  $f(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$  o  $(x_1, x_2, \dots, x_n; \underline{\theta})$ . Como la muestra es aleatoria, los valores de las observaciones son independientes, entonces su función de distribución conjunta es:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n; \underline{\theta}) = f(x_1; \underline{\theta}) \cdot f(x_2; \underline{\theta}) \cdots f(x_n; \underline{\theta}) \quad (3.14)$$

La ecuación anterior es proporcional a la probabilidad de que la muestra o una muestra aleatoria en particular pertenezca a la distribución, y se conoce con el nombre de "*función de verosimilitud* (L)"

$$L \prod_{u=1}^n f(x_u; \underline{\theta}) \quad (3.15)$$

donde  $\underline{\theta}$  es el vector de parámetros (desconocido).

Los valores de los parámetros que maximizan a  $L$  se conocen como estimadores de máxima verosimilitud.

Para poder estimar los parámetros que maximicen la función de verosimilitud es necesario calcular las derivadas de dicha función con respecto a cada uno de los parámetros a estimar e igualar cada derivada a cero y así obtener un sistema de ecuaciones, el cual será necesario resolver para obtener los parámetros buscados, esto es.

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_i} = 0 \quad (3.16)$$

Dado que  $L$  es un producto de funciones, la derivación de tales productos es tediosa, por lo que es más fácil encontrar el valor de los parámetros que maximicen a la función logarítmica  $\ln(L)$ , ya que  $\ln L$  es una función monótona creciente de  $L$ , por lo que los valores de los parámetros que maximicen a  $L$  corresponden también a los valores de los parámetros que maximizan a  $\ln L$ , por lo que la ecuación anterior queda.

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \theta_i} = 0 \quad (3.17)$$

con  $\ln L = \ln L$

Cuando el número de parámetros por determinar es mayor a uno, el sistema de ecuaciones que se obtiene con la ecuación anterior es un sistema no lineal, por lo que para resolver dicho sistema es necesario recurrir a un método numérico.

### **3.4.2 Funciones de distribución de probabilidad**

En este trabajo se detalla la teoría de la función de distribución Gumbel para dos poblaciones, ya que casi la totalidad de los registros hidrométricos se ajustaron a ella. Por lo que la teoría de las funciones de distribución de probabilidad Normal, Lognormal, Pearson III o Gamma de tres parámetros, Exponencial y Gumbel, fue omitida.

La aplicación de una de estas distribuciones teóricas mencionadas a una población particular está justificada si las hipótesis (suposiciones) del modelo de comportamiento del proceso que generó la población se cumplen. Dicho de otro modo, si conocemos el proceso, es decir, el conjunto de fenómenos que dieron lugar a nuestra población de mediciones u observaciones y además estamos seguros de que el mismo se ajusta a un modelo de comportamiento determinado, entonces podemos decir que la distribución de probabilidades de nuestra población es la que corresponde al modelo.

En la práctica se sabe que ciertos procesos y fenómenos generan resultados numéricos cuya distribución de probabilidades se puede ajustar a determinados modelos teóricos.

Ahora bien, aplicando este concepto a nuestra realidad, podemos decir que los gastos máximos que se presentan en la zona de estudio muestran la presencia de dos grupos (poblaciones) diferentes. Donde el primer grupo es de los gastos generados por las precipitaciones producto de los fenómenos meteorológicos dominantes en la región y la segunda es la de los gastos generados por las precipitaciones ciclónicas (en general mayores a las primeras).

#### **3.4.2.1 Función de distribución para dos poblaciones o Gumbel Mixta**

Debido como ya se mencionó, a la presencia de los ciclones tropicales en algunas zonas del país, los gastos máximos anuales muestran la presencia de dos grupos de crecientes, el primero debido a las precipitaciones comunes o normales de la región y el segundo debido a las precipitaciones ciclónicas, por lo que ajustar los gastos máximos a una función de distribución resultaría inadecuado, por lo que se puede suponer que cada

uno de los dos grupos de avenidas puede ser descrito por separado por una función de distribución Gumbel (Escalante, 2005).

Si se consideran que los datos de cada población son excluyentes, entonces la función de distribución de probabilidad es:

$$F(x) = p \exp\left\{-\exp\left(\frac{x - \beta_1}{\alpha_1}\right)\right\} + (1 - p) \exp\left\{-\exp\left(\frac{x - \beta_2}{\alpha_2}\right)\right\}; -\infty \leq x \leq \infty \quad (3.18)$$

$$\text{Para } x > 0 \quad \alpha_i > 0, \quad 0 < p < 1$$

donde:

$p$  = es el parámetro de segmentación de series,

$\alpha_1$  = Parámetro de escala de la población no ciclónica,

$\beta_1$  = Parámetro de ubicación de la población no ciclónica,

$\alpha_2$  = Parámetro de escala de la población ciclónica,

$\beta_2$  = Parámetro de ubicación de la población ciclónica.

### 3.4.3 Ajuste de la función de distribución a los registros hidrométricos

La selección de la función de distribución de probabilidad debe seleccionarse adecuadamente para evitar tener problemas como son el tener una obra sobrediseñada o costosa, o por el contrario subdiseñada y con un riesgo de falla considerable.

Ahora bien, existen algunas pruebas de bondad de ajustes. Las pruebas de bondad de ajuste miden la compatibilidad de una muestra aleatoria con una función teórica de distribución de probabilidades. En otras palabras, estas pruebas demuestran qué bien la distribución seleccionada se ajusta a sus datos. Entre estas tenemos: El análisis gráfico, el error estándar de ajuste, la prueba de Kolmogorov – Smirnov, la prueba Ji cuadrada ( $\chi^2$ ),

la prueba de ajuste de Cramér – von Mises y La prueba de Anderson y Darling. En este paso también por cuestiones de limitación al uso del software AX V. 1.05 solo se usa el del mínimo error estándar.

El análisis gráfico consiste en inspeccionar una gráfica donde se tengan dibujadas cada una de las funciones de distribución de probabilidad junto con los puntos medidos. De éstas funciones, la que se apege mejor a los datos medidos, será la que se preseleccione.

### 3.4.3.1 Error estándar de ajuste

El error estándar de ajuste dado por Kite (1988), nos permite deducir la confiabilidad de la ecuación de regresión que hemos desarrollado. Este error se simboliza EEA (Error estándar de ajuste) y es similar a la desviación estándar en cuanto a que ambas son medidas de dispersión.

El error estándar de la estimación mide la variabilidad, o dispersión de los valores observados alrededor de la línea de regresión; el cual está definido como:

$$EEA = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(Qr_i - Qe_i)^2}{(N - np)} \right]^{1/2} \quad (3.19)$$

donde:

$Qr_i$  = i –ésimo gasto máximo anual registrado

$Qe_i$  = i–ésimo gasto estimado por la función de distribución correspondiente

$np$  = es el número de parámetros de la función de distribución

$N$  = es el número de registros o tamaño de la muestra

Como se aplicaba en la desviación estándar, mientras más grande sea el error estándar de estimación, mayor será la dispersión de los puntos alrededor de la línea de regresión. De manera inversa, si  $EEA = 0$ , esperemos que la ecuación de estimación sea

un estimador perfecto de la variable dependiente. En este caso todos los puntos deben caer en la línea de regresión y no habría puntos dispersos.

Otra cosa que debemos observar es que el error estándar de la estimación se mide a lo largo del eje Y, y no perpendicularmente de la línea de regresión.

Caracterización fluvial y análisis multivariado, aplicado a la migración de meandros.

No. Cuenca	Clave	Estación	Nombre de la cuenca	Área de cuenca (km <sup>2</sup> )	Gastos (m <sup>3</sup> /seg.)					
					2	5	10	20	50	100
1	23026	Tapanatepec	Tapanatepec	293	100.8	314.9	1199.6	2054.3	3052.4	3772.9
4	23041	El Rosario	El Rosario	127	4.7	10.8	15.5	20.2	26.3	31.0
5	23040	Tiltepec	Tiltepec	48	4.3	7.4	12.4	19.1	27.1	32.8
6	23011	Tonalá	Zanatenco	163	106.6	212.4	333.5	470.2	641.0	765.0
8	23036	Tres Picos	El Pedregal	137	14.4	44.6	136.3	207.5	292.1	353.4
11	23013	De Jesús	Río de Jesús	59	47.3	88.1	107.5	123.1	142.0	155.7
13	23046	Siete Cigarros	Siete Cigarros	8	0.5	1.2	1.7	2.2	2.8	3.3
15	23014	San Diego	San Diego	126	179.9	331.5	402.4	443.4	498.8	547.4
16	23030	Urbina	Urbina	77	21.4	164.2	212.2	252.7	302.7	339.4
17	23009	Pijijiapan	Pijijiapan	213	213.5	360.5	484.3	668.8	1100.4	1452.4
18	23017	Coapa	Coapa	116	157.9	311.0	375.0	430.9	500.6	552.0
19	23018	Margaritas	Las Margaritas	133	165.0	342.3	532.0	687.5	870.9	1003.3
21	23012	Novillero	Novillero	287	253.4	342.0	388.6	427.0	470.3	499.1
22	23022	San Nicolás	San Nicolás	144	98.0	166.0	236.9	303.5	384.0	442.3
23	23015	Cacaluta	Cacaluta	176	152.8	244.5	323.0	408.9	519.6	600.1
24	23044	Doña María	Doña María	122	12.6	49.7	72.5	93.0	118.6	137.6
25	23016	Cintalapa	Cintalapa	258	135.7	229.8	316.8	486.1	875.1	1149.2
26	23032	Vado Ancho	Cintalapa	182	68.8	97.0	112.6	127.3	146.4	160.9
27	23031	Compoapa	Contalapa	50	14.2	23.5	32.7	41.8	53.0	61.3
28	23019	Despoblado	Despoblado	245	201.7	406.7	467.8	520.2	585.7	634.6
29	23008	Huixtla	Huixtla	354	224.7	408.2	493.6	570.4	667.1	738.6
31	23991	Islamapa	Huixtla	174	32.4	117.9	171.0	215.3	269.6	309.5
32	23037	Cuyamiapa	Cuyamiapa	19	4.4	33.4	39.8	45.4	52.3	57.3
33	23020	Huehuetan	Huehuetan	326	347.7	535.5	674.8	807.6	976.9	1102.7
34	23006	Malpaso	Coatán	172	208.5	447.9	732.9	989.9	1295.4	1516.2
35	23003	Cahuacan	Cahuacan	243	149.9	215.3	280.2	383.8	518.0	606.9
36	23005	Talismán I	Suchiate	96	225.1	348.4	398.2	442.8	498.9	540.5
37	23023/23034	Talismán II y III	Suchiate	108	247.6	408.7	648.6	940.6	1294.0	1549.4
38	23007	Suchiate II	Suchiate	168	979.3	1482.9	1822.5	2118.2	2481.7	2748.1
39	23002	Suchiate I	Suchiate	175	1020.1	1916.3	2651.9	2893.2	3165.7	3360.3

Tabla 3.5 Resumen del análisis de frecuencias de gastos máximos (Gastos hasta para Tr=100 años)

De la Tabla 3.5 se puede decir que a la mayoría de las estaciones se les ajustó de mejor manera la función de distribución para dos poblaciones (Gumbel Mixta).

Así mismo las estaciones 23041, 23011 y 23046, ubicadas en los ríos El Rosario, Zanatenco y Siete Cigarros respectivamente, fueron las excepciones con ajustes de las funciones de distribución exponencial y lognormal. De estas tres últimas no se encuentra alguna similitud entre ellas.

En el Anexo A, se muestran las tablas (Tabla A.1 y Tabla A.2) con los parámetros de las funciones de distribución de probabilidad que fueron ajustadas a los registros hidrométricos, así como la tabla los errores estándar de los ajustes de las funciones de distribución de probabilidad.



## **Capítulo 4 Morfología de los cauces**

La morfología de los ríos estudia la forma de los mismos, incluyendo dentro de esto, su configuración en planta, la geometría de las secciones transversales, la forma del fondo y su perfil.

Para facilitar el estudio de la morfología se han clasificado los ríos desde diferentes enfoques. Lo que permite ubicar fácilmente cualquier cauce dentro de cada clasificación.

### **4.1 Generalidades**

La forma que los cauces van adquiriendo a lo largo del tiempo está directamente influenciada por las diversas alteraciones que sufre el mismo, las cuales son producto de muchos factores ligados entre sí; como son, el régimen hidrológico al que está sujeto, las características de su cuenca de recepción así como las precipitaciones presentes en la zona.

En la zona de estudio tenemos el factor suelo como elemento importante en la morfología de los cauces; ya que los mismos son también llamados ríos aluviales en su parte de planicie por escurrir en materiales sedimentarios aportados por ellos mismos.

Otra característica importante es la formación del lecho del río con materiales granulares prácticamente sueltos así como la formación de llanuras de inundación. Este mecanismo hace que los ríos puedan evolucionar a través de las llanuras causando cambios importantes en la geometría del cauce o en la forma del lecho mismo. Esta evolución se da por un mecanismo bien definido como es la erosión en la cabecera o parte alta de la cuenca, el transporte de los materiales en el tramo medio y la sedimentación en el tramo bajo donde la pendiente es menor y el material llega más fino por la constante abrasión a que está sujeto a lo largo de su recorrido cuesta abajo.

Finalmente se tiene que este mecanismo representa un problema frecuente de la ingeniería fluvial o de la protección y control de los cauces, ya que debido al incremento en las actividades humanas se han originado mayores asentamientos de poblaciones en los valles aluviales con los consecuentes problemas de inundación como ya ha sucedido en esta zona.

Cabe notar que en toda la zona de la costa de Chiapas la mayoría de los ríos presentan dos características muy importantes debido a la configuración del terreno:

- Una parte ó tramo en montaña con pendientes altas y muy irregulares, al inicio de cada cauce.
- Una última zona que desemboca al mar, la cual tiene valles amplios, grandes planicies y pendientes muy bajas. En estos se presentan depósitos naturales de sedimentos a lo largo de las márgenes.

A continuación se revisan los parámetros clasificatorios desde diferentes puntos de vista (Leopold y Wolman, 1957; Lane, 1957; Schumm, 1972; Richardson, 1975; Dury,

1977; Rust, 1978; Shen, 1979; Maza, 1987), para facilitar el estudio de la morfología de ríos (se han clasificado por la configuración del cauce en planta y perfil).

Estas clasificaciones permiten ubicar fácilmente cualquier cauce al determinar sus características principales. Sin embargo, conviene tener siempre en cuenta que en la naturaleza hay cualquier condición intermedia entre las definidas en una clasificación.

#### 4.1.1 Lista de variables morfológicas e hidráulicas

Las variables morfológicas enunciadas en este trabajo son las siguientes:

Br	parámetro de multiplicidad (braiding) [adimensional],
s	índice de sinuosidad [adimensional],
L	longitud del cauce o tramo de cauce [m],
r	radio de curvatura de una curva de meandro [m],
b	ancho superficial del cauce [m],
So	pendiente del cauce [m/m],
T	tortuosidad [m/m],
$\lambda$	longitud de onda del meandro [m],
Q	gasto líquido [m <sup>3</sup> /seg],
Q <sub>m</sub>	gasto medio anual [m <sup>3</sup> /seg],
Q <sub>d</sub>	gasto dominante [m <sup>3</sup> /seg],
R	radio hidráulico [m],
M <sub>B</sub> o B	ancho del meandro [m],
M	% de sedimento transportado (gasto de lavado), menor a 0.074 mm. [%],
a	amplitud del meandro [m],
$\Theta$	ángulo de desvío del alineamiento de la curva [grados],
Gc	grado de curvatura de la curva del meandro [grados],
Lc	longitud de la curva del meandro [m],
Ac	área de la cuenca, hasta la curva [m <sup>2</sup> ].

### 4.1.2 Clasificación de los cauces

Existen varios criterios de clasificación de la forma en planta de ríos de llanura (Knighton 1984; Rosgen 1996), aunque aún se conserva la clásica discriminación en tres tipos (rectos, meandriformes y trenzados) introducida por Leopold et al. (1964) con algunas adecuaciones.

En este trabajo toma en cuenta el sistema de clasificación Rosgen; debido a que no se contó con todos los elementos necesarios para aplicar dicho esquema de una manera adecuada y así poder definir la categoría de cada cauce.

De ahí se obtiene que los tipos básicos de morfología del cauce o estilo fluvial (geometría) estudiados son los rectos, sinuosos, meandriformes, trenzados y anastomosados (Thorne, 1997), existiendo también tipos de transición; los cuales se rigen en función del parámetro de Braiding, en adelante parámetro de multiplicidad y del índice de sinuosidad. Para reforzar esta clasificación y tener clara su división hacemos uso de la Tabla 4.1.

Parámetro de Braiding	Índice de sinuosidad	Clasificación	Tipo de canal
< 1	Baja < 1.5	Rectilíneo	Sencillo
< 1	Alta > 1.5	Meandriforme	Sencillo
> 1	Baja < 1.5	Braided	Múltiple
> 1	Alta > 1.5	Anastomosado	Múltiple

Tabla 4.1 Parámetros identificadores de la morfología con respecto a la sinuosidad

#### 4.1.2.1 Parámetro de multiplicidad (Braiding)

Rust (1978) propuso el parámetro de Braiding "B" como una medida de la multiplicidad de un canal. Este parámetro mide el número de barras o islas presentes en un arco de meandro o trenza de canal múltiple.

Así mismo, tenemos algunos ríos que se les llama trenzados (braided), los cuales tienen un solo canal en el cual el flujo diverge a partir de obstrucciones (barras generalmente de grano grueso). Estos ríos regularmente son amplios y muy poco

definidos, generalmente con márgenes inestables las cuales en periodos de avenida se cubren.

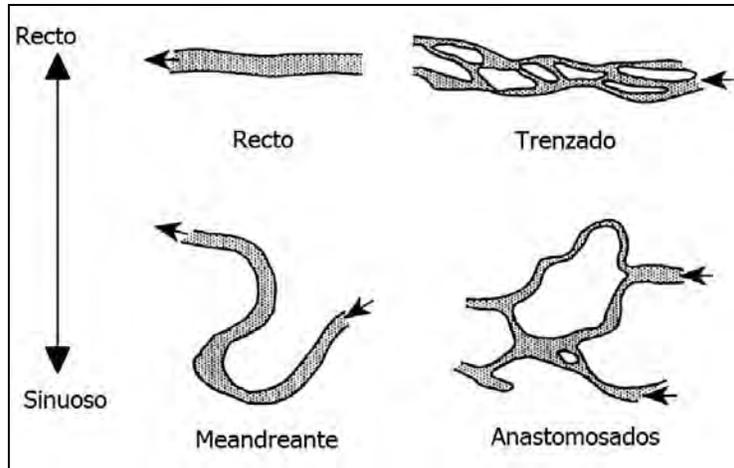


Figura 4.1 Clasificaciones morfológicas de los diferentes tipos de cauces según Thorne, 1997.

Parámetro de Multiplicidad B	Multiplicidad
$0 < B < 1$	Sencillo
2	Moderado
6	Alto

Tabla 4.2 Parámetros identificadores de la morfología con respecto a la multiplicidad

#### 4.1.2.2 Índice de sinuosidad

La sinuosidad de un río es el índice que mide cuanto el trazado del río se aparta de una línea recta. Éste se mide por la relación entre la distancia que separa dos puntos (tramo de análisis) a lo largo de la parte más profunda del cauce o thalweg, y la distancia en línea recta entre ellos. Con esta definición se dice que un cauce recto tiene una sinuosidad de 1.0, mientras que cuando es meandriforme la sinuosidad es mayor de 1.5.

Es usada más a menudo para distinguir entre un cauce recto y canales meandreantes (Schumm 1963). La sinuosidad varía de un valor de 1 para cauces rectos a un valor de 3 o más. Leopold, Wolman y Miller (1964) tomaron el valor de 1.5 como la división entre cauce meandrante y recto.

De esta clasificación se desprenden también los niveles de sinuosidad. Bajo (1 - 1.3), moderado (1.3 - 2.0) y alto (>2.0).

Otro término de importancia es la tortuosidad; definida como el cociente entre la longitud real del cauce (thalweg), menos la longitud del valle de un curso de agua media entre dos puntos a lo largo de su eje y la distancia más corta entre los puntos que se consideran.

$$Tortuosidad = \frac{Long. \text{thalweg} - Long. \text{valle}}{Long. \text{valle}} \times 100 \quad (4.1)$$

#### 4.1.2.3 Corrientes fluviales rectilíneas

Los ríos rectilíneos más bien son raros (sólo determinados tramos), suelen tener barras marginales y con frecuencia pasan a convertirse en sinuosos por evolución.

Presentan cauce y canal únicos, con índice de sinuosidad muy bajo (menor de 1.5) y una relación anchura-profundidad que suele ser menor de 4. Transportan carga en suspensión, de fondo y mixta; por lo general, la primera es inferior al 11% del total.

Pueden tener gran potencia, llegando a mover incluso grandes bloques.

Son corrientes con alta energía, propias de zonas con pendientes longitudinales elevadas, y gran capacidad para el arranque y arrastre de material; también muy inestables, ya que tienden a desaparecer pasando a otro tipo, sobre todo allí donde no presentan confinamiento y la llanura aluvial está sobre materiales fácilmente removibles, ese carácter hace que apenas aparezcan depósitos antiguos derivados de canales rectilíneos. Por su alta energía y capacidad de excavación-arrastre, suelen generar sobreexcavaciones o encajamientos y raramente llanuras aluviales; en los casos más favorables, aparecen acumulaciones marginales (barras) que condicionan y dirigen el flujo, dando lugar a una sinuosidad controlada por pozas y vados.

#### **4.1.2.4 Corrientes fluviales múltiples: braided y anastomosadas**

Tienen como carácter distintivo la presencia de múltiples cauces o diversos elementos del mismo (canales), con parámetro de multiplicidad superior a uno.

Existen discrepancias en la consideración de las distintas tipologías, referidas como de multiplicidad y anastomosadas.

Sin embargo, como ha sido señalado, para analizar la multiplicidad debería procederse mediante una categorización adecuada, ya que, observado este fenómeno globalmente, presenta jerarquías con ritmos geométricos (lazos o trenzas) de entidad (dimensión espacial y temporal) muy diferente, pues separándolas pueden aparecer islas permanentes, isletas fluviales (islas ocasionales) o barras emergentes efímeras (médanos).

En consecuencia, las corrientes fluviales deberán jerarquizarse según sean cauces, canales o láminas de agua, resultando así tres categorías:

- Una primera categoría de multiplicidad la presentan, dentro de cada colector en conjunto, aquellos que poseen cauces múltiples separados por islas permanentes. Estos son escasos y, en su momento, fueron aludidos como ramificados (anabranch); sin embargo, ese término hoy carece de significado y uso concreto. Para su análisis dinámico debe clasificarse cada rama o cauce, y determinar en él la multiplicidad-sinuosidad a escala de isletas o barras.
  
- La segunda categoría, de los ríos con multiplicidad (trenzados, entrecruzados o entrelazados); tienen un sólo canal en el cual el flujo diverge a partir de obstrucciones (barras generalmente de grano grueso o islas ocasionales)

- La última categoría corresponde a los sistemas estables de canales múltiples. Es decir, son láminas con media-alta sinuosidad, que pueden referirse como “anastomosadas” o canales bien definidos pero interconectados y separados por roca o por material aluvial estable.

A nivel general, los cauces con multiplicidad en sus canales y anastomosados son ríos con canales-láminas de agua múltiples, en lazos o trenzas de variada sinuosidad. Ambos tipos de ríos quedan caracterizados por su alta capacidad de carga-sedimentación, formando grandes llanuras aluviales y rellenos de cuencas. Son fenómenos debidos a la unión de barras o médanos aluvionares (llamadas “de canal”), tanto marginales como interiores a la corriente y longitudinales o transversales. Su funcionamiento equivale al de cualquier corriente sinuosa, es decir: erosión en un flanco y sedimentación en el opuesto de cada lazo o trenza.



Figura 4.2 Ejemplo de cauce trezado (Fotografía aérea del río Huehuetán, 2005).

Estas corrientes transportan fundamentalmente carga de fondo, siendo su relación anchura-profundidad mayor de 4 y, en determinadas cuencas (básicamente las de piedemonte generadoras de abanicos aluviales), pueden estar asociadas en el espacio y tiempo. Las braided presentan mayor encauzamiento y alta competencia, con carga de granulometría gruesa o muy gruesa (grava y bloques), llegando a arrastrar grandes bloques. Las anastomosadas son efímeras, con marcada estacionalidad o avenidas excepcionales y la carga suele ser de granulometría media (grava y arena).

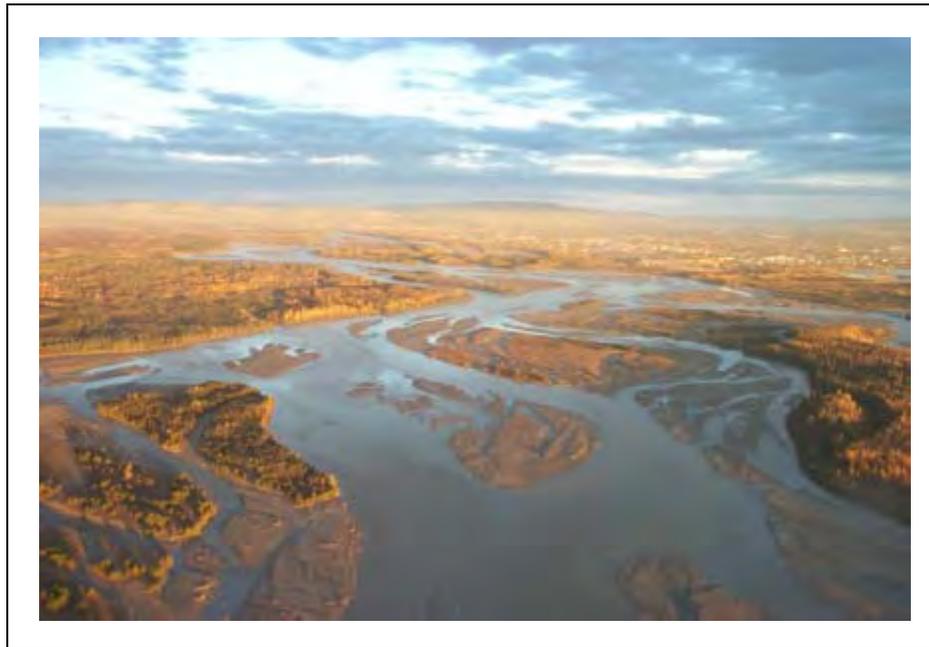


Figura 4.3 Ejemplo de cauce tipo anastomosado río Tanana (Bolivia)

#### 4.1.2.5 Corrientes fluviales meandriformes

Son de cauce y canal únicos, con índice de sinuosidad mayor de 1.5. El canal está encajado en su cauce sin apenas depósito, o divaga sobre el mismo formando una gran llanura aluvial.

En general corresponden a ríos con pendientes longitudinales escasas y abundante carga en suspensión o mixta, aunque la de fondo suele ser inferior al 11% del total transportado. Frente al carácter eminentemente erosivo en los rectilíneos, y sedimentario de los múltiples, éstos deben calificarse como erosivo-sedimentarios.

La unidad geométrica en corrientes meandriformes es el meandro: curva completa sobre el canal, compuesta por dos arcos (bends) sucesivos. Para el análisis de sus relaciones entre dinámica y geometría, hay unos parámetros que asimilan el trazado del canal con funciones sinusoidales: amplitud, longitud de onda, anchura, variación en la dirección, etc. Todos ellos permiten abordar diversos cálculos matemáticos, ampliamente reflejados en trabajos como los de Leopold et al. (1964). En la sección 4.3.2 se abordan algunas teorías de migración de meandros y posteriormente llevaremos a cabo su aplicación.

Característico igualmente es el "flujo helicoidal", debido a la superposición del desplazamiento transversal y longitudinal en la corriente, dando lugar a efectos erosivo-sedimentarios: erosiona y carga sobre el lado externo de un arco, depositando el material sobre el lado interno del siguiente.

Las llanuras aluviales en este tipo de ríos, forman una banda irregular a ambos lados del canal siguiendo la dirección del valle y deben su origen a tres procesos asociados: retroceso del talud de la margen, acreción en barras marginales (por los desbordamientos periódicos que sufre el cauce), y capacidad para unir a los sucesivos cuerpos acrecionales.

El retroceso en el talud de la margen lo regula un proceso de socavación sobre la margen externa del meandro, que condiciona la pérdida de sustentación y la caída de material por gravedad.

La acreción está asociada al retroceso del talud: cada arco erosiona y socava su margen externa, transporta el material, y lo deposita en la margen interna del arco sucesivo inmediato. Esto provoca el crecimiento de barras semilunares (point bars) hacia la zona externa, lo cual marca en la orilla interna una serie de surcos-crestas (scrolls) sucesivos.

El continuo crecimiento de las barras y retroceso del talud ocasiona un desplazamiento de cada arco según diversas modalidades: traslación, extensión, rotación o mezcla de todas ellas (Figura 4.4).

La fusión entre barras semilunares, que produce el relleno en la llanura por desplazamiento continuo de los distintos arcos, está más o menos condicionada por causas climáticas. A este proceso sistemático, deben unírsele los derivados de estrangulamientos o cortes (neck cut-off) y acortamientos (chute cut-off), donde el río recupera un antiguo trazado entre dos crestas; en ambos casos dan lugar a meandros abandonados, que actúan como lagunas semilunares efímeras (oxbow lakes) en los sucesivos desbordamientos, hasta quedar rellenos por material fino (Figura 4.5).



Figura 4.4 Ejemplo de mecanismo de meandreo, (Río Songhua, China). Wikipedia®

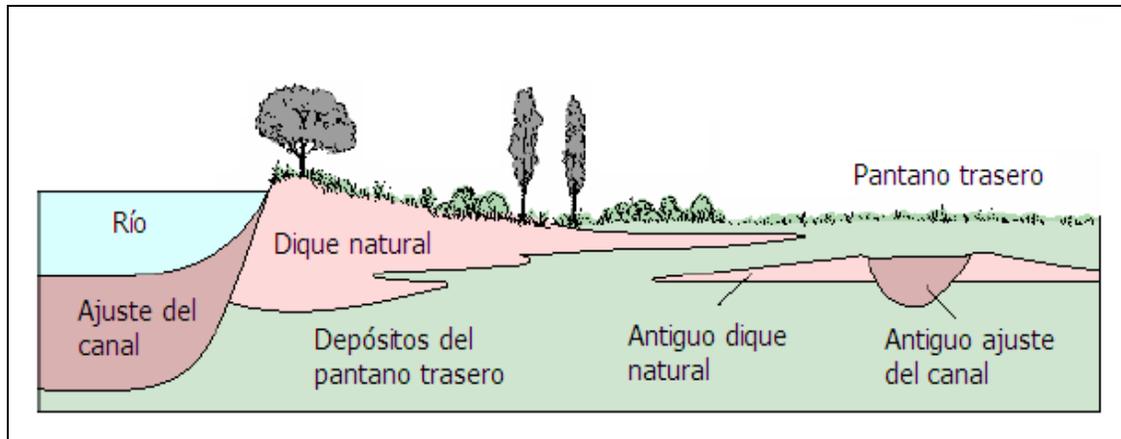


Figura 4.5 Mecanismo de acreción (Fuente: Hamblin & Christiansen, 2001)

Caudales excepcionales con desbordamientos que inundan toda la llanura y originan flujos secundarios, hacen recrecer las márgenes del canal formando los diques naturales. Aunque éstos son posteriormente fijados por la vegetación, otras crecidas de menor caudal pueden ocasionar su rotura, inundando las márgenes mediante conos de desbordamiento o derrame (crevasse splay). En ambos casos, una vez que descargan el material más grueso cerca del canal, las aguas se reparten por la llanura formando encharcamientos con baja velocidad de flujo, lo que provoca decantación de finos sobre la llanura inundable (De Pedraza , 1999).

El conjunto sedimentario en estos ríos está formado por los siguientes materiales, según su granulometría y génesis: grueso en la carga de fondo; medio en diques naturales de las márgenes y conos de derrame; fino procedente de desbordamientos, inundaciones en la llanura y relleno de canales; y granulometrías variables para las barras semilunares (De Pedraza , 1999).

El recrecimiento de diques naturales sobre las márgenes del canal y la sedimentación en su lecho (barras), pueden elevar el nivel del agua superando la cota media topográfica de su llanura inundable. Ello facilita que en episodios de crecida o con roturas puntuales de los bordos (levées), el río cambie su trazado hacia cotas más bajas en la llanura. Este fenómeno, denominado avulsión, es característico en corrientes con

extensas planas aluviales de muy escasa pendiente y frecuentes crecidas; por lo general, coincide con tramos cercanos a su desembocadura.

#### ***4.2 Descripción morfológica de los cauces de la zona de estudio***

A continuación se hará una descripción visual de los aspectos morfológicos de los 31 cauces de la costa de Chiapas. Los cuales son: Tepanatepec, Las Arenas, Lagartero, El Rosario, Zanatenco, Ocuilapa, El Pedregal, Las Hermanas, De Jesús, Los Patos, La Flor, San Diego, Urbina, Pijijiapan, Coapa, Las Margaritas, Novillero, San Nicolás, Tablazón, Cacaluta, Doña María, Cintalapa, Vado Ancho, Compoapa, Despoblado, Huixtla, Islamapa, Huehuetán, Coatán, Cahuacán y Suchiate.

Para poder hacer la descripción de los aspectos geomorfológicos - fluviales, se trabajó con imágenes satelitales Land Sat de toda la costa de Chiapas de 2005 con 3 coberturas de nubosidad (0% a 10%, 11% a 50% y +51%), posteriormente éstas fueron ensambladas (georeferenciadas) para finalmente poder efectuar la digitalización de los cauces.

El sistema de proyección original de las imágenes, es un sistema de coordenadas geográficas con origen o datum Norte América 1983 (NAD 1983); la cual trabaja con grados como unidades de medida.

Para poder definir el datum, se debe definir antes el geoide y el elipsoide. El primero se define como la superficie teórica de la tierra que une todos los puntos que tienen igual gravedad. El elipsoide por su parte es un modelo matemático que representa la superficie terrestre; sin embargo debido a las irregularidades del planeta, no existe un único modelo que la represente en totalidad; por lo que cada continente, nación o país emplea uno distinto (Fernández C. I., 2001).

Ahora bien, el datum se define como el punto tangente al elipsoide y al geoide, donde ambos coinciden.

Para poder trabajar con las unidades de medida en metros, fue necesaria una reproyección de los datos con un software especializado (SIG) a un sistema de coordenadas nuevo; como es el sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM).

El sistema coordinado UTM divide a nuestro en varios husos. Definiendo a un huso como las posiciones geográficas que ocupan todos los puntos comprendidos entre dos meridianos; cada huso tiene  $6^\circ$  de longitud. A nuestro país le corresponden las zonas (husos) UTM 11 a la 16.

La zona de estudio se encuentra en la zona 15 que tiene como meridiano central  $93^\circ W$  y como rango  $96^\circ W - 90^\circ W$ .

Las razones por las que fue usado este sistema de proyección son:

1. Conserva los ángulos.
2. No distorsiona superficies en grandes magnitudes (por debajo de los  $80^\circ$  de latitud).
3. Es un sistema que designa un punto o zona de manera concreta y fácil de localizar.
4. Es un sistema empleado en todo el mundo, empleo universal, fundamentalmente por uso militar.

Se comenta que se continuará respetando el orden de aparición de norte a sur de los ríos de toda la zona.

#### **4.2.1 Cauces de la S.R.H. 23 D**

##### **Río Tepanatepec**

En general es un cauce de planicie de 50.77 km de largo. Sinuoso fuera de la zona de montaña y con un visible meandreo en la planicie. Las curvas que forman los meandros tienen una relación media ( $r/B$ ) de 3.83, siendo  $r$  el radio de curvatura y  $B$  el ancho de superficie libre del cauce. Desde el punto donde el cauce se bifurca (14 km aguas abajo

de su nacimiento) e inmediatamente después, a lo largo en una longitud aproximada de 18 km, se tienen concentraciones de sedimentos en todo el cauce notándose mayormente 5 km aguas arriba de la población de San Pedro Tepantepec, hasta la de Chahuite. Su desembocadura tiene lugar cerca del Puerto Paloma y en una pequeña zona de inundación a las orillas de la laguna Mar Muerto.

### **Río Las Arenas**

Este río confluye con el río La Punta, conservando este último nombre. Su longitud aproximada es 44 km. Los primeros tres kilómetros y medio es un cauce de alta montaña ( $S_0 > 10\%$ ) descendiendo de manera abrupta hasta convertirse en casi su totalidad (aproximadamente 41 km.) en un cauce de planicie por tener una pendiente menor al 2%, sinuoso, donde, debido a los desplazamientos que sufre el río inmediatamente después de las faldas de la montaña, modifican su ancho y provocan la formación de algunas islas. Las curvas son superficiales ya que son cortadas en el material depositado.

Los primeros 17 km, aproximadamente, el río se encuentra en un valle en V producto de la erosión fluvial; desde este último punto, en las faldas de la montaña, se identificó una zona con grandes cantidades de sedimento y después a lo largo el valle cubierto de material aluvial producto de las avenidas y de las grandes velocidades y fuertes pendientes en la parte alta.

### **Río Lagartero**

Su longitud aproximada es de 45.9 km de los cuales 20 son de montaña y 26 de planicie, teniendo en general un cauce sinuoso, desemboca a la laguna Mar Muerto, junto con las aportaciones del afluente Las Arenas. En los primeros 8 km el cauce se puede considerar como de alta montaña por tener pendientes mayores al 10%.

Un aspecto importante es la presencia de un abanico aluvial justamente en la población de Arriaga la cual se encuentra inmediatamente en las faldas de la montaña. Producto del arrastre en la zona montañosa con fuerte pendiente y la disminución abrupta de la misma. Los rasgos dejados por los sedimento muestran un claro desplazamiento del

cauce y grandes cantidades de sedimentos cubriendo la población de Arriaga y a lo largo del cauce 6 km y 7 km aguas arriba y aguas abajo respectivamente desde la población.

### **Río El Rosario**

La longitud aproximada es de 35.5 km, mostrando meandros en la zona alta y la formación de islas en la planicie; así mismo en un pequeño tramo de 1.5 kilómetros de longitud se muestra anastomosado. También este cauce desemboca a la laguna Mar Muerto.

### **Río Zanatenco – San Isidro**

La longitud aproximada de este cauce es de 40.8 km. Es un cauce de alta montaña por tener una pendiente del 25% en una longitud aproximada de 7.5 km y de planicie en el resto del cauce. Es sinuoso al inicio, teniendo un ligero desarrollo de meandros en la zona más baja. Al hacer un análisis por tramos de las curvas que forman los meandros se encuentra que en promedio tienen una relación media ( $r/B$ ) de 2.54.

El río genera un abanico aluvial justamente en la población de Tonalá (la cual se encuentra inmediatamente en las faldas de la montaña), producto de la zona montañosa con fuerte pendiente y la disminución abrupta de la misma. Los rasgos dejados por los sedimento muestran un claro desbordamiento del cauce y grandes cantidades de sedimentos que inician en las faldas de la montaña hasta 5 km aguas abajo a lo largo de la planicie. El río desemboca en una zona de humedales con una serie de lagunas entre las que destacan la laguna Mar Muerto y la laguna Pampa Cabeza de Toro.

## **4.2.2 Cauces de la S.R.H. 23 C**

### **Río Ocuilapa – Agua Dulce**

Este río tiene una longitud de 33.9 km mostrando ser sinuoso en las zonas altas y con presencia de islas y barras que se dejan ver desde las faldas de la montaña hacia la planicie en una longitud de 12 km. También existe una zona del cauce con una longitud aproximada de 2.5 kilómetros donde es anastomosado. Los sedimentos se observan

claramente a partir de las faldas de la montaña hasta prácticamente su desembocadura con la laguna Pampa Cabeza de Toro o La Joya.

### **Río El Pedregal – Los Horcones**

Con una longitud aproximada de 38.7 km, al inicio pendiente de 19% lo que lo convierte en alta montaña y del 1.4% en la planicie. Los rasgos dejados por los sedimento muestran un claro desbordamiento del cauce y grandes concentraciones de sedimentos que se encuentran inmediatamente después de las faldas de la montaña, así como a lo largo de la planicie y finalmente otra gran mancha de sedimentos a unos 3.5 km antes de su desembocadura con la laguna Buenavista. También se observa claramente que el cauce es levemente sinuoso pero al mismo tiempo hay muestras de meandro desarrollado en la zona media de la planicie y probablemente con movimiento de los mismos. En esa misma zona se observa una rectificación natural que lleva el gasto de estiaje, desde la población de Tres Picos continuando hasta unos 4 km aproximadamente aguas abajo.

### **Río Las Hermanas**

La longitud aproximada de este cauce es de 26.5 km. Siendo de alta montaña los primeros 4.5 km con una pendiente del 20% y el resto (22 km) de planicie con una pendiente de 1.6%. En cuanto a el arrastre de sedimentos, se observa un despliegue del mismo en ambas márgenes a lo largo del cauce 5.5 km aproximadamente aguas bajo de las faldas de la montaña. Su desembocadura tiene lugar en una gran zona de humedales influenciada enormemente por la laguna el Mosquito.

### **Río De Jesús**

El río Jesús tiene una longitud aproximada de 23.4 km siendo sinuoso en general; de alta montaña por sus fortísimas pendientes los primeros 4.5 km aproximadamente y finalizando en un cauce de planicie con una pendiente del 1.9%. Siendo visible material sedimentario inmediatamente en la zona de planicie y en una longitud de 8 km aproximadamente. Alimenta con su caudal al río Los Patos.

### **Río Los Patos**

Tiene una longitud de 22.8 km. Al inicio, en los primeros 3.8 km, es de alta montaña con pendiente del 15% para después convertirse en un cauce de planicie con pendiente del 1.8%. Se observa la presencia de depósitos de sedimentos a lo largo del cauce a partir de las faldas de la montaña, debido como sabemos a las altas pendientes que trae el cauce aguas arriba. Estos se presentan a partir de las faldas y en una longitud de 7.5 km. Tiene como afluente al río de Jesús aproximadamente 4.5 km antes de su desembocadura a la laguna el Mosquito en una zona de humedales.

### **Río La Flor**

El río tiene una longitud de 31.16 km aproximadamente, siendo ligeramente sinuoso en la parte alta y con meandros en la zona baja. De un análisis de las curvas del río se encontró que la mayoría presentan una relación media ( $r/B$ ) de 1.80. La zona donde empieza a escurrir el río es de alta montaña mientras que la zona aguas abajo es de planicie con pendientes del 11.6% y 1.7% respectivamente. Con lo que respecta a los sedimentos, se tiene una fuerte presencia a partir de las faldas en una longitud de 9.5 km. Su desembocadura tiene lugar cerca de la laguna Agua Tendida en una zona de humedales.

### **Río San Diego o San Isidro**

Este río tiene una longitud aproximada de 38.5 km siendo sinuoso en la parte alta y con meandros en la zona baja. De un análisis de las curvas del río se encontró que la mayoría presentan una relación media ( $r/B$ ) de 2.21. En la parte alta es un cauce de alta montaña con pendiente del 11% aproximadamente y en su parte baja de planicie con pendiente 1.44%. Por otra parte, se presentan de manera importante los sedimentos desde las faldas de la montaña y hasta 9 km aguas abajo; pasando muy cerca de la población La Central. Así mismo se tiene el gasto que aporta el río Frío (2 km aguas abajo de las faldas de la montaña). Su desembocadura tiene lugar en una zona sujeta a inundación a unos 5 km cerca de la laguna Agua Tendida.

### **Río Urbina**

Este cauce es intermitente con una longitud aproximada de 42.3 km se encuentra entre las poblaciones de La Central y Pijijiapan. En general en un cauce sinuoso, de alta montaña en la parte alta con una pendiente aproximada del 20% y en la planicie en la zona baja con 1.1%. Los sedimentos se hacen presentes a lo largo del cauce en una longitud de 6.5 km aguas abajo de las faldas de la montaña.

### **Río Pijijiapan**

Este río tiene una longitud de 53.5 km con formación de islas y barras en la parte alta, así como en la parte baja de meandros. La pendiente del cauce en la zona alta es del 20% lo que lo convierte en uno de alta montaña mientras que en la parte baja es del 1% siendo éste de planicie. Como aspecto importante podemos citar que la población de Pijijiapan se encuentra justamente en las faldas de la montaña siendo seriamente afectada por la formación de un pequeño abanico aluvial (delta aluvial alargado), el cual muestra sus barras de desembocadura y acumulación de sedimentos provenientes de las partes altas durante las avenidas.

Más adelante también se muestra la presencia de un fuerte meandreo, ocasionando una pequeña zona aislada donde el cauce se presenta como anastomosado. Esta última se da de forma aguda a 9 km aguas abajo de la población de Pijijiapan.

### **Río Coapa**

La longitud de este cauce es de 48 km aproximadamente, siendo poco meandreante y con un tramo anastomosado de 2 km. (en las faldas de la zona montañosa). Además es de alta montaña con un pendiente del 18% y en la parte baja de planicie con pendiente aproximada del 0.8%. Este cauce muestra una gran fuerza para arrastre de sedimento en la parte alta por su configuración, contribuyendo a la formación de un abanico aluvial en la zona baja donde hay un abrupto cambio de pendiente. La población de Coapa se encuentra en el sitio donde el cauce cambia de dirección, viéndose forzado a cambiar su dirección, lo que, en época de avenidas, ha provocado que el escurrimiento siga su curso natural y destruya e inunde dicha población. De un análisis de

las curvas del río se encontró que la mayoría presentan una relación media ( $r/B$ ) de 1.84. Su desembocadura tiene lugar cerca de la laguna Pampa, en una zona de humedales con vegetación densa.

### **Río Las Margaritas**

El río Margaritas tiene una longitud aproximada de 40.3 km, siendo sinuoso en la planicie tendiendo a recto en algunas partes y con meandros en la zona alta. Las pendientes son 20% y 1% convirtiéndolo en alta montaña y planicie.

En cuanto al aporte de sedimentos, éste muestra un comportamiento normal de acuerdo a la configuración y topografía; con presencia de sedimentos desde 9 km aguas arriba a las faldas de la montaña y 8.5 km aguas abajo de la misma. En esta última zona hay rasgos de grandes cantidades de sedimento y desbordamientos producto del paso de fuertes avenidas. La desembocadura de este cauce se da en la zona del estero la Carreta.

## **4.2.3 Cauces de la S.R.H. 23 B**

### **Río Novillero**

Este río tiene una longitud aproximada de 57.2 km es un cauce sinuoso y trezado con presencia de islas, barras y múltiples canales en su recorrido; lo que lo convierte en un cauce tipo braided. Es de alta montaña en la zona donde nace por tener una pendiente del 12.5% y en la zona baja de planicie con 0.9%. En la intersección de ambas se muestra una gran zona con depósito de sedimento en las márgenes que afecta seriamente la población de Hidalgo Novillero; donde la presencia de islas y depósitos es notoria, en un área aproximada de 1,240 hectáreas. La desembocadura de este río se da en una pequeña zona que se inunda continuamente; antes de esta se muestran diversos tramos de meandro y lunares o lagunas, por los cursos que ha tomado el río desplazándose hasta 1 kilómetro en algunas partes.

### **Río San Nicolás**

Este cauce es una bifurcación del río Tablazón, tiene una longitud aproximada de 29 km siendo de planicie debido a la pendiente que tiene (0.7%), sinuoso en una pequeña

parte (la más alta) y recto en su mayoría; su desembocadura se da en una zona húmeda sujeta a inundaciones aproximadamente a 5.5 km de la laguna Chantuto. Este cauce presenta cantidades apreciables de sedimento producto de fuertes avenidas, proviniendo de lo alto del río Tablazón; desde donde se bifurca y hasta, aproximadamente 9 km aguas abajo, se aprecian estos sedimentos.

### **Río Tablazón**

Este río tiene una longitud aproximada de 58.4 km siendo sinuoso. La pendiente del cauce al inicio del mismo es de 10.8% lo que lo convierte en cauce de alta montaña y de 1% en la planicie. Los sedimentos se presentan desde la zona de planicie hasta una distancia aproximada de 11 km; antes de llegar a la zona de Mapastepec, se bifurca formando por margen derecha el río San Nicolás. Por el otro lado antes de su desembocadura pasa por una zona sujeta a inundación, con densa vegetación, aproximadamente a 6 km de la laguna Chantuto.

### **Río Cacaluta**

Este río tiene una longitud de 55.5 km. La parte inicial del cauce es de alta montaña por tener una pendiente del 11% mientras que la parte baja es de planicie con tan solo 1%. En cuanto a los sedimentos, se muestra claramente una gran zona de depósito alrededor de la población de Hidalgo. Aguas abajo de la misma se observa el lecho por donde anteriormente escurría el flujo. Su desembocadura se da en una zona húmeda de inundación que lleva directamente a la laguna el Campón.

### **Río Doña María**

Este cauce tiene una longitud aproximada de 20.9 km. Siendo en su totalidad de planicie por tener una pendiente del 1%. A lo largo del mismo sólo se muestran rasgos de transporte de sedimento y depósito en las márgenes cóncavas a las curvas, por el meandreo que se ve, aguas abajo de la localidad de Doña María. Su desembocadura se da en una zona sujeta a inundación y otra con vegetación densa, donde se encuentra la población Embarcaderos en la laguna Tembladeras.

### **Río Cintalapa**

El río Cintalapa tiene una longitud aproximada de 57.8 km. De su topografía se puede clasificar en montaña y planicie, 8% y 0.8% respectivamente. En cuanto al transporte de sedimento se ve que se hace presente a lo largo del cauce de planicie en una longitud aproximada de 23 km., concentrándose mayormente en una zona aguas arriba y entre las poblaciones de Acacoyagua y Escuintla. También en ese punto se muestra anastomosado a lo largo de 3 kilómetros por el exceso de sedimento que trae consigo.

Su desembocadura se da al igual que el río Doña María, en una zona sujeta a inundación y otra con vegetación densa donde se encuentra la población de Embarcaderos en la laguna Tembladeras.

### **Río Vado Ancho**

Este cauce tiene una longitud aproximada de 57.6 km. La pendiente en la zona alta es del 12% aproximadamente mientras que en la parte baja es de 0.8% lo que lo convierte en de alta montaña y planicie. Por su parte los sedimentos se hacen presente en una zona de 13 kilómetros de longitud aproximadamente, a partir de las faldas de la montaña y pasando por la población de Comaltitlán, ahí mismo se ve un apenas perceptible meandreo, por el proceso erosión depositación continuo. Su desembocadura se da pasando una zona sujeta a inundaciones y en una zona con vegetación densa que desemboca a la laguna Los Cerritos.

### **Río Compoapa**

Este cauce tiene una longitud aproximada de 17.7 km, en su parte alta el río tiene una longitud muy pequeña. La pendiente en la zona alta es del 15% aproximadamente mientras que en la parte baja es de 1%. Pasa por la localidad de Comaltitlán y su confluencia al río Despoblado se da aproximadamente a unos 5.5 kilómetros aguas abajo.

### **Río Despoblado**

La longitud aproximada es de 71.50 km. Siendo sinuoso al inicio del mismo para terminar con una tendencia a ser recto. Sus pendientes son 6% y 1.3% clasificándose como cauce de faldas de montaña y planicie. El cauce presenta la formación de islas y ocasionalmente algunas barras longitudinales a lo largo de 11 kilómetros, aguas abajo de las faldas de la montaña. Posteriormente se le une como afluente la corriente del río Compoapa. Su desembocadura tiene lugar en la Reserva de la Biosfera La Encrucijada que se encuentra en una zona sujeta a inundaciones.

### **Río Huixtla**

La longitud aproximada de este cauce es de 66.5 km. Encañonado y poco sinuoso en la zona alta mientras que en la zona baja se presenta como tipo braided, posteriormente tiende a ser recto. Las pendientes que tiene son 7% y 0.9% (montaña y planicie). En cuanto a los sedimentos, se presenta una cantidad considerable que bordea la población que lleva el mismo nombre y continua hasta una tercera parte de la planicie. El ancho del corredor fluvial en este serpenteo es de 300 hasta poco más de 1000 metros en algunos sitios.

Antes de su desembocadura el río Huixtla recibe las aportaciones de caudal simultáneo provenientes de los ríos Islamapa y Tepuzapa (15 kilómetros aguas debajo de Huixtla), para terminar en una zona sujeta a constantes inundaciones en la Reserva de la Biosfera La Encrucijada.

### **Río Islamapa**

Este cauce tiene una longitud aproximada de 27.65 km, es un afluente del río Huixtla. Sus pendientes en la zona alta y baja son del 8% y 1%, lo que convierte al río de premontaña y planicie respectivamente. A lo largo del río no se observa depósito de sedimento. Como aspecto importante a considerar es que el cauce tiene un afluente 4.5 kilómetros antes de su confluencia al río Huixtla, el río Tepuzapa.

#### **4.2.4 Cauces de la S.R.H. 23 A**

##### **Río Huehuetán**

Este cauce tiene una longitud aproximada de 61.6 km mostrando a lo largo de su recorrido ser sinuoso. En la parte alta es de montaña con una pendiente del 8% mientras que en la parte baja es de planicie con 0.8%. En las faldas de la montaña se encuentra la población de Huehuetán y poco más abajo la de Cuyamiapa. A lo largo de todo el cauce se observa la presencia de zonas de depósito de sedimentos. En cuanto los anchos del corredor fluvial cerca de las poblaciones se tiene que van desde 200 hasta 300 metros. Hay presencia de islas y barras de gran tamaño. Tiene como afluentes en la parte alta a los cauces Vejapa y Santo Domingo. Su desembocadura tiene lugar al sur de la zona de inundación en la Reserva de la Biosfera la Encrucijada.

##### **Río Coatán**

Este cauce tiene una longitud aproximada de 81.6 km. Es un gran transportador de sedimento producto de su cuenca, por los rasgos de depósito de sedimento visibles. En cuanto a sus pendientes (5.5% y 0.6%) se clasifica como de faldas de montaña y planicie. En cuanto a su geometría podemos decir a lo largo de la población es de tipo anastomosado, posteriormente de tipo braided con barras e islas de gran tamaño y finalmente meandreante en la parte más baja.

De un análisis de las curvas del río se encontró que la mayoría presentan una relación media ( $r/B$ ) de 3.02. Su desembocadura tiene lugar al mar muy cerca de la Barra San Simón.

##### **Río Cahucán**

Este cauce tiene una longitud aproximada de 85.75 km. Debido a su geometría podemos decir claramente que es sinuoso desde la parte alta hasta su desembocadura al mar prácticamente, y sin rasgos de depósito de sedimento visibles. En cuanto a sus pendientes (12.7% y 0.7%) se clasifica como de alta montaña y planicie. De un análisis de las curvas del río se encontró que la mayoría presentan una relación media ( $r/B$ ) de 2.7 Su desembocadura tiene lugar al mar muy cerca de la población Brisas del Mar.

### **Río Suchiate**

Este cauce tiene una longitud aproximada de 90.66 km haciéndolo el cauce más largo dentro de la región de la costa de Chiapas. En cuanto a sus pendientes (6% y 0.6%) se clasifica como de pie de monte y planicie. Tiene zonas con depósito de sedimento que comienza a partir de la zona media y hasta 16 kilómetros antes de su desembocadura, aunque en varios tramos su cauce en el fondo tiene roca y se dejan ver de manera aislada la formación de algunas islas. La población de Ayutla se encuentra en ambos márgenes del río 21 km aguas arriba de la desembocadura. Este cauce es internacional y sirve de límite fronterizo con Guatemala.

En la siguiente tabla se muestra el resumen de las características morfológicas más relevantes de los cauces de la región hidrológica Costa de Chiapas; así como también el resultado de los análisis efectuados a las curvas de los cauces con meandro visible (Tabla 4.3).

#### 4.2.5 Resumen de la morfología general de cada cauce

No	Corriente	L (km)	Geometría Montaña y planicie		Índice de sinuosidad	Tortuosidad	Parámetro Multiplicidad	Clasificación	Tipo de canal	Tipo de corriente	Abanico aluvial
1	Tepanatepec	50.77	Sinuoso	Meandros	1.54	54.2	2	Moderada	Sencillo	Meandriforme	no
2	Las Arenas	44.321	Sinuoso	Sinuoso	1.35	34.9	1	Moderada	Sencillo	Meandriforme	no
3	La Punta	45.914	Sinuoso	Sinuoso	1.50	50.1	2	Moderada	Sencillo	Meandriforme	si
4	El Rosario	35.507	Meandros	Islas	2.47	147.2	4	Alta	Múltiple	Anastomosado	no
5	Zanatenco	40.812	Sinuoso	Meandros	1.52	52.2	2	Moderada	Sencillo	Meandriforme	si
6	Ocuilapa	33.901	Sinuoso	Islas	1.50	50.0	4	Moderada	Múltiple	Anastomosado	no
7	El Pedregal	38.716	Sinuoso	Sinuoso	1.64	64.3	3	Moderada	Múltiple	Braided	no
8	Las Hermanas	23.383	Sinuoso	Sinuoso	1.28	28.5	1	Baja	Sencillo	Rectilíneo	no
9	De Jesús	23.377	Meandros	Sinuoso	1.32	32.2	1	Moderada	Sencillo	Rectilíneo	si
10	Los Patos	22.778	Sinuoso	Sinuoso	1.37	36.6	2	Moderada	Sencillo	Braided	no
11	La Flor	31.16	Sinuoso	Meandros	1.55	54.5	2	Moderada	Sencillo	Braided	no
12	San Diego	38.459	Sinuoso	Meandros	1.71	71.4	3	Moderada	Múltiple	Braided	no
13	Urbina	42.276	Sinuoso	Sinuoso	1.63	63.3	1	Moderada	Sencillo	Rectilíneo	no
14	Pijjiapan	53.521	Islas	Trenzado	1.71	70.8	3	Moderada	Múltiple	Braided	si
15	Coapa	47.996	Meandros	Meandros	1.46	46.2	4	Moderada	Múltiple	Braided	si
16	Las Margaritas	40.265	Meandros	Sinuoso	1.73	73.3	3	Moderada	Múltiple	Braided	no
17	Novillero	57.232	Sinuoso	Trenzado	1.52	51.7	5	Moderada	Múltiple	Braided	si
18	San Nicolás	28.957	---	Recto	1.22	22.0	1	Baja	Sencillo	Rectilíneo	si
19	Tablazón	58.417	Sinuoso	Sinuoso	1.42	42.5	3	Moderada	Múltiple	Braided	si
20	Cacaluta	55.509	Sinuoso	Meandros	1.30	29.9	3	Moderada	Múltiple	Braided	no
21	Doña María	20.933	---	Sinuoso	1.42	42.3	1	Moderada	Sencillo	Rectilíneo	no
22	Cintalapa	57.782	Sinuoso	Sinuoso	1.63	63.3	3	Moderada	Múltiple	Braided	no
23	Vado ancho	57.595	Sinuoso	Sinuoso	1.33	32.6	2	Moderada	Sencillo	Braided	no
24	Despoblado	71.509	Sinuoso	Recto	1.37	36.6	2	Moderada	Sencillo	Braided	no
25	Compoapa	17.71	Sinuoso	Sinuoso	1.25	24.9	0.5	Baja	Sencillo	Rectilíneo	no
26	Huixtla	66.562	Sinuoso	Recto	1.43	43.1	1	Moderada	Sencillo	Rectilíneo	no
27	Islamapa	27.65	Meandros	Recto	1.53	52.6	1	Moderada	Sencillo	Rectilíneo	no
28	Huehuetán	61.609	Sinuoso	Sinuoso	1.53	53.2	0.5	Moderada	Sencillo	Rectilíneo	no
29	Malpaso	81.589	Sinuoso	Meandros	1.47	47.3	2.0	Moderada	Sencillo	Braided	no
30	Cahuacán	85.752	Sinuoso	Meandros	1.75	75.0	0.5	Moderada	Sencillo	Meandriforme	no
31	Suchiate	90.662	Sinuoso	Sinuoso	1.41	40.8	2.0	Moderada	Sencillo	Braided	no

Tabla 4.3 Resumen de las características morfológicas descritas anteriormente

Es importante notar que los parámetros de sinuosidad y tortuosidad fueron tomados de unos tramos de cada cauce solamente, estos tramos de análisis oscilan entre 30 y 3 kilómetros.

La tabla anterior, describe por sí sola las características más importantes de cada cauce. Entre éstas encontramos que el río El Rosario es el que más meandreo sufre (en su parte baja), siendo el único que tiene un índice de sinuosidad alto, de ahí en su mayoría todos los cauces presentan un índice de sinuosidad moderado y sólo algunos cuantos bajo. También por la presencia de barras e islas algunos de los ríos presentan canales múltiples siendo del tipo anastomosado y algunos otros del tipo braided.

Por su condición de estabilidad podemos decir que la mayoría de las corrientes tienen estabilidad dinámica ya que son capaces de arrastrar sedimentos por las grandes pendientes que se tienen en las zonas altas y al mismo tiempo arrastrar las partículas o elementos de las orillas. En esta condición los ríos sufren desplazamientos laterales continuos en las curvas, con erosiones en las márgenes exteriores y depósito de sedimento en las interiores. Se presenta también cuando el desplazamiento lateral de los meandros es muy intenso y por lo tanto, el corte natural entre ellos ocurre frecuentemente, ya que el río trata de alcanzar su pendiente de equilibrio con este mecanismo. De la misma manera en las zonas de planicie, se observa que los ríos presentan ocasionalmente estabilidad morfológica, ya que hay señales de desplazamientos laterales de meandros y cortes naturales de ellos. Este concepto de estabilidad es el más amplio, ya que cualquier corriente natural no afectada por actividades humanas, tiene estabilidad morfológica. Es decir, cualquier río en su condición natural tiene estabilidad estática o dinámica y también morfológica (Gracia Sánchez J., Maza Álvarez J. A; 1997).

Otro aspecto importante en la mayoría de los cauces es la presencia de abanicos aluviales. Estos abanicos aluviales o lóbulos, como se comento en la descripción de los cauces que lo presentan, son del tipo fluvial. Si bien la forma desarrollada de este no se muestra claramente, si lo hacen sus barras de desembocadura.

Los abanicos aluviales de tipo fluvial ocurren en los puntos donde la corriente pasa de un cauce estrecho a uno más amplio, o bien cuando la pendiente se disminuye abruptamente.

El material de estos abanicos es arrastrado por cada una de las siguientes avenidas que ocurren en los cauces, moviéndose continuamente al ser movidos y transportados por el agua como una masa de lodo. Los canales que se forman en los abanicos en muchos casos son efímeros o intermitentes, aunque también son perennes.

#### **4.2.6 Visitas de campo**

Durante esta visita al estado de Chiapas, se hizo un recorrido en el cual se tomaron 5 muestras de suelo de las márgenes de los cauces y en algunos otros sitios del lecho, ya que las condiciones se presentaban para ello (había un caudal de estiaje).

El periodo de la visita fue a lo largo de los días: lunes 17 de julio hasta el miércoles 19 de julio de 2006.

El recorrido se baso fundamentalmente en recorrer la cuenca del río lagartero a lo largo de su cauce principal así como visitar por último el río Coapa en el tramo de afectación más importante (Puente dentro de la población).

Cabe hacer notar que al visitar los sitios, se extrajeron 5 muestras las cuales se enviaron para su análisis a un laboratorio de mecánica de suelos (CONSULTORES Y PROYECTOS DEL SUR, S.A. DE C.V.) para su posterior interpretación y utilización.

En la Tabla 4.4 se muestran las pruebas de mecánica de suelos efectuadas a cada una de las muestras; donde se representa los porcentajes de grava y arena (%W y %F).

### 4.2.7 Sitios de muestreo

Lugar	Descripción
Sitio 1:	Pasaje puente Santa Rosa. Río Lagartero km 0+300 Margen izquierda, cerca del cruce
Ubicación:	Latitud: 16.215620° Longitud: -93.2198300°
Muestra:	M-1
Sitio 2:	Los Arreola. Orilla de agua. Margen izquierda
Ubicación:	Latitud: 16.1839 ° Longitud: -93. 9551166666667 °
Muestra:	M-2
Sitio 3:	Pasaje Isabel. Margen izquierda, playón cerca de la orilla
Ubicación:	Latitud: 16.11945° Longitud: -93.9782 °
Muestra:	M-3
Sitio 4:	Río Coapa. Cruce de carretera a ir a margen izquierda
Ubicación:	Latitud: 15.6065° Longitud: :-93.14875°
Muestra:	M-4
Sitio 5:	Río Coapa. Cruce de carretera a ir a margen izquierda (muestra dentro de lecho)
Ubicación:	Latitud: 15.6065° Longitud: :-93.14875°
Muestra:	M-5

Tabla 4.4 Concentrado de sitios de muestreo, prueba efectuada y características de la misma

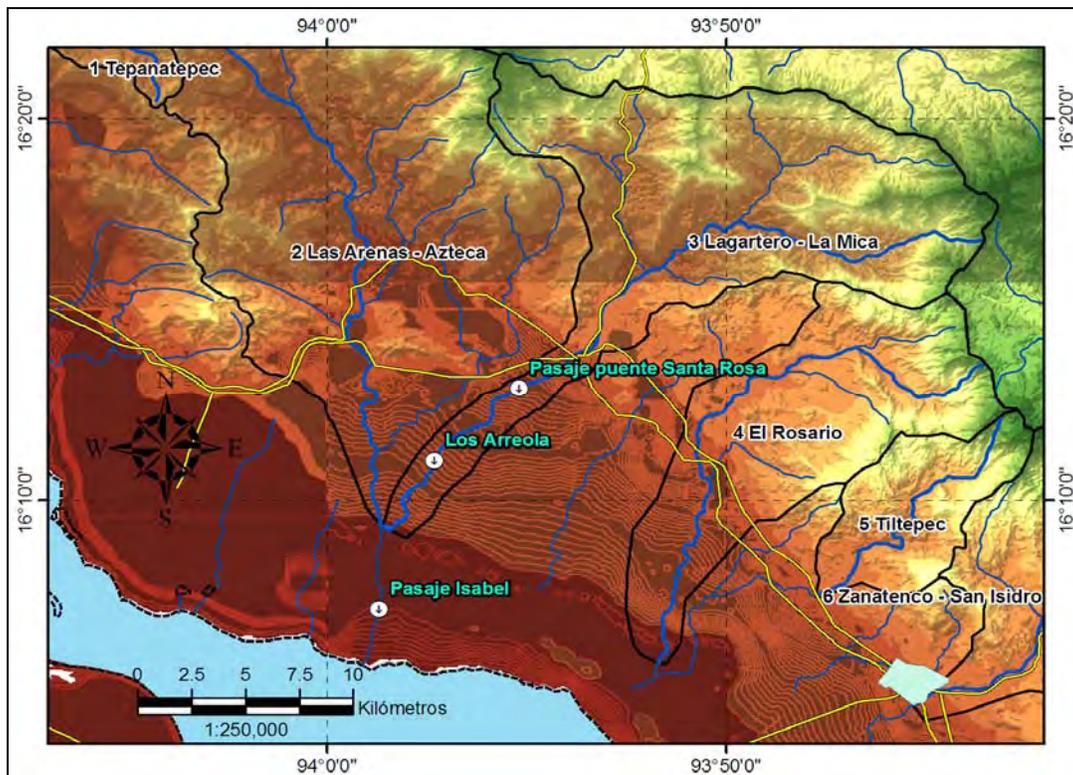


Figura 4.6 Ubicación de los primeros tres sitios de extracción de muestra en el río Lagartero

#### 4.2.7.1 Sitio 1 Pasaje puente Santa Rosa

Riío Lagartero km 0+300 margen izquierda cerca de cruce carretera.



Fotografía 1 Pasaje puente Santa Rosa km 0+300 (río Lagartero)

En la Fotografía 1 se ve el grado de socavación experimentado alrededor de las pilas del puente, ocasionadas por el flujo helicoidal que se forma al pie de cada una cuando se presentan avenidas con fuertes gastos, así como por obstáculos transportados por la corriente como son troncos, ramas. También en la Fotografía 2 se observa claramente el descenso del fondo del cauce producto de las crecientes. Ya que cada vez que el flujo adquiere mayor velocidad, de la misma forma aumenta también la capacidad de arrastre de material sólido del lecho.

En la Fotografía 2 se puede ver el ancho que el cauce tiene en condiciones normales. Así como los bordos laterales construidos a cada lado, formando márgenes para proteger de las inundaciones en periodos de lluvia.



Fotografía 2 Socavación al pie de las pilas del puente del río Lagartero



Fotografía 3 Panorámica del río Lagartero en el cruce del pasaje puente Santa Rosa.



Fotografía 4 Material extraído del lecho del cauce en estiaje (río Lagartero)

En campo se pudo apreciar de manera preliminar las propiedades del material, ayudados con la textura, el color, y tamaño de las partículas.

#### **4.2.7.2 Sitio 2 Los Arreola**

Orilla de agua margen izquierda. Debido al material de este sitio se sugirió efectuar la prueba de mecánica de suelos de límites de consistencia (Fotografía 5).

En la Fotografía 6 se aprecia la humedad que contiene el suelo, así como la formación de rizos en el lecho. Éstos últimos debido a que el esfuerzo tangencial que el flujo impone a la superficie es mayor que el esfuerzo tangencial crítico o coeficiente de Shields, deformando o permitiendo el movimiento de las partículas del fondo. La acción de un flujo tangencial o transporte de sedimentos puede incluso deberse al viento.



Fotografía 5 Condiciones de humedad del sitio de toma de muestra M-2



Fotografía 6 Formación de rizos en lecho del río

#### 4.2.7.3 Sitio 3 Pasaje Isabel

Margen izquierda playón cerca de la orilla. En este tramo de cauce se han hecho trabajos de protección; como se aprecia en la Fotografía 7, donde se ve la construcción de dos diques paralelos a la línea del eje del cauce en una distancia aproximada de 20 m.



Fotografía 7 Pasaje Isabel, playón en la margen izquierda cerca de la orilla

Un aspecto importante a resaltar en la construcción de estos diques, son los materiales utilizados para ese fin. Para este proceso se debió hacer un estudio previo de la permeabilidad del material local para verificar si es adecuado como elemento de retención; ya que se observa en la imagen un dique de material granular (arena).



Fotografía 8 Dique recién construido para protección contra inundaciones

#### 4.2.7.4 Sitio 4 Río Coapa

Cruce de carretera a ir a margen izquierda.

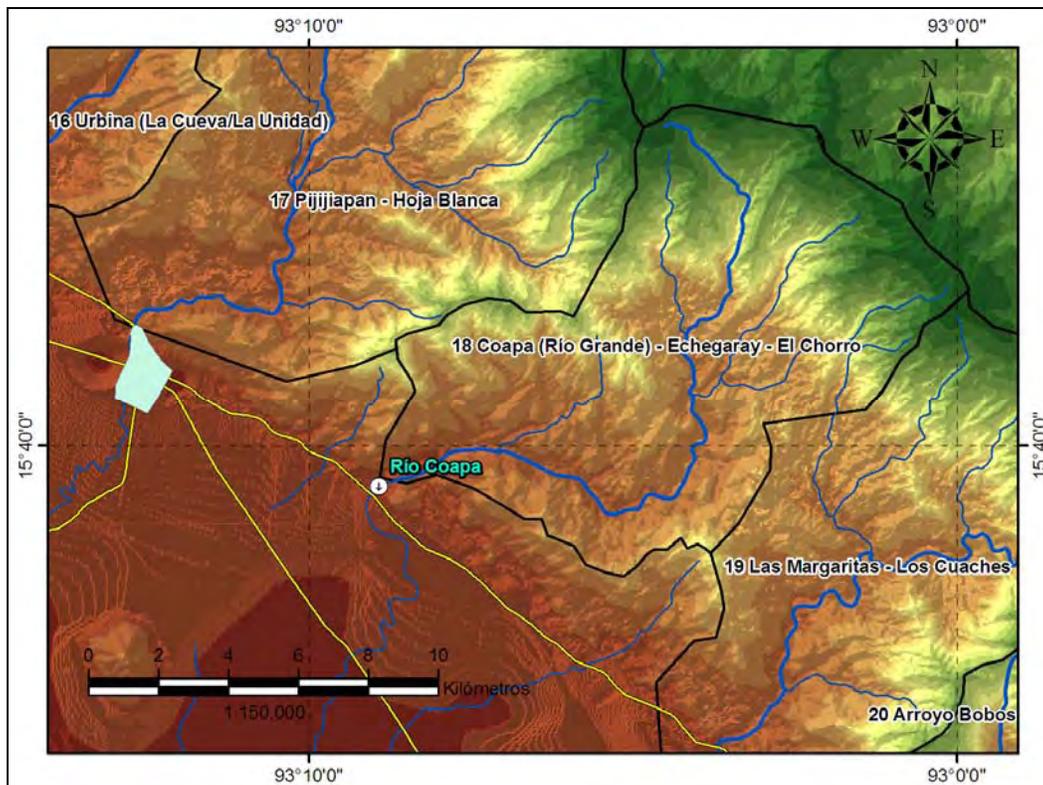


Figura 4.7 Sitio de visita y toma de muestras M-4 y M-5 en el río Coapa

En la Fotografía 9, se puede apreciar la potencia del cauce al transportar bolos, cantos, gravas y arenas. Los tamaños de los bolos agrupan 3 categorías: grandes, medianos y pequeños; aquí se aprecian en general de tamaños medianos y pequeños (no los de tamaño grandes 2,048 a 4,096 mm).

El fragmento de roca de gran tamaño que ahí mismo se ve, en realidad es una parte de la losa de un puente que anteriormente se usaba para cruzar el río Coapa.

En los resultados de la prueba aplicada a la muestra tomada en la orilla del cauce (M-4), arrojaron que está constituida por arenas finas de color café claro.



Fotografía 9 Río Coapa, se observa dentro del lecho del cauce parte la losa de un puente

#### **4.2.7.5 Sitio 5 Río Coapa**

Cruce de carretera a margen izquierda (orilla dentro del agua). En esta las Fotografía 9 y Fotografía 10, se aprecian los materiales constituyentes del cauce (fragmentos naturales de roca y cantos rodados); los cuales se fragmentan por la abrasión o rodadura al que son sujetos en todo momento.



Fotografía 10 Se observa la presencia de cantos rodados en los materiales constituyentes del cauce

### ***4.3 Análisis de siete cauces de la zona***

Esta parte tiene como objeto aplicar, revisar y reformular algunos parámetros de las relaciones empíricas de la migración de meandros, tomando como base las variables más representativas o simplemente las más usuales que caracterizan un cauce o un tramo del mismo.

Como se ha visto, el poder saber o predecir el comportamiento de un cauce a lo largo del tiempo, es un trabajo que aún no se ha podido descifrar, ya que en este fenómeno intervienen muchos factores, lo que lo hace muy difícil ésta tarea.

Por lo anterior, primeramente se tiene la necesidad de utilizar las formulaciones empíricas propuestas por algunos investigadores. Aquí se evidencian sus potencialidades y deficiencias. Posteriormente buscamos las relaciones funcionales aptas para aplicarse en esta zona, que nos permitan saber, sino el comportamiento general de los cauces; al menos relaciones independientes de cada uno. Es decir, encontrar algún patrón característico o interrelación en las variables que intervienen.

A continuación se mostrarán las relaciones empíricas obtenidas a lo largo del tiempo, por los investigadores; posteriormente estos criterios se aplicarán a algunas curvas de los cauces Tepanatepec, Zanatenco, La Flor, San Diego, Coapa, Coatán y Cahuacán.

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan las figuras (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) de las curvas de los siete cauces considerados para su análisis con las teorías de evolución de meandros.

### 4.3.1 Variables medidas

Para poder hacer el análisis de los cauces se midieron 9 variables (y 10 en el río Cahuacán), las cuales son: La longitud del tramo analizado ( $L$ ), el radio de curvatura que describe una curva de meandro ( $r$ ), el ancho del cauce ( $b$ ), la longitud de onda del meandro ( $\lambda$  o  $ML$ ), el ancho del meandro ( $B$ ), la amplitud del meandro ( $A$ ), el grado de curvatura de una curva de meandro ( $G_c$ ), el ángulo de desvío del cauce con respecto del alineamiento anterior ( $\theta$ ) y la longitud de la curva del meandro ( $L_c$ ).

La Figura 4.8 describe cada uno de los parámetros recién comentados.

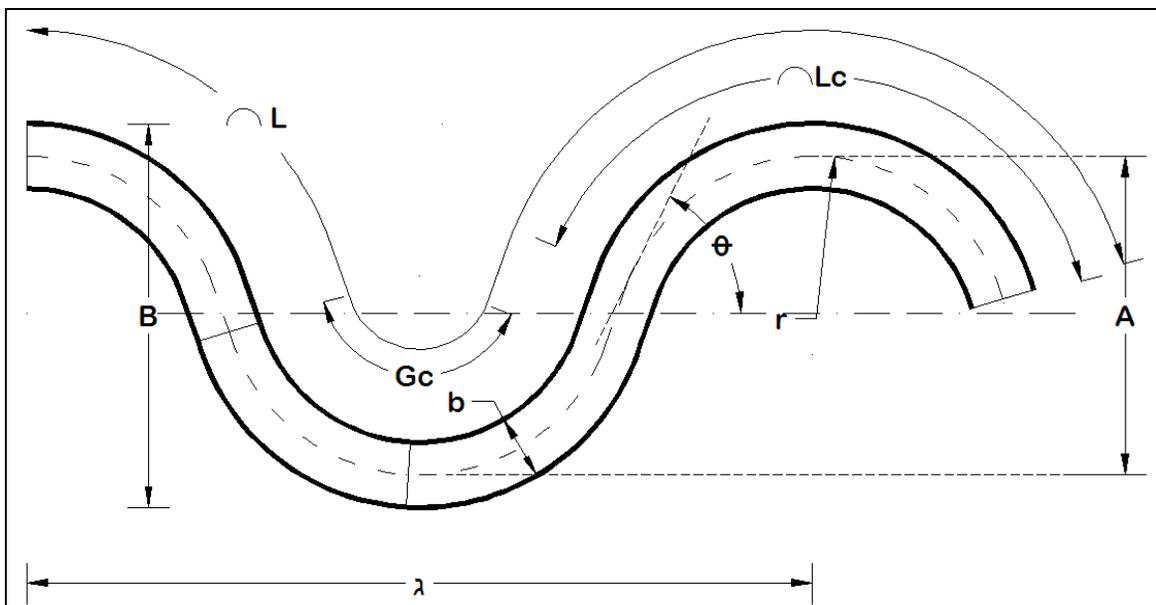


Figura 4.8 Variables incluidas en el análisis de los siete cauces seleccionados

### 4.3.2 Teorías de la evolución de meandros

Las teorías de migración de meandros usadas en este trabajo son de tipo empíricas; sin embargo no son todas las teorías de meandros existentes, solo se han considerado estas por las variables que requieren y por las variables que se midieron. (Inglis, 1949; Leopold y Wolman, 1957 – 1960; Altunin, 1967; Zeller, 1967; Ackers y Charlton, 1970; Schumm, 1972; Bray, 1982 y Agarwal, 1983).

Cabe notar que las relaciones de Bray, no calculan la amplitud de onda del meandro; pero nos es muy útil para determinar la carga de lavado, parámetro necesario para determinar la longitud de onda del meandro en la relación de Schumm.

A continuación se resumen las formulaciones propuestas por estos autores.

$$\text{Inglis (1949)} \quad \lambda = 6.6b \quad \text{Meandros superficiales en material grueso} \quad (4.2)$$

$$M_B = 17.38 b \quad (4.3)$$

$$\lambda = 11.45b \quad \text{Ríos en trinchera} \quad (4.4)$$

$$M_B = 27.30 b \quad (4.5)$$

$$\text{Leopold y Wolman (1957 - 1960)} \quad \lambda = 11b^{1.01} \quad (4.6)$$

$$M_B = 2.7b^{1.1} \quad (4.7)$$

$$\text{Altunin (1967)} \quad \lambda = 12.15b \quad (4.8)$$

$$\text{Zeller (1967)} \quad \lambda = 10b^{1.0225} \quad (4.9)$$

$$M_B = 4.5b \quad (4.10)$$

$$\text{Ackers y Charlton (1970)} \quad \lambda = 12.13b^{1.09} \quad (4.11)$$

$$\text{Schumm (1972)} \quad \lambda = 1935Q_m^{0.34} M^{-0.74} \quad (4.12)$$

$$\text{Bray (1982)} \quad b = 43.7M^{-0.39} Q_m^{0.38} \quad (4.13)$$

$$M = \left( \frac{b}{43.7Q_m^{0.38}} \right)^{0.39}$$

$$\text{Agarwal (1983)} \quad \lambda = 29.7Q^{0.32} \rightarrow Q < 9 \text{ m}^3/\text{seg} \quad (4.14)$$

$$\lambda = 11.55Q^{0.75} \rightarrow Q > 9 \text{ m}^3/\text{seg} \quad (4.15)$$

$$B = 0.477\lambda \quad (4.16)$$

donde:

$\lambda$  longitud de onda del meandro [m],

$B$  ancho superficial del cauce [m],

$M_B$  o  $B$  ancho del meandro [m],

$Q_m$  gasto medio anual [ $\text{m}^3/\text{seg}$ ],

$M$  % de sedimento transportado (gasto de lavado), menor a 0.074 mm [%],

$Q$  gasto dominante ( $Tr = 2$  años) [ $\text{m}^3/\text{seg}$ ].

### 4.3.3 Aplicación de teorías de migración de meandros a siete cauces de la zona

#### 4.3.3.1 Aplicación al río Tepanatepec

De la aplicación de las relaciones anteriores, se desprenden los siguientes resultados:

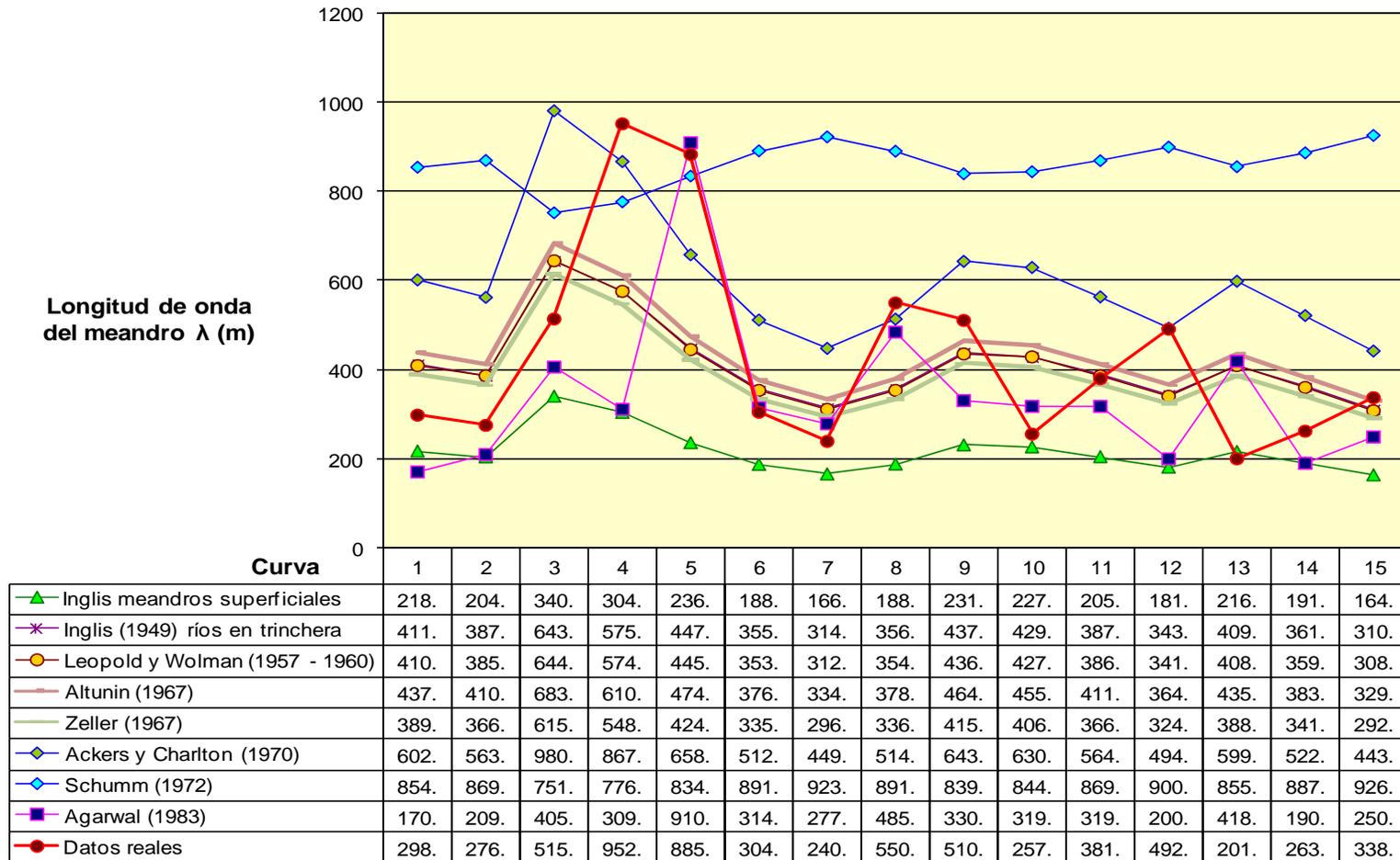


Figura 4.9 Longitudes de onda de meandros obtenidas con los datos del río Tepanatepec

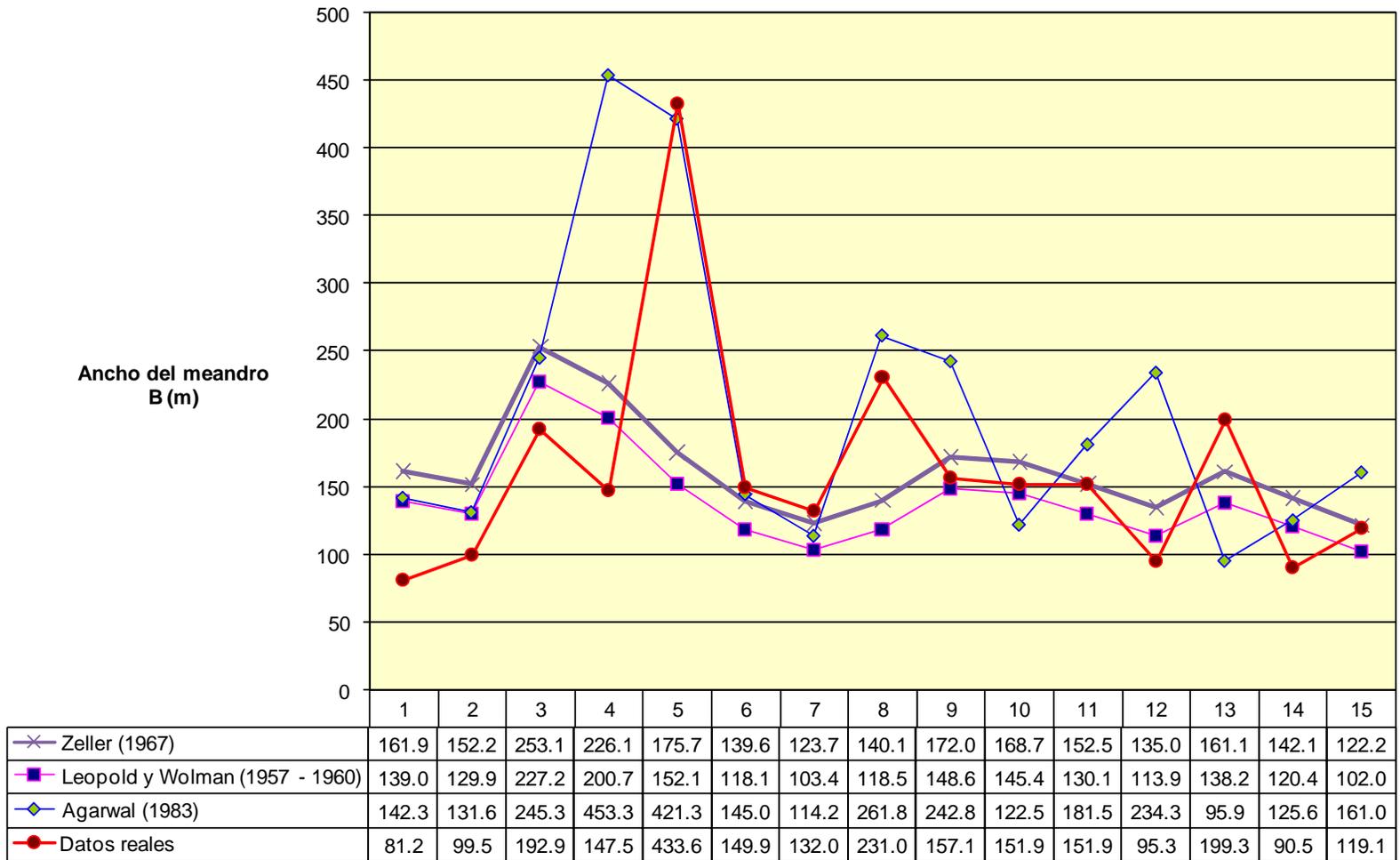


Figura 4.10 Anchos de los meandros obtenidos con los datos del río Tepanatepec

### 4.3.3.2 Aplicación al río Zanatenco

De la aplicación de las relaciones anteriores, se desprenden los siguientes resultados:

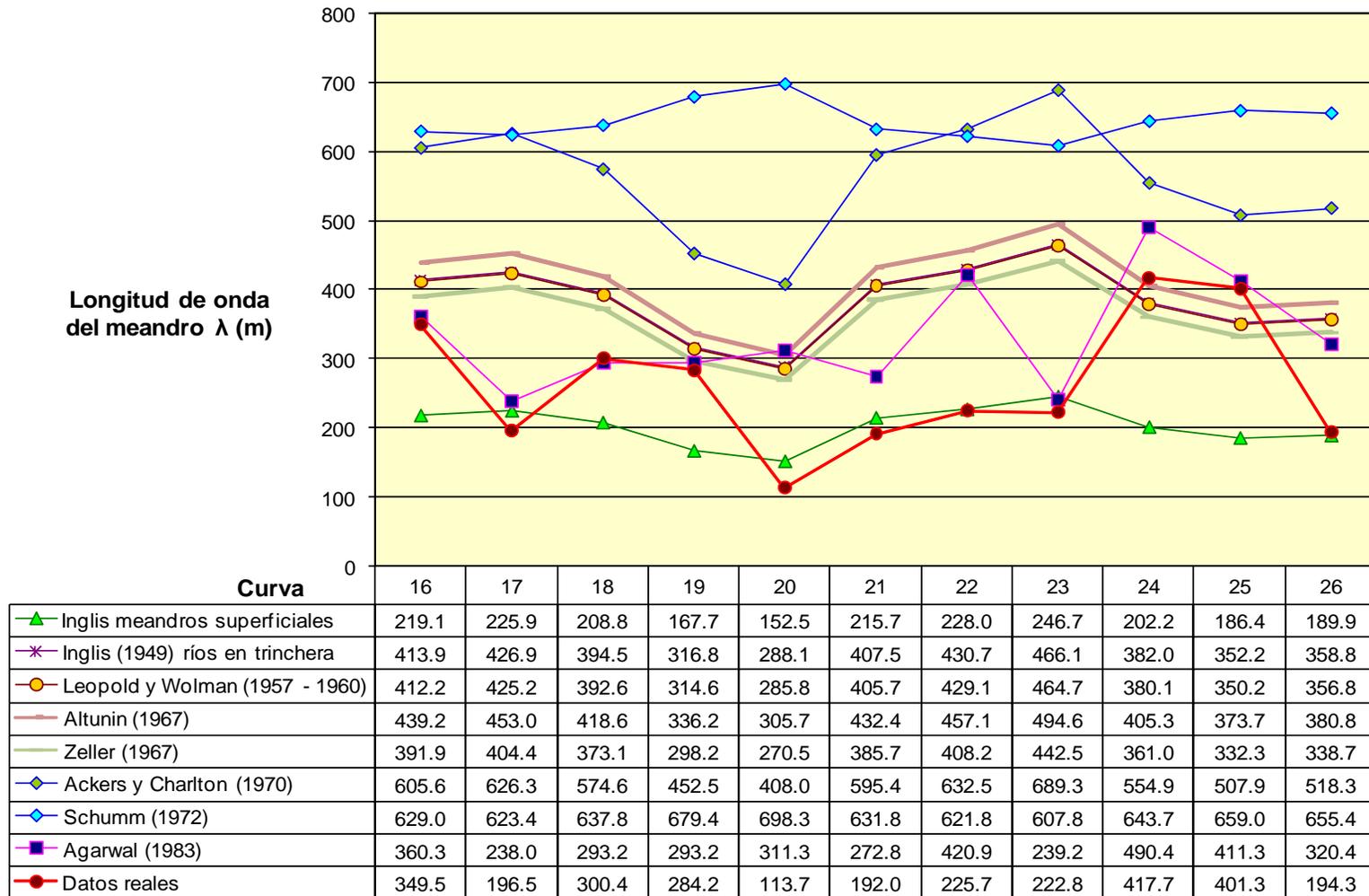


Figura 4.11 Longitudes de onda de meandros obtenidas con los datos del río Zanatenco

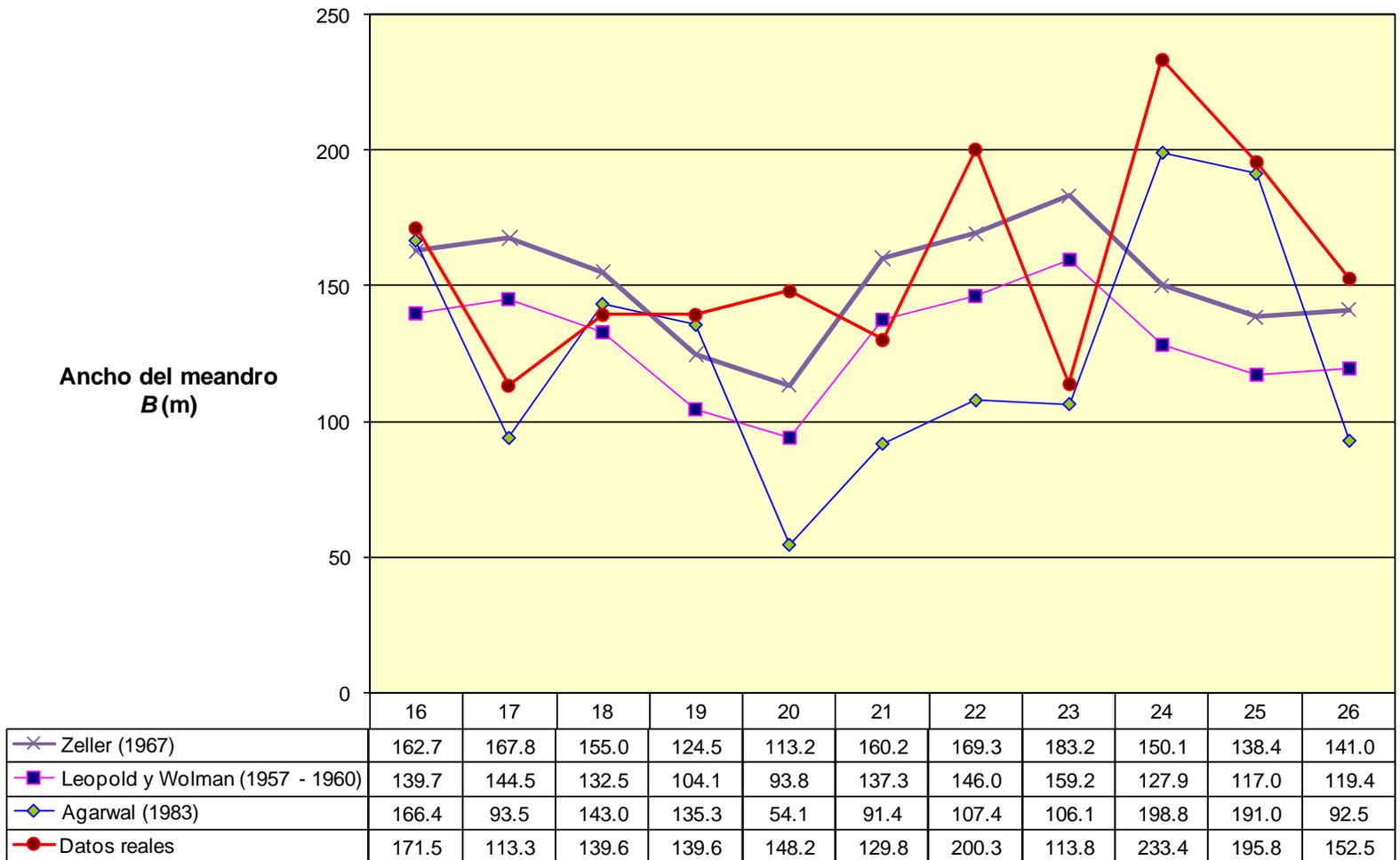


Figura 4.12 Anchos de los meandros obtenidos con los datos del río Zanatenco

### 4.3.3.3 Aplicación al río Coapa

De la aplicación de las relaciones anteriores, se desprenden los siguientes resultados:

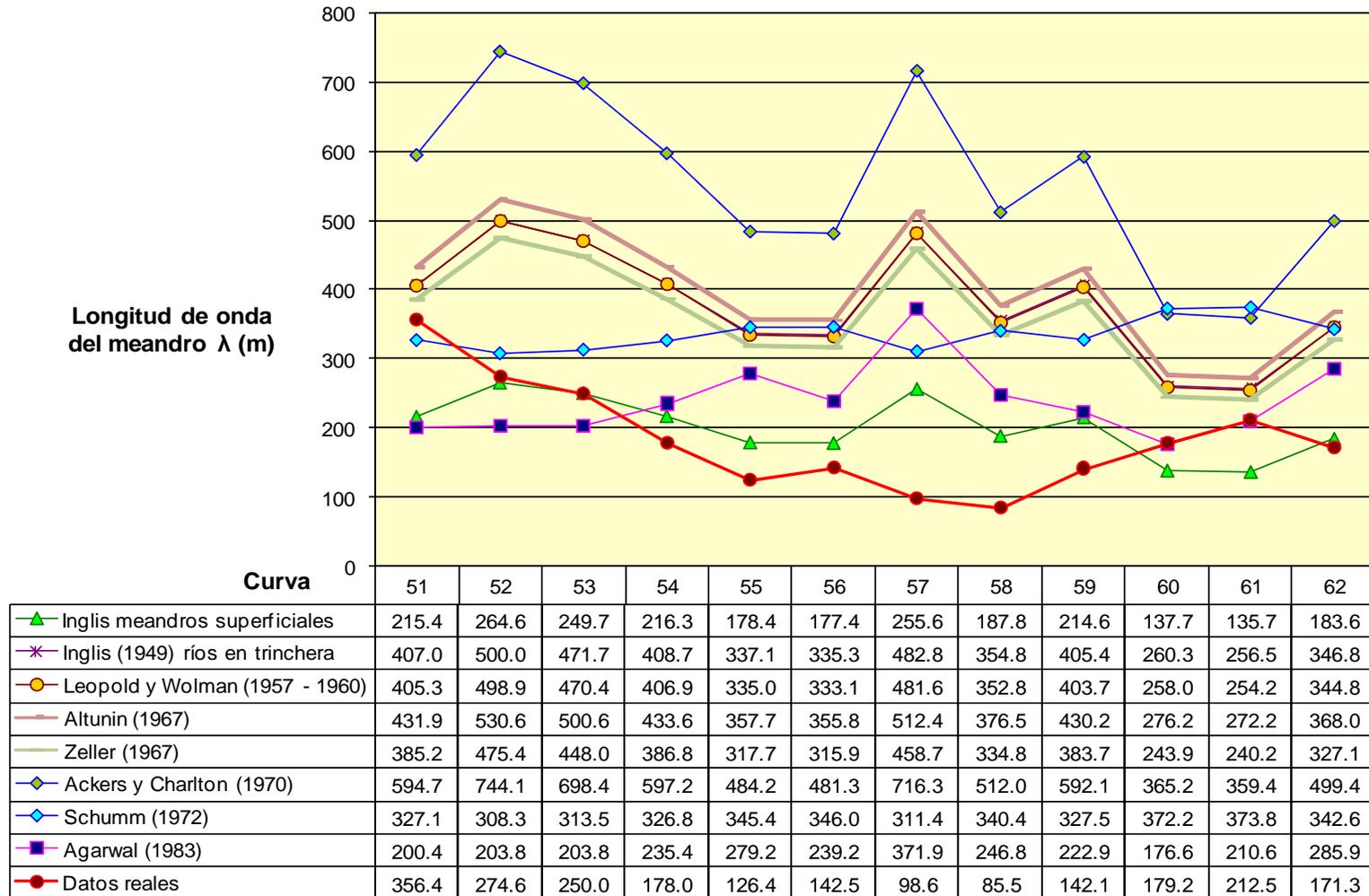


Figura 4.13 Longitudes de onda de meandros obtenidas con los datos del río Coapa

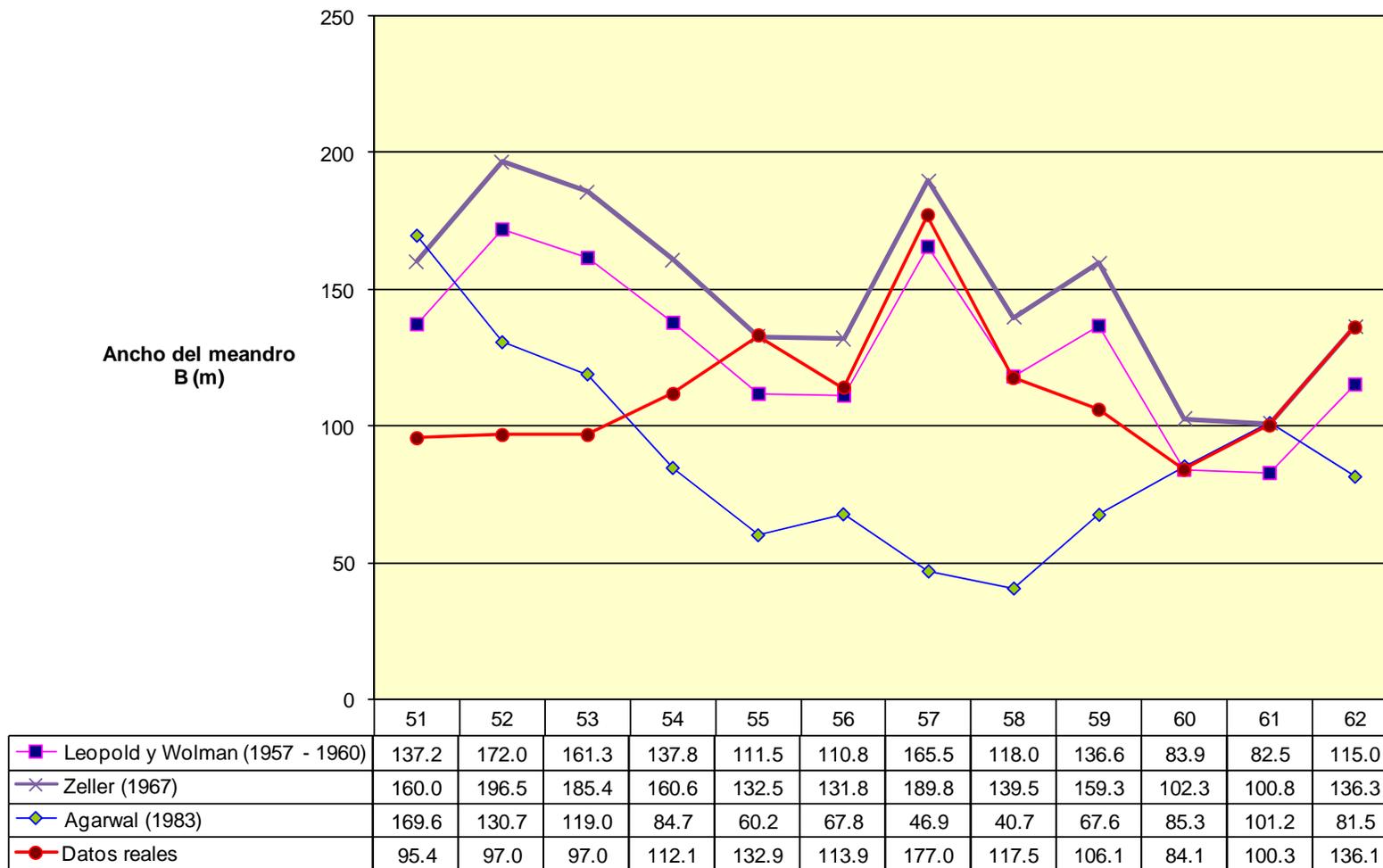


Figura 4.14 Anchos de los meandros obtenidos con los datos del río Coapa

### 4.3.3.4 Aplicación al río Coatán

De la aplicación de las relaciones anteriores, se desprenden los siguientes resultados:

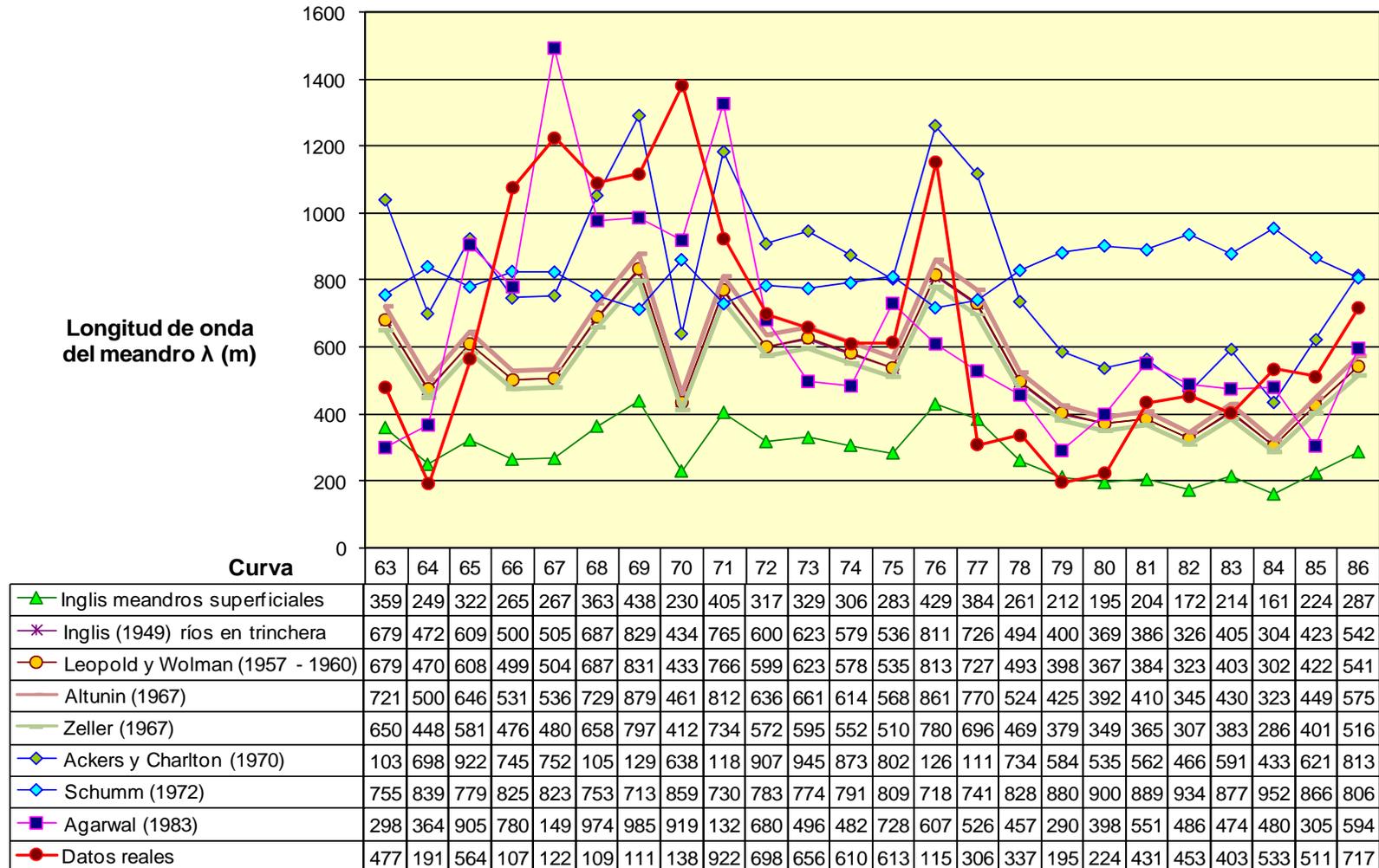


Figura 4.15 Longitudes de onda de meandros obtenidas con los datos del río Coatán

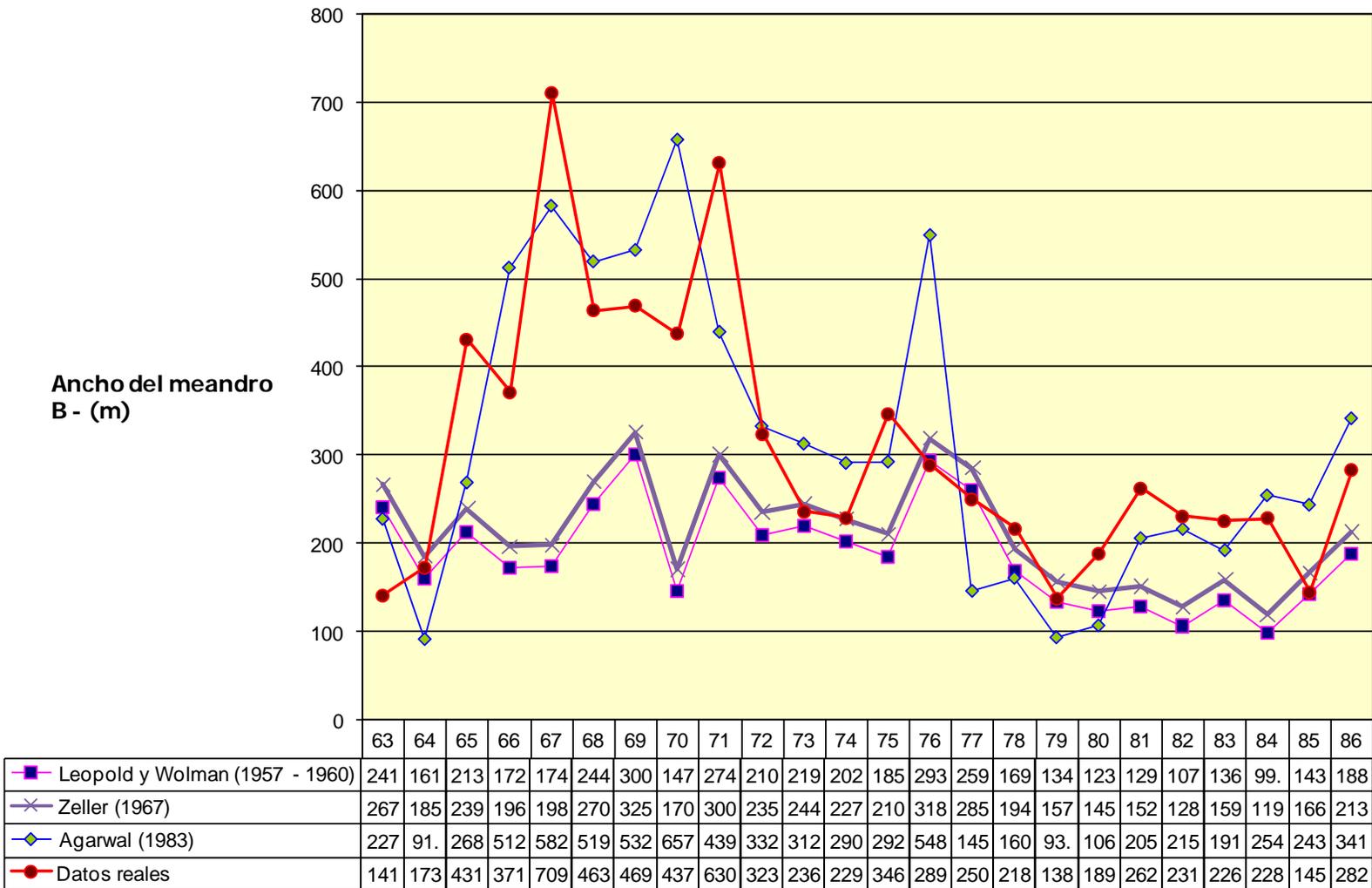


Figura 4.16 Anchos de los meandros obtenidos con los datos del río Coatán

### 4.3.3.5 Aplicación al río Cahuacán

De la aplicación de las relaciones anteriores, se desprenden los siguientes resultados:

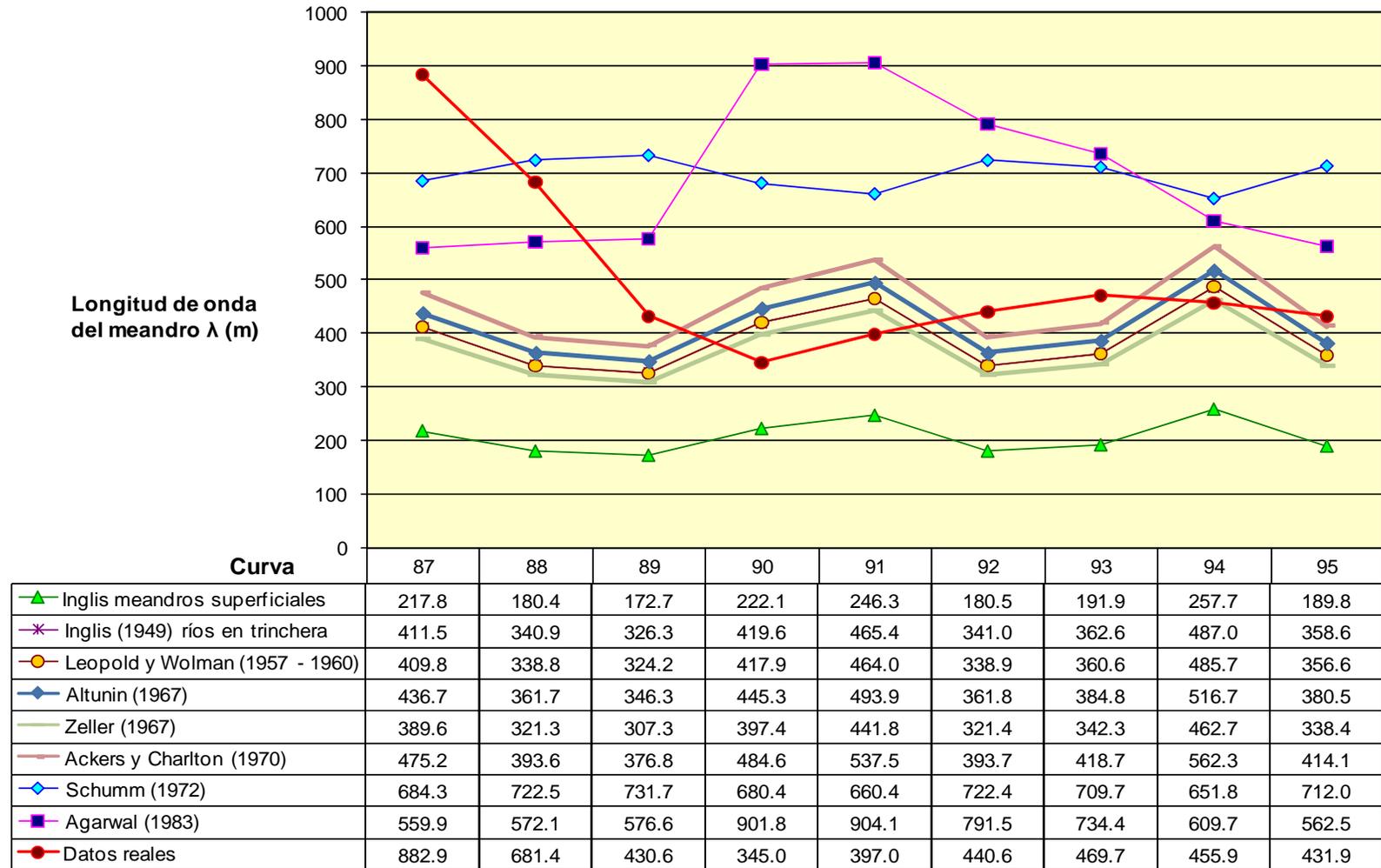


Figura 4.17 Longitudes de onda de meandros obtenidas con los datos del río Cahuacán

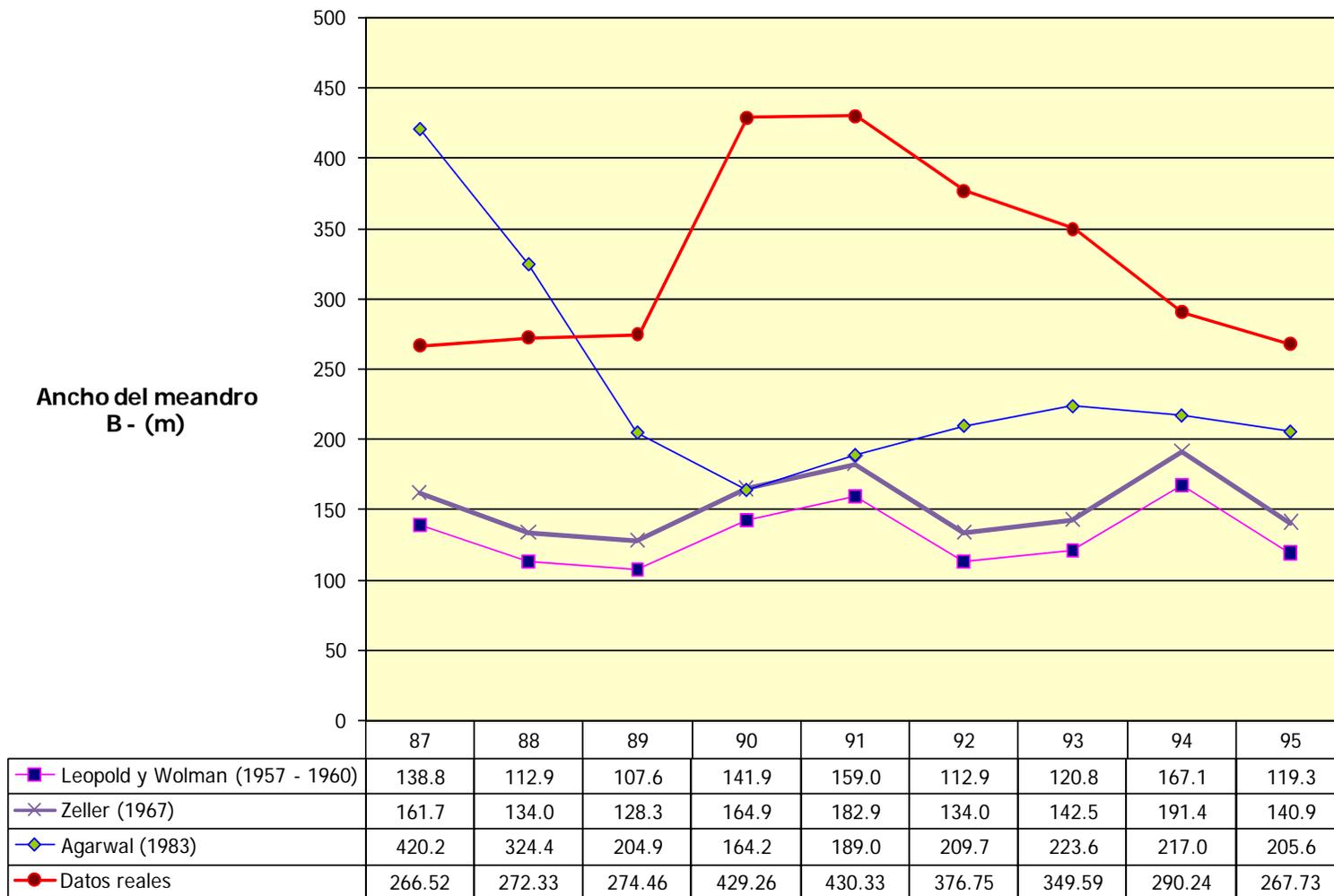


Figura 4.18 Anchos de los meandros obtenidos con los datos del río Cahuacán

#### 4.3.4 Comentarios sobre los resultados obtenidos

Al río La Flor no se pudieron aplicar estos criterios, ya que hubo algunos inconvenientes, como son: No se encontró la estación hidrométrica de este cauce, el cauce al tener poco ancho evitó su digitalización. Sin embargo las demás variables medidas son de utilidad para las formulaciones finales. Lo mismo sucedió con el río San Diego, excepto que ahí si se cuenta con registros hidrométricos.

Para el cálculo de la longitud de onda del meandro, el criterio de Agarwal (1983) y el de Inglis (1949) para meandros superficiales, fueron los que se aproximaron más a los valores reales. Para el cálculo del ancho del meandro, el criterio de Leopold y Wolman (1957 - 1960); fue el que se aproximó más, a los valores reales.

El criterio para poder decidir sobre el mejor ajuste a los datos reales, fue obtenido aplicando el criterio del error estándar acumulado.

<b>Cauce</b>	<b>Longitud del meandro (<math>\lambda</math>)</b>	<b>Ancho del meandro (<math>B</math>)</b>
Tepanatepec	Agarwal (1983)	Leopold y Wolman (1957 - 1960)
Zanatenco	Agarwal (1983)	Leopold y Wolman (1957 - 1960)
La Flor	Inglis (1949)	Agarwal (1983)
San Diego	Leopold y Wolman (1957 - 1960)	Leopold y Wolman (1957 - 1960)
Coapa	Inglis (1949)	Leopold y Wolman (1957 - 1960)
Coatán	Agarwal (1983)	Agarwal (1983)
Cahuacán	Ackers y Charlton (1970)	Leopold y Wolman (1957 - 1960)

Tabla 4.5 Resumen de las relaciones empíricas de mejor ajuste

Como comentario acerca de las formulaciones o relaciones empíricas para el cálculo de los parámetros de meandro, se puede decir que estos mismos son relaciones lineales o potenciales que involucran sólo una variable (excepto relación de Schumm).

Con respecto a las relaciones de Inglis (1949) y Altunin (1967) para el cálculo de longitudes de onda de los meandros, se observa que son lineales, mientras que las demás relaciones son potenciales; y todas estas son dependientes del ancho del cauce, con excepción de las relaciones de Schumm (1972) y Agarwal (1983) que dependen; la primera del gasto medio anual y del gasto de lavado, mientras que la segunda del ancho

del meandro. Aunque la relación de Shumm involucra 2 variables, no fue la que mejor se ajustó a los datos reales de longitud de onda del meandro, en algún río.

Con respecto al cálculo de anchos de meandro, sólo se graficaron las relaciones de Leopold y Wolman (1957 - 1960), Zeller (1967) y Agarwal (1983), ya que las dos relaciones de Inglis (1949) dan como resultado anchos de meandro de ordenes de dos o hasta cuatro veces mayores que los datos reales.

#### **4.3.5 Relaciones funcionales para los cauces**

En este apartado se muestran las relaciones funcionales obtenidas para todo el conjunto de datos. Esto con la idea de poder contar con ecuaciones válidas para toda la zona de estudio.

Primeramente para obtener las ecuaciones, se procedió a relacionar las variables del fenómeno entre sí, que corresponden a datos medidos incluidos en el análisis de las 95 curvas (864 datos), las cuales forman parte de siete cauces de la región hidrológica Costa de Chiapas, mencionados con anterioridad.

Posteriormente con la ayuda de un software de cálculo (Microsoft Excel ®) se obtuvo las curvas de regresión (de tipo lineal, polinómica, potencial, exponencial o logarítmica) y finalmente se escogió la curva de regresión de mayor ajuste. Es decir, se muestran las funciones encontradas al relacionar los datos medidos de las variables ya mencionadas anteriormente, para así contar con funciones de una variable válidas para cada cauce y para toda la zona.

Para aceptar dichas ecuaciones como válidas se tomo como criterio, un coeficiente de correlación mayor o igual al 80% como apto ( $R \geq 80\%$ ).

A continuación, en la tabla siguiente (Tabla 4.6), se muestran los concentrados con las curvas de mejor ajuste, para los datos medidos en cada tramo de cauce y para todos los datos en conjunto respectivamente.

En la Tabla 4.6 se ven las funciones que tienen correlaciones de interés. Así mismo, se observa que no hay función que cuente con una correlación mayor o igual al 80% para el cauce La Flor.

Algunos otros cauces tienen coeficientes de correlación con porcentajes importantes (entre 80 y 60%), sin embargo no son mostradas aquí.

Cauce	Relación	Ecuación	Tipo Ec.	Rc <sup>2</sup>
<b>Tepanatepec</b>	L - $\lambda$	$\lambda = 0.761L - 12.25$	Polinomio 2°	0.88
<b>Zanatenco</b>	L - Lc	$Lc = 0.842L - 146.2$	Lineal	0.81
<b>San Diego</b>	B - Lc	$Lc = 0.536B + 57.13$	Lineal	0.81
<b>Coapa</b>	r - $\lambda$	$\lambda = 197.3\ln(r) - 606.8$	Logarítmica	0.85
<b>Coapa</b>	$\lambda$ - Gc	$\lambda = 3380 Gc^{-0.66}$	Potencial	0.8
<b>Coatán</b>	r - Lc	$Lc = 3.074r^{0.908}$	Potencial	0.84
<b>Coatán</b>	L - $\lambda$	$\lambda = 0.633L + 90.56$	Lineal	0.81
<b>Cahuacán</b>	$\lambda$ - $\theta$	$\theta = 268.8e^{-0.00\lambda}$	Exponencial	0.88
<b>Cahuacán</b>	r - $\lambda$	$\lambda = 2.633r + 172.4$	Lineal	0.88
<b>Cahuacán</b>	$\lambda$ - (r/b)	$(r/b) = 0.009\lambda - 1.073$	Lineal	0.85
<b>Cahuacán</b>	r - Lc	$Lc = -0.006r^2 + 3.395r + 24.60$	Polinomio 2°	0.83

Tabla 4.6 Resumen de las relaciones empíricas de mejor ajuste para cada cauce

Con respecto a los resultados; llama la atención las relaciones para el río Cahuacán; ya que muchas variables presentan una alta correlación entre sí. Esto se puede constatar por el hecho de que la geometría de su cauce es uniforme y que, aunque hay meandro, éste guarda cierta simetría entre sí, teniendo continuidad en su forma.

Las gráficas de las relaciones de interés para cada cauce, listadas anteriormente (Tabla 4.6), no fueron incluidas en este trabajo.

Aquí es interesante decir que las relaciones  $L - \lambda$ ,  $r - \lambda$ ,  $r - Lc$  y  $Lc - L$ , son las que se presentan más frecuentemente en casi todos los datos de las curvas, y esas mismas son las que en conjunto, forman las funciones representativas, que tienen parámetros que pueden ser aplicables a todos los cauces de la zona. Pese a ello, es más recomendable la aplicación de ecuaciones para cada cauce, por lo complejo que es el fenómeno estudiado.

Estos resultados ponen en evidencia el hecho de que, si analizamos las curvas de los cauces por tramos, los valores de las correlaciones van a ser más elevados para algunas variables, que si intentamos obtener una ecuación para todo el conjunto; esto se debe un tanto a la cantidad de datos y otro a la heterogeneidad de los factores que conforman el mecanismo de meandro no incluidos en este trabajo, los cuales modifican también estas variables.

Debemos tener en cuenta que aunque los cauces están en la misma región hidrológica, y con el mismo material aluvial de base, la distancia entre estos cauces es de 270 kilómetros aproximadamente; es decir, no son tan próximos unos de otros.

A continuación se muestran los resultados de las relaciones globales.

#### 4.3.6 Relaciones funcionales globales

Al igual que en el apartado anterior, en esta parte se hizo un análisis de correlación entre las variables. Este análisis se llevo a cabo con la ayuda del software Statistica V. 6.0.

El resultado de esas correlaciones se muestra a continuación.

	<b>L</b>	<b>r</b>	<b>b</b>	<b>ML</b>	<b>B</b>	<b>a</b>	<b>Gc</b>	<b>Angulo</b>	<b>Lc</b>	<b>(r/b)</b>
<b>L</b>	<b>1.00</b>	0.78	0.61	0.92	0.87	0.86	0.06	0.09	0.79	0.60
<b>r</b>	0.78	<b>1.00</b>	0.47	0.85	0.62	0.60	-0.23	-0.14	0.85	0.89
<b>b</b>	0.61	0.47	<b>1.00</b>	0.63	0.52	0.47	0.00	-0.09	0.45	0.07
<b>ML</b>	<b>0.92</b>	0.85	0.63	<b>1.00</b>	0.75	0.73	-0.15	-0.08	0.74	0.66
<b>B</b>	<b>0.87</b>	0.62	0.52	0.75	<b>1.00</b>	1.00	0.33	0.25	0.80	0.47
<b>a</b>	<b>0.86</b>	0.60	0.47	0.73	1.00	<b>1.00</b>	0.35	0.28	0.78	0.47
<b>Gc</b>	0.06	-0.23	0.00	-0.15	0.33	0.35	<b>1.00</b>	0.43	0.25	-0.27
<b>Angulo</b>	0.09	-0.14	-0.09	-0.08	0.25	0.28	0.43	<b>1.00</b>	0.06	-0.15
<b>Lc</b>	0.79	<b>0.85</b>	0.45	0.74	<b>0.80</b>	0.78	0.25	0.06	<b>1.00</b>	0.73
<b>(r/b)</b>	0.60	<b>0.89</b>	0.07	0.66	0.47	0.47	-0.27	-0.15	0.73	<b>1.00</b>

Tabla 4.7 Resumen de correlación entre variables

Con la ayuda de la tabla vemos que las variables que presentan mayor correlación entre sí son las siguientes: L – ML, r – (r/b), L – B, L – a, r – Lc y B – Lc.

Así mismo, con el software obtenemos la ecuación correspondiente a cada par de variables; es decir, funciones lineales obtenidas de la nube de puntos (Figura 4.19) de las variables en cuestión.

Relación	R <sup>2</sup>
L - M <sub>L</sub>	0.92
L - B	0.87
L - a	0.86
r - M <sub>L</sub>	0.85
r - L <sub>c</sub>	0.85
B - L <sub>c</sub>	0.80

Tabla 4.8 Resumen de las relaciones de interés

Finalmente se concluye esta parte, con una serie de ecuaciones con seis de las variables que influyen en el movimiento de los meandros (Longitud del cauce, longitud de onda del meandro, el ancho del meandro y su amplitud, el radio de curvatura y la longitud de la curva del meandro). Sin embargo, no se tiene alguna jerarquía en las mismas, por lo que es necesario hacer uso de una técnica exploratoria multivariada como es el análisis de componentes principales.

$$\lambda = 0.659 L + 29.47 \quad (4.17)$$

$$B = 0.2833 L + 43.86 \quad (4.18)$$

$$a = 0.2654 L + 14.767 \quad (4.19)$$

$$\lambda = 3.356 r + 42.69 \quad (4.20)$$

$$L_c = 1.672 r + 27.99 \quad (4.21)$$

$$L_c = 0.8774B + 26.21 \quad (4.22)$$

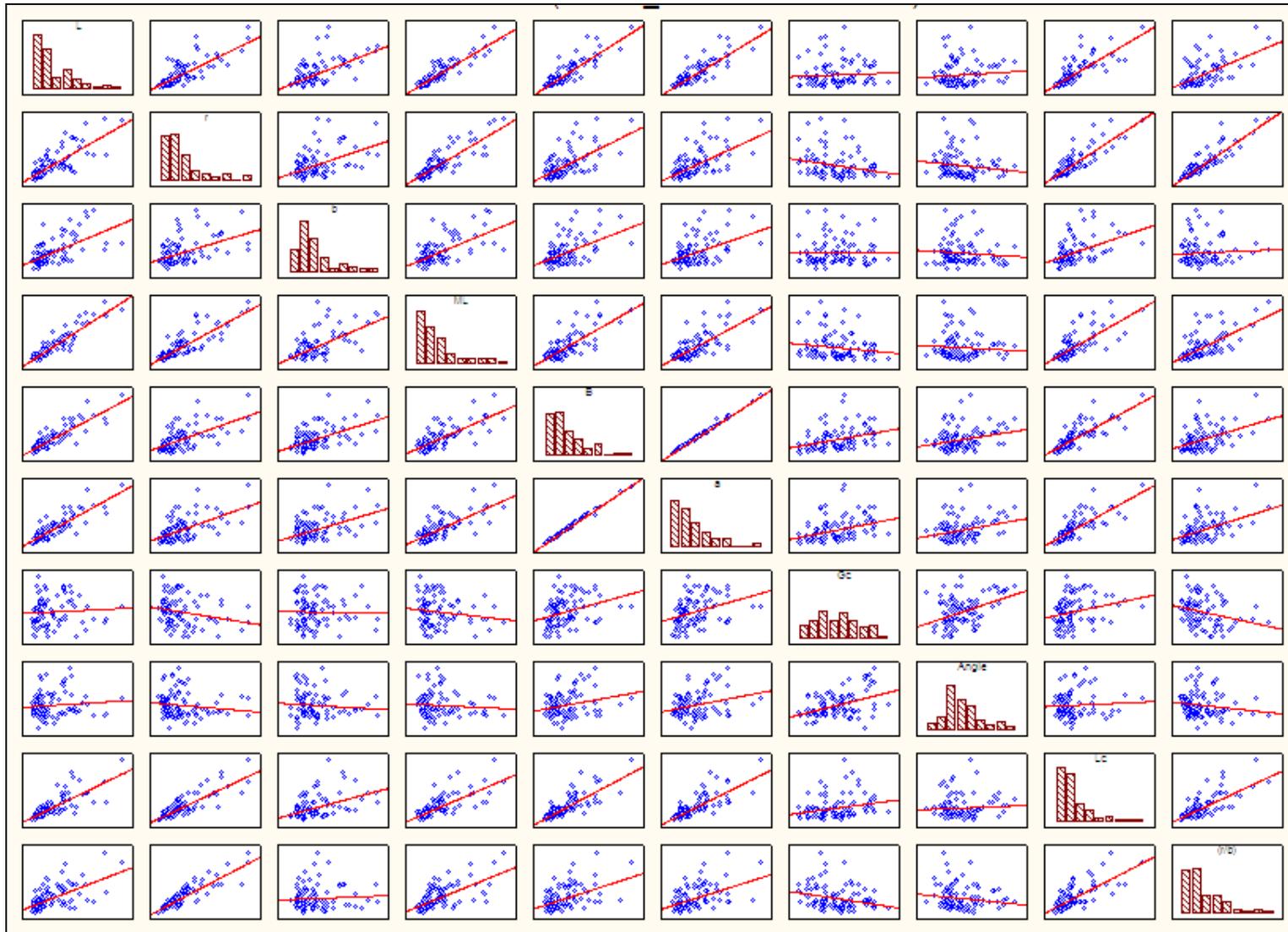


Figura 4.19 Resumen gráfico de correlaciones entre variables

## Capítulo 5 Técnicas de análisis multivariado

### 5.1 *Análisis de componentes principales*

El objetivo del análisis de componentes principales es transformar el espacio de representación  $P$  en un nuevo espacio  $P^*$ , en el que los datos estén incorrelacionados (la matriz de covarianza en ese espacio será diagonal). Con otras palabras, se trata de encontrar un nuevo conjunto de ejes ortogonales en el que la varianza de los datos sea máxima. El objetivo final es reducir la dimensionalidad del problema una vez realizada la transformación.

Veamos cómo se puede plantear el problema a partir de un ejemplo. Supongamos que representamos un conjunto de patrones bidimensionales que presentan cierto grado de correlación (Figura 5.1, izquierda). En esta representación utilizamos por simplicidad una elipse en lugar de la nube de puntos. Si representamos estos patrones en un nuevo espacio generado por las variables  $Y_1$  e  $Y_2$  (Figura 5.1, derecha), que se corresponden con los ejes de la elipse y consideramos únicamente  $Y_1$ , la proyección de los patrones sobre

este eje hace que su dispersión sea mayor que sobre cualquier otro eje (y en particular sobre cualquiera de los originales).

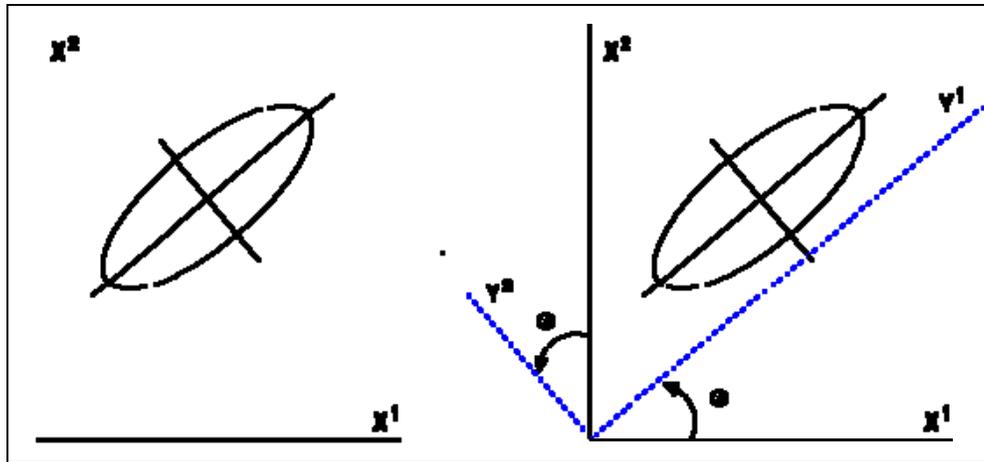


Figura 5.1 Representación de una nube de puntos a través de una elipse. Correlación con los ejes

Es fácil comprobar que si los datos están correlacionados en  $P$  la *dirección de máxima varianza en  $P$  es la del eje principal de la elipse que los caracteriza*. Este nuevo eje,  $Y_1$ , se calcula como una rotación de magnitud  $\theta$  del primer eje de  $P$ ,  $X_1$ . Si el nuevo sistema de coordenadas es ortogonal, el segundo eje,  $Y_2$ , se establece en base al segundo eje del sistema original,  $X_2$ , mediante una rotación de la misma magnitud  $\theta$ , que la aplicada al primero. En definitiva, la relación entre los nuevos ejes y los antiguos consiste en una relación lineal:

$$\begin{aligned} Y_1 &= W_{11}X_1 + W_{12}X_2 \\ Y_2 &= W_{21}X_1 + W_{22}X_2 \end{aligned} \quad (5.1)$$

que asume únicamente una rotación, manteniendo el origen de coordenadas común para los sistemas de coordenadas  $(X_1, X_2)$  e  $(Y_1, Y_2)$ . Con esta transformación, la longitud del eje mayor  $Y_1$  indicará el rango de los datos a lo largo de este nuevo eje, que será necesariamente mayor que sobre cualquiera de los ejes originales,  $X_1$  ó  $X_2$ . En consecuencia, dependiendo de la relación entre los ejes originales, la mayor parte de la

información contenida en el espacio  $P$  puede retenerse únicamente en el primer eje principal,  $Y_1$ , lo que implica una selección de características en el espacio transformado  $P^*$ .

Si se trabaja con datos de dimensionalidad mayor que 2 el procedimiento es similar: los nuevos ejes se definen secuencialmente de manera que un nuevo eje se define como aquel que es perpendicular al seleccionado anteriormente y su dirección es la de la máxima varianza de entre todos los ejes posibles.

Desde una perspectiva geométrica, la ecuación (5.1) puede reescribirse de manera explícita como una rotación de magnitud  $\theta$  alrededor del origen:

$$\begin{aligned} Y_1 &= \cos \theta X_1 - \text{sen} \theta X_2 \\ Y_2 &= \text{sen} \theta X_1 + \cos \theta X_2 \end{aligned} \tag{5.2}$$

de manera que el problema se reduce a encontrar el ángulo de rotación  $\theta$ . Este problema, no obstante, depende mucho de la muestra concreta que manejamos. La solución se aborda desde una perspectiva diferente. La ecuación (5.1) puede reescribirse en términos matriciales como:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

y el objetivo será encontrar los coeficientes de transformación  $W_{ij}$  con las restricciones:

1. Los ejes que definen  $P^*$  son ortogonales.
2. Los datos en  $P^*$  están incorrelacionados.



### 5.1.2 Sobre la ortogonalidad de los ejes

La transformación consiste, básicamente, en una rotación rígida de los ejes de  $P$  tomando como referencia el origen de coordenadas. La consecuencia es que si los ejes de  $P^*$  deben ser ortogonales, la distancia euclídeana entre el origen y los puntos se mantiene inalterada con esta transformación. Para que esto sea cierto, la matriz de transformación  $W$  debe ser ortogonal, esto es, que  $W^{-1} = W^T$  una matriz cuadrada  $d \times d$ , por lo que:

$$W^T W = W W^T = 1 \quad (5.7)$$

### 5.1.3 Sobre la incorrelación en $P^*$

Si las nuevas variables  $Y$  se calculan a partir de  $X$  mediante la transformación dada por la ecuación (4) puede demostrarse que

$$\mu_Y = E[Y] = E[W^T X] = W^T E[X] = W^T \mu_X \quad (5.8)$$

$$\Sigma_Y = E[(Y - \mu_Y)(Y - \mu_Y)^T] = W^T \Sigma_X W \quad (5.9)$$

Si los datos en  $P^*$  deben estar incorrelacionados, la matriz de covarianza en  $P^*$ ,  $\Sigma_Y$  debe ser diagonal.

### 5.1.4 Obtención de la matriz de transformación $W$

El problema que nos ocupa puede formularse como un problema de maximización (varianza en  $P^*$ ) con restricciones (ortogonalidad de  $W$ ). La técnica adecuada es la utilización de los multiplicadores de Lagrange, que puede plantearse como sigue.

Si el objetivo es maximizar una función  $f(v_1, v_2, \dots, v_p)$  con la condición  $g(v_1, v_2, \dots, v_p) = 0$  se puede construir una nueva función

$$F = f(v_1, v_2, \dots, v_p) - \lambda g(v_1, v_2, \dots, v_p)$$

y maximizar esta función sin restricciones.

En nuestro caso, se trata de maximizar la varianza en  $P^*$ , por lo que  $f = \Sigma_Y = W^T \Sigma_X W$  y la restricción es que  $W^T W = I$ , por lo que  $g = W^T W - I = 0$ . En definitiva, se trata de maximizar

$$F = W^T \Sigma_X W - \lambda(W^T W - I) \quad (5.10)$$

y derivando (5.10) respecto a  $W$ ,

$$(\Sigma_X - \lambda I)W = 0 \quad (5.11)$$

y se tratará de encontrar la solución al sistema de ecuaciones dado por (5.11). En definitiva,  $W$  debe verificar que  $(\Sigma_X - \lambda I)W = 0$  con objeto de que  $W^T \Sigma_X W = \Sigma_Y$  sea máxima, sujeta a la restricción de que  $W^T W = I$ .

Para que la ecuación (5.11) sea cierta sólo pueden ocurrir dos casos:

1. Que  $W=0$  y en este caso la solución trivial y no interesa
2. Que  $\Sigma_X - \lambda I$  sea singular (no invertible), esto es que:

$$|\Sigma_X - \lambda I| = 0 \quad (5.12)$$

La ecuación (5.12) es la ecuación característica de la matriz y su expresión es una ecuación polinómica de  $\lambda$ . Las soluciones a esta ecuación (los valores de  $\lambda$ ) se conocen como los valores-propios de  $\Sigma_X$ . Cuando se sustituyen en (5.11), se calculan los vectores asociados a cada valor de  $\lambda$ , que se conocen como los vectores-propios de  $\Sigma_X$ . Con otras palabras, cada valor-propio  $\lambda_i$ , es solución a una ecuación del sistema  $(\Sigma_X - \lambda I)W = 0$ . Así, para cada ecuación, los parámetros de W asociados a la solución con  $\lambda_i$  es un vector-propio  $\phi_i$ .

De esta manera, podemos expresar la matriz de transformación como un vector de d vectores columna (W es un vector de vectores-propios):

$$W = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_d] \quad (5.13)$$

Como  $\Sigma_X$  es de orden  $d \times d$ , tendrá d valores-propios asociados,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_d$  y como  $\Sigma_X$  es simétrica, todos los valores-propios serán reales.

### 5.1.5 Conclusiones

Como  $\Sigma_X$  es simétrica, todos sus valores-propios serán reales. Por otra parte, dado que  $\Sigma_X$  es definida positiva, sus valores-propios están ordenados:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_d \quad (5.14)$$

La matriz de covarianza  $\Sigma_Y = W^T \Sigma_X W$  será una matriz diagonal formada por los valores-propios de  $\Sigma_X$ :

$$\Sigma_Y = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_d \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

y los valores de la diagonal (valores-propios de  $\Sigma_x$ ) son las varianzas de los patrones en las respectivas coordenadas transformadas.

La matriz que contiene los coeficientes de la transformación,  $W$ , es la matriz de vectores-propios de  $\Sigma_x$ , asumiendo que  $W$  es ortogonal.

Cada valor-propio  $\lambda_i$  tiene asociado un vector-propio  $\phi_i$  y cada vector-propio define la dirección de un eje en el espacio transformado  $P^*$ . Dado que los valores-propios están ordenados (por el valor de varianza en cada eje de  $P^*$ ), y que cada valor-propio tiene asociado un vector-propio, podemos establecer un orden entre las variables transformadas de forma que:

$Y_1$ : Primer eje en  $P^*$  (*primera componente principal*).

La dirección de la máxima varianza de los patrones en  $P$  está determinada por este eje.

$Y_2$ : Segundo eje en  $P^*$  (*segunda componente principal*).

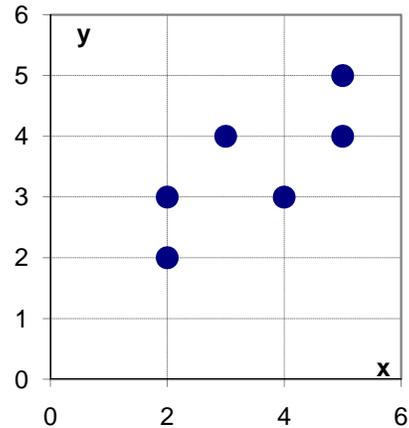
La dirección de la máxima varianza en  $P$  entre todos los ejes ortogonales a  $Y_1$  está determinada por este eje.

### 5.1.6 Ejemplo introductorio

Se tiene una serie de puntos en el espacio bidimensional  $(X_1, X_2)$  que tienen una cierta correlación. Se propone efectuar una transformación en componentes principales.

	a		b		
	$x_1$	$x_2$	$x_1 - \bar{x}_1$	$x_2 - \bar{x}_2$	$a \cdot b$
	2	2	-1.5	-1.5	2.3
	2	3	-1.5	-0.5	0.8
	3	4	-0.5	0.5	-0.3
	4	3	0.5	-0.5	-0.3
	5	4	1.5	0.5	0.8
	5	5	1.5	1.5	2.3
Suma	21	21	0	0	5.6
Media	3.5	3.5	0	0	1.1*
Var	1.9	1.1			

\*(n-1)



$$\text{Cov}(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)$$

Figura 5.2 Serie de puntos  $(X_1, X_2)$

Matriz de varianza-covarianza

$$\begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \text{cov}(x_1, x_2) & \cdots & \text{cov}(x_1, x_p) \\ \text{cov}(x_2, x_1) & \sigma_2^2 & \cdots & \text{cov}(x_2, x_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{cov}(x_p, x_1) & \text{cov}(x_p, x_2) & \cdots & \sigma_p^2 \end{bmatrix}$$

1.- Cálculo de  $\sum_x$

El vector media  $\mu_x$  y la matriz de covarianza  $\sum_x$  se calculan a partir de la muestra original.

$$\mu_x = \begin{bmatrix} 3.5 \\ 3.5 \end{bmatrix} \quad \sum_X = \begin{bmatrix} 1.9 & 1.1 \\ 1.1 & 1.1 \end{bmatrix}$$

2.- Cálculo de los valores-propios de  $\Sigma_x$

Como  $d=2$  habrá dos valores-propios asociados a  $\Sigma_X$ :  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  serán las soluciones a la ecuación (5.12)  $|\Sigma_X - \lambda I| = 0$

$$\left| \begin{pmatrix} 1.9 & 1.1 \\ 1.1 & 1.1 \end{pmatrix} - \lambda \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right| = 0$$

$$\begin{vmatrix} 1.9 - \lambda & 1.1 \\ 1.1 & 1.1 - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

$$\lambda^2 - 3\lambda + 0.88 = 0 \quad \text{las soluciones son: } \lambda_1 = 2.67 \text{ y } \lambda_2 = 0.33$$

Como los valores del primer componente son grandes comparados con los del segundo, la mayor variabilidad se da en la dirección del primer componente principal, lo cual indica que contiene la mayor parte de la información. Más específicamente, como  $\lambda_1 = 2.67$  el primer componente contiene el  $2.67/(2.67 + 0.33) = 89\%$  de la variación total. Con el programa Statistica, se puede resolver este ejemplo. A continuación se muestra la secuencia. Crear la matriz de datos iniciales.

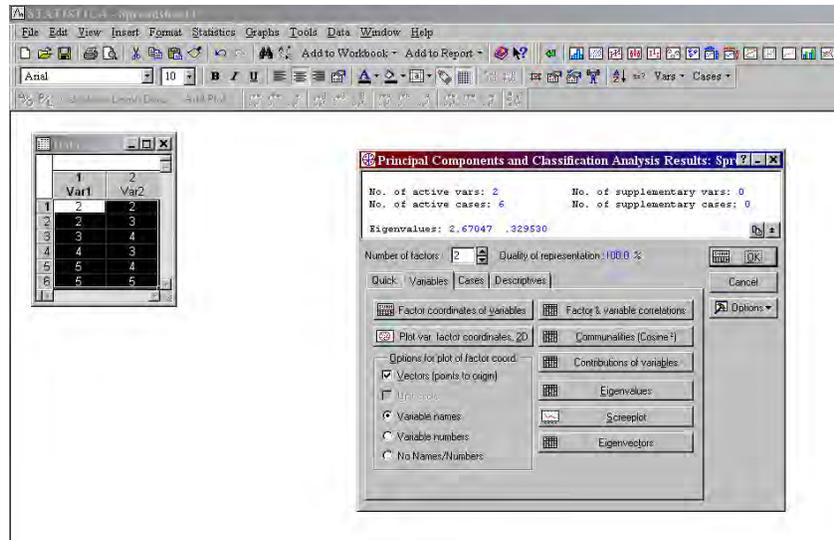


Figura 5.3 Cálculo de los valores-propios - interfaz gráfica de Statística

Value number	Eigenvalue	% Total variance	Cumulative Eigenvalue	Cumulative %
1	2.670470	89.01567	2.67046999107196250	89.0
2	0.329530	10.98433	3.0000000000000000000	100.0

Figura 5.4 Resultado de los valores-propios (eigenvalue)

### 3.- Cálculo de los vectores-propios $\phi_1$ y $\phi_2$ asociados a $\lambda_1$ y $\lambda_2$

El vector-propio  $\phi_1$ , corresponde a  $\lambda_1 = 2.67$  se calcula como sigue. Considerando la ecuación (5.11)  $(\sum_X - \lambda I)W = 0$ , el vector-propio  $\phi_1$  es la solución a  $(\sum_X - \lambda_1 I)\phi_1 = 0$ . Esto es:

$$\left[ \begin{pmatrix} 1.9 & 1.1 \\ 1.1 & 1.1 \end{pmatrix} - 2.67 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{12} \end{pmatrix} = 0$$

$$\left[ \begin{pmatrix} 1.9 & 1.1 \\ 1.1 & 1.1 \end{pmatrix} - 2.67 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{12} \end{pmatrix} = 0$$

$$\left[ \begin{pmatrix} 1.9 - 2.67 & 1.1 \\ 1.1 & 1.1 - 2.67 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{12} \end{pmatrix} = 0$$

$$\left[ \begin{pmatrix} -0.77 & 1.1 \\ 1.1 & -1.57 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{12} \end{pmatrix} = 0$$

formado el sistema.

$$-0.77\phi_{11} + 1.10\phi_{12} = 0$$

$$1.10\phi_{11} - 1.57\phi_{12} = 0$$

Este sistema de ecuaciones tiene una solución no trivial porque el determinante es cero. Tomando cualquiera de ellas se deduce que  $\phi_{11} = 1.43 \phi_{12}$ . Como la matriz  $W$  debe ser ortogonal  $W^T = W^{-1}$  se requiere que los valores-propios estén normalizados, esto es:  $\phi_{11}^2 + \phi_{12}^2 = 1$

De esta forma se forma el sistema de ecuaciones a resolver.

$$\phi_{11} = 1.43 \phi_{12}$$

$$\phi_{11}^2 + \phi_{12}^2 = 1$$

Resolviendo el sistema se tiene que:  $\phi_{11} = 0.82$  y  $\phi_{12} = 0.57$

$$\phi_1 = \begin{bmatrix} 0.82 \\ 0.57 \end{bmatrix}$$

El vector-propio correspondiente a  $\lambda_2 = 0.33$  se calcula de manera similar. Así

$$\phi_2 = \begin{bmatrix} -0.57 \\ 0.82 \end{bmatrix}$$

En Statistica se obtienen los vectores-propios

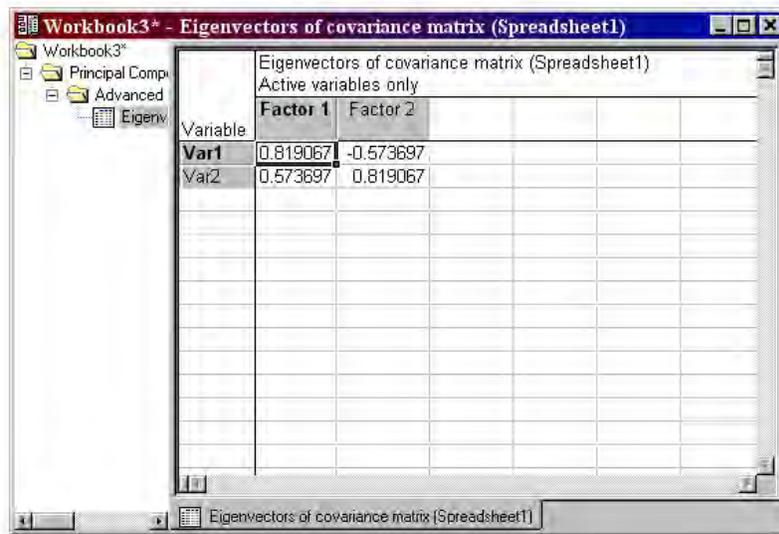


Figura 5.5 Cálculo de los vectores-propios (eigenvector)

Los vectores que se acaban de calcular están normalizados. Esto implica que son de longitud 1. Por lo que se debe verificar que:

$$\phi_{11}^2 + \phi_{12}^2 = 0.82^2 + 0.57^2 = 0.67 + 0.33 = 1$$

$$\phi_{21}^2 + \phi_{22}^2 = -0.57^2 + 0.82^2 = 0.33 + 0.67 = 1$$

Los componentes de un vector-propio indican la dirección de los nuevos ejes respecto al sistema de coordenadas original. La interpretación geométrica del nuevo sistema de coordenadas  $(Y_1, Y_2)$  respecto al original  $(X_1, X_2)$  con base a los vectores-propios  $\phi_1$  y  $\phi_2$  se detalla en la siguiente figura.

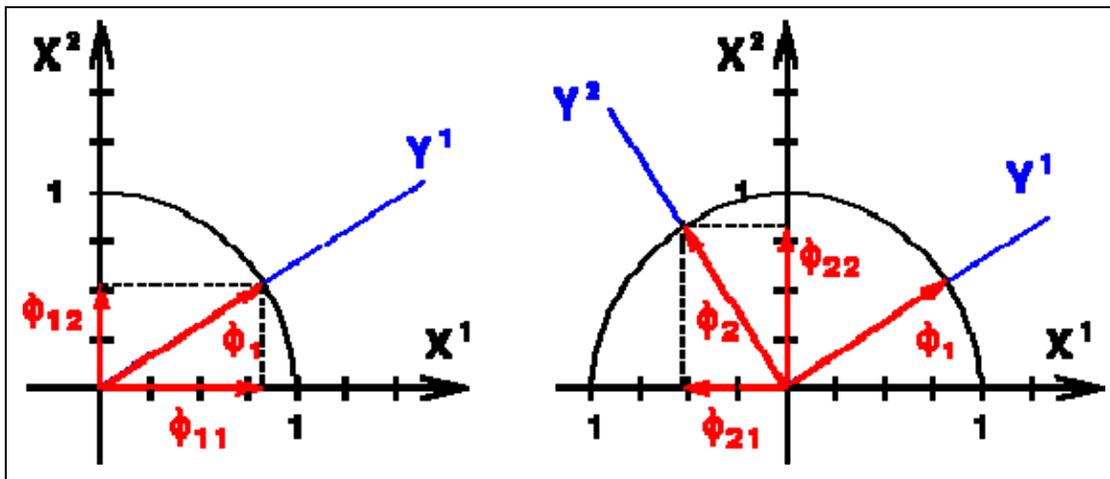


Figura 5.6 Interpretación geométrica de los sistemas de coordenadas

#### 4.- Formar la matriz de transformación W

La matriz de transformación es una matriz cuadrada de 2x2 cuyas columnas son los vectores propios  $\phi_1$  y  $\phi_2$ .

$$W = [\phi_1, \phi_2] = \begin{bmatrix} 0.82 & -0.57 \\ 0.57 & 0.82 \end{bmatrix}$$

Finalmente, se procede a la transformación de coordenadas para expresar los patrones X en las coordenadas del nuevo espacio. La transformación viene dada por la ecuación  $Y = W^T X$ .

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.82 & 0.57 \\ -0.57 & 0.82 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}$$

Si se aplica esta transformación a las coordenadas  $X$ , el resultado se muestra en la siguiente figura.

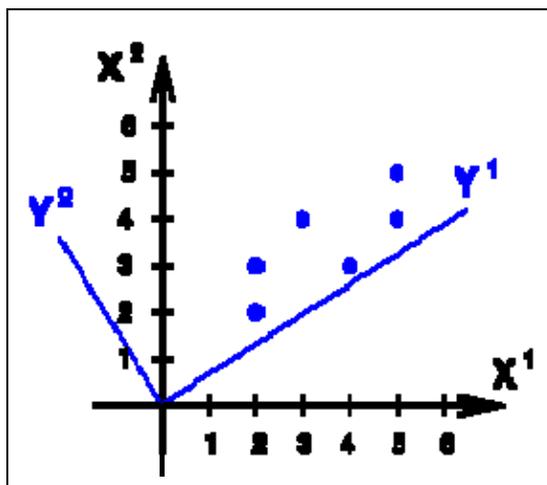


Figura 5.7 Interpretación geométrica de los sistemas de coordenadas

$X_i$	$Y_i$
2, 2	2.78, 0.50
2, 3	3.35, 1.32
3, 4	4.74, 1.57
4, 3	4.99, 0.18
5, 4	6.38, 0.43
5, 5	6.95, 1.25

Tabla 5.1 Resultado de la transformación de coordenadas

## 5.2 Aplicación del ACP a los datos del río Cahuacán

Aquí se continúa con una aplicación del análisis de componentes principales, usando los valores reales del fenómeno en estudio.

En esta parte de aplicación tenemos como objetivo la reducción de la dimensionalidad del fenómeno real; en este caso de las variables involucradas en el fenómeno de meandro. Esto, a partir de los valores de las 15 variables y 9 elementos o curvas, dispuestos en una matriz como anteriormente se explico.

Ahora bien, se tiene una serie de puntos (mediciones o elementos) en el espacio multidimensional de  $d$  variables  $(X_i, Y_i, \dots, Z_i)$ . Se propone efectuar una transformación en componentes principales.

Es importante analizar las matrices de correlación y de varianza-covarianza, ya que se debe seleccionar una para efectuar el análisis. Si utilizamos la primera, tendremos los componentes sobre las *observaciones estandarizadas*; de este modo se evita el problema de escala.

Curva	$L$	$r$	$b$	$M_L$	$B$	$b_1$	$b_2$
C87	844	272.98	35.94	882.87	266.52	17.97	20.15
C88	908.39	151.6	29.77	681.43	272.33	14.89	22.77
C89	828.3	109.45	28.5	430.55	274.46	14.25	15.58
C90	811.5	83.86	36.65	344.98	429.26	18.33	14.32
C91	958.6	94.56	40.65	396.99	430.33	20.33	17.51
C92	984.72	74.12	29.78	440.58	376.75	14.89	17.69
C93	840.1	131.29	31.67	469.71	349.59	15.84	13.8
C94	802.42	94.09	42.53	455.92	290.24	21.27	15.84
C95	776.4	120.96	31.32	431.85	267.73	15.66	18.82

Tabla 5.2 Mediciones en el espacio multidimensional de las variables  $L, r, b, M_L, B, b_1, b_2, a, G_c,$   
Angulo,  $L_c, r/b, A_c, F A, Q_d$ .

Curva	<i>a</i>	<i>Gc</i>	Angulo	<i>Lc</i>	<i>r/b</i>	<i>Ac</i>	<i>F A</i>	<i>Qd</i>
C87	228.4	96.97	30.07	462	7.6	203.1	0.837	125.49
C88	234.68	142.22	40.82	376.3	5.1	203.5	0.839	125.69
C89	244.64	185.91	88.76	355.14	3.8	203.8	0.84	125.89
C90	396.62	176.81	82.85	258.79	2.3	204.1	0.841	126.08
C91	392.5	187.43	115.3	309.33	2.3	204.4	0.842	126.28
C92	344.17	168.99	101.2	218.61	2.5	204.7	0.844	126.48
C93	319.96	168.79	94.97	386.78	4.1	205.1	0.845	126.67
C94	253.14	180.64	93.68	296.64	2.2	205.4	0.846	126.87
C95	233.26	129.57	88.04	273.55	3.9	205.7	0.848	127.07

Continuación de la tabla anterior.

## 5.2.1 Cálculo de los estadísticos y matrices

### 5.2.1.1 Estadísticos descriptivos

	Media	Desv Sta	Varianza
L	861.6	72.4	5238.8
r	125.9	60.3	3632.5
b	34.1	5.3	25.8
ML	503.9	169.5	28734.0
B	328.6	69.3	4796.1
b1	17.0	2.5	6.4
b2	17.4	2.9	8.3
a	294.1	69.9	4880.3
Gc	159.7	30.6	938.1
Angulo	81.7	28.0	781.7
Lc	326.3	75.4	5688.7
r/B	3.8	1.8	3.1
Ac	204.4	0.9	0.8
F A	0.8	0.9	0.0
Qd	126.3	0.5	0.3

Tabla 5.3 Estadísticos de las mediciones

$$\mu_{(x_i, y_i)} = \begin{bmatrix} 861.6 \\ 125.9 \\ 34.1 \\ 503.9 \\ 328.6 \\ 17.0 \\ 17.4 \\ 294.1 \\ 159.7 \\ 81.7 \\ 326.3 \\ 3.8 \\ 204.4 \\ 0.8 \\ 126.3 \end{bmatrix}$$

Matriz de Correlación [ $\text{Corr}_{(X,Y,\dots)}$ ]

	<i>L</i>	<i>r</i>	<i>b</i>	<i>M<sub>L</sub></i>	<i>B</i>	<i>b1</i>	<i>b2</i>	<i>a</i>	<i>Gc</i>	<i>Angulo</i>	<i>Lc</i>	<i>r/b</i>	<i>Ac</i>	<i>FA</i>	<i>Qd</i>
<i>L</i>	1.000														
<i>r</i>	-0.171	1.000													
<i>b</i>	-0.096	-0.043	1.000												
<i>M<sub>L</sub></i>	0.037	<b>0.936</b>	-0.089	1.000											
<i>B</i>	0.449	-0.538	0.335	-0.575	1.000										
<i>b1</i>	-0.096	-0.043	1.000	-0.089	0.335	1.000									
<i>b2</i>	0.307	0.508	-0.211	0.686	-0.476	-0.211	1.000								
<i>a</i>	0.436	-0.553	0.304	-0.595	0.999	0.304	-0.505	1.000							
<i>Gc</i>	0.199	<b>-0.856</b>	0.190	<b>-0.824</b>	0.570	0.190	-0.663	0.586	1.000						
<i>Angulo</i>	0.174	<b>-0.832</b>	0.205	<b>-0.892</b>	0.583	0.205	-0.660	0.597	0.796	1.000					
<i>Lc</i>	-0.174	<b>0.859</b>	-0.064	0.789	-0.500	-0.064	0.297	-0.505	-0.527	-0.680	1.000				
<i>r/b</i>	-0.152	0.965	-0.294	<b>0.922</b>	-0.626	-0.294	0.558	-0.633	<b>-0.857</b>	<b>-0.860</b>	<b>0.859</b>	1.000			
<i>Ac</i>	-0.247	-0.565	0.173	-0.621	0.103	0.173	-0.416	0.113	0.303	0.688	-0.587	-0.589	1.000		
<i>FA</i>	-0.247	-0.565	0.173	-0.621	0.103	0.173	-0.416	0.113	0.303	0.688	-0.587	-0.589	1.000	1.000	
<i>Qd</i>	-0.247	-0.565	0.173	-0.621	0.103	0.173	-0.416	0.113	0.303	0.688	-0.587	-0.589	1.000	1.000	1.000

Tabla 5.4 Matriz de correlación

Matriz de varianza-covarianza [ $\text{Cov}_{(X,Y,\dots)}$ ] (%)

	<i>L</i>	<i>r</i>	<i>b</i>	<i>M<sub>L</sub></i>	<i>B</i>	<i>b1</i>	<i>b2</i>	<i>a</i>	<i>Gc</i>	<i>Angulo</i>	<i>Lc</i>	<i>r/b</i>	<i>Ac</i>	<i>FA</i>	<i>Qd</i>
<i>L</i>	5238.84														
<i>r</i>	-745.36	3632.46													
<i>b</i>	-35.33	-13.11	25.78												
<i>M<sub>L</sub></i>	448.00	9564.52	-76.71	28734.04											
<i>B</i>	2252.48	-2245.67	117.81	-6744.76	4796.06										
<i>b1</i>	-17.66	-6.55	12.89	-38.36	58.90	6.45									
<i>b2</i>	64.15	88.36	-3.09	335.68	-95.18	-1.54	8.34								
<i>a</i>	2206.00	-2327.48	108.00	-7042.08	4832.33	54.00	-101.98	4880.31							
<i>Gc</i>	440.33	-1580.55	29.60	-4277.03	1208.91	14.80	-58.67	1252.79	938.06						
<i>Angulo</i>	352.51	-1401.14	29.05	-4228.87	1128.08	14.53	-53.29	1166.84	681.26	781.68					
<i>Lc</i>	-948.35	3905.74	-24.59	10088.21	-2610.98	-12.29	64.70	-2663.38	-1217.33	-1434.57	5688.74				
<i>r/b</i>	-19.39	102.56	-2.64	275.70	-76.42	-1.32	2.84	-77.95	-46.31	-42.41	114.23	3.11			
<i>Ac</i>	-15.62	-29.79	0.77	-92.02	6.24	0.38	-1.05	6.90	8.12	16.80	-38.68	-0.91	0.76		
<i>FA</i>	-0.06	-0.12	0.00	-0.38	0.03	0.00	0.00	0.03	0.03	0.07	-0.16	0.00	0.00	0.00	
<i>Qd</i>	-9.65	-18.40	0.47	-56.85	3.85	0.24	-0.65	4.26	5.02	10.38	-23.90	-0.56	0.47	0.00	0.29

Tabla 5.5 Matriz de covarianza

Por las fuertes variaciones ( $M_L$ ,  $B$ ,  $a$  y  $\text{Angulo}$ ) en la matriz  $[\text{Cov}_{(X,Y,\dots)}]$ , se utilizará la matriz de correlación. Es decir, esto se presenta en primer lugar por las diferentes escalas de dimensionales o medición en los datos, y en segundo lugar por las significativas diferencias en las desviaciones estándar de cada una de las variables medidas.

### 5.2.2 Cálculo de los valores-propios de la matriz de correlación

Con quince variables ( $d=15$ ), habrá quince valores-propios asociados  $[\text{Corr}_{(X,Y,\dots)}]: \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{15}$  serán las soluciones a la ecuación (5.14).

$$\left| [\text{Corr}_{(X,Y,\dots)}] - \lambda I \right| = \begin{bmatrix} 1-\lambda & -0.171 & \dots & -0.247 \\ -0.171 & 1-\lambda & \dots & -0.565 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -0.247 & -0.565 & \dots & 1-\lambda \end{bmatrix} = 0$$

Resolviendo el determinante de la matriz se tiene una ecuación de grado 15 en  $\lambda$ :

$$a\lambda^{15} + b\lambda^{14} + c\lambda^{13} + \dots + d\lambda^2 + e\lambda + f = 0$$

cuya solución serán los valores-propios:

$$[\lambda_i] = \begin{bmatrix} \lambda_1 = 7.897 & \lambda_2 = 2.678 & \lambda_3 = 2.047 & \lambda_4 = 1.100 & \lambda_5 = 0.630 \\ \lambda_6 = 0.464 & \lambda_7 = 0.102 & \lambda_8 = 0.083 & \lambda_9 \approx 0 & \lambda_{10} \approx 0 \\ \lambda_{11} \approx 0 & \lambda_{12} \approx 0 & \lambda_{13} \approx 0 & \lambda_{14} \approx 0 & \lambda_{15} \approx 0 \end{bmatrix}$$

Los valores-propios representan la varianza de los elementos sobre el eje correspondiente. En nuestro ejemplo se tiene una varianza de 7.90 sobre el primer eje, 2.68 sobre el segundo, etc. Esta información no es fácil de interpretar; por lo que se propone expresar cada varianza (cada valor-propio), en un valor relativo (porcentaje) de la varianza total (suma de los valores-propios). En nuestro caso con 15 variables, los

porcentajes de variación explicados por cada uno de los ejes principales se calculan como sigue:

$$\frac{7.90}{15} \cdot 100 = 52.6\% \quad \frac{2.68}{15} \cdot 100 = 17.9\% \quad \text{etc...}$$

Los valores-propios de  $\lambda_9, \lambda_{10}, \dots, \lambda_{15} \approx 0$  como se ve en la Figura 5.8.

Cabe recordar que los componentes por construcción algebraica no están correlacionados y por lo tanto, la parte de información explicada por dos ejes es igual a la simple suma de la parte que explicada cada uno de ellos.

$$\begin{aligned} 52.6 + 17.9 &= 70.5\% && \text{por el plano definido por los ejes 1 y 2} \\ 13.6 + 7.3 &= 20.9\% && \text{por el plano definido por los ejes 3 y 4} \\ 52.6 + 13.6 &= 66.2\% && \text{por el plano definido por los ejes 1 y 3} \\ 70.5 + 20.9 &= 91.4\% && \text{por los planos definidos por 1-2 y 3-4 etc...} \end{aligned}$$

Es necesario examinar cada uno de los ejes hasta obtener la información que se requiera o se juzgue *suficiente* de cada uno de ellos. De esta forma se tiene que un solo eje explica un poco más de la mitad de la información inicial (52.6%). Dos ejes explican los 3/4 de esta información (70.5%), mientras que tres ejes explican más de 5/8 (84.1%) y cuatro el (91.5%). Estos resultados se pueden ver la Tabla 5.6. Según el grado de exigencia, normalmente se retienen los ejes hasta que un 80% de la variación sea explicada. Aunque también existen algunos criterios para ello.

Valor propio	% Total de varianza	Acumulado valor propio	% Acumulado total
<b>7.897</b>	52.644	7.897	52.644
<b>2.678</b>	17.853	10.574	70.497
<b>2.047</b>	13.644	12.621	84.141
<b>1.1</b>	7.336	13.721	91.476
<b>0.63</b>	4.197	14.351	95.673
<b>0.464</b>	3.092	14.815	98.765
<b>0.102</b>	0.681	14.917	99.446
<b>0.083</b>	0.554	15	100

Tabla 5.6 Valores-propios y porcentaje de la varianza

También es necesario remarcar que dado el orden decreciente de los valores-propios, un mismo porcentaje puede ser obtenido por diferentes ejes. Por ejemplo, un porcentaje mayor al 21% puede ser obtenido en este caso por los ejes 2-5 (17.853 + 4.197) o por los ejes 3-4 (13.644 + 7.336). En general se recomienda conservar los ejes con un valor-propio entre  $\lambda \geq 0.8$ , en este caso los cuatro primeros ejes. En ocasiones se representan estos porcentajes en gráficas como la que se muestra en la Figura 5.8, también llamada gráfico de sedimentación ó gráfico en ladera.

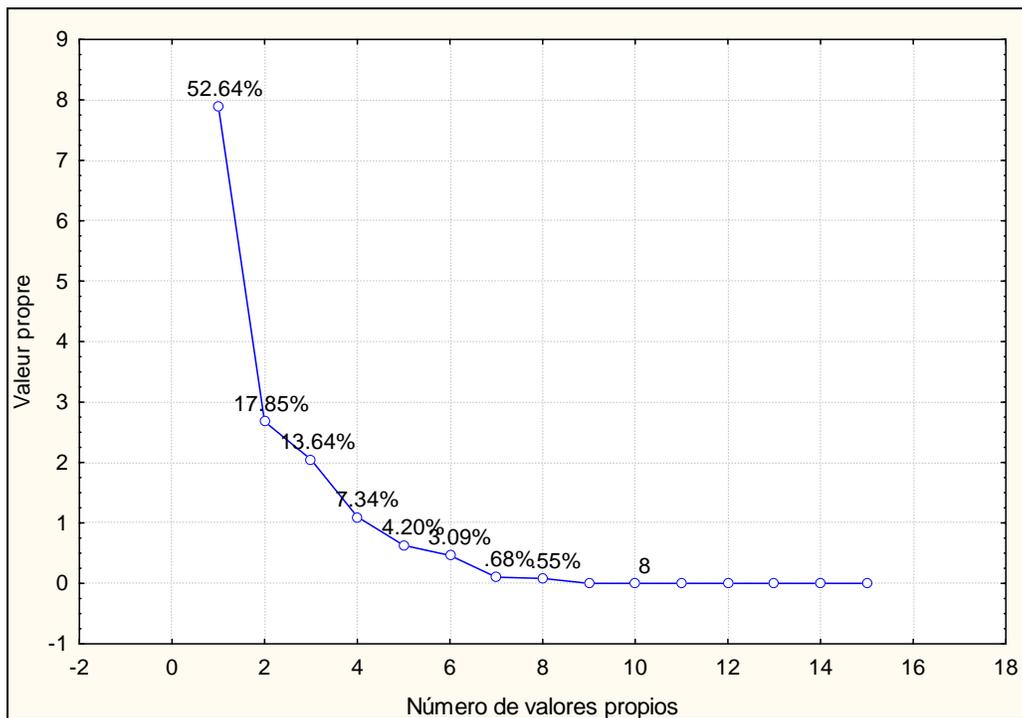


Figura 5.8 Valores-propios de la matriz de correlación

En este gráfico se observan el porcentaje de la varianza que explica cada uno de los 15 valores propios obtenidos.

La figura se lee como sigue: en el eje de las abscisas se tiene el número de valor propio, mientras que en las ordenadas los porcentajes de la varianza.

### 5.2.3 Cálculo de los vectores-propios $\phi_i$

Considerando la ecuación (5.13)  $([Corr_{(X,Y,...)}] - \lambda I)W = 0$ , el vector-propio  $\phi_i$  es la solución a  $([Corr_{(X,Y,...)}] - \lambda_i I)\phi_i = 0$ . Esto quiere decir que existe una solución asociada a cada valor-propio. Así se obtienen los vectores-propios para cada valor asociados de  $\lambda_i$ :

$$\begin{bmatrix} 1-\lambda & -0.171 & \cdots & -0.247 \\ -0.171 & 1-\lambda & \cdots & -0.565 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -0.247 & -0.565 & \cdots & 1-\lambda \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \phi_{1,1} \\ \phi_{1,2} \\ \vdots \\ \phi_{1,d} \end{bmatrix} = 0$$

$$\phi_1[\lambda_1] = \begin{bmatrix} -0.026 \\ 0.325 \\ -0.105 \\ 0.336 \\ -0.231 \\ -0.105 \\ 0.242 \\ -0.235 \\ -0.286 \\ -0.334 \\ 0.289 \\ 0.341 \\ -0.257 \\ -0.257 \\ -0.257 \end{bmatrix} \quad \phi_2[\lambda_2] = \begin{bmatrix} 0.403 \\ -0.035 \\ 0.105 \\ 0.009 \\ 0.406 \\ 0.105 \\ 0.002 \\ 0.399 \\ 0.181 \\ 0.000 \\ 0.012 \\ -0.067 \\ -0.388 \\ -0.388 \\ -0.388 \end{bmatrix} \quad \phi_3[\lambda_3] = \begin{bmatrix} 0.229 \\ -0.205 \\ -0.644 \\ -0.130 \\ -0.055 \\ -0.644 \\ 0.094 \\ -0.035 \\ 0.079 \\ 0.051 \\ -0.172 \\ -0.034 \\ -0.050 \\ -0.050 \\ -0.050 \end{bmatrix} \quad \text{etc...}$$

## 5.2.4 Conformación de la matriz de transformación W

Estos vectores-propios  $\phi_i$  forman la matriz W.

	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_3$	$\phi_4$	$\phi_5$	$\phi_6$	$\phi_7$	$\phi_8$
<b>L</b>	-0.026	<b>0.403</b>	0.229	-0.546	0.078	-0.492	0.298	-0.052
<b>r</b>	<b>0.325</b>	-0.035	-0.205	0.006	0.326	-0.071	0.106	0.278
<b>b</b>	-0.105	0.105	-0.644	-0.123	-0.173	-0.020	0.032	0.049
<b>M<sub>L</sub></b>	<b>0.336</b>	0.009	-0.130	-0.179	0.100	-0.137	0.398	-0.313
<b>B</b>	-0.231	<b>0.406</b>	-0.055	-0.036	0.403	0.208	-0.202	-0.124
<b>b1</b>	-0.105	0.105	-0.644	-0.123	-0.173	-0.020	0.032	0.049
<b>b2</b>	0.242	0.002	0.094	-0.619	-0.292	0.120	-0.614	0.063
<b>a</b>	-0.235	0.399	-0.035	-0.006	0.418	0.202	-0.176	-0.127
<b>Gc</b>	-0.286	0.181	0.079	0.271	-0.383	-0.392	-0.074	-0.290
<b>Angulo</b>	<b>-0.334</b>	0.000	0.051	0.007	0.085	-0.377	-0.074	0.734
<b>Lc</b>	0.289	0.012	-0.172	0.277	0.185	-0.553	-0.523	-0.233
<b>r/b</b>	<b>0.341</b>	-0.067	-0.034	0.043	0.306	-0.089	-0.048	0.157
<b>Ac</b>	-0.257	-0.388	-0.050	-0.186	0.195	-0.092	-0.037	-0.163
<b>FA</b>	-0.257	-0.388	-0.050	-0.186	0.195	-0.092	-0.037	-0.163
<b>Qd</b>	-0.257	-0.388	-0.050	-0.186	0.195	-0.092	-0.037	-0.163

Tabla 5.7 Vectores propios de la matriz de correlación

Los vectores que se acaban de calcular están normalizados. Esto implica que son de longitud 1, por lo que se debe verificar que:

$$\phi_{1,1}^2 + \phi_{1,2}^2 + \phi_{1,3}^2 + \phi_{1,4}^2 + \phi_{1,5}^2 + \phi_{1,6}^2 + \phi_{1,7}^2 + \phi_{1,8}^2 + \phi_{1,9}^2 + \phi_{1,10}^2 = 1$$

$$(-0.0264)^2 + (0.3250)^2 + (-0.1046)^2 + (0.3358)^2 + (-0.2313)^2 + (-0.1046)^2 + (0.2418)^2 + (-0.2354)^2 + (-0.2863)^2 + (-0.3336)^2 + (0.2889)^2 + (0.3411)^2 + (-0.2573)^2 + (-0.2573)^2 + (-0.2573)^2 = 1$$

La matriz de transformación W muestra la contribución de cada una de las variables en cada uno de los ejes de los componentes principales. Es decir, que para un cierto eje o componente seleccionado, las variables que tienen los coeficientes mayores (en valor absoluto) son aquellas que contribuyen mayormente a la formación de ese eje (componente principal). Para nuestro ejemplo, las variables r, M<sub>L</sub>, Angulo, y r/b son las que más contribuyen a la formación del primer componente principal. Para el caso del segundo componente principal, las variables B y L son las que más contribuyen a la

formación del segundo componente principal. En la práctica no se utilizan mucho los vectores-propios como tales, normalmente se obtiene mayor información si se analiza la correlación de las variables con cada uno de los ejes o componentes principales. Esta correlación se lleva a cabo con el procedimiento tradicional de correlacionar dos variables cuantitativas. Por ejemplo, se calcula el coeficiente de correlación entre la variable L y el primer componente principal  $\Omega_1$ . Para representar estas correlaciones se utiliza el llamado *círculo de correlaciones*, en donde de manera gráfica, se determinan las variables que están correlacionadas entre si y aquellas que no lo están. La interpretación detallada de un *círculo de correlaciones* se analizará más adelante. Ahora es necesario calcular cada uno de los componentes principales  $\Omega_i$ .

Para obtener los componentes principales, es necesario recordar que los vectores-propios contienen los coeficientes que afectan a cada una de las variables iniciales y esto permite el cálculo de los componentes principales. Por ejemplo, el primer componente principal  $\Omega_1$  se obtiene para la i-ésima medición como:

$$\Omega_{1,i} = -0.026 L_i + 0.325 r_i - 0.105 b_i + 0.336 ML_i + \dots - 0.257 Qd_i$$

Es importante recordar que los valores de cada variable deben introducirse a esta ecuación, dependiendo de la matriz que se haya seleccionado para encontrar los valores-propios. Esto quiere decir que si se utilizó la matriz de varianzas-covarianzas, los datos originales deberán ser transformados como valores centrados (restando a cada valor su media); mientras que si se utilizó la matriz de correlación los datos deberán ser centrados-estandarizados (restando su media y dividiendo entre su desviación estándar).

Transformación a valores centrados:  $X'_i = X_i - \mu_x$

Transformación a valores centrados-estandarizados:  $X''_i = (X_i - \mu_x) / \sigma_x$

Si las  $n$  variables tienen medidas incompatibles (kg, m, s, ...) las varianzas no son comparables. Entonces se recurre a la matriz de correlación. La correlación es la covarianza medida para valores estandarizados. Por eso la correlación de una variable consigo misma da uno; es la varianza de cualquier variable estandarizada. Para nuestro ejemplo, aplica el segundo caso.

Empleando la segunda expresión se obtiene la matriz transformada de datos centrados-estandarizados que será utilizada también para el cálculo del círculo de correlaciones.

	<i>L</i>	<i>r</i>	<i>b</i>	<i>M<sub>L</sub></i>	<i>B</i>	<i>b1</i>	<i>b2</i>
<b>C87</b>	-0.24*	2.44	0.36	2.23	-0.89	0.36	0.95
<b>C88</b>	0.64	0.42	-0.85	1.04	-0.81	-0.85	1.86
<b>C89</b>	-0.45	-0.27	-1.1	-0.43	-0.78	-1.1	-0.62
<b>C90</b>	-0.69	-0.69	0.5	-0.93	1.45	0.5	-1.06
<b>C91</b>	1.33	-0.51	1.29	-0.63	1.46	1.29	0.04
<b>C92</b>	1.7	-0.85	-0.84	-0.37	0.69	-0.84	0.1
<b>C93</b>	-0.29	0.08	-0.47	-0.2	0.3	-0.47	-1.24
<b>C94</b>	-0.81	-0.52	1.66	-0.28	-0.55	1.66	-0.53
<b>C95</b>	-1.17	-0.08	-0.54	-0.42	-0.87	-0.54	0.49

	<i>a</i>	<i>Gc</i>	<i>Angulo</i>	<i>Lc</i>	<i>r/b</i>	<i>Ac</i>	<i>FA</i>
<b>C87</b>	-0.94	-2.04	-1.84	1.79	2.17	-1.46	-1.46
<b>C88</b>	-0.85	-0.57	-1.46	0.66	0.75	-1.09	-1.09
<b>C89</b>	-0.70	0.85	0.25	0.38	0.04	-0.73	-0.73
<b>C90</b>	1.46	0.55	0.03	-0.89	-0.83	-0.36	-0.36
<b>C91</b>	1.40	0.90	1.19	-0.22	-0.81	0.00	0.00
<b>C92</b>	0.71	0.30	0.69	-1.42	-0.72	0.36	0.36
<b>C93</b>	0.36	0.29	0.47	0.80	0.21	0.73	0.73
<b>C94</b>	-0.58	0.68	0.42	-0.39	-0.87	1.09	1.09
<b>C95</b>	-0.87	-0.98	0.22	-0.70	0.05	1.46	1.46

Tabla 5.8 Matriz de datos originales transformada (datos centrados-estandarizados)

$$* \frac{843.97 - 861.59}{\sqrt{5238.84}} = -0.24$$

Es interesante mencionar que si se obtiene la matriz de varianza-covarianza y la matriz de correlación de estos datos centrados-reducidos, se obtendrá la misma matriz de correlación que se encontró para los datos originales. Esto es:

$$[\text{Corr}_{(X,Y,\dots)}] = [\text{Corr}_{(X'',Y'',\dots)}] = [\text{Cov}_{(X'',Y'',\dots)}]$$

### 5.2.5 Obtención de la matriz de componentes principales $\Omega_i$

A continuación con los datos transformados en el punto anterior, se procede a calcular el total de los componentes principales  $\Omega_i$ , de la siguiente manera.

Para el primer término del primer componente principal se tiene:

$$*^1 \Omega_{1,1} = -0.026(-0.24)_1 + 0.325(2.44)_1 - 0.105(0.36)_1 + \dots - 0.257(1.46)_1 = 5.73$$

Para el segundo término del primer componente principal, el cálculo será:

$$*^2 \Omega_{1,2} = -0.026(0.65)_2 + 0.325(0.43)_2 - 0.105(-0.85)_2 + \dots - 0.257(1.05)_2 = 3.44$$

De esta misma manera se van calculando cada uno de los términos de la matriz de componentes principales (con la matriz de transformación y con los vectores propios).

	$\Omega_1$	$\Omega_2$	$\Omega_3$	$\Omega_4$	$\Omega_5$	$\Omega_6$	$\Omega_7$	$\Omega_8$
<b>C87</b>	<b>5.73<sup>*1</sup></b>	0.38	-1.56	-0.06	0.61	0.08	0.26	0.19
<b>C88</b>	<b>3.44<sup>*2</sup></b>	0.54	1.18	-0.79	-0.83	0.07	-0.34	-0.41
<b>C89</b>	0.57	0.00	1.56	1.77	-0.86	-0.48	0.05	0.34
<b>C90</b>	-2.00	1.59	-0.49	1.08	0.11	1.41	-0.02	-0.12
<b>C91</b>	-2.35	2.20	-1.10	-0.87	0.06	-0.60	-0.39	0.29
<b>C92</b>	-1.83	0.76	1.93	-1.30	0.33	-0.01	0.55	0.00
<b>C93</b>	-0.89	-0.76	0.20	0.98	1.36	-0.78	-0.12	-0.35
<b>C94</b>	-2.05	-1.52	-2.17	-0.13	-1.08	-0.32	0.28	-0.21
<b>C95</b>	-0.60	-3.19	0.46	-0.69	0.30	0.64	-0.28	0.28

Tabla 5.9 Matriz de componentes principales  $\Omega_i$

Si se obtienen los estadísticos básicos de esta matriz se obtendrá media cero y varianzas igual a los valores-propios. También es interesante comprobar las consideraciones comentadas anteriormente en el sentido de que los nuevos ejes no están correlacionados y que la matriz de varianza-covarianza (ecuación 5.10) contiene a los valores-propios.

Para ratificar lo anterior, a continuación se presentan ambas matrices para su análisis.

	$\Omega_1$	$\Omega_2$	$\Omega_3$	$\Omega_4$	$\Omega_5$	$\Omega_6$	$\Omega_7$	$\Omega_8$
$\Omega_1$	1.00							
$\Omega_2$	0.00	1.00						
$\Omega_3$	0.00	0.00	1.00					
$\Omega_4$	0.00	0.00	0.00	1.00				
$\Omega_5$	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00			
$\Omega_6$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00		
$\Omega_7$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	
$\Omega_8$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Tabla 5.10 Matriz de Correlación [ $Corr_{(\Omega_i)}$ ]

	$\Omega_1$	$\Omega_2$	$\Omega_3$	$\Omega_4$	$\Omega_5$	$\Omega_6$	$\Omega_7$	$\Omega_8$
$\Omega_1$	7.897							
$\Omega_2$	0.00	2.679						
$\Omega_3$	0.00	0.00	2.047					
$\Omega_4$	0.00	0.00	0.00	1.100				
$\Omega_5$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.630			
$\Omega_6$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.464		
$\Omega_7$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.102	
$\Omega_8$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.083

Tabla 5.11 Matriz de Covarianza [ $Cov_{(\Omega_i)}$ ]

De estos resultados, se concluye que no existe correlación entre las variables transformadas ( $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_d$ ), mientras que las variables iniciales ( $X_i, Y_i, \dots, Z_i$ ), están fuertemente correlacionadas (ver matriz de correlación inicial). Asimismo, la transformación aplicada ha tenido el efecto de maximizar la varianza. La varianza en el

primer eje principal  $\Omega_1$  es 7.897; mayor que en  $X_1''$ , 1.0. Además, no existe ningún otro eje en el que haya una varianza mayor.

En estadística, una matriz de correlación reagrupa las correlaciones de algunas variables entre ellas, los coeficientes indican la influencia que unas variables tienen sobre las otras.

Una matriz de covarianza es un método matemático de evaluación del sentido de variación de dos variables y que permite calificar sus independencias.

### **5.2.6 Relación de las mediciones con los componentes principales**

De la misma forma como se realizó para los vectores-propios y las variables; ahora también es posible conocer la aportación de cada elemento, a la formación de cada componente principal. Es decir, cuál de los elementos contribuye más en la varianza de cada uno de los ejes o componentes principales. Para poder identificar esto hacemos uso de la interpretación de los componentes principales en un plano.

Si se grafica en un plano coordenado, por ejemplo, los dos primeros componentes; se tiene una representación de la correlación de cada elemento con  $\Omega_1$  y  $\Omega_2$ .

Por ejemplo, si observamos el primer componente  $\Omega_1$  (Figura 5.9, eje horizontal), podemos concluir que los elementos que tienen el valor más grande (en valor absoluto) son los que mayormente contribuyen a la formación del primer componente por encontrarse más cerca de este eje; estos son los datos de las curvas C93, C89, C88 y C87.

Es interesante observar en la Figura 5.9, la posición de los puntos mencionados (de mayor contribución a la varianza), con respecto al primer componente principal.

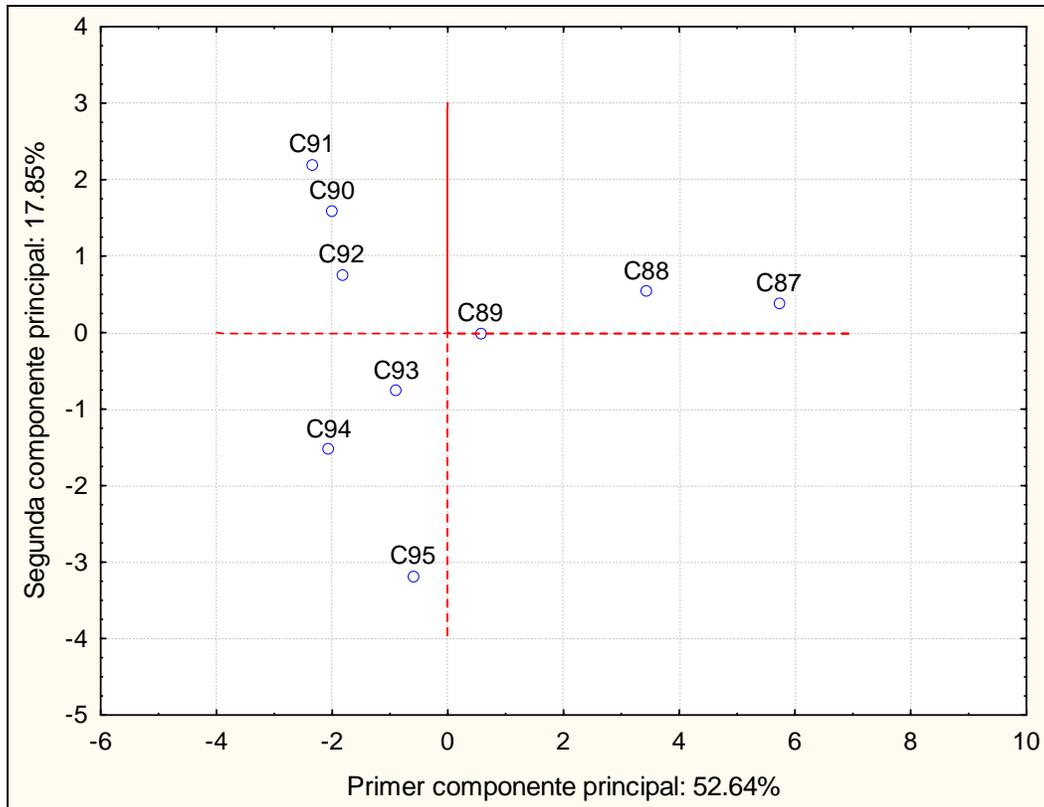


Figura 5.9 Relación entre los componentes principales 1-2 y los elementos

Esta figura representa de manera gráfica, la contribución de cada uno de los elementos en la formación de los componentes principales 1 y 2. En total, este plano 1-2 representa el 70.5 % de la variación total de la muestra. De la misma forma, se puede graficar la posición de los puntos con los componentes principales 1 y 3; esto explicaría el 66.28 % de la variación total de la muestra (Figura 5.10). En el apartado siguiente, se analizará con detalle la interpretación de un plano de componentes principales y de un *círculo de correlaciones*.

La contribución que tiene cada uno de los individuos sobre la componente principal, se lee; con la aproximación de éste a un eje o a ambos. Por ejemplo, de la figura anterior podemos decir que el individuo que mayormente contribuye es el C89, ya que está prácticamente sobre el eje del primer componente y muy próximo al segundo.

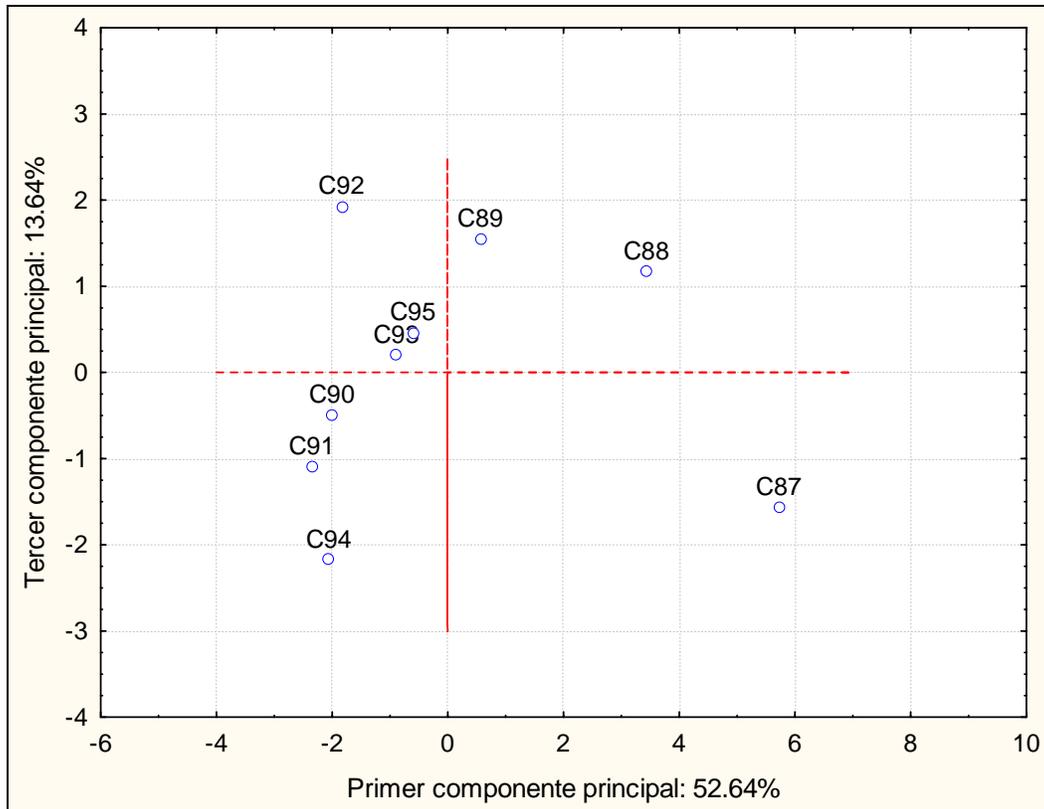


Figura 5.10 Relación entre los componentes principales 1-3 y los elementos

En este caso se tiene que el individuo C93 es el que es el que se aproxima más al eje más representativo, así como al segundo eje o componente.

### 5.2.7 Relación de las variables con los componentes principales

Como se mencionó en el apartado 5.2.4, las variables  $r$ ,  $M_L$ , Angulo, y  $r/b$ , son las que más contribuyen a la formación del primer componente principal; B y L al segundo. Sin embargo, es interesante representar esta contribución de cada una de las variables, en una grafica similar a la que representa la contribución de cada elemento, con los componentes principales. A esta gráfica se le llama *círculo de correlaciones* y representa la correlación entre los componentes principales y cada una de las variables. El análisis de estas correlaciones nos permite determinar, entre otras cosas, cómo están estructuradas las variables. El cálculo e interpretación de las correlaciones, se lleva a cabo de la manera tradicional: por lo que el coeficiente de correlación se calcula como el cociente de la

covarianza, entre el producto de las desviaciones estándar. Por facilidad se recomienda formar la matriz de varianzas-covarianzas.

Como ejemplo tomaremos la matriz de varianzas-covarianzas  $[Cov_{(X''_1, \Omega_1)}]$  estimada entre la primera variable (L) y el primer componente principal esto es:

$$[Cov_{(X''_1, \Omega_1)}] = \begin{bmatrix} 1.0 & -0.209 \\ -0.209 & 7.897 \end{bmatrix}$$

De esta forma, el coeficiente de correlación es:

$$\rho(X''_1, \Omega_1) = \frac{Cov_{(X''_1, \Omega_1)}}{\sigma(X''_1) \sigma(\Omega_1)} = \frac{-0.209}{\sqrt{1.0} \sqrt{7.897}} = -0.074^*$$

De una forma similar se calculan cada uno de los términos de la matriz de correlación.

	$\Omega_1$	$\Omega_2$	$\Omega_3$	$\Omega_4$	$\Omega_5$	$\Omega_6$	$\Omega_7$	$\Omega_8$
<b>L</b>	-0.074	<b>0.659</b>	0.327	-0.573	0.062	-0.335	0.095	-0.015
<b>r</b>	<b>0.913</b>	-0.057	-0.293	0.007	0.259	-0.048	0.034	0.080
<b>b</b>	-0.294	0.171	-0.921	-0.129	-0.137	-0.014	0.010	0.014
<b>M<sub>L</sub></b>	<b>0.944</b>	0.015	-0.186	-0.188	0.079	-0.094	0.127	-0.090
<b>B</b>	-0.650	<b>0.665</b>	-0.078	-0.038	0.320	0.142	-0.064	-0.036
<b>b1</b>	-0.294	0.171	-0.921	-0.129	-0.137	-0.014	0.010	0.014
<b>b2</b>	0.679	0.003	0.135	-0.649	-0.232	0.082	-0.196	0.018
<b>a</b>	-0.662	<b>0.653</b>	-0.050	-0.006	0.332	0.138	-0.056	-0.037
<b>Gc</b>	-0.804	0.297	0.113	0.285	-0.304	-0.267	-0.024	-0.084
<b>Angulo</b>	<b>-0.937</b>	0.001	0.073	0.007	0.067	-0.257	-0.024	0.212
<b>Lc</b>	0.812	0.019	-0.246	0.290	0.147	-0.377	-0.167	-0.067
<b>r/b</b>	<b>0.959</b>	-0.110	-0.048	0.045	0.242	-0.060	-0.015	0.045
<b>Ac</b>	-0.723	-0.636	-0.071	-0.195	0.155	-0.063	-0.012	-0.047
<b>FA</b>	-0.723	-0.636	-0.071	-0.195	0.155	-0.063	-0.012	-0.047
<b>Qd</b>	-0.723	-0.636	-0.071	-0.195	0.155	-0.063	-0.012	-0.047

Tabla 5.12 Matriz de Correlación  $\rho(X''_1, \Omega_1) = [Corr_{(X''_1, \Omega_1)}]$

Una vez que se obtiene esta matriz de correlación se representa gráficamente como un círculo unitario, en donde se localizan las variables en un plano formado por los componentes principales que se desean observar. La Figura 5.11 muestra el círculo de correlaciones entre los componentes principales  $\Omega_1 - \Omega_2$  y las variables estudiadas. En el siguiente apartado se estudiará a detalle la interpretación de esta figura.

Es importante señalar que por tratarse de un planteamiento de correlación lineal, es común elevar al cuadrado el coeficiente de correlación, tal y como se hace en un análisis de regresión lineal. Esta operación, se realiza con el objeto de conocer la parte de la variable, que explica la variación sobre el eje. Para que una variable se considere bien representada en un plano tendrá que tener un coeficiente alto en los componentes principales que forman el plano. En general, para obtener la parte de variación de una variable explicada por  $k$  ejes; estará dada por la suma de los cuadrados de los coeficientes de esos  $k$  ejes.

Por ejemplo, 93% ( $0.5227 + 0.4042 = 0.9269$ ) de la información de la variable Qd está representada sobre un plano formado por los componentes principales  $\Omega_1$  y  $\Omega_2$ .

	$\Omega_1$	$\Omega_2$	$\Omega_3$	$\Omega_4$	$\Omega_5$	$\Omega_6$	$\Omega_7$	$\Omega_8$
<b>L</b>	0.0055	0.4340	0.1072	0.3281	0.0039	0.1121	0.0091	0.0002
<b>r</b>	0.8341	0.0033	0.0858	0.0000	0.0669	0.0023	0.0011	0.0064
<b>b</b>	0.0864	0.0293	0.8482	0.0167	0.0189	0.0002	0.0001	0.0002
<b>M<sub>L</sub></b>	0.8906	0.0002	0.0345	0.0354	0.0063	0.0088	0.0162	0.0082
<b>B</b>	0.4223	0.4423	0.0061	0.0015	0.1023	0.0201	0.0042	0.0013
<b>b1</b>	0.0864	0.0293	0.8482	0.0167	0.0189	0.0002	0.0001	0.0002
<b>b2</b>	0.4616	0.0000	0.0182	0.4211	0.0537	0.0066	0.0385	0.0003
<b>a</b>	0.4377	0.4263	0.0025	0.0000	0.1100	0.0190	0.0032	0.0013
<b>Gc</b>	0.6472	0.0881	0.0128	0.0810	0.0923	0.0712	0.0006	0.0070
<b>Angulo</b>	0.8788	0.0000	0.0053	0.0001	0.0045	0.0660	0.0006	0.0448
<b>Lc</b>	0.6590	0.0004	0.0604	0.0842	0.0215	0.1421	0.0279	0.0045
<b>r/b</b>	0.9188	0.0121	0.0023	0.0020	0.0588	0.0036	0.0002	0.0020
<b>Ac</b>	0.5227	0.4042	0.0051	0.0379	0.0239	0.0039	0.0001	0.0022
<b>FA</b>	0.5227	0.4042	0.0051	0.0379	0.0239	0.0039	0.0001	0.0022
<b>Qd</b>	<b>0.5227</b>	<b>0.4042</b>	0.0051	0.0379	0.0239	0.0039	0.0001	0.0022

Tabla 5.13 Matriz de Correlación  $\rho^2(X''_i, \Omega_1) = [Corr_{(X''_i, \Omega_1)}]^2$

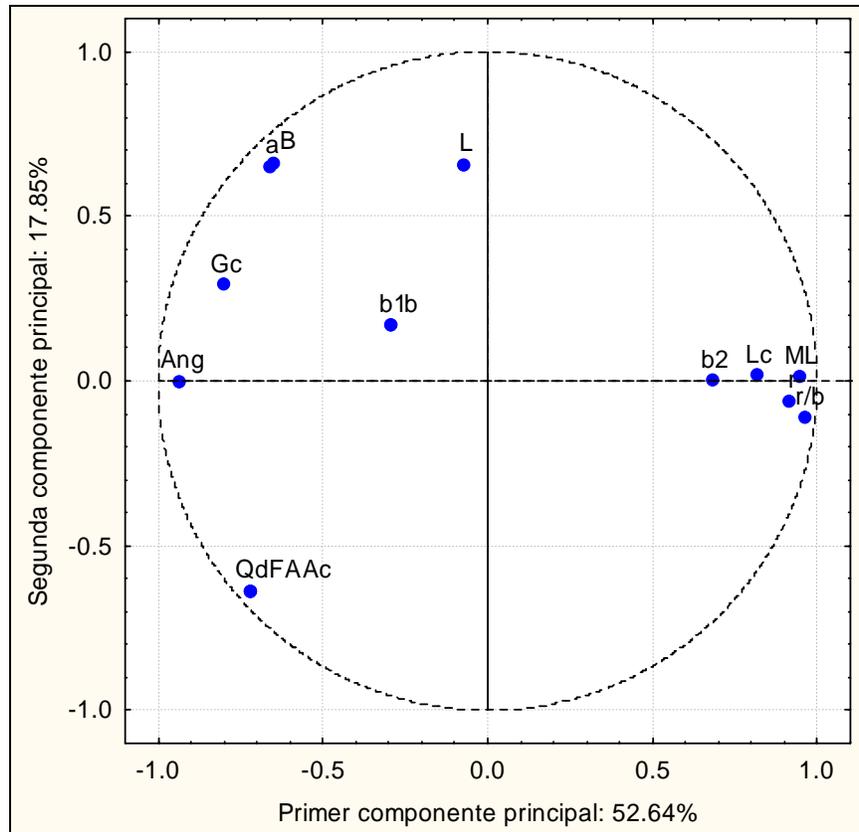


Figura 5.11 Círculo de correlaciones entre los componentes principales 1-2 y las variables

Otro ejemplo de variables *bien representadas* en el plano (1-2) formado por los componentes principales  $\Omega_1$  y  $\Omega_2$ , son:  $r$ ,  $M_L$ ,  $B$ ,  $a$ ,  $\text{Angulo}$ ,  $r/b$ ,  $Ac$  y  $FA$  ( $\sum \rho^2 > 0.80$ ). Las variables  $Gc$  y  $Lc$  también están *bien representadas* en este plano ( $0.65 < \sum \rho^2 < 0.80$ ). Un ejemplo de variables *medianamente representadas* son:  $L$  y  $b_2$ , ya que  $\sum \rho^2 > 0.40$ . Finalmente se consideran variables *pobremente representadas*:  $b$  y  $b_1$ , pues  $\sum \rho^2 \leq 0.40$ .

Antes de pasar al apartado de interpretación, se puede mencionar que, en general, una variable estará bien representada sobre un plano  $\Omega_i - \Omega_j$ ; si se encuentra cerca del *círculo de correlaciones*.

### 5.2.8 La interpretación de un plano de componentes principales

La representación gráfica de los resultados de un ACP se lleva a cabo con dos tipos de ilustraciones. La primera, es la representación de los elementos, sobre un plano de ejes coordenados, formados por cada uno de los componentes principales. La segunda, es lo que se conoce como *círculo de correlaciones* y se forma con los valores del coeficiente de correlación entre los componentes principales y las variables de medición.

### 5.2.9 Representación de los elementos

Para analizar los resultados de un ACP sobre los elementos, es suficiente construir un plano tomando los componentes principales más importantes, como ejes coordenados (Figura 5.9 y Figura 5.10). Lógicamente, el plano más importante será el formado por los componentes 1 y 2; ya que por definición y por construcción, es el plano sobre el cual existe la mayor cantidad de información visible (generalmente se le da el nombre de plano principal). Según la calidad de información que se presenta en este plano, será necesario o no examinar alguna otra combinación de ejes, por ejemplo el plano 3-4. Cabe mencionar que no es suficiente observar cómo se distribuyen estos elementos sobre el plano; también es importante conocer el significado de las variables medidas, ya que éstas juegan un papel importante en la construcción de los componentes principales y por lo tanto, son las que explican la posición de cada uno de los elementos.

La primera relación que se debe observar es la proximidad en el plano de los elementos, dos individuos serán similares mientras más cerca se encuentre uno del otro. En este aspecto es importante analizar si estos individuos también son análogos o presentan alguna relación de similitud en la realidad. Esto puede ocurrir con dos o más elementos, si este fuera el caso, se presume que existe o que se forman grupos de individuos. Esta es justamente una de las aplicaciones del ACP, la formación de grupos homogéneos. Estos resultados son utilizados con frecuencia para la definición de regiones hidrológicamente homogéneas (Gutiérrez-López, 2004) y a menudo se complementan con un análisis hiperjerárquico de variables y elementos (dendogramas).

Por otro lado, si uno o más elementos se localizan totalmente fuera del resto de los elementos, pueden suceder dos casos. El primero, que los datos originales sean erróneos o que exista algún error de escritura en los valores de la matriz inicial. Si este fuera el caso, se recomienda revisar la muestra y en su caso corregir o retirar la medición y volver a calcular el ACP. El segundo caso, después de verificar los posibles errores y que el elemento continuara fuera del resto de los elementos, se podría tomar la decisión de retirarlo de la muestra y volver a comenzar al ACP; o conservar el elemento en la muestra, ignorándolo y utilizando sólo los elementos restantes.

Sin duda el mejor procedimiento.

Círculo de correlaciones.

La primera aproximación será observar la matriz de  $\rho^2(X''_i, \Omega_i)$ . Este valor nos indica la *calidad de la representación* de cada una de las variables.

De la misma forma que con los elementos, las variables pueden formar grupos y en este caso se recomienda estudiar por separado la inter-relación de estas variables y en su caso realizar un ACP para cada uno de los grupos de variables formados.

Si dos variables se sitúan en una misma dirección pero con sentido opuesto, significa que mientras una aumenta la otra disminuye.

### 5.2.10 Los componentes principales como herramienta de simulación

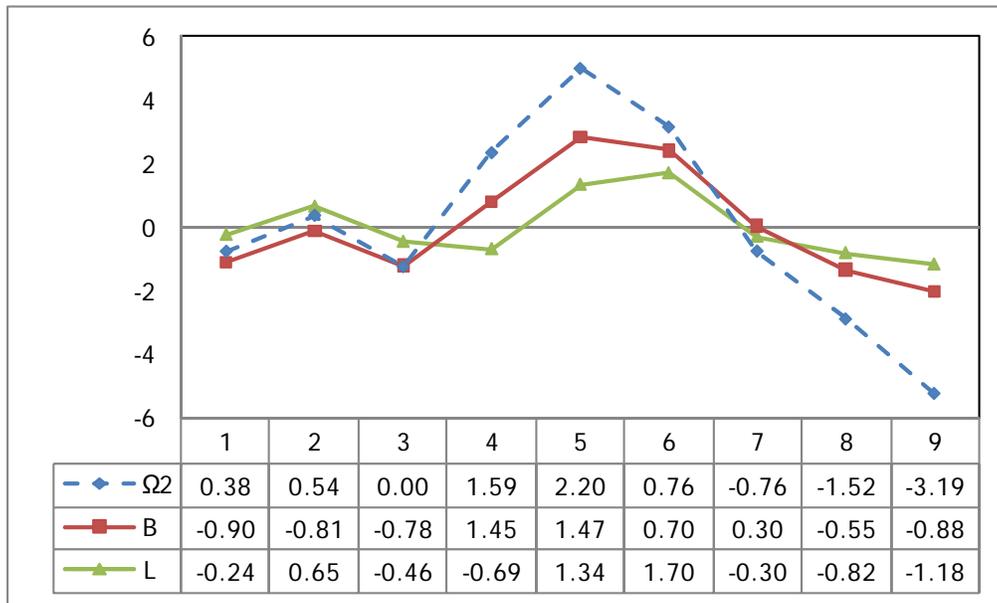


Figura 5.12 B y L con la segunda componente principal  $\Omega_2$

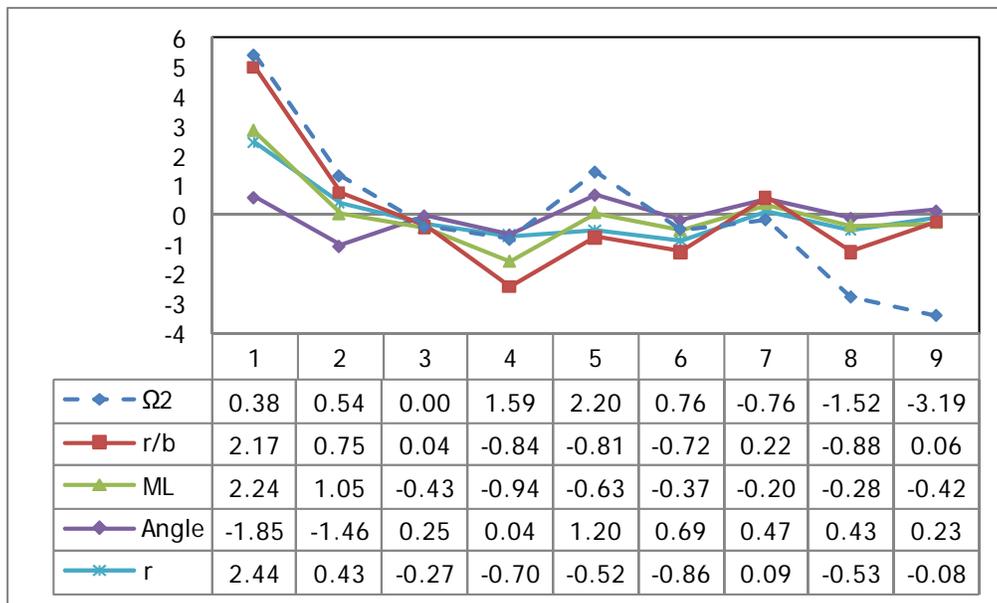


Figura 5.13 r/b,  $M_L$ , Angulo y r con el primer componente principal  $\Omega_1$

### **5.3 Recomendaciones**

Antes de pretender interpretar los resultados gráficos de un ACP, es importante analizar los estadísticos descriptivos de la muestra de datos (media, varianza, correlación, etc.) Este análisis permite tener una idea general de la magnitud de las variables y de llevar a cabo una rápida verificación de la calidad de las mediciones. También se recomienda observar los valores-propios y el porcentaje de varianza de cada uno de ellos; esto con la idea de saber cuántos componentes principales se examinarán a detalle.

Debido a que los resultados de un ACP son influenciados por la magnitud de medición de las variables, se recomienda transformar los datos originales para que todos tengan el mismo peso. Esta transformación se lleva a cabo restando a cada valor de medición, el valor de la media (datos centrados) o restando la media y dividiendo entre su desviación estándar (datos centrados-estandarizados). Es importante esta transformación ya que dependiendo de ello, se utilizará para la estimación de los componentes principales; la matriz de correlación o la matriz de varianza-covarianza. La recomendación de utilizar una u otra matriz radica en el origen de las mediciones, es decir, cuando las variables tienen las mismas unidades se recomienda utilizar la matriz de varianza-covarianza, mientras que cuando las variables se miden en diferentes unidades se propone utilizar la matriz de correlación.

Cuando se analiza la correlación entre dos componentes principales y los elementos, a través de una figura de ejes coordenados que forma un plano, se observa la contribución a la varianza de ese plano de cada uno de los elementos. Sin embargo algunos programas de cómputo ofrecen la opción de graficar en 3D, lo que nos ayuda a mejor interpretar la relación entre elementos. Es decir, dos elementos pueden estar cercanos en un plano de componentes principales 1-2, pero muy alejados en un espacio de componentes principales 1-2-3.

Finalmente estas recomendaciones contribuyen fuertemente a entender el comportamiento de los parámetros hasta aquí involucrados.

A continuación, en el siguiente capítulo se hará la unificación o utilización de lo hasta aquí obtenido en conjunto con las formulaciones encaminadas con miras a obtener un procedimiento para caracterizar el meandro en ríos.

## **Capítulo 6    Pronóstico de la zona de riesgo en meandros**

### **6.1 *Introducción***

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

estas características hidrodinámicas aportan un grado de dificultad cuando se trata de utilizar modelos hidrodinámicos para predecir la migración de ríos con meandros (Abad *et al.*, 2006).

Los estudios generales sobre los patrones que puede seguir un río a lo largo de un curso de meandros se encuentran en los trabajos de Hickin (1974), Hooke (1984, 1995) y Hooke y Redmond, (1992). También se han propuesto diversas metodologías para caracterizar los ríos con meandros (Hooke, 1984; Oneill y Abrahams, 1986; Howard y Hemberger, 1991; MacDonald *et al.*, 1992) sin embargo, pocos son los programas de cómputo desarrollados específicamente para describir y pronosticar la migración de ríos (Lagasse *et al.*, 2004; Abad y García, 2006). En Latinoamérica, el modelo RVR Meander (Abad y García, 2004), constituye la más precisa herramienta para el pronóstico de meandros. Este programa está conformado por tres módulos, uno de pre-procesamiento, uno estadístico y otro de migración de ríos. Se trata de un modelo que se concentra en los procesos morfológicos a mediana escala temporal. Su aplicación se lleva con éxito describiendo la evolución del río Bermejo en Argentina por la influencia de la construcción del puente Lavalle. El dominio estudiado es del orden de 100 km y se valida mediante imágenes de satélite a diferentes intervalos de tiempo.

Un procedimiento para caracterizar el meandreo en ríos debe considerar, una completa descripción del ciclo fluvial. Es decir, una caracterización de la etapa de juventud, madurez y completo desarrollo del río (Mueller, 1968). Este procedimiento se basa en la identificación de los dos tipos de sinuosidad: topográfica e hidráulica. En este último tipo, la forma del meandro se asocia con la delimitación del corredor fluvial y con la configuración de la plataforma geológica de la corriente. Para el tipo de sinuosidad topográfica, se utilizan las llamadas curvas de Kinoshita las cuales se basan en la formulación empírica desarrollada por Beck (1988). La formulación de curvas Kinoshita incorpora un gran número de características fisiográficas y de configuración de un río, sin embargo, es la amplitud de las curvas, lo que representa la característica primordial de esta formulación (Parker *et al.*, 1983; Parker y Andrews, 1986); a esta característica se le conoce como coeficiente de sinuosidad angular ( $\theta$ ). El presente trabajo emplea esta

formulación y propone una expresión alternativa para el pronóstico de meandros, a partir de un análisis multivariado y estocástico de las características geomorfológicas y fisiográficas de un río. Se utilizan modelos estocásticos para simular 3,480 ocurrencias de las 16 características propuestas para caracterizar el meandreo del río Cahuacán en el estado de Chiapas, México.

## 6.2 Descripción del área en estudio

Localmente, la zona que nos ocupa se encuentra sobre el río Cahuacán, específicamente entre los municipios de Tapachula y Tuxtla Chico; extendiéndose casi 2.5 km a lo largo del cauce (Figura 6.1), sobre la subprovincia fisiográfica de la Llanura Costera de Chiapas y Guatemala, sobre una zona de geológicamente de depósito sedimentarios y rocas ígneas extrusivas básicas.

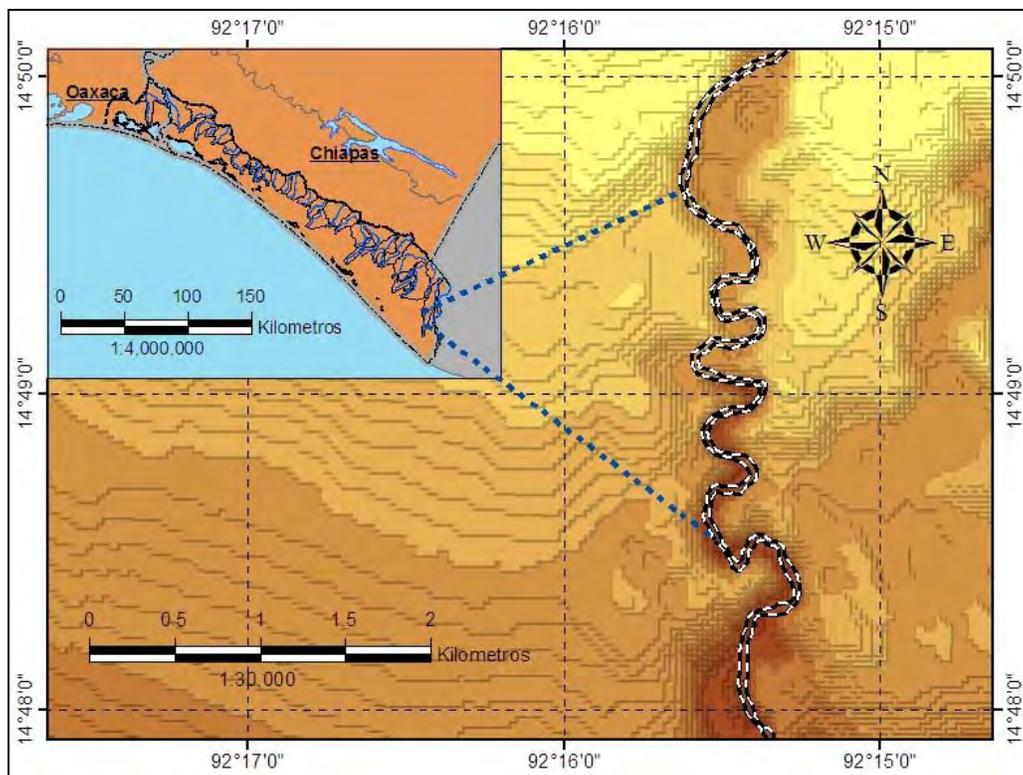


Figura 6.1 Ubicación del río Cahuacán

### 6.3 Desarrollo

La conformación de la morfología de un río en espacio y tiempo, es un fenómeno que involucra un sin número de variables fisiográficas y dinámicas, que en la mayoría de los casos son difíciles de determinar. La conformación de un grupo de variables o componentes morfológicos de un río, son únicos para cada caso y son tantas las variables que rigen su comportamiento, que resulta imposible determinarlas todas; ya que muchas de ellas ni siquiera se conocen o no se han determinado como relaciones dominantes en el proceso de meandro de un río. Un procedimiento propuesto por (Abad y García, 2006), consiste en identificar tres etapas principales. Un pre-procesamiento, el cual consiste en obtener la ubicación exacta (coordenadas) de los  $n$  puntos que juntos conforman la traza de un río a lo largo de su eje. Esta etapa incluye por ejemplo, la digitalización del cauce, la utilización de fotografías aéreas e imágenes satelitales, que luego se incorporan en sistemas de información geográfica. En algunos casos es necesario filtrar y corregir puntos que presenten alguna desviación comprobable en campo. Esta etapa de pre-procesamiento se utiliza en el programa RVR Meander, para representar las coordenadas planimétricas del cauce mediante polinomios parametrizados de tercer orden, que permiten calcular la primera y segunda derivada de la función en forma continua. Una vez realizada esta primera etapa se obtuvo la configuración del río. La Figura 6.2 muestra la representación de un tramo de 230 km del río Cahuacán.

La segunda etapa es el procesamiento estadístico. En ella se estima apropiadamente la evolución del río. Se calculan parámetros como el desplazamiento lateral y longitudinal del río, la amplitud, la sinuosidad, así como la curvatura promedio (MacDonald *et al.*, 1992). Adicionalmente se emplean otros parámetros correspondientes a los aspectos dinámicos como el gasto de lavado y gasto dominante. En la Tabla 6.1 y la Figura 6.3, muestran las características morfológicas y fluviales para el análisis de migración de ríos utilizando un esquema estocástico senoidal. En la Tabla 6.2, se presentan los valores de las características morfológicas y fluviales para el río Cahuacán.

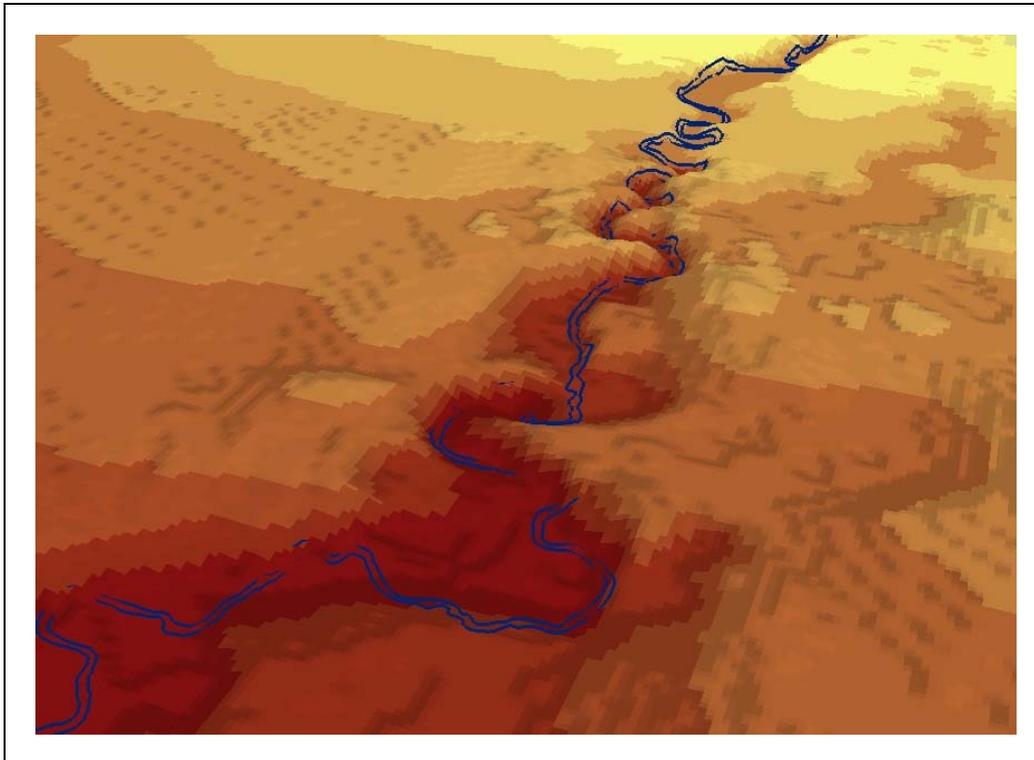


Figura 6.2 Configuración del meandro del río Cahuacán

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

Tabla 6.1 Características morfológicas y fluviales propuestas

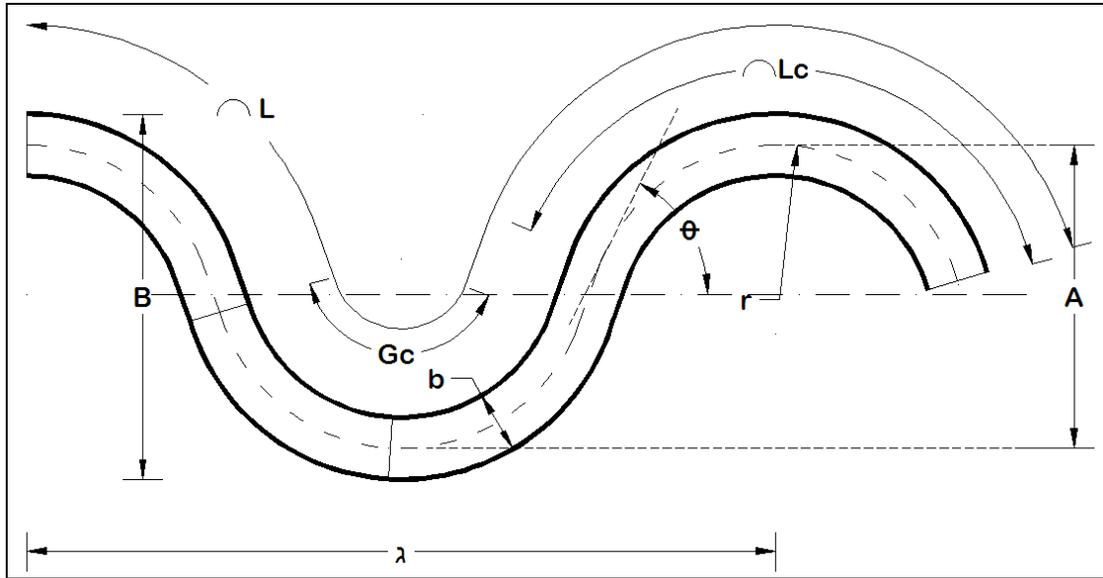


Figura 6.3 Características morfológicas y fluviales propuestas

Curva	L	r	b	ML	B	b1	b2
No	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
87	844	272.98	35.94	882.87	266.52	17.97	20.15
88	908.39	151.6	29.77	681.43	272.33	14.89	22.77
89	828.3	109.45	28.5	430.55	274.46	14.25	15.58
90	811.5	83.86	36.65	344.98	429.26	18.33	14.32
91	958.6	94.56	40.65	396.99	430.33	20.33	17.51
92	984.72	74.12	29.78	440.58	376.75	14.89	17.69
93	840.1	131.29	31.67	469.71	349.59	15.84	13.8
94	802.42	94.09	42.53	455.92	290.24	21.27	15.84
95	776.4	120.96	31.32	431.85	267.73	15.66	18.82

Curva	a	Gc	theta	Lc	r/b	Ac	FA	Qd
No	(m)	grados	grados	(m)	categoria	(km <sup>2</sup> )	(%)	(m <sup>3</sup> /s)
87	228.4	96.97	30.07	462	7.6	203.1	0.837	125.49
88	234.68	142.22	40.82	376.3	5.1	203.5	0.839	125.69
89	244.64	185.91	88.76	355.14	3.8	203.8	0.84	125.89
90	396.62	176.81	82.85	258.79	2.3	204.1	0.841	126.08
91	392.5	187.43	115.28	309.33	2.3	204.4	0.842	126.28
92	344.17	168.99	101.15	218.61	2.5	204.7	0.844	126.48
93	319.96	168.79	94.97	386.78	4.1	205.1	0.845	126.67
94	253.14	180.64	93.68	296.64	2.2	205.4	0.846	126.87
95	233.26	129.57	88.05	273.55	3.9	205.7	0.848	127.07

Tabla 6.2 Características morfológicas y fluviales del río Cahucán

La tercera etapa comprende propiamente la predicción de la migración del río. En esta etapa es importante definir la formulación de la configuración de curvas; si son simétricas (*sinegenerated curves*) (Langbein y Leopold, 1966) o asimétricas (Kinoshita, 1961; Kinoshita y Miwa, 1974; Parker *et al*, 1983; Yamaoka y Hasegawa, 1984; Parker y Andrews, 1986). (*asymmetric bends*). Por ejemplo, en el modelo RVR Meander se predice en esta etapa la migración lateral. En este programa se asume la hipótesis hidráulica de escurrimiento casi-permanente (*quasi-steady flow*), válido para cauces erosionables con un ancho del río constante a lo largo de la simulación. Para modelar la erosión de bancos, considerados verticales, se emplea el concepto de velocidad excesiva. Algunas simplificaciones son utilizadas en este tipo de modelos, por ejemplo la ecuación de continuidad del sedimento, no es incluida y se considera un perfil lineal del fondo del río (Abad y García, 2006). Estas mismas consideraciones se utilizan en este trabajo, sin embargo a diferencia del RVR Meander (que utiliza como principal formulación la curva de Kinoshita), aquí se propone una nueva expresión trigonométrica para generar las curvas.

Este nuevo procedimiento utiliza la *forma* de la expresión de Kinoshita, pero afecta la sucesión de senos y cosenos directamente con las características morfológicas del río. Esta idea no es nueva y normalmente se utiliza para definir la variación promedio aguas abajo del valle ( $z$ ) y el ancho de la sección transversal del valle ( $y$ ) (MacDonald, 1991; MacDonald *et al.*, 1992).

$$\dot{z} = \frac{\sum n \operatorname{sen} \theta \Delta s}{\Delta t \sum \Delta s} \quad \dot{y} = \frac{\sum n \operatorname{cos} \theta \Delta s}{\Delta t \sum \Delta s} \quad (6.1)$$

donde:

- $n$  es el componente perpendicular al eje del río, a lo largo de la sección transversal,
- $s$  es el componente perpendicular a " $n$ " que forma un ángulo  $\theta$  con el plano horizontal de referencia,
- $\Delta t$  es el intervalo de tiempo de ocurrencia.

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

$$(\dot{y}_i) = [X_{i+(i-1)}'' \text{seno}(|\Omega_i| \dot{z})] + [X_{i+i}'' \text{cos}(|\Omega_i| \dot{z})] \quad (6.2)$$

donde:

$X_i''$  son los valores centrados-estandarizados de las características morfológicas y fluviales propuestas  $X_i'' = (X_i - \mu_x) / \sigma_x$  [adimensional],

$|\Omega_i|$  es el i-ésimo componente principal [adimensional].

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

$$\theta = \theta_0 \text{sen}\left(\frac{2\pi s}{\lambda}\right) + \theta_0^3 \left[ J_s \cos\left(3 \frac{2\pi s}{\lambda}\right) - J_f \text{sen}\left(3 \frac{2\pi s}{\lambda}\right) \right] \quad (6.3)$$

donde:

$J_s$  es el coeficiente de asimetría,

$J_f$  es el coeficiente de aplastamiento o curtosis,

$\theta_0$  es ángulo máximo de amplitud,

$\lambda$  es el arco de curvatura del canal,

$s$  es la coordenada de giro.

Beck (1988) presentó una comparación cualitativa entre la sinuosidad media y la elevación del fondo de un río con curvatura simétrica (Hooke, 1974) presentó estas relaciones a través de tres ecuaciones que se conocen como las relaciones de Beck (Abad y García, 2006). Esta misma comparación se realizó para ríos con alta sinuosidad (Hills, 1987). Estas comparaciones sugieren que existe un componente a lo largo del eje del río, que relaciona la pendiente transversal máxima del río con el radio máximo de curvatura. Sin embargo, los demás componentes topográficos son bien representados.

De forma similar a lo anterior, se realiza una comparación entre la formulación de Kinoshita (ecuación 6.3) y la expresión propuesta en este trabajo dada por la ecuación 6.2. La Figura 6.4, muestra la sinuosidad utilizando los valores presentados por la formulación de Beck (1988) y utilizando los mismo parámetros se estima la sinuosidad empleando la ecuación 6.2, para  $i=1$  (un solo par de senos y cosenos).

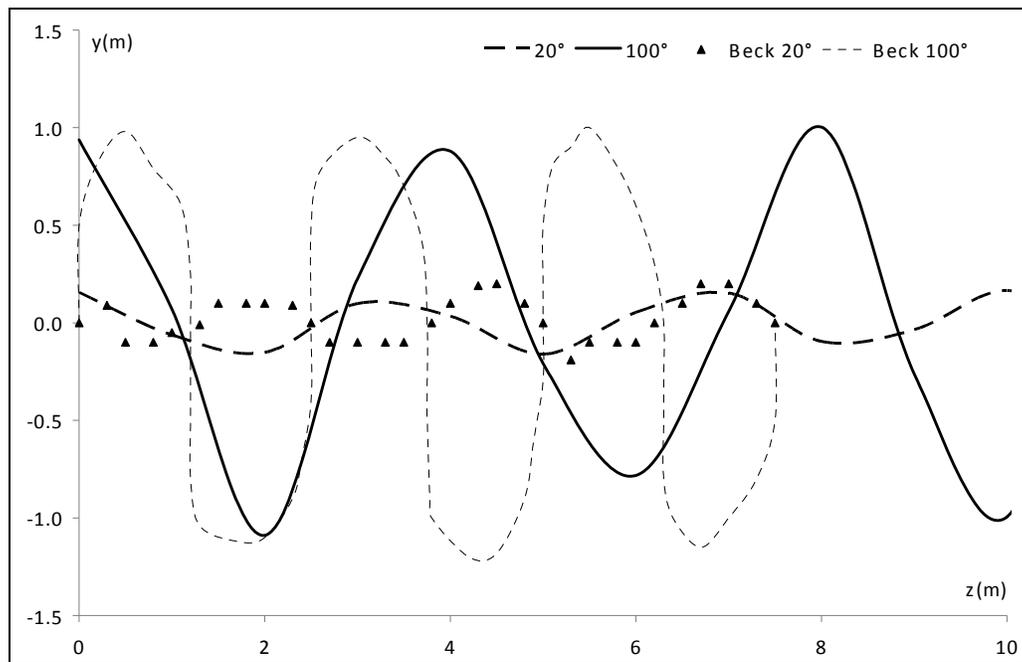


Figura 6.4 Sinuosidad estimada con la formulación de Beck (ecuación 6.3) y con la formulación Gutiérrez-Vladimir (ecuación 6.2), para  $\theta_0 = 20^\circ$   $J_s = 1/32$   $J_f = 1/192$  y  $\theta_0 = 100^\circ$   $J_s = 1/32$   $J_f = 1/192$

La similitud entre las dos formulaciones es evidente, a pesar de que existe un desfase. La formulación propuesta lo corrige agregando otro par de senos y cosenos y así sucesivamente, hasta lograr la precisión deseada. Cabe mencionar que en ambos casos se utilizaron los valores de  $\theta_0 = 20^\circ$   $J_s = 1/32$   $J_f = 1/192$  y  $\theta_0 = 100^\circ$   $J_s = 1/32$   $J_f = 1/192$  presentados por Beck (1988) y que pueden consultarse a detalle en los trabajos de (Abad y García, 2004, 2005 y 2006).

La idea fundamental de la expresión propuesta en este trabajo radica en utilizar un número tal de pares de senos y cosenos que permitan describir la trayectoria y migración del meandro. Además estas funciones trigonométricas estarán afectadas por un máximo de características morfológicas y fluviales, siempre y cuando éstas hayan sido seleccionadas y jerarquizadas con un análisis multivariado. Por ejemplo para nuestro caso, al estimar la sinuosidad del río Cahuacán, la formulación se puede extender hasta 15 características morfológicas y fluviales; lo cual da como resultado tener 7 pares de senos y cosenos ( $n=7$ ), más un término independiente. Este término independiente será la variable más significativa.

La formulación propuesta en este trabajo se basa además, en la idea de que un conjunto de variables son capaces de especificar por si solas una cierta semejanza, que dibujadas en un diagrama revelarán similitudes (o agrupaciones) entre cada una de ellas. Esta consideración se emplea sistemáticamente en la delimitación de regiones hidrológicamente homogéneas en hidrología (Everitt, 1978; Wiltshire y Beran, 1987; Donald, 1988; Nathan y McMahon, 1990). Este tipo de desarrollo multivariado prevé una discriminación previa de variables, la cual sirve para resaltar la importancia de cada una de las características ellas. Un ejemplo clásico de este desarrollo es la técnica que se conoce con el nombre de *trazo multidimensional* (Andrews, 1992).

Expresión propuesta por Andrews (1992); para llevar a cabo un trazo multidimensional se usa la siguiente expresión.

$$f(X) = \frac{X_1}{\sqrt{2}} + X_2 \text{sen}(t) + X_3 \cos(t) + X_4 \text{sen}(2t) + X_5 \cos(2t) + \dots \quad (6.4)$$

donde:

$X_i$  representan a cada una de las variables analizadas y jerarquizadas.

Una característica de esta expresión, que no es inmediatamente identificada, consiste en que los resultados que se obtengan dependen de la magnitud de las variables seleccionadas; por lo que se recomienda estandarizar los valores de las características analizadas, antes de efectuar cualquier trazo multidimensional. Sin embargo, la característica aditiva de senos y cosenos aporta características cíclicas; de esta forma, las primeras características son asociadas con componentes cíclicas de bajas frecuencias y las últimas con componentes de frecuencias altas; esto puede ayudar a asociar a las variables con su importancia. Las bajas frecuencias son más fáciles de observar, de esta manera  $X_1$  representa la variable más importante,  $X_2$  a la segunda, y así sucesivamente. Esta formulación es similar a la ecuación 6.3 y con ayuda de una sucesión de senos y cosenos afectados por los componentes principales (ecuación 6.2) se obtiene la expresión propuesta para estimar el meandro en ríos.

$$\dot{y} = \left[ X_0'' / \sqrt{2} \right] + \sum_{i=1}^n \left[ X_{i+(i-1)}'' \text{sen}(|\Omega_i| \dot{z}) + X_{i+i}'' \cos(|\Omega_i| \dot{z}) \right] \quad (6.5)$$

donde:

$X_i''$  son las características morfológicas y fluviales centradas-estandarizadas,

$|\Omega_i|$  es el i-ésimo componente principal,

$n$  es el número de pares de senos y cosenos.

Como se ha mencionado, antes de utilizar el esquema propuesto es necesario llevar a cabo una jerarquización de variables. Con los valores de las características morfológicas y fluviales presentados en la Tabla 6.2, se llevó a cabo un Análisis de

Componentes Principales (ACP) en donde se encontró que los dos primeros componentes principales explican el 70.5 % de la varianza de las características morfológicas y fluviales del río Cahuacán. La Figura 6.5 muestra el círculo de correlaciones entre las 15 variables propuestas.

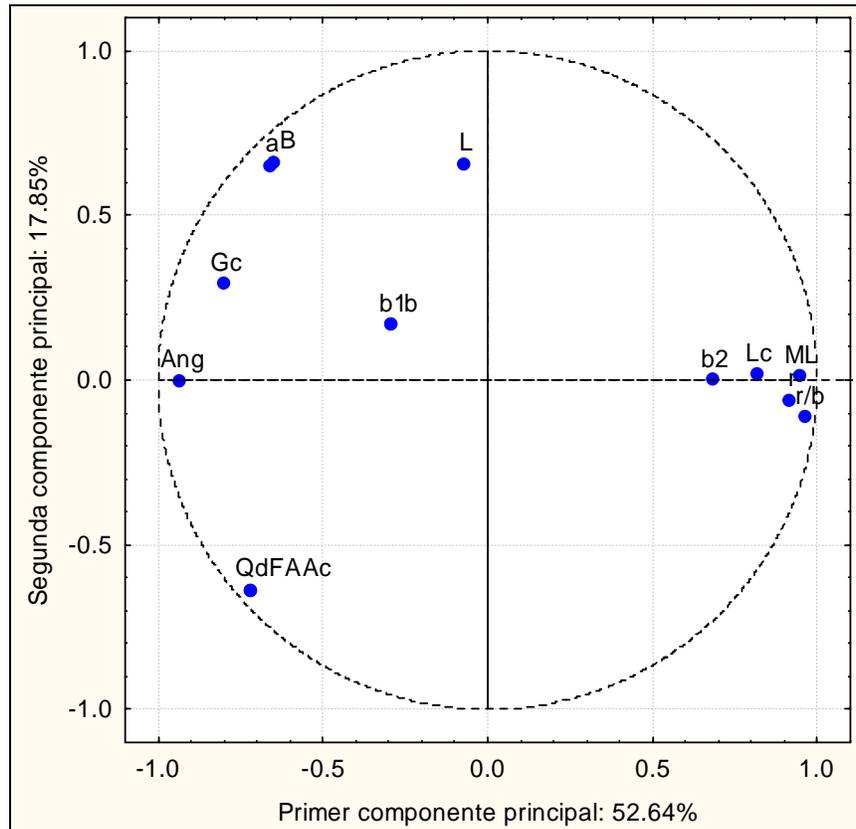


Figura 6.5 Resultado del ACP con las características morfológicas y fluviales del río Cahuacán

Los resultados del ACP muestran la existencia de tres grupos de variables que definen el comportamiento del río Cahuacán (Figura 6.5). El primer grupo está formado por las características morfológicas del río, como son el radio de curvatura, la relación de Schumm, la longitud de onda del meandro, la longitud de curva y la mitad del ancho del cauce al final del meandro analizado ( $r$ ,  $r/b$ ,  $ML$ ,  $Lc$  y  $b2$ ). El segundo grupo está formado por características netamente hidrológicas, en donde se incluye el gasto de aportación y el área de la cuenca ( $Qd$ ,  $FA$  y  $Ac$ ). El tercer grupo de características representa variables morfológicas y geométricas del río ( $a$ ,  $B$ ,  $L$ ,  $Gc$ ,  $Ang\theta$ ,  $b$  y  $b1$ ). También de este análisis se

puede obtener una jerarquización de características con base en la proyección de cada variable sobre los ejes de los componentes principales  $|\Omega_i|$ . Este procedimiento es la interpretación tradicional de un ACP. Asimismo, se estandarizan los valores de las características mostradas en la Tabla 6.2, obteniendo sus valores máximos y mínimos. Estos resultados se muestran en la Tabla 6.3, en donde se puede observar que la variable con mayor importancia para el primer componente principal  $|\Omega_1|$  es la relación de Schumm (r/b) y la de mayor relevancia para el segundo componente  $|\Omega_2|$  es el ancho del meandro (B).

$X_i$	$ \Omega_1 $	$ \Omega_2 $	Máximo $X_i$ "	Mínimo $X_i$ "
r/b	<b>0.341</b>	0.067	2.174	-0.878
$M_L$	0.336	0.009	2.236	-0.937
$\theta$	0.334	0.000	1.200	-1.848
r	0.325	0.035	2.441	-0.859
$L_c$	0.289	0.012	1.799	-1.428
$G_c$	0.286	0.181	0.905	-2.048
FA	0.257	0.388	1.461	-1.461
Qd	0.257	0.388	1.461	-1.461
Ac	0.257	0.388	1.461	-1.461
b2	0.242	0.002	1.865	-1.243
a	0.235	0.399	1.467	-0.941
B	0.231	<b>0.406</b>	1.469	-0.896
b	0.105	0.105	1.662	-1.101
b1	0.105	0.105	1.662	-1.101
L	0.026	0.403	1.701	-1.177

Tabla 6.3 Valores de los dos primeros componentes principales y valores máximos y mínimos centrados-estandarizados de cada una de las características fluviales del río Cahuacán

Por otro lado, se estiman los valores máximos y mínimos de cada una de las características del río Cahuacán. Estos valores permiten obtener las condiciones límite hasta la fecha, de la posible configuración morfológica de sus meandros (Tabla 6.3). A continuación se utilizan estas características jerarquizadas y los componentes principales en la ecuación 6.2 para obtener una representación del meandreo del río en el tramo estudiado. Para el caso del río Cahuacán se seleccionaron 9 características  $X_{i,i=1...9}$  ( $n=4$

+ un término independiente) y los primeros cuatro componentes principales  $|\Omega_{i,i=1...4}|$ . Con estos valores puede desarrollarse la expresión 6.5 de la siguiente forma:

$$\dot{y}(\dot{z}) = \left[ (r/b)/\sqrt{2} \right] + \sum_{i=1}^4 \left[ X_{i+(i-1)}'' \operatorname{sen}(|\Omega_i| \dot{z}) + X_{i+i}'' \cos(|\Omega_i| \dot{z}) \right] \quad (6.6)$$

donde:

$\dot{z}$  es la variación de las condiciones de meandro a lo largo del eje del río (2.3 km).

$$\begin{aligned} \dot{y}(\dot{z}) = & \left[ (r/b)/\sqrt{2} \right] + \left[ M_L \cdot \operatorname{sen}(|\Omega_1| \dot{z}) + \theta \cdot \cos(|\Omega_1| \dot{z}) \right] + \left[ r \cdot \operatorname{sen}(|\Omega_2| \dot{z}) + Lc \cdot \cos(|\Omega_2| \dot{z}) \right] + \dots \\ & \dots + \left[ G_c \cdot \operatorname{sen}(|\Omega_3| \dot{z}) + FA \cdot \cos(|\Omega_3| \dot{z}) \right] + \left[ Qd \cdot \operatorname{sen}(|\Omega_4| \dot{z}) + AC \cdot \cos(|\Omega_4| \dot{z}) \right] \end{aligned} \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}(\dot{z}) = & \left[ (r/b)/\sqrt{2} \right] + \left[ M_L \operatorname{sen}(|0.341| \dot{z}) + \theta \cos(|0.341| \dot{z}) \right] + \left[ r \operatorname{sen}(|0.336| \dot{z}) + Lc \cos(|0.336| \dot{z}) \right] + \dots \\ & \dots + \left[ G_c \operatorname{sen}(|0.334| \dot{z}) + FA \cos(|0.334| \dot{z}) \right] + \left[ Qd \operatorname{sen}(|0.325| \dot{z}) + AC \cos(|0.325| \dot{z}) \right] \end{aligned}$$

Al sustituir las características morfológicas máximas y mínimas del río en la expresión anterior se obtiene el pronóstico del meandro como una representación gráfica de la sinuosidad del río. Las Figura 6.6 y Figura 6.7 muestran los resultados de este procedimiento. Cabe señalar que al utilizar cuatro pares de senos y cosenos, *la señal* se deforma y presenta lo que se conoce como *ruido blanco* de una señal. Para *suavizar* el trazo es necesario tomar el promedio móvil de cada una de las condiciones. La sinuosidad obtenida de un promedio móvil tiene la ventaja de poder desfasarse a lo largo del eje longitudinal del río, lo cual permite adecuar la configuración del meandro, según lo analizado al comparar la expresión propuesta en este trabajo, con la formulación de Beck (1988).

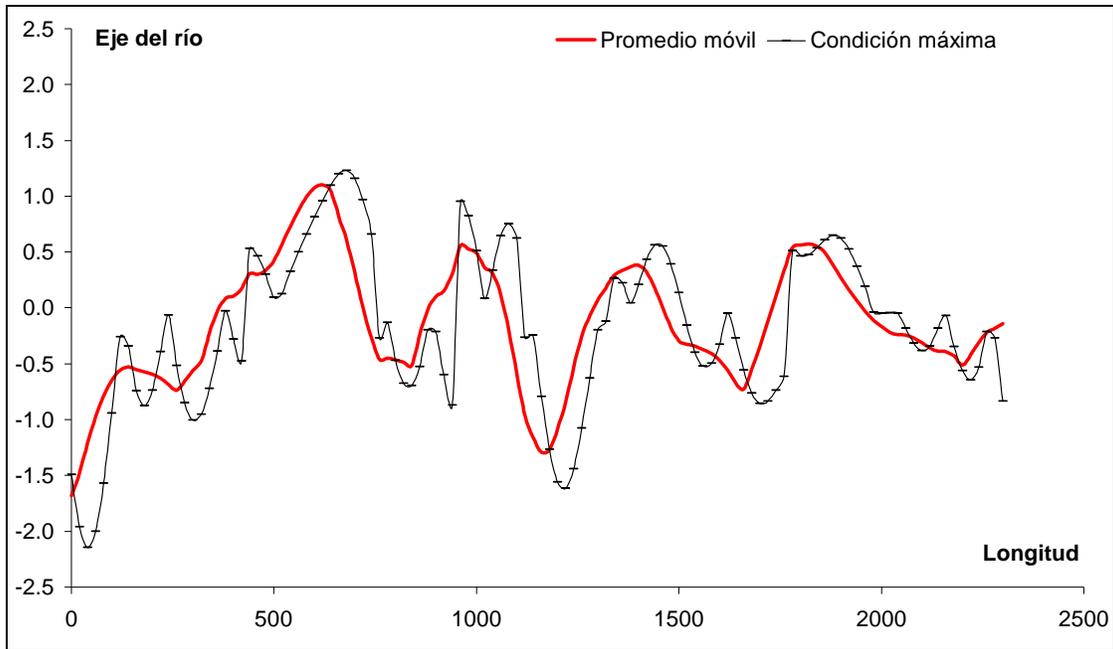


Figura 6.6 Promedio móvil para la estimación de la condición máxima

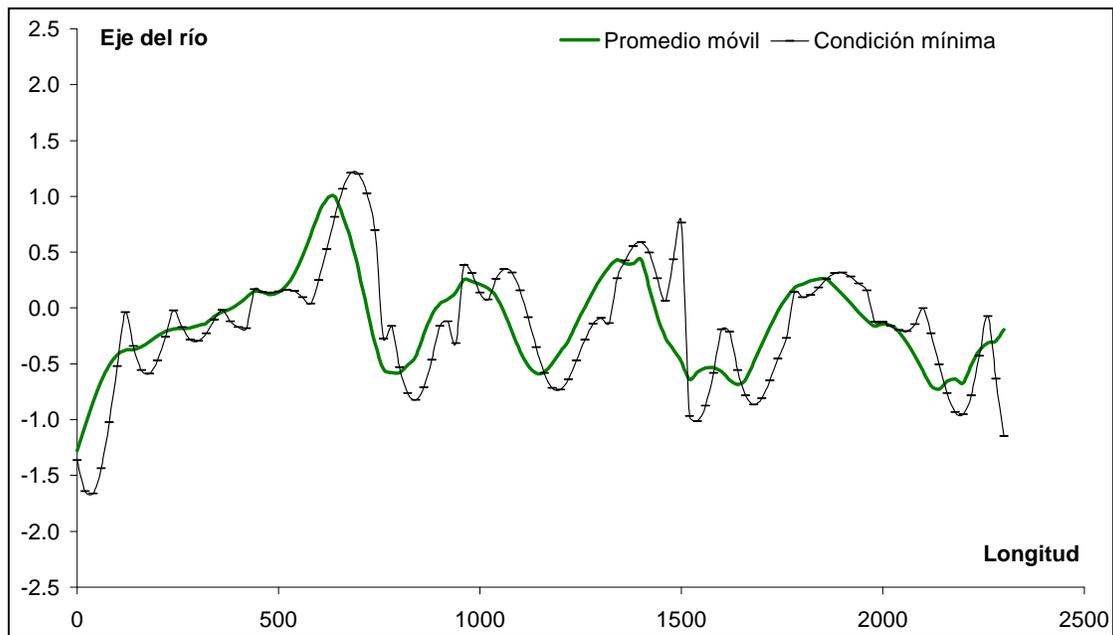


Figura 6.7 Promedio móvil para la estimación de la condición mínima

La Figura 6.8, muestra la comparación entre las condiciones máximas y mínimas y la configuración natural de meandro del río Cahuacán. Es interesante observar como una

vez suavizados los trazos el comportamiento de estas dos condiciones, resulta muy similar a la condición natural. Si bien las crestas y valles no se reproducen totalmente, la representación es una aproximación muy aceptable de las condiciones de meandro del río.

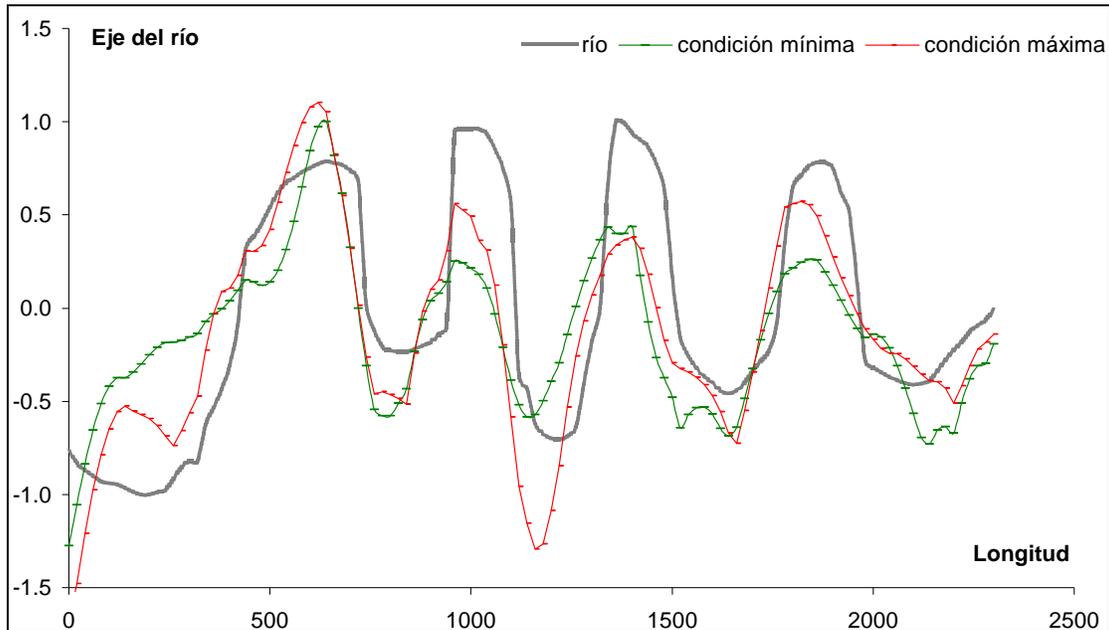


Figura 6.8 Comparación entre la condición natural de meandro del río Cahuacán y sus condiciones máximas y mínimas

Las condiciones máximas y mínimas utilizadas en esta formulación de sinusoidad, por si solas brindan una condición límite del fenómeno de meandro. Sin embargo para que estos resultados tengan una utilidad práctica en campo, resulta particularmente interesante incorporar ciertos límites de confianza que involucren ambas condiciones. Por lo tanto, se propone utilizar la formulación clásica para definir límites de confianza. Seleccionando una tolerancia del 95% se tiene que los límites para cada una de las condiciones estarán dados por la siguiente expresión.

$$\begin{aligned} \delta_{\max} \Big|_z &= \dot{y}(z) + 1.96 \sigma_{\dot{y}} \Big|_z \\ \delta_{\min} \Big|_z &= \dot{y}(z) - 1.96 \sigma_{\dot{y}} \Big|_z \end{aligned} \tag{6.8}$$

donde:

$\sigma_y|_z$  es la desviación estándar de los valores de  $y$  a lo largo del eje de meandro del río.

Con la formulación presentada (ecuación 6.8), se construyen los límites de confianza para cada una de las condiciones mencionadas. La Figura 6.9 y Figura 6.10 muestran estos resultados. Si se acepta que el trazo de estos límites proviene de una formulación que involucra las características morfológicas y fluviales del río Cahuacán, entonces esta frontera así determinada podrá delimitar las condiciones extremas de movimiento del río. Sin embargo, es importante mencionar que rigurosamente la construcción de estos límites se basa en una condición puramente estadística y no involucra en su formulación condiciones físicas del río. Esto puede solucionarse, por ejemplo agregando a la metodología propuesta una etapa de simulación estocástica para definir directamente las fronteras o zonas de riesgo por meandro del río Cahuacán.

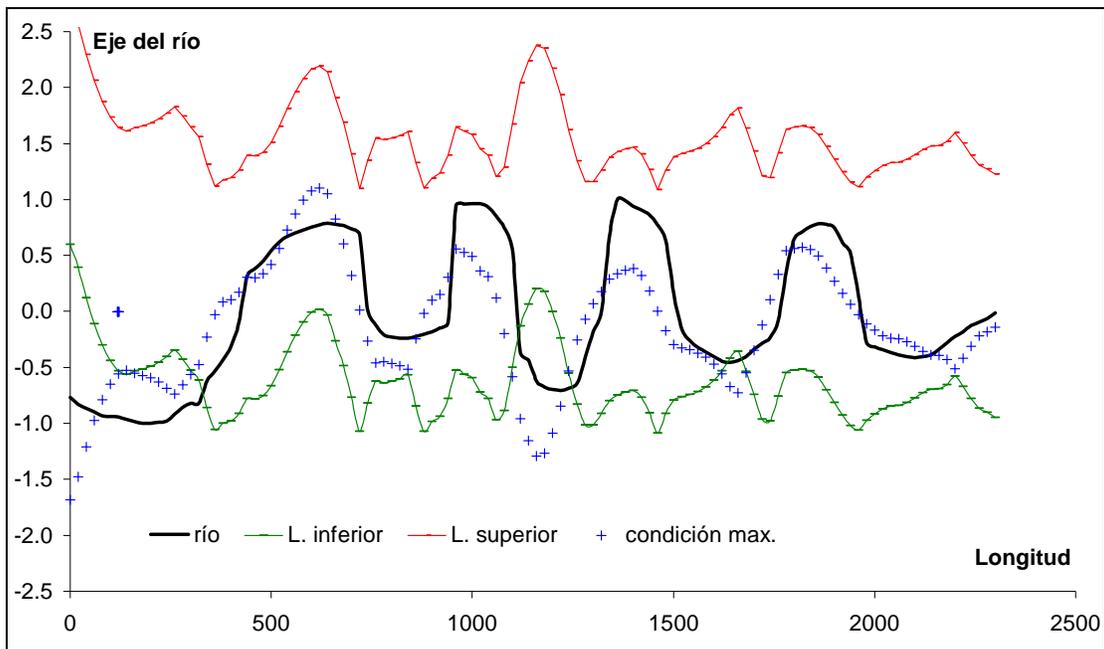


Figura 6.9 Límites de meandro para la condición máxima del río Cahuacán

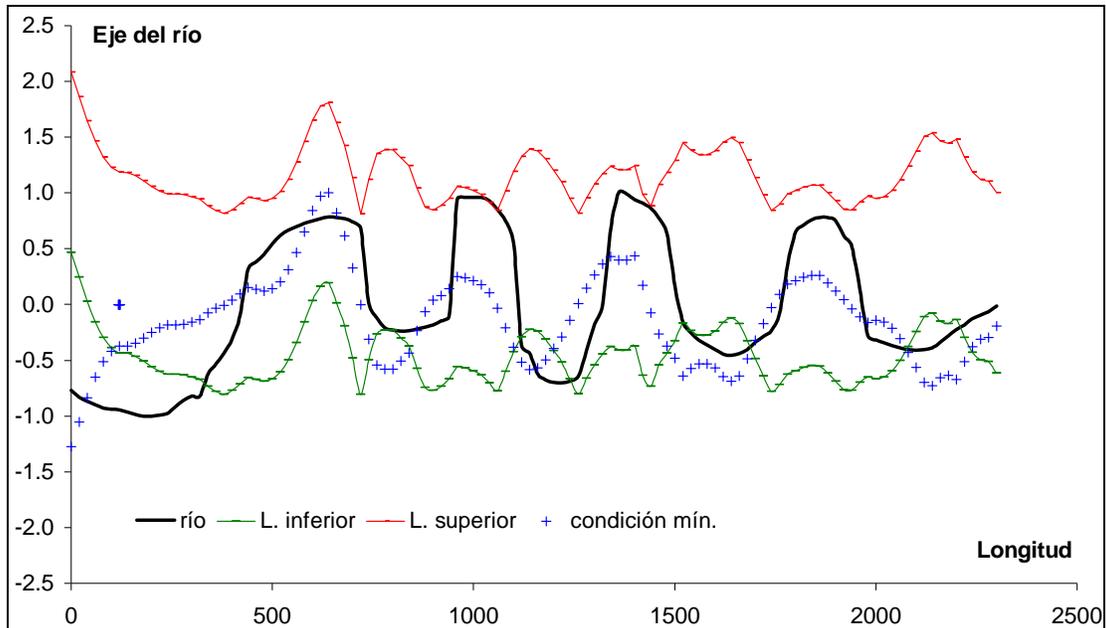


Figura 6.10 Límites de meandro para la condición mínima del río Cahuacán

## 6.4 Discusión

La concepción de idealizar y representar la evolución de la posible tendencia de un meandro en un río es sin duda compleja. Numerosos autores han presentado diversos esquemas de este proceso (Duan, 1998; Darby y Delbono, 2002; Jang y Shimizu, 2005), muchos de ellos son cualitativos y otros tantos cuantitativos; pero en todos los caso la consideración de la curvatura del meandro es un elemento clave para la correcta representación del fenómeno. En este sentido, es correcto el resultado del análisis de componentes principales, ya que éste colocó el radio de curvatura ( $r$ ) y el ancho del cauce ( $B$ ) como la relación más importante y representativa del fenómeno. Un trazo idealizado considerando estas características morfológicas tiene además la ventaja de que pueden probarse exhaustivamente diversas pruebas estadísticas para comprobar su validez o incluso programar las expresiones para sistematizar y poner en marcha diversos modelos numéricos (Bradshaw, 1969, 1973; Irwin y Smith, 1975; Chebbi *et al.*, 1998; Holloway y Tavoularis, 1998; Blanckaert, 2002). Sin embargo, cabe mencionar que al idealizar el trazo se omiten algunas consideraciones que sin duda contribuyen a la dinámica del río. Por ejemplo, la condición de equilibrio a lo ancho del canal y el aporte de sedimentos (Ackers

y Charlton, 1970; Whiting y Dietrich, 1993a,b; Garcia y Niño, 1993; Biedenharn y Copeland, 2000; Shields *et al.*, 2003; Abad y García, 2004).

Los resultados que se obtienen con la formulación Gutiérrez-Vladimir, muestran una coherencia aceptable con la formulación tradicional de Beck (1988) utilizando el esquema de representación de Kinoshita. El suavizado del trazo empleando un procedimiento de promedios móviles, es adecuado para lograr una representación del meandro, que puede ser utilizada directamente en campo para la definición de la zona de riesgo. Por otro lado, la consideración de utilizar un análisis multivariado para seleccionar la importancia de cada una de las características morfológicas y fluviales del río es recomendable y proporciona a la metodología un grado de confiabilidad en el aspecto numérico. Asimismo, se propone enriquecer el procedimiento adicionando un componente estocástico al esquema planteado. Existen dos formas de adicionar este componente. La primera consiste en ajustar un modelo autorregresivo a cada una de las series de observaciones históricas (variables morfológicas) del río y con esas ecuaciones generar muestras o pronosticar a futuro las condiciones del meandro. La segunda forma, es adicionar un término directamente en la formulación propuesta, como se muestra a continuación.

$$\dot{y}(z) = [(r/b)/\sqrt{2}] + \sum_{i=1}^4 [X_{i+(i-1)}'' \text{sen}(|\Omega_i| z) + X_{i+i}'' \text{cos}(|\Omega_i| z)] + \varepsilon(z) \quad (6.9)$$

donde:

$\varepsilon(z)$  es un número aleatorio  $\varepsilon = \hat{\sigma}_\varepsilon \omega_{1,2}$ ,

$\omega_1, \omega_2$  son números aleatorios (normal estándar),

$\alpha_1, \alpha_2$  son números aleatorios de distribución uniforme [0,1].

Considerando por ejemplo las ecuaciones propuestas por Box-Muller (1996), los números aleatorios pueden generarse con las siguientes expresiones.

$$\omega_1 = \left[ 2 \ln \left( \frac{1}{\alpha_1} \right) \right]^{1/2} \cos(2\pi\alpha_2) \quad \omega_2 = \left[ 2 \ln \left( \frac{1}{\alpha_1} \right) \right]^{1/2} \sin(2\pi\alpha_2) \quad (6.10)$$

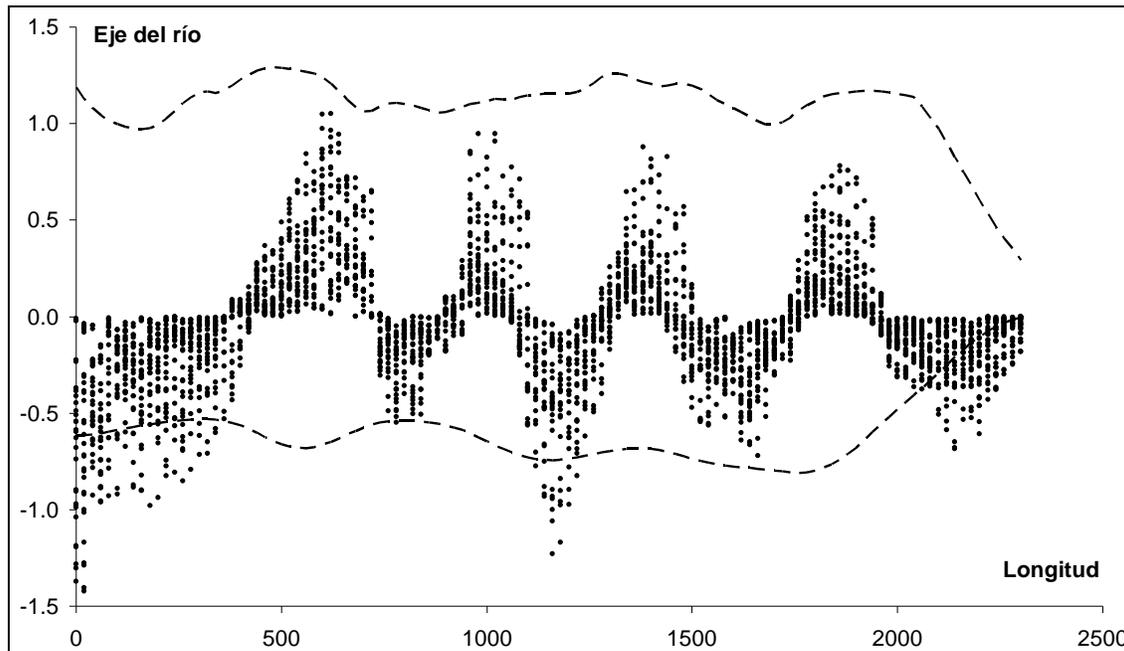


Figura 6.11 Resultados de la simulación estocástica del meandro del río Cahuacán hasta el año 2016

La Figura 6.11 muestra los resultados de la simulación estocástica de 10 años a futuro tomando en cuenta tres condiciones. La primera con base en las condiciones históricas del río, la segunda con las condiciones máximas y la tercera con base en la condición mínima de meandro del río Cahuacán. Esto quiere decir que los resultados de la simulación estocástica representan lo que podría ocurrir hasta el año 2016.

Asimismo, se llevó a cabo un análisis de promedios móviles para suavizar los límites de confianza. Esta representación constituye el resultado primordial de este trabajo ya que esta imagen al sobreponerse con una fotografía aérea de la zona, permite ubicar con exactitud las zonas o predios en riesgo por movimiento del meandro (Figura 6.12).

Finalmente cabe mencionar que este análisis está basado en las 15 características morfológicas y fluviales presentadas, sin embargo la inclusión de características dinámicas o de aporte de sedimentos pueden incluirse en este procedimiento, ya que el análisis de componentes principales ubicará estas variables en el orden de importancia y asociada a los componentes principales que mejor definan la variación multidimensional del fenómeno.

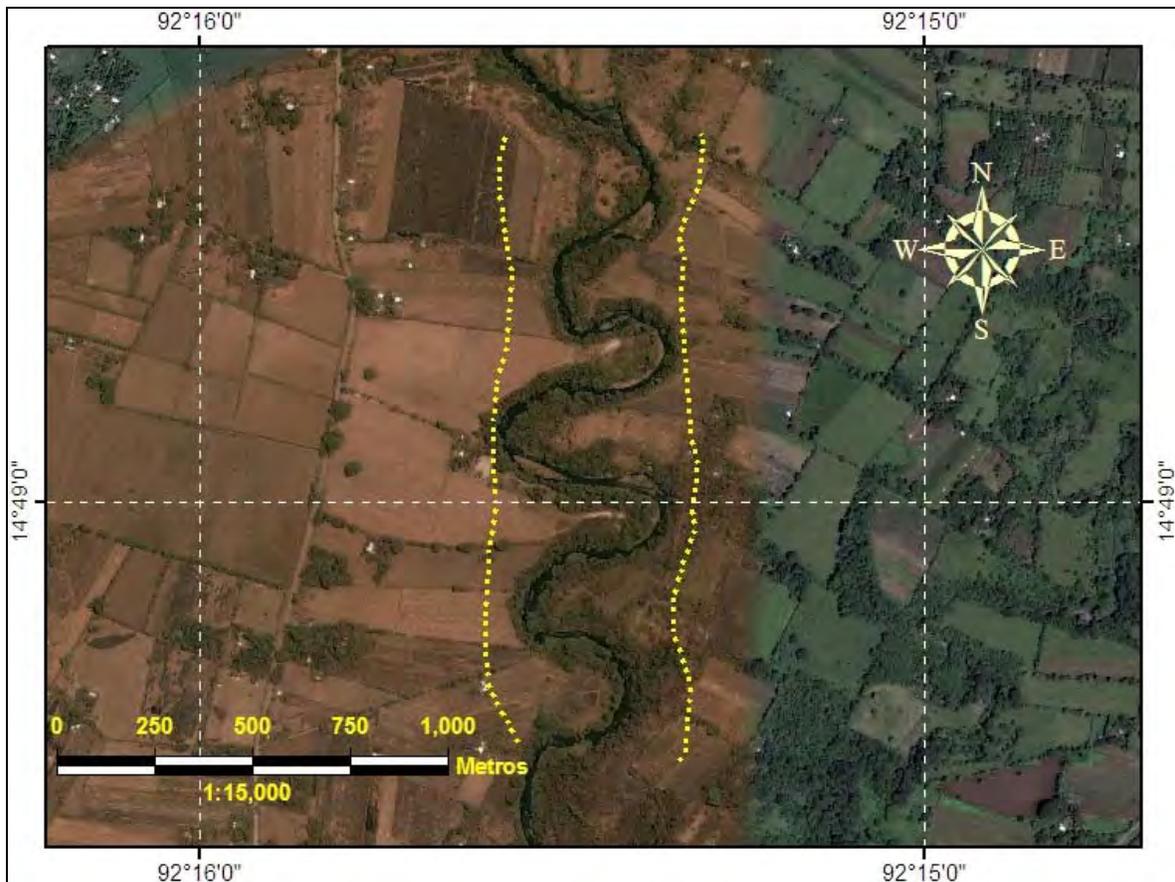


Figura 6.12 Límites del meandro sobre el tramo de estudio

## **6.5 Resumen de la metodología propuesta**

A continuación se presenta un resumen del procedimiento y las recomendaciones propuestas para utilizar la ecuación Gutiérrez-Vladimir, para predecir la zona de riesgo en meandros.

- a) Identificar claramente el tramo del río en estudio y obtener con imágenes de satélite o levantamientos en campo, la geometría del meandro. Si es posible contar con información de años anteriores.
- b) Obtener el mayor número de características morfológicas y fluviales.
- c) Utilizar un análisis multivariado para discriminar y jerarquizar las características morfológicas y fluviales del río en estudio. En su caso, identificar las variables más relevantes a través de un análisis de varianza.
- d) Aplicar la expresión (6.5) utilizando la selección de variables jerarquizadas y los valores de los componentes principales como una descripción fiel del fenómeno estudiado.
- e) Suavizar las curvas con la técnica de promedios móviles y compararla con la sinuosidad original del río en estudio.
- f) Evaluar los límites de confianza para las condiciones máximas y mínimas. Con esto se obtiene una primera aproximación de las zonas afectadas por el meandro del río.
- g) Utilizando un modelo autorregresivo, realizar una simulación estocástica, generando muestras sintéticas o un pronóstico en el tiempo de las condiciones morfológicas y fluviales del río; o directamente utilizando la serie de valores ( $y$ ) que se obtiene con la expresión propuesta para pronosticar el meandro.
- h) Con ayuda de una carta topográfica, levantamiento o fotografía aérea y utilizando los resultados de la simulación estocástica, definir en campo las zonas de riesgo potencial por el meandro del río.
  - i) Validar después de la temporada de lluvias los movimientos y divagación del río, comparar con los límites calculados y en caso de ser necesario volver a estimar la sinuosidad del río con nuevas mediciones.

## Capítulo 7 Conclusiones

Mediante este estudio se elaboró una descripción detallada de la región hidrológica Costa de Chiapas, también se describió su régimen hidrológico.

Posteriormente se plantearon diversas ecuaciones empíricas para cada cauces meandreantes de esta zona. A continuación se obtuvo un grupo de 6 ecuaciones globales empíricas para todos los cauces analizados. Las variables fuertemente correlacionadas entre sí son:  $L - M_L$ ,  $L - B$ ,  $L - a$ ,  $r - M_L$ ,  $r - L_c$  y  $B - L_c$ . Estas ecuaciones no permiten describir el movimiento del cauce sino solamente calcular una variable desconocida a partir de otra que se conoce.

En este estudio se consideró la sinuosidad del río como una variante de la formulación de Kinoshita y los resultados obtenidos empleando cuatro pares de senos y cosenos más un término independiente fueron aceptables. Si bien la formulación expuesta no presenta componentes cinemáticos del comportamiento del meandro, si es una buena

aproximación de la evolución de la sinuosidad del río. Tampoco se utilizaron parámetros que involucren el transporte de sedimentos, pero el desarrollo presentado permite incorporar variables relacionadas con este fenómeno. Un análisis de componentes principales determinara la posición, en su caso de estas variables.

La jerarquización de las variables obtenida con el ACP, mostró claramente tres grupos de parámetros los cuales en conjunto explican el comportamiento del meandro en el río Cahuacán. El primer grupo formado por las características morfológicas del río. El segundo grupo está formado por características netamente hidrológicas, en donde se incluye el gasto de aportación y el área de la cuenca y el tercero formado por las características morfológicas y geométricas del río.

La utilización de las condiciones máximas y mínimas que ha presentado el meandro del río históricamente, arrojan un panorama adecuado para comenzar la estimación de la zona de posibles daños. De esta forma, el cálculo de los límites de confianza aunque de una manera estadística, constituye una buena herramienta para consolidar los argumentos que definen las zonas de riesgo potencial de ser afectadas por el meandro del río Cahuacán. Asimismo, la simulación estocástica de las condiciones futuras del río permite definir con precisión dichas zonas directamente en campo.

Finalmente, la formulación que se presenta en este trabajo es sencilla y puede implementarse fácilmente en un programa de cómputo, además permite incluir variables o una combinación de ellas, que puedan describir por ejemplo efectos que con las formulaciones empíricas tradicionales no ha sido posible modelar; como por ejemplo la distribución de los sedimentos a lo largo de la sección transversal de un río.

En conclusión el objetivo final de este trabajo se cumplió; demostrando que este estudio multivariado permite a través de ecuaciones trigonométricas pronosticar las zonas de riesgo por meandro de ríos. Estos límites permiten definir en campo, las zonas de alto riesgo y vulnerabilidad debido a la dinámica del río y su corredor fluvial.

## Referencias

- Abad, J. D. y García, M. H. 2006. RVR Meander: A toolbox for re-meandering of channelized streams. *Computers & Geosciences* (32) 92–101.
- Abad, J. D. y García, M. H. 2004. Conceptual and Mathematical Model for Evolution of Meandering Rivers in Naturalization Processes. *ASCE World Water & Environmental Resources Congress*, Salt Lake City, Utah, USA.
- Abad, J. D., Spalletti, Pablo D., García, M. H. y Brea, José D. Efecto de la construcción del puente Lavallo en la evolución de meandros en el río Bermejo. XXII.
- Abad, J. D. y García, M. H. 2006. Hydrodynamics in Kinoshita-generated meandering bends: importance for river-planform evolution. *Water resources Center and the National Science Foundation*.
- Ackers, P. and Charlton, F. G. 1970. The geometry of small meandering streams. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. Supplement XII.

- Andrews, C., 1972 Plots of high dimensional data. *Biometrics, Journal of Hydrology*, Number 28, 125-136 pp.
- Agarwal, V. C. 1983. Studies on the characteristics of meandering streams. Ph.D. *Thesis*.
- Aparicio, M. F. J., Fundamentos de Hidrología de Superficie, Limusa, México, 1996.
- Beck, S. M. 1988. Computer-simulated deformation of meandering river patterns. *PhD Thesis*. Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Berezowsky, V. M. y Vilchis, V. R. 2000. Protección y control de cauces. México, *CNA-IMTA*.
- Biedenharn, D. S., y Copeland, R. R. 2000. Effective discharge calculation. *Tech. rep., U.S. Army Corps of Engineers, ERDC/CHL HETN-II-4*.
- Blanckaert, K. 2002. Flow and turbulence in sharp openchannel bends. *PhD thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, EPFL, Switzerland*.
- Bradshaw, P. 1969. The analogy between streamline curvature and buoyancy in turbulent shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 36: 177-191.
- Bradshaw, P. 1973. Effects of streamline curvature on turbulent flow. *AGARDograph, NATO* (169).
- Campos A. D., Procesos del ciclo hidrológico. *Universitaria Potosina*. México 1998.
- Chebbi, B., Holloway, A. G. L., y Tavoularis, S. 1998. The response of sheared turbulence to changes in curvature. *Journal of Fluid Mechanics*, 358 (7).
- Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (CNA, IMTA). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*, México, D.F., 2000.
- Darby, S. E., y Delbono, O. 2002. A model of equilibrium bed topography for meanders. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27: 1057-1085.
- De Pedraza G. J. Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones, Editorial Rueda. Madrid, 1996.

- Deymier C., Tacnet J. M., Mathys N. Conception et calcul de barrages de correction torrentielle. No. 18. Série Équipements pour l'eau et l'environnement. *CEMAGREF*, 1995.
- Donald, H.B., 1988 Delineation of groups for regional flood frequency analysis, *Journal of Hydrology*, Number 104, 345-361 pp.
- Duan, J. G. 1998. Simulation of alluvial channel migration processes with a two-dimensional numerical model. *PhD thesis*, Engineering Science, Computational Hydroscience and Engineering Department, University of Mississippi, Mississippi, USA.
- ECOSUR. Agonía y desaparición de los ríos y humedales en la costa de Chiapas. *Órgano de difusión de El Colegio de la Frontera Sur*. Agosto 2005.
- Everitt, B.S., 1978 Graphical techniques for multivariate data, Great Britain, North-Holland, 117 p.
- Escalante S. C., Reyes C. L., Técnicas estadísticas en hidrología. *UNAM, Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería hidráulica*. Publicaciones de la facultad de ingeniería. Diciembre de 2005.
- García, M. H. y Niño, Y. 1993. Dynamics of sediment bars in straight and meandering channels: experiments on the resonance phenomenon. *Journal of Hydraulic Research*, 31(6).
- García-Pelayo, 1985. Diccionario Larousse de la lengua española. Ramón García-Pelayo y Gross. Editorial Larousse, México 1985.
- Garde R., Ranga raju. 1985. Mechanics of sediment transportation and stream problems. Second edition. Wiley Eastern Limited.
- González, V., F.J. Contribución al análisis de frecuencias de valores extremos de los gastos máximos en un río, *Instituto de Ingeniería de la UNAM*, núm. 277, 24 pp., México, D.F., 1970.
- Gumbel, E. J. Statistics of Extremes, *Columbia University Press*, 375 págs. New York, EUA. (1958).

- Gupta R. S. Hidrology & hidraulic systems. *Waveland Press, Inc.* 1995.
- Gracia Sánchez J., Maza Álvarez J. A., Manual de Ingeniería de Ríos, Capítulo 11 Morfología de Ríos; *Instituto de Ingeniería de la UNAM; Comisión Nacional del Agua*, México. Junio 1997.
- Graf W. H. 1971. Hydraulics of sediment transport. McGraw Hill.
- Grupo TRAGSA, 2003. La ingeniería en los procesos de desertificación. Ediciones Mundi Prensa; 1045 págs; editado por *GRUPO TRAGSA*, Madrid, España.
- Hamblin WK, Christiansen EH (2001). *Earth's dynamic system*. 9ª Ed. Prentice Hall.
- Hernández R. O. Temas de análisis estadístico multivariado. 1ª Edición. Editorial de la Universidad de Costa Rica, 1998.
- Hickin, E. J. 1974. The development of meanders in natural river-channels. *American Journal of Science*, 274: 414-442.
- Holloway, A. G. L. y Tavoularis, S. A. 1998. A geometric explanation of the effects of mild streamline curvature on the turbulence anisotropy. *Physics of Fluids*, 10 (7).
- Hooke, J. M. 1984. Changes in river meanders: a review of techniques and results of analyses. *Prog. Phys. Geog.* 8: 473-508.
- Hooke, J. M. 1995. Processes of channel planform change on meandering channels in the UK. *Inchanging River Channels* (Ed: Gurnell, A. and Petts, G.), John Wiley & Sons Ltd.
- Hooke, J. M. y Redmond, C. E. 1992. Causes and Nature of River Planform Change. *In Dynamics of Gravelbed Rivers* (Ed: Billi, P., Hey, R. R., Thorne, C. R. and Tacconi, P.), John Wiley & Sons Ltd.
- Hooke, R. LeB. 1974. Shear-stress and sediment distribution in a meander bend. *Technical report*. University of Uppsala, Sweden..
- Howard, A. D. y Hemberger, A. T. 1991. Multivariate characterization of meandering. *Geomorphology*, 4, 161-186.

- Horton, R.E. 1947. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America. Bulletin* 56: 275-370.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Extractor rápido de información climatológica (ERIC III), México, D.F., 2006.
- Irwin, H. P. y Smith, P. A. 1975. Prediction of the effect of streamline curvature on turbulence. *Physics of Fluids*, 18 (6): 624-630.
- Jang, C-L. y Shimizu, Y. 2005. Numerical simulation of relatively wide, shallow channels with erodible banks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131 (7), 565-575.
- Johnson, D. Applied multivariate methods for data analysis. International Thompson Editores (2000).
- Kinoshita, R. 1961. Investigation of channel deformation in Ishikari River. *Report to the Bureau of Resources*: 1-174.
- Kinoshita, R. y Miwa, H. 1974. River channel formation which prevents downstream translation of transverse bars. *ShinSabo*, 94: 12-17.
- Kite, G. W. Frequency y Risk Analyses in Hydrology, *Water Resources Publications*, 187 págs. Littleton, Colorado, (1988).
- Lagasse, P. F., Spitz, W. J., Zevenbergen, L. W., y Zachmann, D. W. 2004. Handbook for predicting stream meander migration. *Report 533, National Cooperative Highway Research Program*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, USA, 105 pp.
- Lane, S. (1995): The dynamics of dynamic river channels. *Geography*, 80(2): 147-162.
- Langbein, W. B. y Leopold, L. B. 1966. River meanders, a theory of minimum variance. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 422-H, 15.
- Leopold, L.B. A View of the River. *Harvard University Press*. 1994.
- Leopold L. B., and M. G. Wolman 1960. *River meanders*. Bull. Geo, S. A., Vol. 71.
- Leopold L. B., M. G. Wolman., P. Miller John. 1964. *Fluvial processes in geomorphology*.

- Levi, L. E. Tratado Elemental de Hidráulica. *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*. 1996.
- Lindsley, Kohler and Paulus. Hidrología para ingenieros. 2da Edición, Editorial McGraw-Hill.
- MacDonald, T. E., Parker, G., y Leuthe, D. 1992. Inventory and analysis of stream meander problems in Minnesota. Technical report., Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, USA, 38 pp.
- MacDonald, T.E., 1991. Inventory and analysis of stream meander problems in Minnesota. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, USA, 152pp.
- Martín V. J. 2003. Ingeniería de ríos. *Universitat Politècnica de Catalunya*. Alfa Omega grupo editor, S. A. de C. V.
- Maza Alvarez J. A. 1987. Introduction to river engineering. *Università Italiana per Stranieri*. Advanced course on Resources Management. Perugia Italia.
- Maza Alvarez J. A. y Cruickshank V. C. 1973. Canales estables en corrientes aluviales. México. *Recursos hidráulicos*. Vol. II. No. 2.
- Mendenhall, W, D. Wackerly D., L. Scheaffer R. Estadística Matemática con Aplicaciones, Iberoamericana, México, 1994.
- Mueller, J. E. 1968. An introduction to the hydraulic and topographic sinuosity indexes. *Annals of the American Geographers*, 58 (2): 371-385.
- Musy A. Cours d'Hydrologie générale. Section SIE et GC. 4ème semestre 2005.
- Nathan, J., y McMahon, T., 1990 Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation, *Journal of Hydrology*, Number 121, 217-238 pp.
- Oneill, M. P. y Abrahams, A. D. 1986. Objective identification of meanders and bends. *Journal of Hydrology*, 83, 337-353.
- Organización Meteorológica Mundial, Guía de prácticas hidrológicas. OMM-Nº 168, Quinta edición. 1994.

- Parker, G. y Andrews, E. D. 1986. On the time development of meanders bends. *Journal of Fluid Mechanics*, 162: 139-156.
- Parker, G., Diplas, P., y Akiyama, J. 1983. Meander bends on high amplitude. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109 (10).
- Pérez. L. C. Técnicas de Análisis Multivariante de Datos. Person Educación, S. A., Madrid, 2004.
- Raudkivi A. J. 1990. Loose boundary hydraulics. 2nd Edition. Pergamon Press.
- Raynal, J. A., y O. D. Santillán, Estimadores de Máxima Verosimilitud para los Parámetros de la Distribución GVE Mixta, IX Congreso Nacional de Hidráulica, págs. 79-90, Querétaro, México (1986).
- Rice Raymond M. (1967). Multivariate methods useful in hydrology. International Hydrologie Symposium, Fort Collins.
- Rosgen, D.L. (1994): A classification of natural rivers. *Catena*, 22(3): 169-199.
- Ruíz U. M. del R. Programa de automatización de los métodos estadísticos en hidrología. *UNAM, Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería hidráulica.* Publicaciones de la facultad de ingeniería. Mayo de 2002.
- Shen H. W. 1971. River Mechanics. Vol. I. Colorado: Fort Collins.
- Shields, F. D., Copeland, R. R., Klingeman, P. C., Doyle, M. W., y Simon, A. 2003. Design for stream restoration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129 (8).
- Sotelo Ávila Gilberto. Hidráulica General. Volumen 1, Fundamentos. Editorial Limusa S.A. de C.V. 2001.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *American Geophysical Union Transactions*. 38: 913-920.
- Strahler, A. N. (1952). Dynamic basis of geomorphology. *Geological Society of America Bulletin*, 63, 923 – 938.
- Viessmanm W; Lewis, G. L. and knapp, J. W. Introduction to Hydrology, Harper & Row, New York, EUA, 1989.

- Whiting, P. J. y Dietrich, W. E. 1993a. Experimental studies of bed topography and flow patterns in large-amplitude meanders 1: Observations. *Water Resources Research*, 29 (11).
- Whiting, P. J. y Dietrich, W. E. 1993b. Experimental studies of bed topography and flow patterns in large-amplitude meanders 2: Mechanisms. *Water Resources Research*, 29 (11).
- Wiltshire, S., y Beran, M., 1987 Multivariate techniques for the identification of homegeneous flood frequency regions, Regional flood frequency analysis, 133-145 pp.
- Yamano T. Estadística. Tercera edición, Harla S. A. de C. V. 1979.
- Yamaoka, I. y Hasegawa, K. 1984. Effects of bends and alternate bars on meander evolution. *In River Meandering, Proceedings of the Conference, Rivers '83*, edited by C. M. Elliot, pp: 783-793, ASCE, New York.

## Anexo A

### A. 1 Parámetros de las f. d. p. ajustadas

No Cuenca	Clave	Estación	Función de ajuste	Parámetros de las funciones de distribución				
				P	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$
1	23026	Tapanatepec	D.G. Optimizada	0.78	0.01208	46.591	0.00100	671.791
4	23041	El Rosario	<b>Exponencial</b>		<b>6.728</b>			
5	23040	Tiltepec	Doble Gumbel	0.80	0.72986	2.079	0.19107	8.006
6	23011	Tonalá	<b>Log normal</b>		<b>4.59330</b>	<b>0.899</b>		
8	23036	Tres Picos	D.G. Optimizada	0.75	0.131421	8.6139	0.1164	78.6304
11	23013	De Jesús	D.G. Optimizada	0.78	0.056398	32.96	0.051588	94.6401
13	23046	Siete Cigarros	<b>Exponencial</b>		<b>0.7238</b>	<b>0.004</b>		
15	23014	San Diego	D.G. Optimizada	0.89	0.011101	130.31	0.02821	391.7587
16	23030	Urbina	D.G. Optimizada	0.65	0.157527	12.996	0.019277	156.0511
17	23009	Pijijiapan	D.G. Optimizada	0.92	0.009151	163.59	0.002161	532.7718
18	23017	Coapa	D.G. Optimizada	0.70	0.01265	73.265	0.013938	296.9906
19	23018	Margaritas	D.G. Optimizada	0.78	0.015671	114.09	0.005415	436.7384
21	23012	Novillero	D.G. Optimizada	0.70	0.012342	164.59	0.027765	344.8576
22	23022	San Nicolás	D.G. Optimizada	0.78	0.033933	75.298	0.01228	192.4625
23	23015	Cacaluta	D.G. Optimizada	0.92	0.015777	121.26	0.008888	364.6601
24	23044	Doña María	D.G. Optimizada	0.55	0.300403	6.9822	0.037125	35.3335
25	23016	Cintalapa	D.G. Optimizada	0.91	0.014855	104.02	0.002764	375.2644
26	23032	Vado Ancho	D.G. Optimizada	0.60	0.039496	36.722	0.054558	82.643
27	23031	Compoapa	D.G. Optimizada	0.70	0.266879	11.041	0.085837	21.7262
28	23019	Despoblado	D.G. Optimizada	0.70	0.010786	101.53	0.015386	398.3755
29	23008	Huixtla	D.G. Optimizada	0.61	0.010553	77.266	0.009807	359.2922
31	23991	Islamapa	D.G. Optimizada	0.67	0.11818	22.125	0.017762	112.821
32	23037	Cuyamiapa	D.G. Optimizada	0.62	1.01246	2.9121	0.139072	31.2806
33	23020	Huehuetan	D.G. Optimizada	0.78	0.009806	269.56	0.00556	545.514
34	23006	Malpaso	D.G. Optimizada	0.78	0.010494	134.53	0.003248	568.7654
35	23003	Cahuacan	D.G. Optimizada	0.93	0.021843	127.73	0.008623	382.8011
36	23005	Talismán I	D.G. Optimizada	0.70	0.019245	179.95	0.019663	348.94
37	23023 23034	Talismán II y III	D.G. Optimizada	0.77	0.012939	196.92	0.002806	446.1949
38	23007	Suchiate II	D.G. Optimizada	0.78	0.004252	790.42	0.002647	1581.8777
39	23002	Suchiate I	Doble Gumbel	0.80	0.003966	825.63	0.00467	2449.74

Tabla A.1 Parámetros de las funciones de distribución de probabilidad ajustadas

**A. 2 Error estándar de los ajustes de las funciones de distribución de probabilidad**

No Cuenca	Clave	Estación	Doble Gumbel Optimizado	Doble Gumbel	Normal	Log normal	Gumbel	Exponencial	Gamma
1*	23026	Tapanatepec	44.49	85.00	331.24	252.26	274.16	231.58	235.05
4	23041	El Rosario		2.84	2.70	2.09	2.24	1.91	2.27
5	23040	Tiltepec		1.68	2.61	2.40	2.24	2.12	2.27
6	23011	Tonalá	35.57	42.77	71.63	45.77	53.41	44.40	47.29
8	23036	Tres Picos	3.20	21.11	32.03	29.01	26.20	22.17	23.84
11	23013	De Jesús	3.86	4.80	7.54	6.47	4.73	7.52	4.62
13	23046	Siete Cigarros		0.32	0.32	0.31	0.25	0.22	0.24
15	23014	San Diego	12.44	20.57	20.74	30.99	20.12	35.49	20.83
16	23030	Urbina	10.86		41.25	47.00	35.03	32.51	37.41
17	23009	Pijjiapan	34.78	54.92	74.97	55.54	55.05	54.98	54.48
18	23017	Coapa	22.72	28.50	32.88	42.84	29.01	40.40	32.05
19	23018	Margaritas	48.05	49.08	85.88	62.56	63.46	55.30	57.82
21	23012	Novillero	14.08	25.92	21.10	33.23	30.85	44.94	27.47
22	23022	San Nicolás	9.44	13.66	29.88	17.67	19.71	15.63	18.99
23	23015	Cacaluta	17.73	22.81	28.67	21.39	19.20	24.57	19.46
24*	23044	Doña María	7.12	311.40	12.02	13.60	10.34	9.84	11.01
25	23016	Cintalapa	20.56	42.83	67.35	46.47	51.15	45.54	48.41
26*	23032	Vado Ancho	9.90	16.79	8.38	13.17	11.28	14.95	11.46
27	23031	Compoapa	1.54		2.98	2.81	2.57	2.74	2.67
28	23019	Despoblado	24.89	28.37	38.84	57.11	40.26	56.86	43.47
29	23008	Huixtla	19.03	32.12	34.57	52.68	30.12	51.02	36.79
31*	23991	Islamapa	6.29	41.20	27.36	28.36	23.03	21.30	23.25
32	23037	Cuyamiapa	1.31	218.60	7.51	9.08	6.73	6.72	7.38
33	23020	Huehuetan	55.51	60.29	64.53	55.73	51.54	63.09	56.07
34	23006	Malpaso	53.36	63.22	139.45	81.74	97.32	70.92	78.28
35	23003	Cahuacan	7.04	16.99	37.50	20.67	23.72	17.84	25.16
36	23005	Talismán I	16.08	32.89	27.45	26.45	25.42	31.82	24.22
37	23023/23034	Talismán II y III	67.36	81.78	145.76	94.68	113.50	94.02	99.65
38	23007	Suchiate II	69.96	78.83	116.96	87.45	84.59	109.34	86.85
39	23002	Suchiate I		194.55	300.29	270.19	255.80	261.98	263.05

Tabla A.2 Errores estándar de ajuste

## Anexo B

### *B. 1 Figuras de los meandros analizados*

En este apartado se muestra la configuración en planta de los tramos de siete ríos, que sirvieron como base para este estudio. Estos son: Los ríos Tepanatepec, Zanatenco, La Flor, San Diego, Coapa, Coatán y Cahuacán. Así mismo, en estas imágenes se aprecian suficientemente las curvas y en algunos casos la numeración de las mismas, utilizada para su análisis.

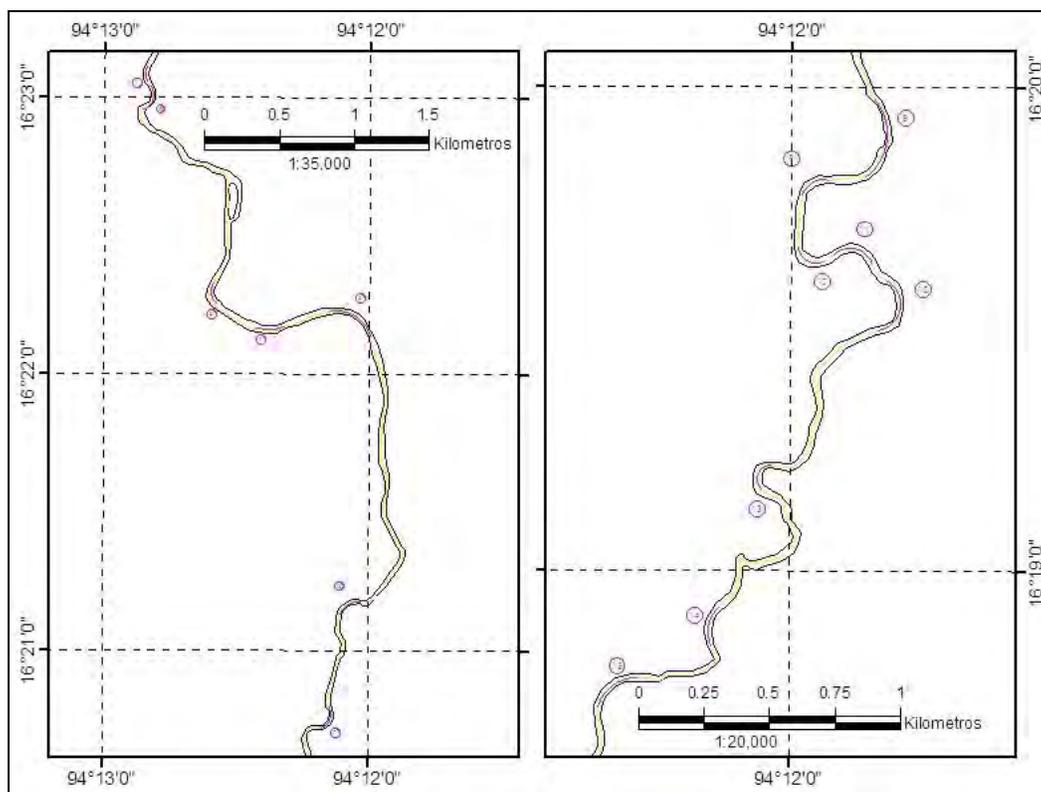


Figura B.1 Meandros del río Tepanatepec

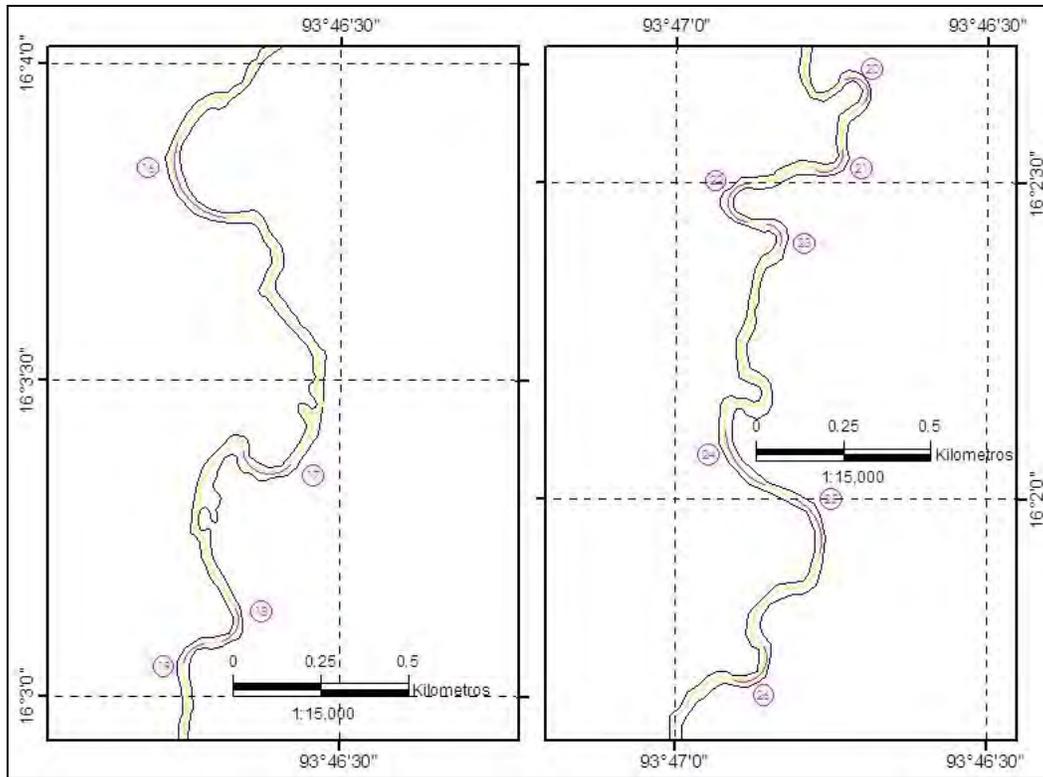


Figura B.2 Meandros del río Zanatenco

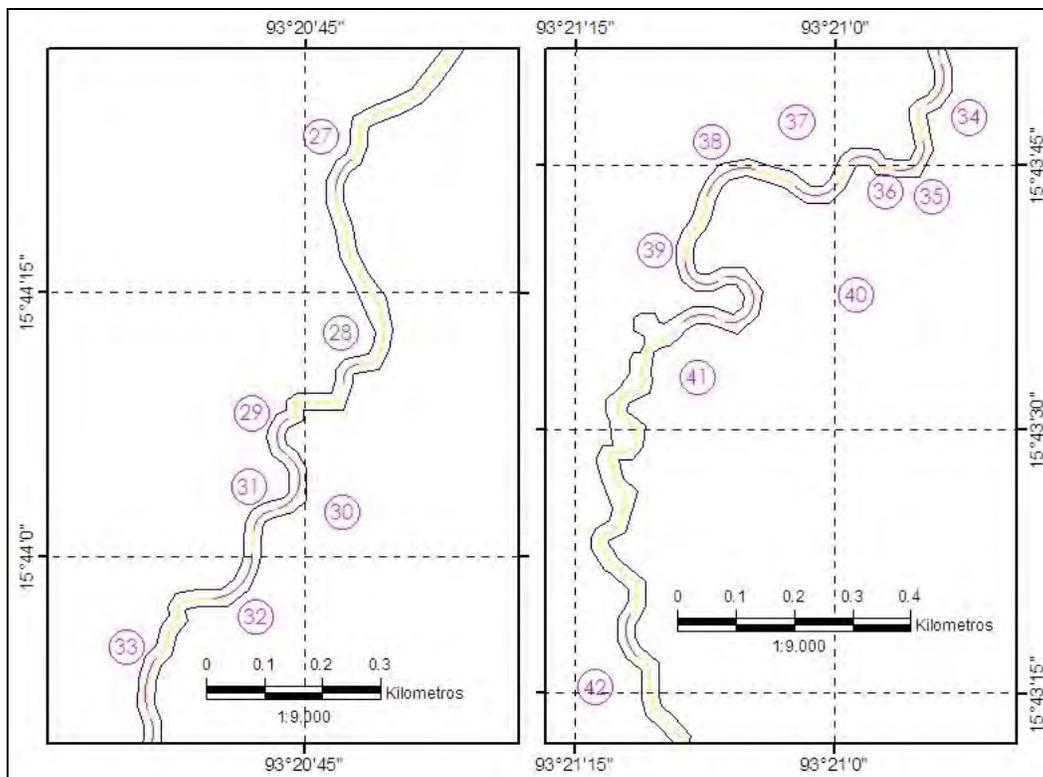


Figura B.3 Meandros del río La Flor

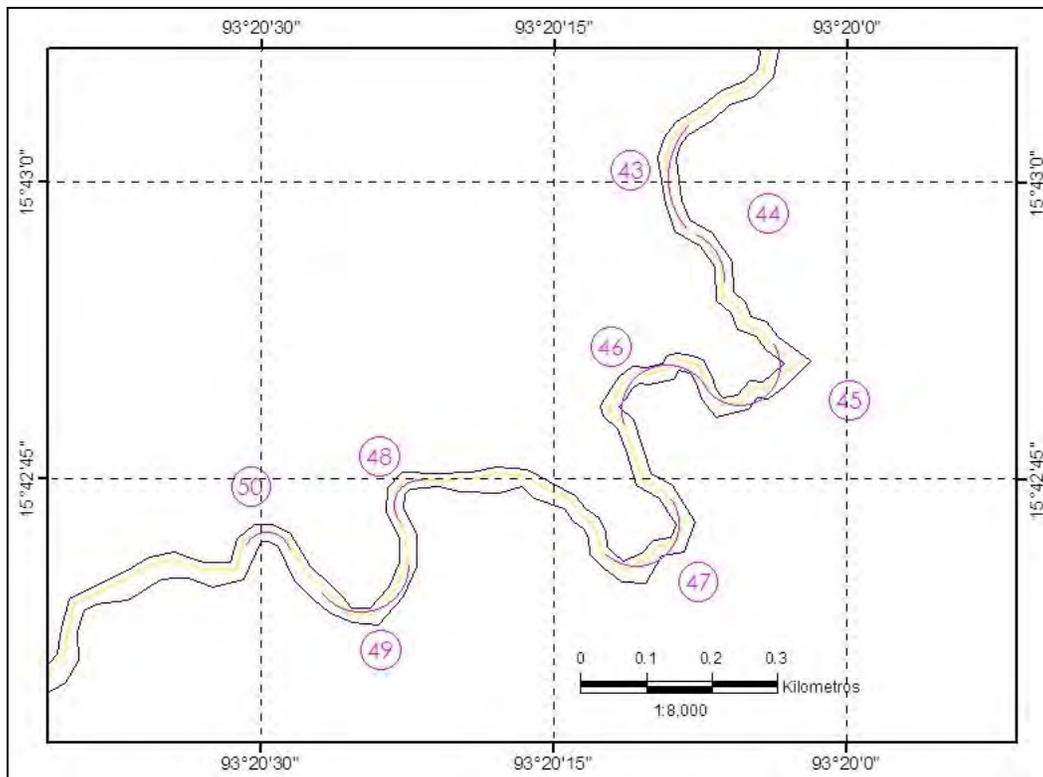


Figura B.4 Meandros del río San Diego

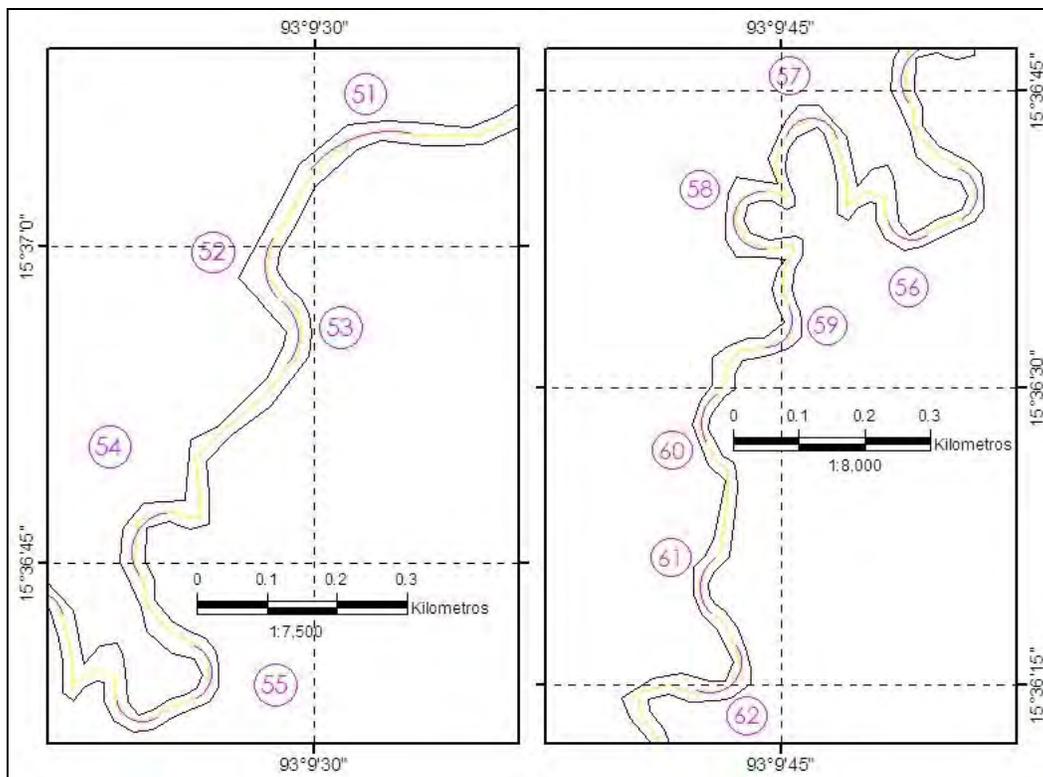


Figura B.5 Meandros del río Coapa

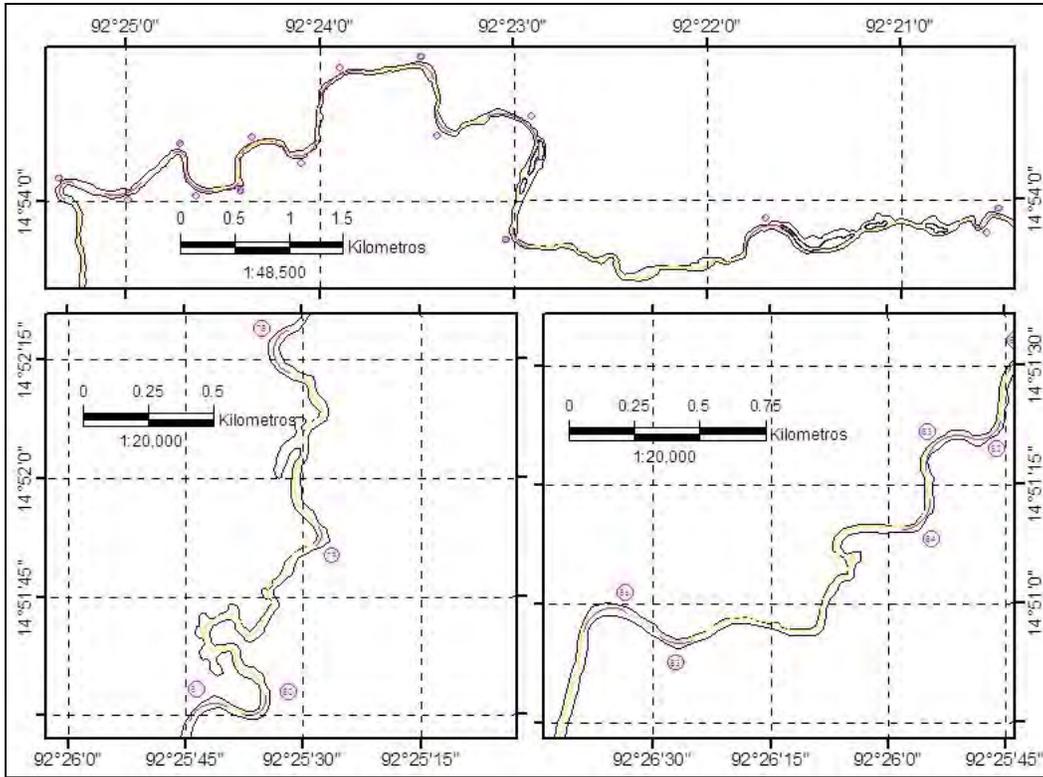


Figura B.6 Meandros del río Coatán

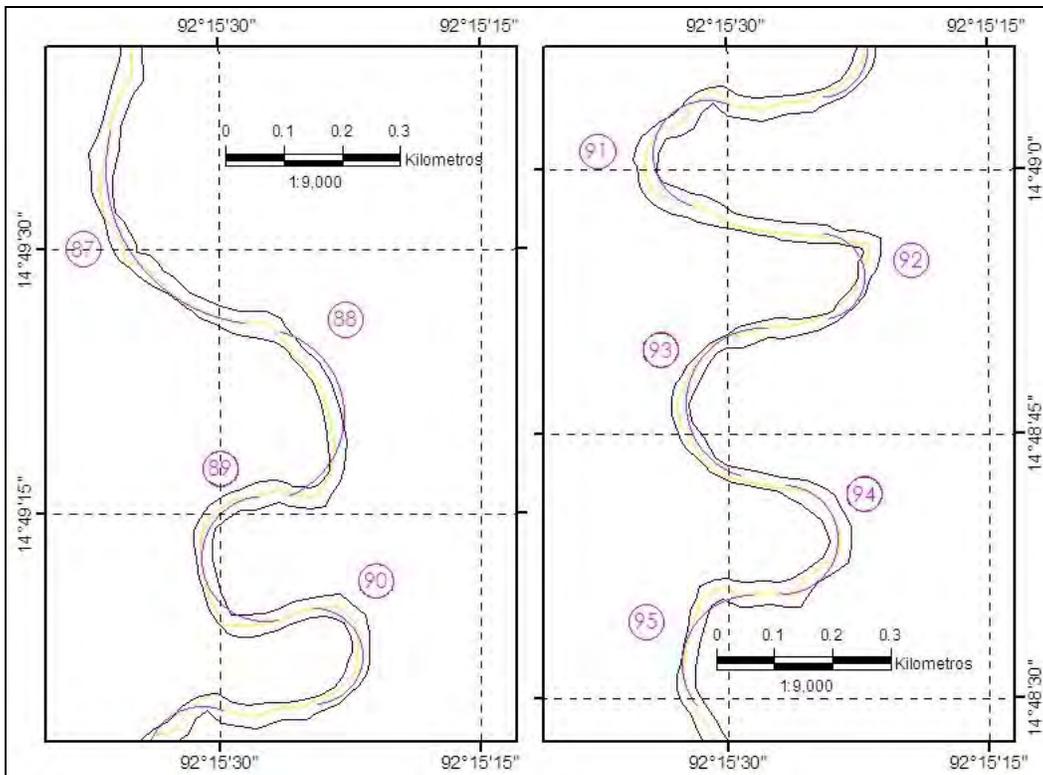


Figura B.7 Meandros del río Cahuacán

