

DIANÁMICA FLUVIAL DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO TEPEJI

Por *Oralia Oropeza Orozco**

SUMMARY

El presente trabajo pretende conocer la dinámica fluvial de los principales ríos y afluentes que integran la cuenca alta del río Tepeji. Al efecto, se determinan los parámetros considerados como los más importantes y se analiza el balance hídrico. A la vez, estos aspectos se relacionan geomorfológicamente con otros elementos clave del medio natural.

RÉSUMÉ

Le présent travail aspire à connaître la dynamique fluviale du réseau hydrologique appartenant à l'haute bassin du Tepeji. A cette effet se déterminent les paramètres morphométriques considérés comme les plus importants au même temps que s'analyse le bilan hydrique. A la fois, ces aspects se relationent, suivant un critérium géomorphologique, vis-à-vis d'autres éléments clefs du milieu naturel.

INTRODUCCIÓN

En general, los estudios de cuencas hidrográficas realizados en nuestro país no toman en consideración el manejo del medio natural y, en muchos casos, tampoco incluyen el funcionamiento hidrodinámico; en cambio, se le da mayor importancia al aspecto hidráulico.

El principal objetivo de este trabajo es apoyar el manejo óptimo de la cuenca del río Tepeji, de sus elementos y de sus recursos mediante el análisis integral de la dinámica fluvial, puesto que se observa en ella una serie de situaciones anómalas que, en último grado, afectan el funcionamiento de la presa Taxhi-may.

Esta problemática resume, entre otras cosas, el desconocimiento de la distribución de la cantidad de agua que entra en la cuenca, de

la que se pierde por evapotranspiración o infiltración, las formas como se recupera, su actividad dinámica dentro de la misma, etcétera.

La solución a estas anomalías sólo podrá lograrse analizándolas integralmente.

El desarrollo del trabajo se basa en un criterio geomorfológico que enfatiza en la morfometría y en el balance hídrico de la cuenca.

EL MEDIO FÍSICO

La cuenca alta del río Tepeji se localiza en la porción centro-norte del Sistema Volcánico Transversal.

Las sierras que le sirven de límite son: por el sur y oeste, las sierras de Monte Alto, Monte Bajo y Las Masas; por el noroeste y noreste la sierra de Jilotepec y sus estribaciones; y al este un pedimento que, a manera de lomeríos, se desprende de las sierras de Monte Alto y Monte Bajo.

* Ayudante de investigador del Instituto de Geografía de la UNAM.

Las aguas captadas por la cuenca en cuestión se almacenan en la presa Taxhimay, cuya capacidad es de 50 millones de metros cúbicos, en un área de embalse de aproximadamente 400 hectáreas.

La mayor parte de la cuenca corresponde al Estado de México y una pequeña parte al Estado de Hidalgo (noreste).

Unidades morfoestructurales

Se encuentran fundamentalmente tres tipos de estructuras:¹

Las elevaciones. Constituidas por los macizos volcánicos de Monte Alto y Monte Bajo, al sur de la cuenca; Las Masas, al oeste; y Jilotepec al norte y noreste (véase mapa de Unidades Morfoestructurales). Su génesis es volcánica en sus inicios, pasando después a una actividad tectónica en la que los procesos de fractura son los más importantes. Las alturas de estas elevaciones sobrepasan los 3 000 m, su composición litológica es a base de andesitas, traquiandesitas, fonolitas y brechas volcánicas.

El tipo de vegetación de esta unidad está representado por oyameles, pinos y encinos, así como algunos pastizales naturales, todos con diversos grados de alteración debido al mal uso que de esta vegetación se hace.

Dentro de los procesos geomorfológicos que actúan en estas elevaciones se encuentran los de intemperismo físico-químico y biológico; procesos gravitacionales tales como la sufosión, coluvionamiento, derrumbes, deslizamientos y reptación; y procesos hídricos como escorrentías, escurrimiento hipodérmico y escurrimiento superficial.

El pedimento. La segunda estructura está constituida por una subplanicie de piedemonte y pedimento que se ha dividido en: el pedimento de Villa del Carbón, localizado al sur de las sierras de Monte Alto y Monte Bajo, de los 2 600 m a los 3 000 m de altitud aproximadamente, continúa hacia el este de la sierra de Las Masas donde es muy reducido, y abarca de los 2 450 m a los 2 600 m de altitud; y el pedimento La Soledad que se extiende al sureste de la sierra de Jilotepec, más o menos de los 2 300 m a los 2 400 m de altitud.

¹ Oropeza O., 1976. *Análisis de los procesos geomorfológicos en la cuenca alta del río Tepeji, Hgo.* Tesis profesional, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. p. 4-10.

La litología de ambos pedimentos está compuesta por depósitos volcánicos heterogéneos constituidos por aglomerados, brechas volcánicas y tobas; el tipo de vegetación se caracteriza por la presencia de un bosque de encinos, matorral subinerme caducifolio, pastos y cultivos.

En esta zona los procesos dominantes son los hídricos, de los cuales destacan las escorrentías difusa fuerte y concentrada, así como los escurrimientos.

La depresión Taxhimay. Por último, la tercera estructura corresponde a la depresión Taxhimay localizada en la parte centro-nororiental de la cuenca; sus límites son, por el norte, el pedimento de La Soledad, y por el sur y este el de Villa del Carbón.

La composición litológica es semejante a la de la estructura anterior, pero, además, incluye material aluvial aportado por los ríos y arroyos principales. La vegetación está representada por un bosque muy perturbado, de encinos, interrumpido por matorral, pastizal y gran cantidad de cultivos. Los procesos morfogenéticos más importantes son los hídricos cuyo incremento es favorecido por la acción antrópica negativa.

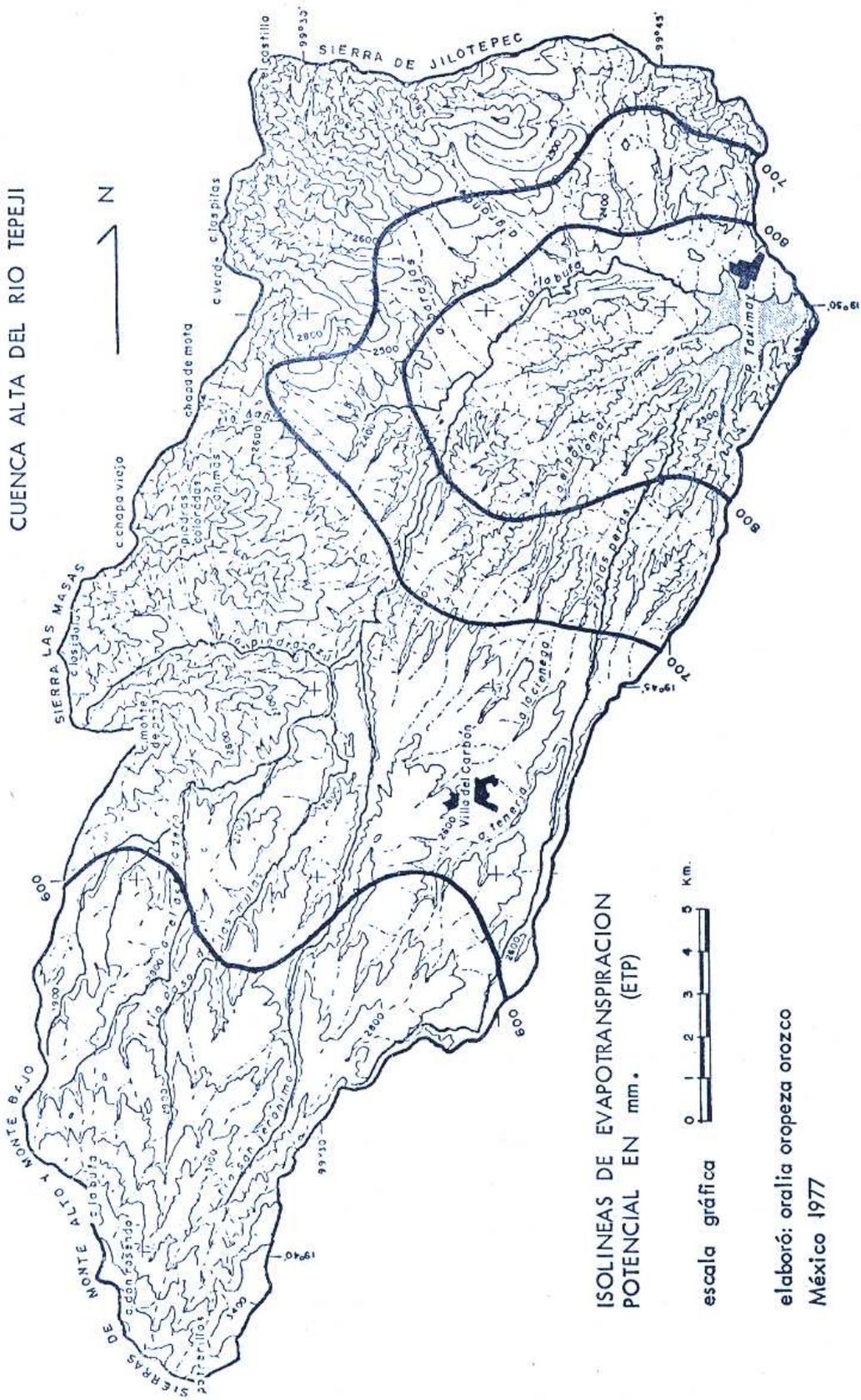
En todas las estructuras se han manifestado movimientos neotectónicos; sin embargo, la zona más afectada es la correspondiente a la depresión Taxhimay.

ANÁLISIS MORFOMÉTRICO

En una cuenca hidrográfica es muy importante el estudio morfométrico de los ríos, de los arroyos y de sus propias subcuencas. En la práctica se vi ne sintiendo la necesidad cada vez más imperiosa de encontrar medidas de comparación entre los ríos, para poder destacar en una forma más precisa la importancia de su evolución y de su dinámica témporo-especial.

Morfometría de la cuenca

De todos los parámetros que se requieren para estudiar una cuenca, se seleccionaron únicamente aquellos más importantes para definir la dinámica fluvial: el área, la pendiente media y el coeficiente de compacidad.



Área de la cuenca

En realidad no existe un criterio definido para considerar la dimensión de una cuenca a partir de su superficie. En efecto, se ha notado que las cuencas pequeñas se ven más afectadas por las precipitaciones que pueden cubrir gran parte del área en poco tiempo; lo contrario sucede en cuencas grandes en donde es más importante el efecto de almacenamiento en los cauces; en cuanto a las cuencas medianas, en éstas existe un equilibrio entre las precipitaciones y el almacenamiento en los cauces. Aunque existe una relación directa entre el área de la cuenca y la magnitud del caudal, o sea que, a mayor área correspondería un caudal mayor, la realidad es que los gradientes de este crecimiento no son constantes debido a la influencia de otros factores tales como: la distribución de las precipitaciones, el tipo de relieve, la litología, la vegetación, etcétera.

Las superficies de la cuenca y de las subcuencas se obtuvieron planimetrando una carta base a escala 1:50 000; el resultado fue de 355.05 km² y se consideró como una cuenca de tamaño mediano tanto por su área como por lo expresado en el párrafo anterior.

1. SUPERFICIE DE LAS SUBCUENCAS

Subcuencas	Área en km ²
Río San Jerónimo	139.77
Río Las Peras	70.34
Río Paso de Las Mulas	65.23
Río Dañé	38.38
Río Piedra Azul	20.66
Arroyo Barajas	20.67
Total	355.05

Pendiente media de la cuenca

Se utilizó la pendiente media porque es el parámetro que condiciona la velocidad de la escorrentía y del escurrimiento, representa una medida de la intensidad del proceso de erosión y de la capacidad de transporte del río y, además, constituye un criterio para juzgar la variación en la infiltración; de ahí lo necesario de su cálculo.

La pendiente media se obtuvo por el método de Horton.²

Aplicando la fórmula se tiene:

$$P_m = \frac{DL}{A} = \frac{50 \times 1964.10}{335.05} = 0.2765$$

Donde:

D = diferencia de cotas entre curvas de nivel = 50 m

L = longitud total de las curvas de nivel = 1964.10 km

A = área de la cuenca = 355.05 km²

El resultado de la pendiente convertido a porcentaje corresponde al 27.65%, y traducido a grados es igual a 15°27' de pendiente media; este es un valor alto que, junto con otros elementos analíticos de la cuenca, indican elevado poder erosivo sobre las vertientes y gran capacidad de transporte de materiales hacia las partes bajas, lo cual se produce en detrimento de la infiltración.

Coefficiente de compacidad

Este coeficiente o índice de compacidad o circularidad nos ayuda a describir la forma de la cuenca. Fue establecido por el autor alemán Gravelius.

La fórmula es la siguiente:

$$k = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

0.28 = constante

P = perímetro de la cuenca

A = área de la cuenca

Aplicándolo a la cuenca tenemos:

P = 94.50 km

A = 355.05 km²

$$k = 0.28 \frac{94.50}{\sqrt{355.05}} = 0.28 \times \frac{94.50}{18.84} = 0.28 \times 5.01 = 1.40$$

k = 1.40

² López Cadenas y Blanco C., 1968 *Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica y del transporte y depósito de materiales*. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones y Experiencias, Madrid, p. 52-53.

Este valor refleja que la forma de la cuenca se aleja de la forma circular, o sea que es alargada* y, de acuerdo con otras características de la misma, significa que existen pocas posibilidades de que se produzcan avenidas, puesto que el agua tarda más tiempo en llegar desde las cabeceras de la cuenca a la salida de la misma.

Morfometría fluvial

Red de drenaje

El análisis de la red fluvial es indispensable para la comprensión de la hidrodinámica de la cuenca a partir de la cantidad, distribución y arreglo de las corrientes.

La red de drenaje en la cuenca tiene una configuración subdendrítica que se caracteriza porque muestra menor control de la pendiente sobre los tributarios de primer orden, lo cual denota la influencia de áreas de materiales resistentes, con un ligero control estructural para las corrientes de orden 2 y 3, a lugares poco resistentes donde se forman fácilmente barrancos y cárcavas, con corrientes de orden 1.

Clase de corrientes

Las corrientes se clasificaron de la siguiente manera: perennes, estacionales y esporádicas.

Las corrientes perennes son aquellas que se mantienen durante todo el año, aun en la época de estiaje, ya que son alimentadas por manantiales, veneros y aguas subálveas. Están representadas por los ríos: San Jerónimo, Las Peras, El Palomar, Piedra Azul, Paso de Las Mulas, El Aserradero y Dañé.

Las corrientes estacionales se presentan la mayor parte del año, desapareciendo cuando el nivel freático desciende por debajo del fondo del cauce, en la época seca, de enero a abril. A esta clase de corrientes corresponden los arroyos que se localizan en las sierras de Monte Alto, Monte Bajo, Las Masas y Jilotepec, así como el pedimento de Villa del Carbón y

* Esta forma, indicada por el valor 1.4 es el resultado de la relación entre el perímetro de una cuenca y de un círculo de igual superficie. Como el círculo tiene la misma área que la cuenca, su perímetro siempre será menor; por tanto, este coeficiente será mayor o igual a la unidad y entre más cercano o lejano a ella, la forma de la cuenca será más circular o más alargada respectivamente.

La Soledad y, por último, en la depresión Taxhimay.

Las corrientes esporádicas se producen sólo en el momento de la lluvia e inmediatamente después de ésta. Dentro de esta clase de corrientes están los cursos que se comportan como torrentes, los cuales se localizan básicamente en la depresión Taxhimay.

Orden de las corrientes

La jerarquización de las corrientes es importante porque proporciona el estado evolutivo que guarda la zona drenada por la corriente principal; sobre todo para poder prever la magnitud de las crecidas, especialmente en los sitios donde las lluvias se concentran en unos cuantos meses. Además, a través de la jerarquización se pueden analizar las características del terreno sobre el que se desarrolla el drenaje.

Como una generalización puede decirse que, en la cuenca los cauces de primer orden y segundo orden solamente pueden llevar agua en la temporada de lluvias.

De acuerdo con la jerarquización, la cuenca resultó con un sistema fluvial de 6º. orden, lo que indica que, aunque se trata de una cuenca mediana, la densidad de drenaje es muy alta, que la litología permite el desarrollo de numerosos talwegs de órdenes menores, y que el agua no se infiltra sino que se concentra. También nos indica este orden que la vegetación es escasa o nula en algunos lugares, lo que favorece mejor erosión hídrica que da por resultado nuevos cauces. El resultado por subcuencas es el siguiente:

2.

<i>Subcuenca</i>	<i>Orden de las corrientes</i>
Río San Jerónimo	6º.
Río Las Peras	5º.
Arroyo Barajas	5º.
Río Paso de Las Mulas	4º.
Río Dañé	4º.
Río Piedra Azul	4º.

Densidad de drenaje (Densidad hidrográfica y longitud de cauces por km²).

La densidad de drenaje en la cuenca se relaciona generalmente con la cantidad de

lluvia, la pendiente y las características litológicas de la superficie del suelo. Los valores grandes de la densidad de drenaje indican mayor abundancia de escurrimiento y, por tanto, valores importantes de erosión. En condiciones de fuertes pendiente, los valores elevados de la densidad de drenaje indican un régimen de torrencialidad de la red fluvial.

Densidad hidrográfica.

$$Dc = \frac{Nc}{A} = \frac{1150}{355.05} = 3.23 \text{ corrientes por km}^2$$

Donde:

Dc = densidad de corrientes

Nc = número de corrientes

A = área de la cuenca en km²

3. DENSIDAD DE CORRIENTES POR SUBCUENCAS

Subcuenca	Densidad de corrientes No. de corrientes/km ²
Arroyo Barajas	4.64
Río Piedra Azul	4.25
Río San Jerónimo	3.49
Río Dañé	3.38
Río Las Peras	3.28
Río Paso de Las Mulas	1.77

Longitud de cauces por km²

$$Dd = \frac{Lc}{A} = \frac{918}{355.05} = 2.58 \text{ km de longitud por km}^2$$

Donde:

Dd = densidad de drenaje

Lc = longitud total de las corrientes en km

A = área de la cuenca en km²

4. LONGITUD DE CAUCES POR SUBCUENCAS

Subcuencas	Densidad de drenaje km/km ²
Arroyo Barajas	3.25
Río Piedra Azul	3.21
Río Dañé	2.87
Río San Jerónimo	2.58
Río Las Peras	2.52
Río Paso de Las Mulas	2.08

De acuerdo con el criterio establecido por Strahler³ el valor que resultó para la densidad de drenaje de esta cuenca sería bajo; sin embargo, nosotros lo consideramos como alto tomando en cuenta que la litología, los suelos, la vegetación y la infiltración del área impiden una densidad baja, como se verá más adelante en la parte correspondiente a la dinámica fluvial.

Pendiente media del cauce.

La pendiente media total de las corrientes de agua indica el aspecto de la variación de algunas características fisicoquímicas y biológicas de las aguas. En este sentido, por ejemplo, las corrientes de la cuenca, cuyas pendientes son pronunciadas, tendrá siempre aguas mejor oxigenadas y mineralizadas debido a la mayor turbulencia* y a la mayor capacidad de erosión y transporte.

Fórmula para la pendiente del cauce:

$$S = \frac{\Delta H}{L}$$

Donde:

S = pendiente del tramo del cauce en su relación m/km (%)

ΔH = diferencia de nivel entre los extremos del cauce en m.

L = longitud horizontal del tramo del cauce en km.

5. PENDIENTE MEDIA DE LOS PRINCIPALES RÍOS Y ARROYOS

Ríos y arroyos	Pendiente media	
	en m/km (%)	en grados
Río San Jerónimo	33.24	18°25'
Río Las Peras	34.34	18°55'
Río Paso de Las Mulas	51.89	27°25'
Río Dañé	60.00	31°
Arroyo Barajas	76.00	37°15'
Río Piedra Azul	77.77	37°55'

Este análisis morfométrico sirve de base para que, junto con el balance hídrico se pueda determinar la dinámica fluvial de la cuenca.

³ Strahler N. Arthur, 1974. *Geografía Física*. Ediciones Omega, Barcelona, España, p. 522-523.

* No hay que confundir este concepto con la turbidez.

BALANCE HÍDRICO.

El balance hídrico de la cuenca tiene por objeto contabilizar los aportes y las pérdidas de agua.

El balance se establece de acuerdo con cuatro elementos:

- P = precipitación en milímetros
- Q = escurrimiento en milímetros (gasto)
- ETP = evapotranspiración potencial en milímetros
- I = infiltración en milímetros

Estos elementos pueden expresarse respecto de la precipitación, como la igualdad siguiente:

$$P = Q + ETP + I$$

Precipitación

La precipitación es el elemento más importante en el balance hídrico porque representa la única aportación de agua que entra en la cuenca.

Aquí mismo, es a partir de abril cuando se inicia el aumento de humedad que alcanza su máximo de junio a agosto, colocando a la región bajo un dominio de lluvias de verano

que se prolongan hasta principios de otoño. Las lluvias son del tipo orográfico y convectivo, las primeras son abundantes y se presentan en las sierras del sur y suroeste de la cuenca con una precipitación vespertina y nocturna; las segundas se manifiestan por fuertes chubascos, tormenta eléctrica y granizo; este tipo de lluvias se presenta en toda la cuenca durante las tardes del verano. Hay otro tipo de lluvias provocadas por las ondas del este y por los ciclones tropicales, éstas ocurren a fines del verano y principios de otoño y son generales para toda la cuenca.

En el invierno las precipitaciones son escasas y sólo se producen algunas lluvias causadas por los "nortes" y las "vaguadas".

—Cálculo de la lámina media de agua caída sobre la cuenca.

Para calcular el valor medio de la precipitación se escogió el método de isoyetas por ser el procedimiento más adecuado y preciso. (Véase mapa de Isoyetas).

También se calculó la distribución de la precipitación media por subcuencas, para estar en condiciones de establecer una relación con el escurrimiento, la evapotranspiración y la infiltración.

6. CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA POR EL "MÉTODO DE ISOYETAS".

1. Isoyetas en mm.	2. Área entre cada dos isoyetas, km ²	3. Precipitación media en mm.	4. Volumen en miles de m ³ (2 × 3)	5. $\frac{\Sigma 4}{\Sigma 2}$
de 1000	43.10	1000	43 100.0	
de 1000-1100	89.12	1050	93 576.0	
de 1100-1200	90.97	1150	104 615.5	
de 1200-1300	84.97	1250	106 212.5	
más de 1300	46.89	1350	63 401.5	
Totales	355.05	5800	410 805.5	1157.03

7. DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA POR SUBCUENCAS.

Subcuenca	Área en km ²	Vol. de precip. en miles de m ³	Precipitación en mm	%
Río San Jerónimo	139.77	161 718.23	455.48	39.37
Río Las Peras	70.34	81 385.64	229.22	19.81
Río Paso de las Mulas	65.23	75 473.21	212.57	18.37
Río Dañé	38.38	44 406.96	125.07	10.81
Río Piedra Azul	20.66	23 904.38	67.33	5.82
Arroyo Barajas	20.67	23 915.96	67.36	5.82
Totales	355.05	410 804.38	1157.03	100.00

TABLA No. 8

GASTO MEDIO EN M³/SEG. y VOLUMEN MENSUAL EN MILES DE M³

ESTACIÓN HIDROMÉTRICA "PLANTA TAXHIMAY"													
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANUAL
1.	0.311	0.307	0.241	0.217	0.258	0.293	0.329	0.354	0.378	0.382	0.358	0.288	0.309
2.	834.4	751.0	647.3	565.0	693.2	761.2	883.2	950.3	980.9	1025.5	928.8	772.3	9793.0
ESTACIÓN HIDROMÉTRICA "GALABOZO"													
1.	0.961	1.325	3.198	5.190	2.434	2.205	1.527	1.660	4.789	3.294	1.060	0.641	2.344
2.	2522.5	3019.0	8565.8	13451.8	6518.3	5714.7	4091.0	4443.9	12363.1	8768.9	2695.4	1665.1	73752.9

1. Gasto medio en m³/seg.
2. Volumen mensual en miles de m³

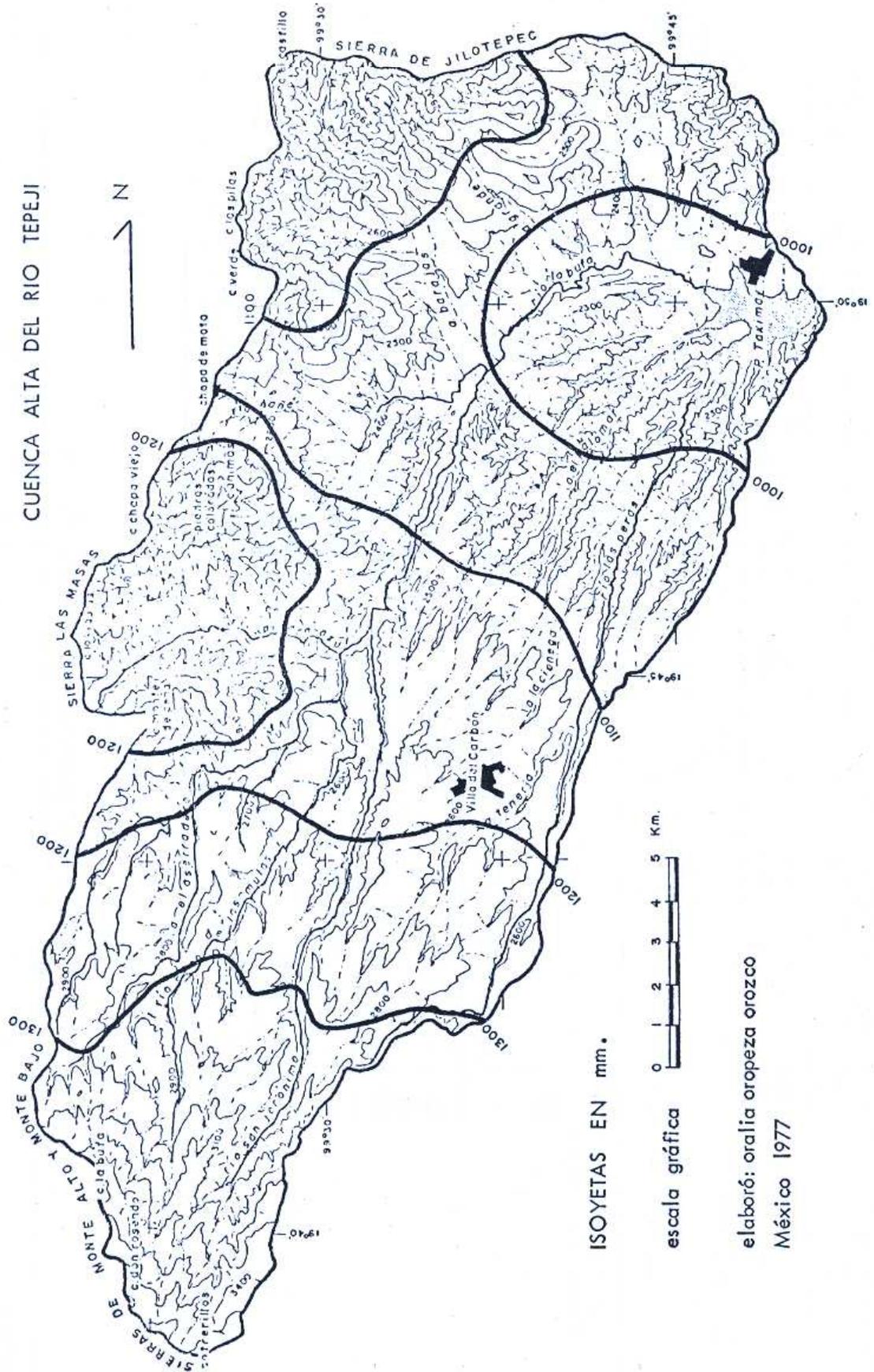
9. DISTRIBUCIÓN DEL ESCURRIMIENTO MEDIO POR SUBCUENCAS

Subcuenca	Área en km ²		Q. en miles de m ³		Q. medio en mm
Río San Jerónimo	139.77		29 033.775		81.77
Río Las Peras	70.34		14 611.403		41.15
Río Paso de Las Mulas	65.23		13 549.927		38.16
Río Dañé	38.38		7 972.500		22.45
Río Piedra Azul	20.66		4 291.606		12.08
Arroyo Barajas	20.67		4 293.683		12.09
Totales	355.05		73 752.900		207.70

TABLA No. 10

EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)

ESTACIÓN	EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)												ANUAL
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Presa Taxhimay	26.51	40.83	72.38	99.11	134.29	136.95	139.39	131.39	105.45	91.56	61.48	39.87	1079.21
Villa del Carbón	24.83	24.41	29.74	61.97	105.95	123.39	126.04	115.53	60.71	24.83	22.14	21.41	740.95



El agua de las precipitaciones, después de haber sufrido pérdidas por evapotranspiración y absorción por el manto vegetal, llega a la superficie del suelo donde se reparte en dos vías: el escurrimiento y la infiltración.

El escurrimiento.

El escurrimiento superficial, ya se trate de un flujo desordenado (escorrentía) o de uno ordenado (escurrimiento concentrado), está en función de la intensidad y duración de la precipitación, de la permeabilidad de la superficie del suelo, del tipo de cobertura vegetal, del comportamiento litológico, de la extensión de la cuenca, de la profundidad del nivel freático y de la pendiente.

El estudio del escurrimiento de la cuenca incluyó un análisis de la distribución del agua y de su trayectoria desde que aquélla se precipita hasta que alcanza la red hidrográfica.

De acuerdo con las condiciones climáticas, el escurrimiento presenta sus máximos durante los meses de julio a noviembre, que corresponden a la temporada de precipitaciones del verano-otoño, decrece en diciembre y luego, en enero, tiene un nuevo aumento que se debe tanto a la alimentación de volumen surgente de manantiales, como a precipitaciones aisladas provocadas por perturbaciones de la atmósfera superior; es durante la primavera (abril) cuando el escurrimiento tiene su máximo estiaje $0.2 \text{ m}^3/\text{seg.}$ (Estación-Hidrométrica Calabozo).

La carencia de datos hidrométricos de los ríos principales obligó a utilizar los de otras estaciones hidrométricas cuya situación, si bien no es buena para la determinación del balance hídrico, puesto que las estaciones "Planta Taxhimay" y "Calabozo" se localizan a la salida de la presa Taxhimay, sí nos dan una idea del volumen escurrido en la cuenca.

Tales valores del escurrimiento así obtenidos se registran en la Tabla No. 8, al igual que la precipitación; en este caso la distribución del escurrimiento medio también se realizó por subcuencas.

La evapotranspiración.

Una parte del agua que cae sobre la superficie del suelo es eliminada gradualmente por un doble proceso de secado, por así decirlo.

En primer lugar, una evaporación efectuada por el viento y, en segundo, la transpiración efectuada por las plantas.

En estudios como el presente es conveniente usar el término evapotranspiración, ya que éste combina la pérdida de humedad por evaporación directa y la efectuada por la transpiración de las plantas. En nuestro caso usamos la llamada evapotranspiración potencial.

Cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP).

Creemos que es más importante el cálculo de la evapotranspiración potencial que la real, porque la primera no se refiere exclusivamente a las circunstancias de un momento, sino que resulta de una condición media más acorde con la realidad.

Para calcular la ETP se utilizó el método de Blaney y Criddle⁴ por dos razones: primero, porque la fórmula empleada es muy completa, pues incluye características de vegetación, suelo y clima, además de que su cálculo es sencillo y se adapta bien a cualquier tipo de vegetación y región siempre que los coeficientes elegidos sean los correctos. Segundo, porque este método ha sido aplicado para determinar la evapotranspiración potencial de la cuenca baja del río Tepeji,⁵ lo que nos permite comparar y establecer relaciones entre ambas cuencas, ya que en algunos aspectos son muy semejantes.

Con este método se obtuvieron los datos de evapotranspiración potencial (véase tabla No. 10) con los cuales se trazó una carta de isóneas de ETP, para estimar la evapotranspiración potencial media de la cuenca y de las subcuencas.

El resultado de evapotranspiración media de la cuenca es de 673.85 mm. los cuales se distribuyen por subcuencas, de igual manera como se procedió en el caso de la precipitación y del escurrimiento.

La Infiltración

Ante la carencia de datos concretos, se dedujo la infiltración como la diferencia que re-

⁴ Domínguez García Tejero, F. 1971, *El riego, su implantación y su técnica*. Edit. Dossat, S. A., Madrid, p. 93-98.

⁵ Meza S. M., 1976, *Interpretación de los elementos climáticos en la evolución morfológica de la cuenca baja del río Tepeji*, Hgo. "Tesis Profesional, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. p. 111-118.

11. CÁLCULO DE LA EVAPORACIÓN POTENCIAL MEDIA POR EL MÉTODO DE ISOLÍNEAS DE ETP

1. Isolíneas de ETP	2. Área entre cada 2 iso-líneas km ²	3. ETP media en mm.	4. ETP en miles de m ³ (2 × 3)	5. $\frac{\sum 4}{\sum 2}$
Menos de 600	80.27	550	44 148.5	
600-700	163.04	650	105 976.0	
700-800	50.52	750	43 890.0	
más de 800	52.33	850	45 237.0	
Totales	355.05	2800	239 251.5	673.85

12. DISTRIBUCIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MEDIA POR SUBCUENCAS.

Subcuenca	Área en km ²	ETP en miles de m ³	ETP media en mm
Río San Jerónimo	139.77	94 184.43	265.27
Río Las Peras	70.34	47 398.82	133.50
Río Paso de Las Mulas	65.23	43 955.43	123.80
Río Dañé	38.38	25 862.48	72.84
Río Piedra Azul	20.66	13 921.80	39.21
Arroyo Barajas	20.67	13 928.54	39.21
Totales	355.05	239 251.50	673.85

sulta del volumen total precipitado una vez que se han sustraído los valores de escurrimiento y de evapotranspiración.

Para normar un criterio del volumen infiltrado se consideraron algunos factores como la porosidad y textura del suelo, la presencia o ausencia de vegetación, el laboreo agrícola y ganadero que el hombre realiza, etc.

El valor de la infiltración deducido fue:

$$I = P - (ETP + Q)$$

$$I = 1157.03 - 881.55 = 275.48$$

Donde:

I = infiltración en mm

P = precipitación en mm

ETP = evapotranspiración en mm

Q = escurrimiento en mm (gasto)

El valor medio de la infiltración fue de 275.48 mm que, distribuido por subcuencas, se muestra en la Tabla 13.

13. DISTRIBUCIÓN DE LA INFILTRACIÓN MEDIA POR SUBCUENCAS

Subcuenca	Área en km ²	I miles de m ³	I media en mm
Río San Jerónimo	139.77	38 500.66	108.45
Río Las Peras	70.34	19 375.66	54.58
Río Paso de Las Mulas	65.23	17 968.08	50.61
Río Dañé	38.38	10 572.06	29.78
Río Piedra Azul	20.66	5 690.95	16.03
Arroyo Barajas	20.67	5 693.70	16.03
Totales	355.05	97 801.10	275.48

Resultados del Balance Hídrico.

Teniendo en cuenta la expresión general del balance hídrico, el cual expresa la igualdad de los aportes y salidas del agua en la cuenca, a continuación se indica la distribución estimativa que se obtuvo.

$$P = Q + ETP + I$$

$$1157.03 = 207.70 + 673.85 + 275.48$$

Precipitación = 1157.03 mm

Escurrimiento = 207.70 mm

Evapotranspiración = 673.85

Infiltración = 275.48

Espacialmente, el 65% de las lluvias cae en las partes alta y media de la cuenca, aproximadamente desde los 2500 metros sobre el nivel del mar; el resto corresponde a la parte baja de la misma.

Del escurrimiento, más o menos el 45% se distribuye en las sierras de Las Masas y Jilotepec, así como en la depresión Taxhimay.

Por lo que respecta a la evapotranspiración potencial, el 55% se efectúa de los 2400 a los 2220 m de altitud, o sea en la depresión Taxhimay y en el pedimento La Soledad; el 45% corresponde al resto de la cuenca.

En las sierras de Monte Alto y Monte Bajo, parte de Las Masas y parte de Jilotepec, y en los pedimentos tanto de Villa del Carbón como La Soledad, la infiltración alcanza entre 60 y 70% dado que los materiales de estos sitios son más permeables que en la depresión Taxhimay donde se estiman los valores mínimos de infiltración.

Por cuanto al balance hídrico por subcuencas, se observó que éste no corresponde exactamente a la realidad, porque su distribución se estimó con base en la superficie de cada subcuenca, resultando, entonces, valores proporcionales al área; es decir, que a la subcuenca de mayor área le corresponde mayor precipitación, escurrimiento, evotranspiración e infiltración; y aunque esto es cierto en principio, la verdad es que al tomar en cuenta otros factores (litología, suelos, vegetación, relieve, etc.) cada subcuenca tendrá diferencias que no corresponden al área. Por ello estos resultados necesitan de una afinación que se hará posteriormente. De cualquier modo, este balance hídrico es importante porque nos ayuda, como

apoyo, a determinar la dinámica fluvial de la cuenca como un todo.

DINÁMICA FLUVIAL

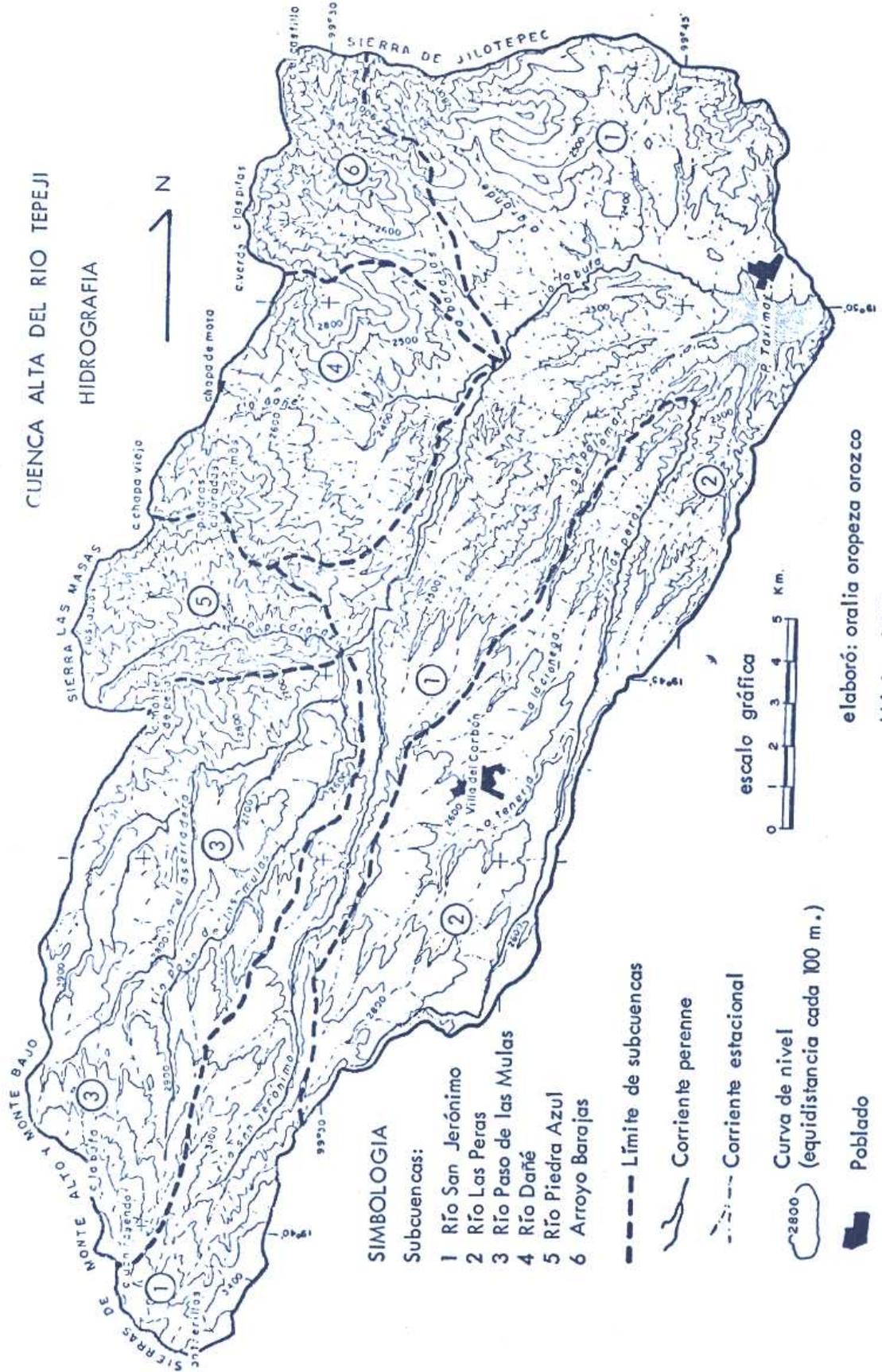
Río San Jerónimo

Este río nace en los cerros Los Potrerillos y La Bufa los cuales forman parte de las sierras de Monte Alto y Monte Bajo localizadas al sur; su cuenca (la primera por su superficie) es de 139.77 km² y está limitada, al norte, por la cuenca del río Coscomate, al noreste y sureste por la cuenca baja del río Tepeji, al suroeste por la cuenca alta del río Lerma, al este por la subcuenca del río Las Peras y al oeste por las subcuencas de los ríos Paso de Las Mulas, Piedra Azul, Dañé y del arroyo Barajas (véase mapa de Hidrografía).

El río tiene una longitud aproximada de 73 km considerada desde su inicio en el cerro Los Potrerillos (3440 m), hasta la presa Taxhimay (2210 m); ya cerca de la presa el río se conoce como río La Bufa y se comporta como una corriente de 6o. orden (ver tabla No. 2) y, por tanto, éste es el río principal. Después de la presa toma el nombre de río Tepeji. Tiene un rumbo general hacia el noreste y recibe algunos afluentes importantes a lo largo de su curso, como son: los ríos Paso de Las Mulas, Piedra Azul y Dañé y el arroyo Barajas, todos ellos por su margen izquierda.

La lámina media de precipitación es de 455.48 mm, pero de este valor corresponden al escurrimiento 81.77 mm (17.95%) mientras que el resto se reparte entre la evapotranspiración, la cual es más efectiva en la parte baja de la cuenca, y la infiltración, que alcanza valores más altos en la parte alta y media de la cuenca debido al material de carácter permeable por la gran cantidad de fracturas que presenta. El valor de la infiltración y la evapotranspiración es de 373.71 mm., igual al 82.05%

Aunque la cifra del escurrimiento es baja comparada con las de la evapotranspiración y de la infiltración, representa una acción que es suficiente para que se organice una buena dinámica fluvial, como lo muestran las características morfométricas analizadas anteriormente.



Por otra parte, el escurrimiento del río se rige por las condiciones climáticas; así, los máximos se presentan en los meses del verano y parte del otoño, después se abate notablemente y en esta etapa sólo es alimentado por aisladas precipitaciones locales propiciadas por perturbaciones de la atmósfera superior, o por aguas de infiltración que surgen de manantiales.

Del análisis del perfil longitudinal del río, representado en la gráfica No. 1, se deduce lo siguiente: desde su inicio, a los 3 100 m. de altitud, el río corre sobre un puerto formado por materiales andesíticos de las sierras de Monte Alto y Monte Bajo, con una pendiente, en este tramo, no demasiado fuerte ($21^{\circ}15'$), pero a partir de esta altitud, hasta los 3 000 m, la pendiente del río es muy fuerte ($62^{\circ}15'$): en este trecho, en donde la pendiente es muy pronunciada, la velocidad del escurrimiento aumenta causando mayor poder erosivo en el fondo del cauce que en sus riberas; es decir, que la acción hidráulica se ejerce con mayor fuerza en el sentido vertical, sobre materiales andesíticos y traquiandesíticos que le imponen un lecho de fondo fijo.

El lecho presenta variaciones continuas tanto en anchura como en profundidad, con numerosas rupturas de pendiente que se traducen en pequeños rápidos donde el desgaste hidráulico aumenta.

El hecho de que en esta parte precipita la mayor cantidad de agua y de que la pendiente sea fuerte, se traduce en un aumento en la velocidad que da lugar a intensa turbulencia y a mayor fuerza erosiva que se producen no tanto en el fondo del cauce, que tiene gran dureza, sino sobre las márgenes, provocando su minamiento y facilitando, así, otros procesos gravitacionales sobre las vertientes, tales como asentamientos, deslizamientos, derrumbes, etcétera; al efectuarse dichos procesos se transporta material muy heterogéneo que muchas veces invade el lecho y dificulta el drenaje. Sólo durante las avenidas mayores estos materiales pueden ser movilizadas.

A medida que el caudal del río va disminuyendo, ya sea porque la temporada de lluvias haya pasado o porque a través de las grietas de las rocas del fondo del cauce el agua se haya infiltrado, la velocidad también decrece junto con su poder erosivo y su capacidad de carga.

En esta forma se realiza la dinámica hasta aproximadamente los 2 650 m de altitud, sobre el tramo correspondiente al pedimento de Villa del Carbón; a partir de este punto, donde la pendiente es menos fuerte ($25^{\circ}35'$), el río penetra en otro tipo de material, cambiando su comportamiento, pero la pendiente más o menos se sigue conservando. La litología está representada por tobas, brechas volcánicas y aglomerados muy deleznales, materiales a los que el río erosiona verticalmente, lo que favorece la incisión de torrente y la profundización del cauce.

Aproximadamente de los 2 500 m hasta la desembocadura del río en la presa Tashimay, el material se constituye por aluvión y tobas en los que el río cambia su dinámica, ya que la corriente decrece considerablemente ($9^{\circ}25'$), circunstancia que hace que el río pierda velocidad y fuerza y empiece a divagar; por tanto, la altura del lecho aumenta ya que el poder erosivo de la corriente se efectúa en sentido lateral. Es en esta parte donde se define un lecho mayor durante la época de mayor escurrimiento en el año, en tanto que en los meses de sequía el escurrimiento mínimo se desarrolla en un canal de estiaje.

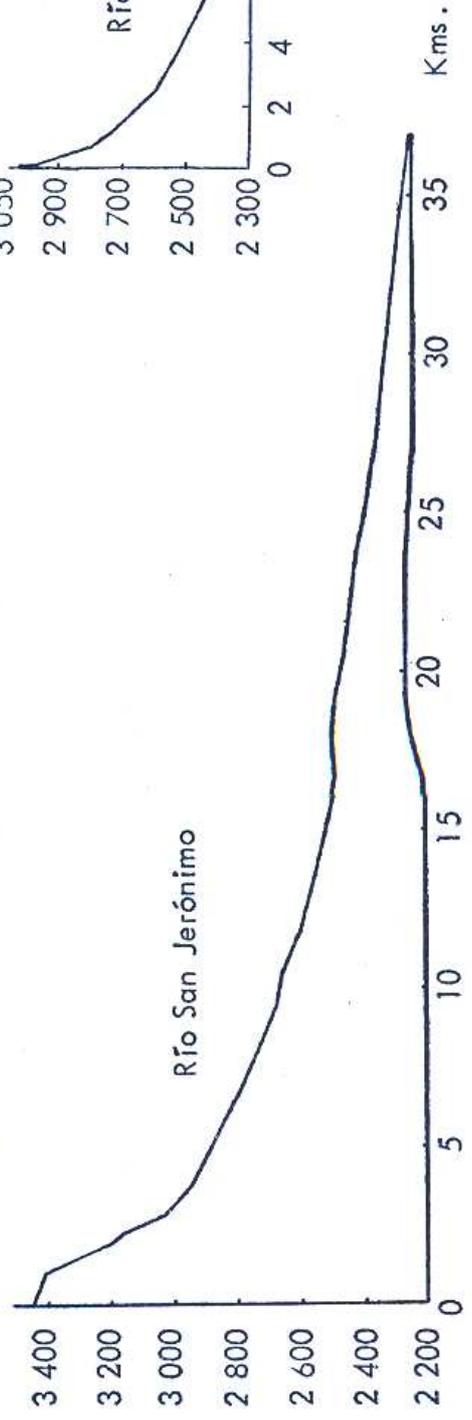
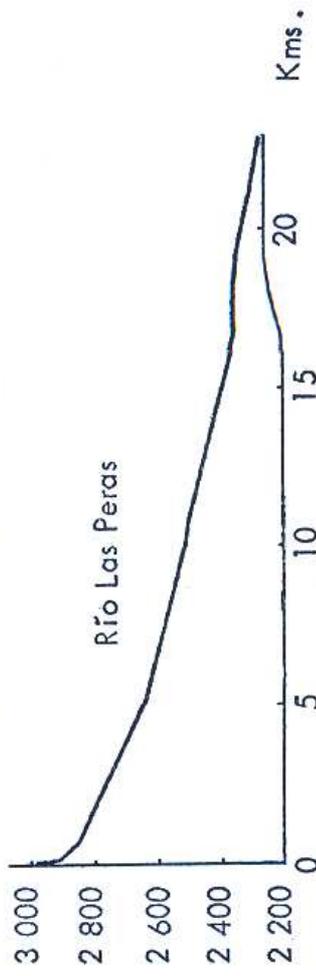
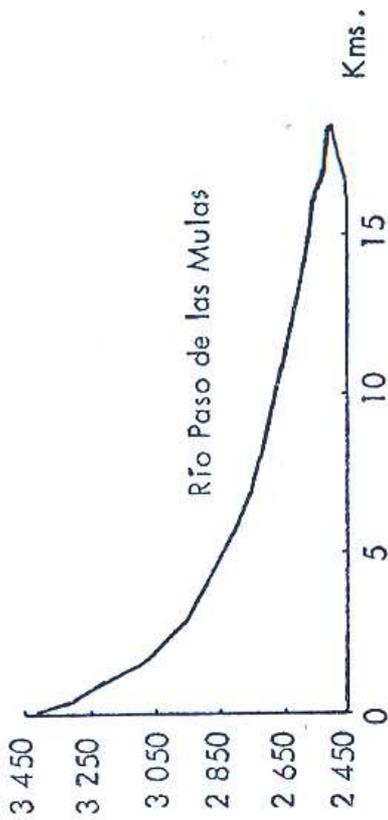
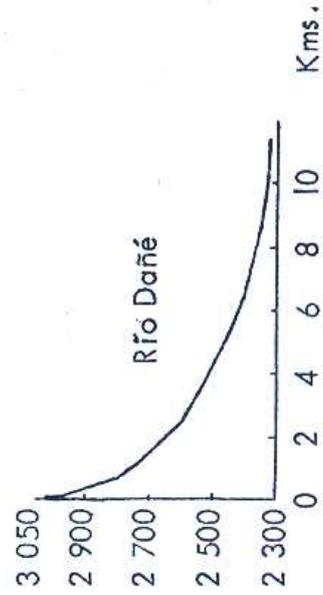
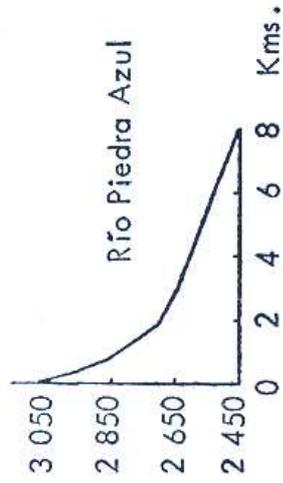
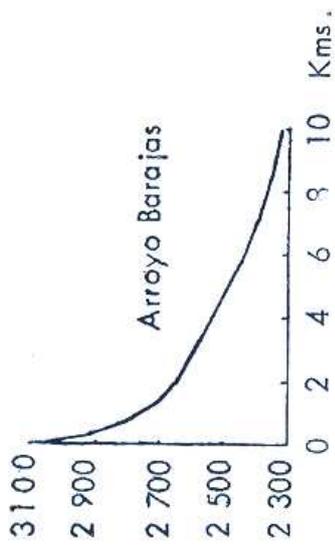
Paradójicamente, en esta zona existe elevada densidad de drenaje de los tributarios, lo que sólo puede explicarse como resultado de un levantamiento neotectónico que ha provocado la incisión y proliferación de los cauces de orden 1 y 2^a además, por la intervención negativa del hombre que al destruir la vegetación de las vertientes ha propiciado las escorrentías concentradas en el suelo, las cuales originan numerosos talwegs que se integran al sistema de drenaje y contribuyen en grado máximo al aporte de azolves a la presa, restándole su vida útil.

La acción neotectónica expresada y la erosión regresiva activa explican, también, la formación de áreas de capturas que se observaron en esta subcuenca.

Por último, las características de forma alargada, pendiente media moderada ($18^{\circ}25'$), alta densidad de drenaje y escurrimiento forzado favorecen avenidas peligrosas que afectan, básicamente, la parte baja. Además, las fuertes pendientes de los tributarios, el exceso de lluvias de convección y la acción antrópica ne-

¹ Oropeza O. 1976. *Op. cit.*, p. 15-32.

PERFILES LONGITUDINALES DE LOS RIOS PRINCIPALES



Gráfica No. 1

gativa coadyuvan a que el escurrimiento sea más intenso.

Río Las Peras

Se origina este río en las laderas del cerro Los Potrerillos situado al sur de la cuenca; la superficie de esta subcuenca es de 70.34 km², por tanto, ocupa el 2.º lugar por área; sus límites son: al norte, suroeste y oeste, la subcuenca del río San Jerónimo; por el este y sureste, la cuenca baja del río Tepeji.

La longitud del río es de 23 km aproximadamente, desde su inicio en el cerro Los Potrerillos (3 000 m de altitud) hasta su desembocadura, como corriente de 5o. orden, en la presa Taxhimay (2 210 m. de altitud). Sigue una dirección general hacia el noreste y en su trayecto recibe, como afluentes más importantes, los arroyos Tenería y La Ciénega, por su margen izquierda.

La distribución en área de la lámina de precipitación media es de 229.22 mm que se reparten como sigue: al escurrimiento se le calcularon 41.15 mm, a la evapotranspiración 133.50 mm y a la infiltración 54.57 mm.

En la parte alta y media de esta subcuenca es en donde la humedad se concentra y, por tanto, llueve durante gran parte del año, en cambio, en la parte baja de la misma llueve menos durante el año, pero la lluvia se presenta con mayor intensidad. Por cuanto a la evapotranspiración, ésta es más efectiva en la parte baja y en la parte media de la cuenca debido a que el suelo está descubierto, el viento es rasante y seco y la vegetación es de pastos, bosque degradado y cultivos. La infiltración, por el contrario, es mayor en la parte alta correspondiente a la sierra de Monte Alto y a la de Monte Bajo, donde el material andesítico se encuentra muy fracturado.

El escurrimiento es producto directo de las precipitaciones que ocurren durante el verano y parte del otoño, y, el resto del año, de las aguas que afloran de manantiales.

La forma alargada de la subcuenca y la pendiente media del cauce (18°55') son dos características que, al igual que la densidad de drenaje (de 2.52 kilómetros de longitud/km² y 3.28 corrientes/km²) le dan posibilidades medias de avenidas. Las corrientes de primer orden dominan en la parte baja de la cuenca (depresión Taxhimay) y, de hecho, es en esta

zona donde los procesos erosivos son más fuertes y se presentan los problemas más graves de erosión, debido principalmente al material litológico deleznable, al neotectonismo que se ejerce en esta zona y a la carencia del sustrato vegetal.

La dinámica de este río es semejante a la del río San Jerónimo. Desde su origen (3 000 m de altitud) su pendiente es muy fuerte, de 78°45' hasta los 2 900 m; aguas abajo, hasta los 2 850 m, es de 48°, y de 26°15' hasta los 2 650 m, en donde cambia la litología (véase perfil longitudinal en la gráfica No. 1). Desde su origen, hasta los 2 450 m, su curso es bastante rectilíneo, con algunas flexiones casi en ángulo recto que indican la adaptación del drenaje a la estructura; aguas abajo de esta altitud el curso es divagante a pesar de que está muy encajonado. En la zona montañosa y en el pedimento las corrientes adquieren gran velocidad, encajonándose en un fondo de lecho fijo formado por materiales muy compactos (andesitas y traquiandesitas).

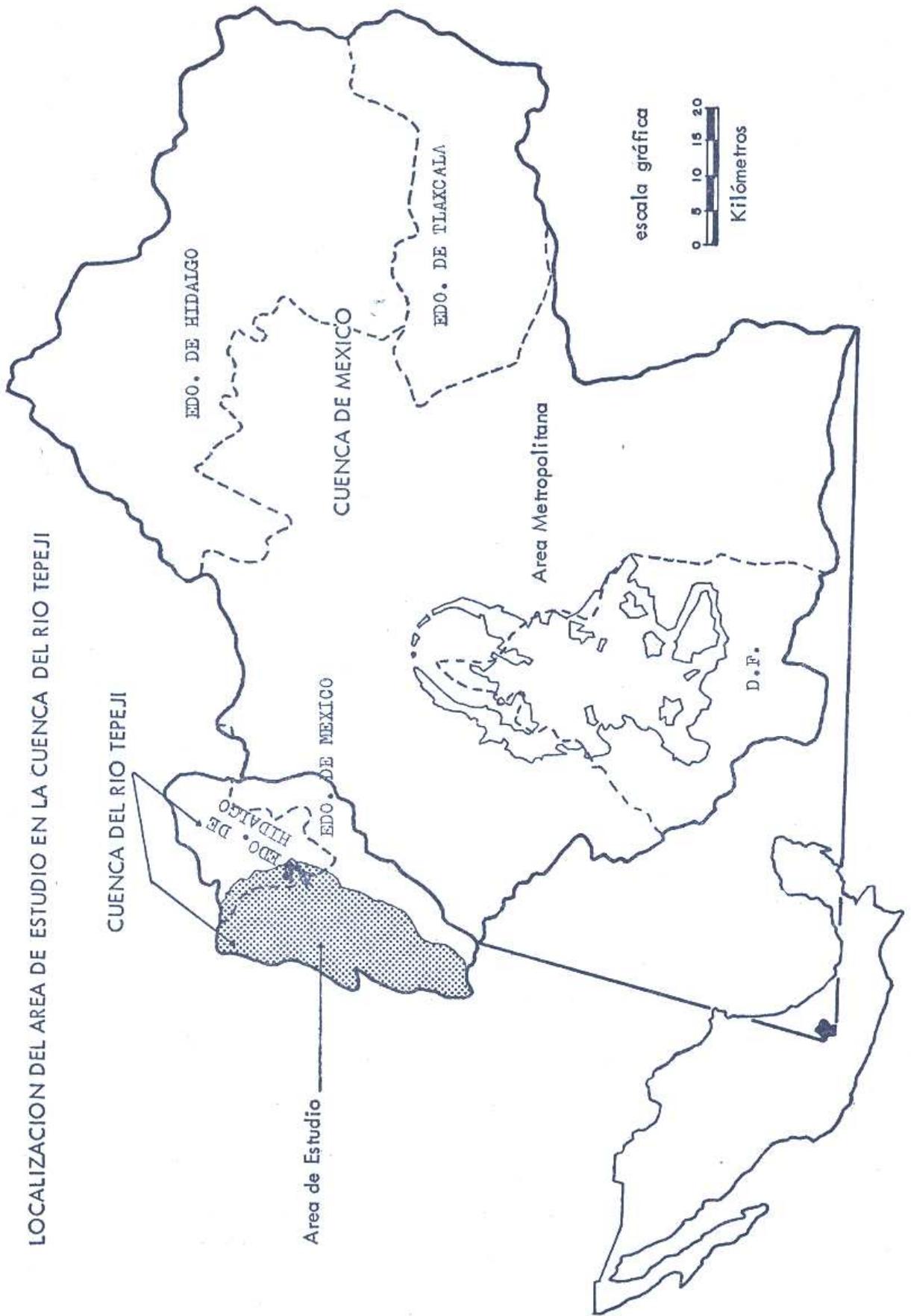
Desde los 2 650 metros, hasta la desembocadura del río en la presa Taxhimay, la pendiente decrece notablemente (13° 30'); este cambio coincide con el litológico puesto que la corriente entra a los depósitos volcánicos heterogéneos a los que el río incide profundamente dado lo deleznable del material.

En la parte baja (depresión Taxhimay), en la época de gastos máximos (verano-otoño) la corriente divaga por un lecho estacional amplio, en tanto que en la época de sequía sólo sigue por el canal de estiaje. En esta misma zona las vertientes se encuentran muy erosionadas y la densidad de drenaje tiende a aumentar.

Río Paso de las Mulas

El origen de este río se encuentra tanto en el cerro Don Rosendo como en el de La Bufa; a su cuenca le corresponde el 3er. lugar por extensión, igual a 65.23 km² y sus límites son: al norte la subcuenca del río Piedra Azul, al suroeste la cuenca del río La Bufa, y al este y sureste la subcuenca del río San Jerónimo. La longitud aproximada del río es de 18.50 km, desde su inicio en el cerro Don Rosendo (3 410 m s n m) hasta su desembocadura como corriente de 4o. orden en el río San Jerónimo (ver tabla No. 2). Mantiene una dirección

LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO EN LA CUENCA DEL RIO TEPEJI



principal hacia el noreste y recibe como afluente más importante, por la margen izquierda, al arroyo El Aserradero.

En el balance hídrico para esta subcuenca se calculó una lámina media de precipitación de 212.57 mm que se distribuye de la siguiente manera: escurrimiento 38.62, evapotranspiración potencial 123.80, e infiltración 50.61 mm.

Los gastos máximos del escurrimiento corresponden a los meses del verano y principios del otoño, el resto del año el mantenimiento hídrico del cauce es por aportaciones de aguas surgentes que en esta zona son bastantes gracias a una litología muy permeable.

La evapotranspiración es más alta en la parte baja de la subcuenca; sin embargo, comparándola con las subcuencas anteriores, en ésta resulta mucho menor.

La forma de la cuenca es alargada, la pendiente media del cauce vigorosa, de $27^{\circ} 25'$; una densidad de cauces de 2.08 km de longitud por km², valor que se considera alto, pero su densidad hidrográfica es de 1.77 corrientes por km²; este último valor es medio considerando que la subcuenca tiene una infiltración elevada y que el agua que escurre se concentra en pocos cauces, pero más alargados; además, las lluvias, aunque frecuentes, no son intensas y no incrementan el número de talwegs porque se precipitan sobre sus laderas bien protegidas por vegetación arbórea y herbácea.

Tomando como base el perfil longitudinal del río (ver gráfica No. 1) se describirá su dinámica que no difiere mucho de la de los ríos anteriores. Desde su nacimiento (3 410 m s n m) hasta los 2 850 m de altitud, la pendiente es muy fuerte ($58^{\circ} 15'$); en este tramo el escurrimiento se desplaza por la zona montañosa y del pedimento cuyos materiales son de origen andesítico; la corriente se encauza muy forzada por la resistencia que opone el material; tiene un control estructural muy marcado y su valle es muy estrecho ya que prácticamente la corriente se encuentra encajonada.

Durante los meses en que el caudal aumenta, el río ocupa plenamente el lecho menor, pero cuando el caudal disminuye ocupa únicamente el canal de estiaje y en las riberas se nota el trabajo de los procesos del intemperismo que degrada las márgenes.

A partir de los 2 850 m de altitud, hasta los 2 550 m, todavía dentro del pedimento, la pen-

diente disminuye ($16^{\circ} 45'$), la litología cambia a tobas, brechas volcánicas y aglomerados donde el curso divaga aunque muestra aún un ligero control estructural. En esta parte se han formado terrazas pequeñas de menos de 1 m a 5 m de altura, y el aporte de materiales de las vertientes al río es mayor porque se ha perdido la vegetación original, lo que incrementa la aceleración de los procesos gravitacionales e hídricos.

Desde los 2 550 m a su desembocadura en el río San Jerónimo, y sobre los mismos depósitos volcánicos heterogéneos del pedimento, el río intensifica su dinámica porque aumenta la pendiente a $22^{\circ} 35'$, además de que se encajona y sigue su curso en forma recta, porque se sitúa sobre una fractura.¹

Río Dañé

Nace en la sierra de Las Masas, propiamente en las laderas de los cerros Chapa Viejo, Las Piedras Coloradas y Las Ánimas, que se encuentran situados al este, dentro de la cuenca del río Tepejil, y al sur y suroeste, dentro de la subcuenca; su cuenca tiene una superficie de 38.38 km², ocupando el 4o. lugar, y limita por el norte y noreste con la subcuenca del arroyo Barajas, por el sur con la del río San Jerónimo y por el oeste con la del río La Bufa.

Este río tiene aproximadamente 11.50 km de longitud, desde su nacimiento en el cerro Chapa Viejo (3 010 m), hasta su desembocadura en el río San Jerónimo (2 320 m) al que llega como corriente de 4o. orden. El rumbo general de la corriente es el noreste, y afluyen como más importantes, por la margen izquierda, los arroyos La Mora, El Epazote y Los Baños, y por la derecha, los arroyos Loma Las Cabras, Milpa Larga y El Taido.

En la determinación del balance hídrico el resultado es el siguiente: para una lámina media de precipitación (125.97 mm) corresponden, para el escurrimiento, 22.45 mm, para la evapotranspiración, 72.84 mm y para la infiltración, 29.78 mm.

En el verano y parte del otoño las lluvias se caracterizan por ser muy intensas aunque de poca cantidad en la parte baja de la subcuenca (depresión Taxhimay).

¹ Oropeza O. 1976. *Op. cit.* p. 15-32.

Sin embargo, el escurrimiento resultante es suficiente para que se genere una dinámica fluvial de importancia.

En la parte montañosa de la sierra de Las Masas, formada por andesitas y traquiandesitas, es donde se registra la mayor infiltración, a pesar de que los materiales no son muy permeables; por cuanto a la evapotranspiración, ésta es muy elevada sobre todo en la parte del pedimento y la depresión Taxhimay.

La subcuenca del Dañé no es tan alargada como las anteriores, su longitud de cauces es de 2.87 km/km² y la densidad hidrográfica de 3.38 corrientes/km² que son valores que permiten suponer una dinámica actual bastante intensa.

El comportamiento de este río tampoco difiere mucho del de los ríos San Jerónimo y Las Peras. Desde su nacimiento, sobre materiales andesíticos, está sujeto a un control estructural menos marcado que en la subcuenca anterior. Desde los 3 010 m hasta los 2 500 m de altitud su pendiente es muy fuerte (72° 45' a 48° 45') y se desplaza sobre un lecho de fondo fijo.

Al entrar el curso a los depósitos volcánicos heterogéneos que forman el pedimento, la pendiente disminuye de 26° 35' a 8° 55' y el lecho se vuelve de fondo móvil, dada la incoherencia de los materiales. En esta porción y hasta la confluencia con el río San Jerónimo, los aportes de sedimentos provenientes de las vertientes desnudas son elevados.

Río Piedra Azul

El nacimiento de este río se encuentra en los cerros Monte de Peña, Los Ídolos, Chapa Viejo y Las Piedras Coloradas, que forman la sierra de Las Masas, situada al este de la cuenca. La subcuenca tiene un área de 20.66 km², a la que le corresponde el 5o. lugar; está limitada al norte por la subcuenca del río Dañé, al sur por la subcuenca del río San Jerónimo y al oeste por la cuenca del río La Bufa.

Con 8.10 km de longitud, desde su inicio en el cerro Los Ídolos (3 080 m s n m), el río desemboca, como corriente de 4o. orden, en el río Paso de Las Mulas que en este lugar se conoce como arroyo El Salto (2 450 m s n m). La corriente tiene una dirección general hacia el este y sus afluentes principales son, por su margen izquierda, los arroyos Loma de Veláz-

quez y La Mina, y por su margen derecha, los arroyos Los Corrales y Canchui.

La lámina media de precipitación es de 67.33 mm, cifra de la cual 12.08 mm. corresponden al escurrimiento, en tanto que el resto se reparte entre la evapotranspiración (39.21 mm) y la infiltración (16.04 mm). Si se hace una relación entre el balance hídrico de esta subcuenca, con la morfometría, podemos observar que los valores de la infiltración no coinciden con la realidad, ya que la elevada densidad de drenaje de esta subcuenca muestra que el escurrimiento tiene que ser mayor. De manera que aceptamos que los valores del balance hídrico pueden resultar erróneos si no se consideran otros elementos como la litología que, en este caso, modifica los valores de la infiltración.

La subcuenca tiene una forma alargada, con una densidad de drenaje de 3.21 km de longitud por km² y de 4.25 corrientes por km², valores que son los más altos dentro de toda la cuenca. Esta peculiaridad se debe principalmente a que la litología está representada por derrames de lavas andesíticas que no están muy alteradas y, por tanto, son impermeables a las aguas de precipitación que aquí son poco intensas aunque frecuentes.

A partir del perfil longitudinal de este río se establece su comportamiento hidrodinámico y, así, desde los 3 080 m, donde se origina, hasta aproximadamente los 2 650 m, la pendiente es muy fuerte (de 70° 50' a 53° 45'), afluye por materiales andesíticos y traquiandesíticos por lo que el fondo del lecho tiene características de fondo fijo.

En este río es notable el control estructural del cauce, aspecto que se observa en lo forzado de su entallamiento. De hecho, al principio la corriente sigue un curso bastante rectilíneo que más adelante se desvía formando ángulos muy fuertes, casi de 90°; este paso, obligado por las fuertes fracturas y afallamientos existentes en esta zona, hace que la corriente se encajone formando valles profundos, a pesar de que el material litológico es muy resistente a la acción hidráulica.

De los 2 650 m hasta su desembocadura en el arroyo El Salto, el río Piedra Azul disminuye la pendiente a 21° 55'; sin embargo, el valor de la pendiente media del cauce, de 37° 55', influye en la velocidad del escurrimiento y, por tanto, en su mayor poder erosivo sobre

el lecho. En esta área diferentes tipos de rocas formadas de tobas, brechas y aglomerados, permiten cierta divagación del lecho del río. No obstante lo anterior, el curso sigue muy forzado y encajonado, toda vez que prevalece el control estructural antes mencionado.

Como en el caso de las corrientes antes estudiadas, en la época de gastos máximos este curso de agua también escurre sobre un lecho menor, y sobre el canal de estiaje cuando el gasto es mínimo.

En general, en toda la subcuenca se observa una clara adaptación a las condiciones estructurales, así como una concentración de las corrientes a causa de la litología. Por otra parte, a pesar de que los suelos y la vegetación están bien conservados y debieran, por tanto, facilitar la infiltración, ésta es baja porque las rocas tienen alto grado de impermeabilidad.

Arroyo Barajas

El origen de este arroyo está en la sierra de Jilotepec, en los siguientes cerros: El Castillo, Iglesia Vieja, Las Pilas y Verde. La superficie de la subcuenca que drena es de 20.67 km² (ocupa el 6o. lugar), cuyos límites son: al norte y oeste, la cuenca del río La Bufa; por el sur, la subcuenca del río Dañé, y por el noreste y este la subcuenca del río San Jerónimo.

La longitud del arroyo es de 10 km desde su nacimiento en el cerro El Castillo (3 080 m s.n.m.) hasta su desembocadura, como corriente de 5o. orden, en el río San Jerónimo (2 320 m s.n.m.). El rumbo general del arroyo es sureste, y de sus afluentes más importantes destaca únicamente el arroyo Grande, por la margen derecha.

El balance hídrico quedó formado por las siguientes cantidades: 67.36 para la precipitación media, 12.09 para el escurrimiento, 39.23 para la evapotranspiración y 16.04 para la infiltración.

Como en todos los casos anteriores, en esta subcuenca la precipitación también se presenta en forma intensa durante el verano y otoño, única época en que el arroyo lleva agua, pues el resto del año el cauce permanece seco, ya que la cantidad de agua que aflora de manantiales no es suficiente para generar un escurrimiento perenne.

El valor de la evapotranspiración es alto en la parte baja y media de la subcuenca (pedimento La Soledad y depresión Taxhimay), ya que, por un lado, se encuentran los vientos de la zona que absorben la humedad que encuentran a su paso, además aquí la temperatura es más elevada, por tanto, también influye en la evaporación del agua del suelo. Por otro lado, la escasa cubierta vegetal de la zona deja al descubierto el suelo, ofreciendo una gran superficie a la evaporación.

Característica de esta cuenca es su forma alargada, no obstante ello no se restringen las posibilidades de tener avenidas desastrosas, puesto que los valores para la densidad de drenaje son los más altos de la cuenca (3.25 km²/km²) y el número de corrientes/km² es igual a 4.64. Esta densidad todavía es mayor en la parte alta y montañosa, propiciada por el tipo de rocas que afloran.

Del perfil longitudinal del arroyo (ver gráfica No. 1) se deduce lo siguiente: a partir de los 3 080 m de altitud, donde se origina este arroyo, hasta los 2 500 m, donde cambia el tipo de rocas de andesitas a depósitos volcánicos heterogéneos, la pendiente es muy fuerte, con rangos que varían de 79° a 28° 25'. En la parte alta el arroyo se adapta a la estructura, y en este tramo de pendiente fuerte la velocidad del escurrimiento genera una acción poderosa sobre el fondo del lecho. Cuando el arroyo entra a la parte baja, en otro tipo de material, la pendiente disminuye (22°) y el escurrimiento pierde energía, el agua se dispersa y empieza a acumular el material de acarreo que lleva consigo; además, la anchura del cauce aumenta porque hay un ataque más directo sobre las orillas, en donde el material es más incoherente y se pierde con facilidad.

Otra característica de esta subcuenca es que algunas de las corrientes, sobre todo las de la parte montañosa, se comportan como verdaderos torrentes; es decir, son corrientes de agua con un régimen estacional. Dichos torrentes excavan brutalmente los materiales de su cauce, que son transportados y depositados hasta el cauce principal como conos de deyección.

Esta torrencialidad la relacionamos como causa directa de la deforestación, de la pendiente fuerte y de las lluvias de carácter intenso, durante la estación de verano.

CONCLUSIONES

El funcionamiento de la cuenca se origina a partir de una lámina media de escurrimiento calculada en 207.70 mm por km².

Dicho escurrimiento es suficiente para que se genere una efectiva dinámica fluvial en toda la cuenca, aun cuando a niveles particulares encontremos diferencias de intensidad y modalidad de una subcuenca a otra.

Estas diferencias se deben a la interacción que surge entre los factores que aceleran la dinámica fluvial respecto de los que la controlan. Así, en las zonas montañosas correspondientes a las sierras de Monte Alto y Monte Bajo, la parte sur de la de Las Masas y la parte suroeste de Jilotepec, donde el relieve es muy abrupto y de pendiente fuerte, los ríos liberan gran energía y funcionan activamente. En estos lugares la vegetación de pinos, oyameles y encinos se encuentra bien conservada, al igual que el suelo, de manera que ambas condiciones determinan una infiltración lo mismo subsuperficial que profunda, por medio de flujos que afloran más tarde y ayudan a mantener el escurrimiento del estío.

Dicho afloramiento tiene su sitio en manantiales y veneros situados al pie de las vertientes de los valles, casi siempre en donde hay un cambio litológico que coincide geomorfológicamente con el límite entre las sierras y el pedimento. Lo contrario sucede en la parte norte de la cuenca, ocupada por las sierras de Las Masas y Jilotepec, en donde la vegetación y los suelos son escasos. Aquí la actividad de los procesos hídricos provoca mayor número de talwegs de orden 1 y 2.

En general, la parte alta de la cuenca se encuentra bien conservada en cuanto a suelos y vegetación, lo que permite que gran parte del agua de precipitación se infiltre y otra parte se concentre formando suficiente escurrimiento y lográndose un buen funcionamiento hidrodinámico.

En la parte del pedimento, tanto de Villa del Carbón como de La Soledad, así como en la parte de la depresión Taxhimay, al cambiar el tipo de rocas los ríos presentan otro funcionamiento: se intensifica la densidad de drenaje, primero como consecuencia de la deforestación, pues el hombre al talar los bosques ha dejado

sin protección al suelo que ha sido decapitado y lavado por los procesos de escorrentía laminar, hasta llegar a una escorrentía concentrada que causa la formación de nuevos talwegs. Además, la actividad neotectónica, manifestada por un levantamiento y abombamiento local, ha originado numerosas fracturas y fallas que siguen una dirección noreste, sobre todo en la depresión Taxhimay; estos sistemas de ruptura son aprovechados por las corrientes que inciden profundamente sus cauces dando por resultado la formación de vertientes con fuerte pendiente en las que la escorrentía es ciento por ciento más efectiva en el aumento de la densidad del drenaje.

Por los aspectos antes mencionados determinamos que la parte baja de la cuenca es la que mayores problemas presenta en cuanto a erosión hídrica se refiere y, por tanto, es el área que más directamente afecta a la presa por el gran volumen de azolves que aporta, con lo que se reduce la capacidad de almacenamiento del embalse.

En el caso particular de la subcuenca del arroyo Barajas, cuyos afluentes se comportan como verdaderos torrentes, es donde se requiere la aplicación de medidas inmediatas para restablecer su equilibrio natural, pues en esta subcuenca es donde los problemas hidrodinámicos se agudizan.

Una vez señaladas las zonas donde existen los mayores problemas, ya se pueden determinar las soluciones más indicadas, las que escapan al cometido de este estudio y son motivo de preocupación de otros especialistas como los ingenieros que se encargarán de elegir las obras más apropiadas en la corrección de torrentes; agrónomos y biólogos que seleccionarán los cultivos adecuados y las repoblaciones forestales pertinentes, etc.

Sin embargo, estas soluciones deberán realizarse en un plazo inmediato, para conservar el suelo, la vegetación y el agua de la cuenca, a la vez que alargar la vida útil de la presa Taxhimay cuyo embalse retiene actualmente uno de los recursos más importantes para el desarrollo agrícola de la zona baja del río Tepeji. En estas condiciones, y por lo que hemos visto en este estudio, se llegaría nuevamente al equilibrio natural de la cuenca, en beneficio de la población.

BIBLIOGRAFÍA

- Castany, G. 1971. *Tratado práctico de las aguas subterráneas*. Ediciones Omega, Barcelona, España.
- Damínguez García Tejero, F. 1971. *El riego, su implantación y su técnica*. Edit. Dossat, S. A. Madrid, p. 93-98.
- Instituto de Geografía de la UNAM, 1973. *Estudio geomorfológico de la cuenca del río La Laja*, investigación realizada para la Dirección de Manejo de Cuencas de la SRH, México.
- Instituto de Geografía de la UNAM, 1973, *Cutzamala (geomorfología de la cuenca baja)*, investigación realizada para la Dirección de Manejo de Cuencas de la SRH, México.
- López Cadenas y Blanco C., 1968. *Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica y del transporte y depósito de materiales*. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones y Experiencias, Madrid, p. 52-53.
- Maderey, L. 1970. "Características físicas de la cuenca del río Tizar". *Boletín No. 3* del Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Meza S. M., 1976. *Interpretación de los elementos climáticos en la evolución morfológica de la cuenca baja del río Tepeji, Hgo.* Tesis profesional, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, p. 111-118.
- Oropeza O., 1976. *Análisis de los procesos geomorfológicos en la cuenca alta del río Tepeji, Hgo.* Tesis profesional, Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, p. 4-10.
- Stanescu, S. *Parámetros hidrológicos y su aplicación*.
- Strahler N., Arthur, 1974. *Geografía Física*. Edit. Omega, Barcelona, España, p. 522-523.
- Vivas, L. 1966. "Métodos de investigación hidrogeomorfológica aplicados en el estudio de una cuenca hidrográfica". *Revista geográfica*, Universidad de los Andes vol. VII, Nos. 16-17, enero-diciembre, Mérida, Venezuela.