

## PRECIPITACIONES Y ESCURRIMIENTO DE UNA PEQUEÑA CUENCA EN ZONA DE MONTAÑA: EL RIO ACHUMANI (LA PAZ - BOLIVIA)

*J. Bourges, \**  
*P. Ribstein, \**  
*R. Hoorelbeke\**  
*C. Dietze \*\**  
*J. Cortez \*\*\**

Las medidas hidrológicas en la cuenca superior del río Achumani comenzaron en 1989, gracias a la colaboración entre la Honorable Alcaldía Municipal de La Paz (proyecto HAM/GTZ) y el equipo hidrológico del ORSTOM en Bolivia (Guyot y Bourges, 1989). Se han realizado durante más de dos años, mediciones en esta cuenca. Con esta información, es posible hacer un balance hídrico preliminar, presentar además algunas características morfológicas de la cuenca, así como entregar los primeros resultados de las precipitaciones y escurrimientos, y concluir con un enfoque de la relación lluvia-caudal.

Las dos principales instituciones asociadas en este estudio, Honorable Alcaldía de La Paz y ORSTOM, fijan objetivos diferentes pero complementarios a este trabajo. Para la municipalidad, los resultados esperados deben permitir dimensionar mejor las obras de protección contra las inundaciones y estudiar el impacto de las medidas contra la erosión aplicadas a la cuenca. Para el ORSTOM, se trata de un trabajo que completa los estudios llevados a cabo en el marco del programa PHICAB (Programa Hidrológico y Climatológico de la cuenca Amazónica de Bolivia). El PHICAB se interesó en la regionalización de

las características hidrológicas de las grandes cuencas de Bolivia, este estudio permitirá entender mejor la génesis del escurrimiento y de los flujos de materia a partir de los datos de una pequeña cuenca. Además, el río Achumani fluye por capas sedimentarias del Plio-Cuaternario, cuyo comportamiento hidrológico fue poco estudiado. Sin embargo, de que estas capas proporcionan lo esencial de las materias en suspensión del río Alto-Beni.

El objetivo de este estudio, es también comprender mejor el medio ambiente, ver como el hombre puede influir sobre su medio a través de la ocupación del suelo, analizar la adaptación del hombre a su medio y los riesgos debido a las inundaciones y a la acumulación de sedimentos arrastrados.

### EL MEDIO ESTUDIADO

Entre todos los ríos que drenan la cuenca de la ciudad de La Paz, el río Achumani fue seleccionado debido a que su cuenca superior presenta una influencia antrópica débil. Las urbanizaciones aún no han alcanzado esta cuenca, recubierta principalmente de pastos en la parte alta y poco cultivada en el fondo de los valles. Las únicas obras existentes,

\* ORSTOM CP 9214 LA PAZ

\*\* HAM/GTZ CP 9206 LA PAZ

\*\*\* SENAMHI CP 10993 LA PAZ

29 AVRIL 1994

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 39 472, cx. 1

Cote : B

consisten en algunas presas de contención de sedimentos y la canalización de los dos ríos que forman el río Achumani en una longitud total aproximada de 3 Km. Más arriba de las estaciones de observación, se instalaron dos estaciones hidrométricas, permitiendo así el estudio de dos cuencas, drenadas por el río Achumani y por su afluente principal, el río Huayllani. Los límites de estas dos cuencas están dados en el plano de ubicación (figura 1). La estación principal drena una cuenca de 38.9 Km<sup>2</sup>, la otra estación corresponde a una cuenca de 17.5 Km<sup>2</sup>. La altura máxima de la cuenca es de 4975 m, y las salidas se encuentran respectivamente a 3580 m y a 3620 m. Una particularidad del río Achumani reside en su topografía (relieve escarpado, considerables declives, desnivel de 1400 m) que, en formaciones sedimentarias con gran tendencia a la erosión, da origen al transporte muy importantes de materiales.

La topografía de la cuenca de Achumani fue analizada gracias a un Modelo Numérico de Terreno (MNT), es decir con representación numérica de un campo de alturas conocidas en los nudos de una red regular. El MNT de Achumani proviene de la numerización de las curvas de nivel resultantes de los mapas topográficos en la escala 1:50.000. Este trabajo fue llevado a cabo en el paquete DEMIURGE (Depraetere, 1992). La figura 2, proporciona una vista en perspectiva de la cuenca a partir del MNT, en intervalos de 41 m.

El trazado de la red hidrográfica está determinado automáticamente por el paquete DEMIURGE, a partir del modelo de drenaje, que es el registro de las direcciones de drenaje entre cada malla y sus ocho vecinas. La representación de los ríos, obtenida por este método, puede presentar ciertas diferencias con las corrientes de agua representadas en los mapas topográficos.

Es interesante el cálculo de un cierto número de archivos derivados del MNT, caracterizando la morfología de la cuenca estudiada. Por ejemplo, el mapa de las pendientes

proveniente del MNT permite conocer mejor las zonas que presentan los mayores riesgos de erosión. En el río Achumani, determinamos tres clases de pendiente: 64.2% de la superficie de la cuenca, presenta pendientes de 0 a 20 grados; 33% de 20 a 40 y 2.8% de 40 a 59; lo que da una buena apreciación del relieve. La repartición en el espacio de las dos primeras clases de pendientes está en la figura 3 (las pendientes superiores a 20 están representadas en gris oscuro). Las pendientes pronunciadas se sitúan en la parte intermedia de la cuenca, entre las vertientes convexas y poco inclinadas aguas arriba, y una parte inferior que comprende flancos de poca pendiente y valles alargados en parte terraplenados por los materiales desprendidos aguas arriba.

De la misma manera, podemos estimar, a partir del MNT, los perfiles longitudinales de todos los ríos que drenan cuencas superiores a un cierto valor de superficie. El cálculo realizado para los perfiles longitudinales de los afluentes del río Achumani, confirma el resultado del estudio de las pendientes, a saber, la presencia de una meseta drenada por los afluentes poco inclinados en la parte superior de la cuenca.

## LAS PRECIPITACIONES Y SU VARIABILIDAD

Este estudio se basa en los datos del pluviógrafo y del pluviómetro de la estación de Millipunku, situados sobre la cuenca, a una altura de 3800 m aproximadamente. El pluviómetro está en funcionamiento desde 1987 y el pluviógrafo, desde febrero 1990. Para extrapolar en el tiempo los valores obtenidos en Millipunku, se han utilizado los datos pluviométricos del observatorio San Calixto, que está ubicado en el centro de La Paz. La figura 4, presenta los totales mensuales en las dos estaciones.

Como lo muestra la figura 4, los datos mensuales en las dos estaciones de Millipunku y San Calixto están bien correlacionados. Una regresión lineal calculada en los 60 me-

ses de observaciones comunes en las dos estaciones, nos da un valor del coeficiente de correlación  $r$  de 0.95.

A nivel anual, las dos estaciones presentan las mismas tendencias con valores sistemáticamente más importantes en Millipunku.

En el cuadro 1, los valores anuales están presentados en años hidrológicos: El valor del año 1987-88 corresponde a la lluvia del 1° de octubre de 1987 al 30 de septiembre de 1988. Esta separación se ha elegido para homogeneizar con el año hidrológico escogido en la cuenca amazónica (Bourges y al., 1987).

Cuadro 1

## Lluvias Anuales en las Estaciones de San Calixto y Millipunku

AÑO	1987-88	1988-89	1989-90	1990-91	1991-92(*)	Promedio
SAN CALIXTO Lluvia (mm)	680.5	433.6	526.9	540.5		545.4
MILLIPUNKU Lluvia (mm)	704.6	482.9	604.4	655.3	458.3	611.8

(\*): incompleto - solamente de octubre 1991 a marzo 1992 -

El promedio de las precipitaciones en Millipunku es de un 12% superior al de San Calixto. En la estación de San Calixto, la lluvia promedio en el período 1920-1991, es de 572 mm. Las observaciones de Millipunku se sitúan entonces en un período más bien deficitario en lluvias, 3 valores de los cuatro observados en San Calixto son inferiores al promedio interanual. Ajustando una ley normal a los valores anuales de San Calixto, es posible calcular los períodos de recurrencia de las lluvias observadas; el valor anual más alto del 1987-88, presenta en un período de recurrencia del orden de 9 años en año húmedo, y el valor más bajo de 1988-89 en un período de recurrencia de 21 años en año seco. Se nota que las medidas en las estaciones hidrométricas de Huayllani y Achumani superior, comenzaron a fines de 1989, por lo tanto, en un

período un poco deficitario en lluvias.

Una correlación de lluvias diarias en las dos estaciones, muestra una gran dispersión de los puntos (coeficiente de correlación  $r$  de 0.66). Por consiguiente, no es posible ampliar la serie de Millipunku con los datos de San Calixto. Debido a la proximidad de las dos estaciones, éstas presentan la misma exposición y están sometidas al mismo régimen climático, permitiendo pensar que el estudio estadístico de las lluvias diarias máximas de San Calixto, puede también ser válido para la estación de Millipunku. En los cuatro años hidrológicos de observaciones comunes, la repartición por grupos de las lluvias diarias y los valores máximos anuales, son semejantes (cuadro 2).

Cuadro 2

## Lluvias diarias en las estaciones de San Calixto y Millipunku

AÑO	1987-88	1988-89	1989-90	1990-91
SAN CALIXTO				
N días de lluvias	124	126	117	123
N días de lluvia 10 mm	23	12	16	17
N días de lluvia 20 mm	5	1	5	2
Lluvia diaria máx (mm)	35.8	30.1	30.9	29.9

AÑO	1987-88	1988-89	1989-90	1990-91
<b>MILLIPUNKU</b>				
N días de lluvia	130	122	128	125
N días de lluvia 10 mm	30	13	22	20
N días de lluvia 20 mm	2	0	4	3
Lluvia diaria máx (mm)	30.2	18.5	25.3	25.6

El análisis del cuadro 2 nos conduce a dos comentarios:

- con respecto a San Calixto, las lluvias anuales más altas en Millipunku no provienen de valores diarios altos, sino de un mayor número de días de lluvia, con valores de medios a bajos;
- las lluvias máximas en San Calixto son ligeramente más altas; la utilización de los resultados de San Calixto para las lluvias diarias de Millipunku, da mayor seguridad, especialmente para el dimensionamiento de obras hidráulicas.

Los datos máximos diarios de San Calixto en el periodo 1920-1991, se ajustan bien a una ley gamma de 3 parámetros (figura 5). Los cuatro valores máximos observados desde 1987 son próximos a 30.4 mm, promedio de los valores máximos observados desde 1920.

## ESCURRIMIENTO

Las estaciones hidrométricas que controlan las dos cuencas, están situadas en la parte regulada del río, sobre secciones de canal rectangular. Para reducir las velocidades del agua, el fondo del canal está entrecortado por barreras, que provocan caídas de aproximadamente 2 a 3 m cada 50 m sobre el canal principal, y caídas de 50 cm cada 10 m sobre el canal del Huayllani. Dos limnógrafos Stevens con flotador registran las variaciones del nivel del agua. Las fuertes cargas de materiales en suspensión en el curso de las crecidas, obstruyen frecuentemente por su deposición, los pozos de los limnógrafos y hacen imposible la observación de muchos niveles de decrecidas. Las medidas de caudal se efectúan por medio de molinetes desde las pasarelas. En aguas altas, por encima de 20 a 30

cm de profundidad, el transporte de fondo hace difícil las medidas clásicas con el molinete y hay que limitarse a medidas de velocidad de superficie, ya sea por molinete o por flotadores.

A pesar del acondicionamiento del lecho en el canal, estabilizado por las barreras y por el empedrado de las secciones, el perfil transversal a nivel de la estación es muy variable. Durante las crecidas, se forman bancos de sedimentos que desvían la corriente o levantan el fondo, lo que obliga a efectuar calibraciones permanentes haciendo difícil e imprecisa la determinación de los caudales.

Se dispone de dos años hidrológicos de observaciones en dos cuencas, de 1989 a 1991, con periodos rellenados al principio del primer año. El escurrimiento anual es más o menos idéntico durante estos dos años, representando una lámina escurrida de 182 a 185 mm sobre la gran cuenca, y de 210 a 230 mm sobre la cuenca de Huayllani correspondiendo respectivamente a caudales medios anuales de 225 l/s y 110 a 130 l/s. El caudal específico (6 a 7 l/s/km<sup>2</sup>) es bastante inferior a lo observado sobre la misma cuenca del río La Paz aguas abajo en Cajetillas, con 12 l/s/km<sup>2</sup> (Bourges, et. al., 1990; Carrasco, 1990).

La repartición anual del escurrimiento refleja y amplifica la irregularidad del régimen de las precipitaciones (figura 6). En el primer año observado los aportes son concentrados en los meses de enero y febrero, representando más de 80% del escurrimiento anual, esta proporción disminuye a 55% en el año 1990-1991. En ese caso, la estación de las crecidas dura de noviembre a marzo, con aportes bastante bien repartidos, que representan en total 90% del escurrimiento anual.

Dado el relieve de estas cuencas y la heterogeneidad de las lluvias, las crecidas son rápidas (figura 7) y muchas veces complejas, con tiempos de respuesta del orden de media hora. Las puntas de crecida pueden sucederse a intervalos de 15 minutos, dando un aspecto dentado al hidrógrafo (figura 8). En el curso del período de febrero 1990 a diciembre 1991, los máximos caudales alcanzados en las cuencas fueron de 8300 l/s en Achumani, y 6650 l/s en Huayllani, observados el 7 de febrero de 1990 y representando respectivamente caudales específicos de 210 y 380 l/s/Km<sup>2</sup>.

Pero estos máximos no son representativos de la respuesta de la cuenca. En realidad, en este período se observa en la cuenca principal 32 puntas de crecidas superiores a 5000 l/s, reagrupadas en 19 días. Durante el año 1990-1991, en 11 días, 21 crecidas sobrepasaron este límite inferior de 125 l/s/Km<sup>2</sup>.

En la cuenca de Huayllani, para un límite inferior de 3000 l/s correspondiendo a 170 l/s/Km<sup>2</sup>, sólo se observan 5 crecidas en 3 días, todas durante los meses de enero y febrero. Sin embargo, aunque las máximas ocurran en general durante el verano, pueden suceder fuertes crecidas en meses generalmente secos como las del 9 al 12 de junio de 1990 sobre la cuenca de Achumani superior, con un caudal máximo de 7400 l/s. Es importante recalcar que, por encima de una profundidad de 30 a 40 cm, el caudal no escurre en forma de un flujo continuo, sino que se presenta como una sucesión de olas desplazándose a velocidades que varían de 6 a 9 m/s en intervalos muy irregulares, de 5 a 45 segundos. Los caudales máximos indicados corresponden a caudales ficticios continuos equivalentes, pero debido a su repartición ondulatoria pueden ocasionar riesgos de desbordamiento.

### RELACION PRECIPITACIONES - ESCURRIMIENTO - ESCORRENTIA SUPERFICIAL

Tomando como referencia el año hidrológico 1990-1991, los coeficientes de escurri-

miento anual observado son de 27.5 y 31%. En el período 1989-1990, sobre la base de las observaciones efectuadas, se puede estimar la lámina escurrida de agua en las mismas cuencas, a 182 y 230 mm, que corresponden a coeficientes de escurrimiento de 30 y 38%.

Aunque un sólo pluviógrafo situado en Millipunku no pueda ser considerado como representativo de la altura promedio de las lluvias precipitadas en las cuencas, estos coeficientes indican la importancia del escurrimiento. Es probable que los coeficientes más elevados, observados en 1989-1990, se deban a la repartición anual de las lluvias; la altura de lluvia total precipitada en enero y febrero, representa 44% del total anual de este año, cuando en 1990-1991 sólo es de 34%.

A nivel mensual, este coeficiente varía de 20 a 60% en los meses lluviosos. Con excepción de acontecimientos excepcionales, como el evento lluvioso de junio de 1990, no hay gran significado en los años secos durante los cuales el vaciado de los acuíferos asegura únicamente el escurrimiento de base sin el aporte de las precipitaciones.

Sin embargo, el gráfico de las láminas mensuales escurridas en función de las alturas de precipitaciones mensuales pone en evidencia una relación entre dichos parámetros: Debajo de 30 mm, no hay escurrimiento superficial (figura 9), encima de este límite el escurrimiento representa, en promedio, 60% de la altura precipitada. Los puntos ubicados debajo de la recta representan meses con suelos secos (diciembre, junio) y los puntos ubicados encima corresponden a meses con suelos saturados por las lluvias anteriores (enero).

En las crecidas, si se considera la escorrentía superficial directa que interviene inmediatamente después de la lluvia, se constata que, a pesar del relieve, esta escorrentía superficial es débil. De los 15 acontecimientos, precipitación - crecida, analizados, el coeficiente de escorrentía superficial, que no toma en cuenta el caudal de base, no pasa del 24%. En el 60% de las crecidas, es inferior a 10%, y en el 40%, es inferior a 5%. Estos coeficientes dependen en gran parte de la forma

de las precipitaciones, pero sobre todo de la humedad de los suelos, ya que se observa que todas las crecidas cuyo coeficiente de escorrentía superficial es superior a 10%, tienen tiempos de base superiores a 30 horas y son generados por acontecimientos compuestos por una serie de lluvias. Por el contrario, la mayoría de las crecidas que tienen un tiempo de base inferior a 5 horas, tienen coeficientes de escorrentía superficial inferior al 5%. Eso confirma lo ya observado en el caso del escurrimiento mensual.

Dadas las fuertes pendientes y la tectónica de la cuenca, es muy probable que existan pocas infiltraciones profundas; por consiguiente, el agua precipitada es evapotranspirada o es devuelta al río en forma de escorrentía superficial, escurrimiento o flujo subfluvial. Considerando en una primera aproximación, el déficit del balance hídrico como igual a la evapotranspiración real anual, se deduce valores para dicho parámetro de 420 a 475 mm, lo que corresponde a valores encontrados sobre las subcuencas del lago Titicaca, de 490 a 660 mm por año (Roche y al., 1992).

## CONCLUSIONES

Las alteraciones en la cuenca debidas al medio natural y las provocadas por el hombre, tienen un impacto directo sobre los suelos y las aguas; este proyecto considera en su estudio al hombre y sus actividades en su medio y trata de investigar la eficiencia de las medidas de regulación de ríos y de control de la erosión (que se realizaron en base a canales, presas de retención, obras bio - mecánicas, y plantaciones forestales) que en gran medida reducen los caudales de las crecidas, atenúan la acción erosiva de las aguas y evitan los riesgos de inundaciones.

El estudio de los flujos de materiales y de la erosión, que son aspectos principales de este proyecto, serán tratados, en relación con los otros parámetros, en un próximo estudio. De una manera general, las concentraciones de materia en suspensión están estrechamente ligadas a los caudales líquidos, pudiendo alcanzar mas de 300 g/l, lo que a escala diaria da caudales sólidos que pueden

pasar, tres o cuatro veces en el año, 5000 t/d e incluso alcanzar 12000 t/d (Guyot, a editarse).

Es difícil, en un período tan breve, llevar a cabo un análisis exhaustivo de los mecanismos precipitación - escorrentía superficial, debido a la poca frecuencia de las crecidas y sobre todo a la dificultad de observación de estos ríos de montaña. Sería pues aconsejable continuar estas observaciones durante dos o tres años suplementarios.

## AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer al Padre Cabre (Observatorio San Calixto) y al Padre Lop (estación de Millipunku, Radio Fides), quienes nos proporcionaron datos pluviométricos utilizados en este estudio. Nuestro reconocimiento va también a Javier Mendoza (SENAMHI) y Oscar Fuertes (SENAMHI), por su participación en el tratamiento de los datos pluviométricos e hidrométricos, así como también al personal del proyecto HAM/GTZ.

## BIBLIOGRAFIA

- BOURGES J., et. al (1987).  
Estudio de los caudales del Mamoré a Guayaramerín. PHICAB: ORSTOM, SENAMHI, La Paz, 26 p.
- BOURGES J., et. al (1990).  
Evolution spatio-temporelle des débits et des matières particulaires sur un bassin des Andes boliviennes: le Río Beni. Hydrology in Mountainous Regions, Lausanne, August 1990. IAHS Publ. 193: 351-356.
- CARRASCO NATTES L.M. (1990).  
Estudio del régimen del escurrimiento superficial en la cuenca Andina del río Beni. PHICAB: IHH - ORSTOM - SENAMHI. Tesis de grado de UMSA. La Paz, 118 p.
- DEPRAETERE C. (1992).  
DEMIURGE, Logiciel intégré de production et de traitement de Modèles Numériques de Terrain. ORSTOM, Paris.
- GUYOT J.L.  
(a editarse). Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Tesis de doctorado, Universidad de Bordeaux.
- GUYOT J.L., BOURGES J. (1989).  
Projet d'étude du bassin versant d'Achumani. ORSTOM, La Paz, 12 p.
- ROCHE M.A., et. al (1992).  
Climatología y hidrología de la cuenca del lago Titicaca. síntesis del conocimiento limnológico actual. ORSTOM - HISBOL, La Paz; pp. 83-104.

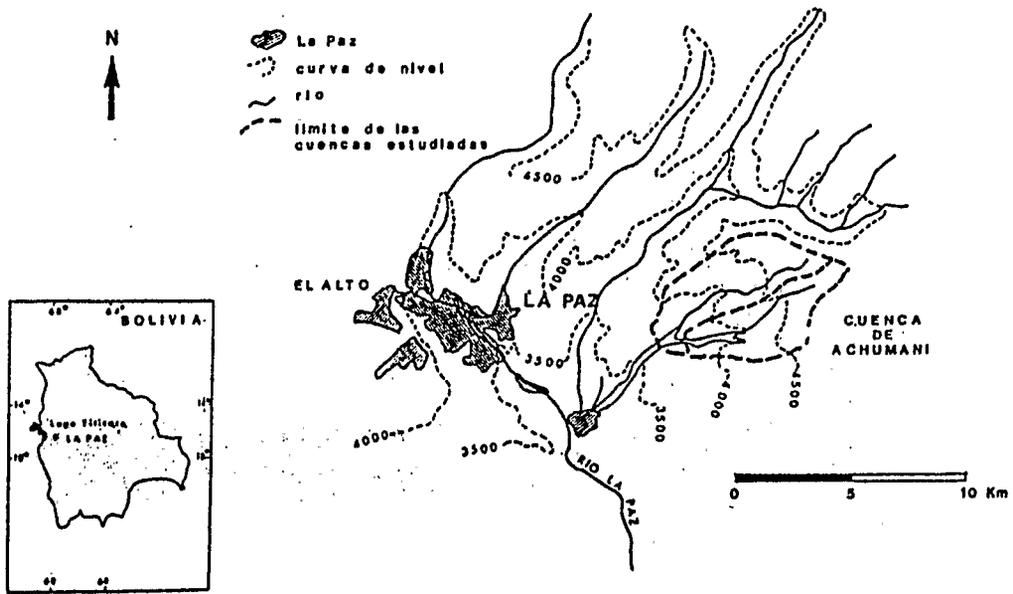


Figura 1: Plano de ubicación del río Achumani

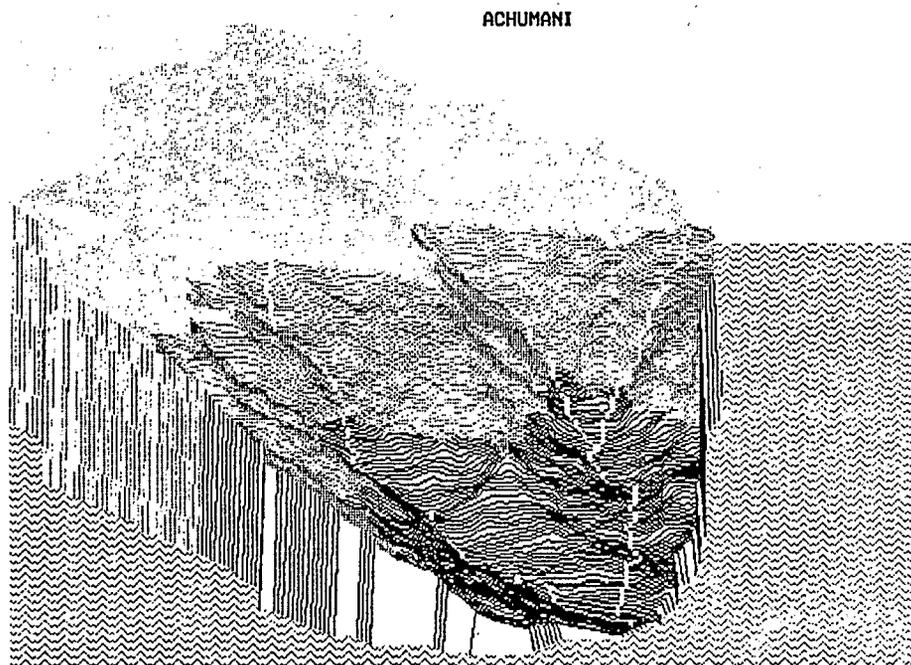


Figura 2: Vista en perspectiva de la cuenca de Achumani (vista del Oeste)



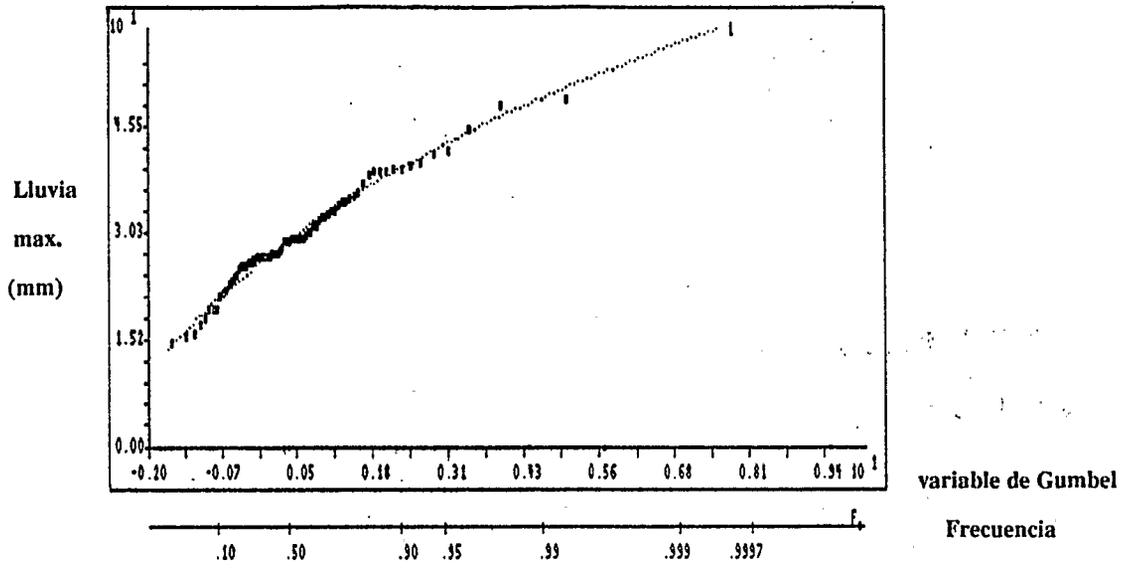


Figura 5: Ajuste de una ley gamma de las lluvias diarias de San Calixto

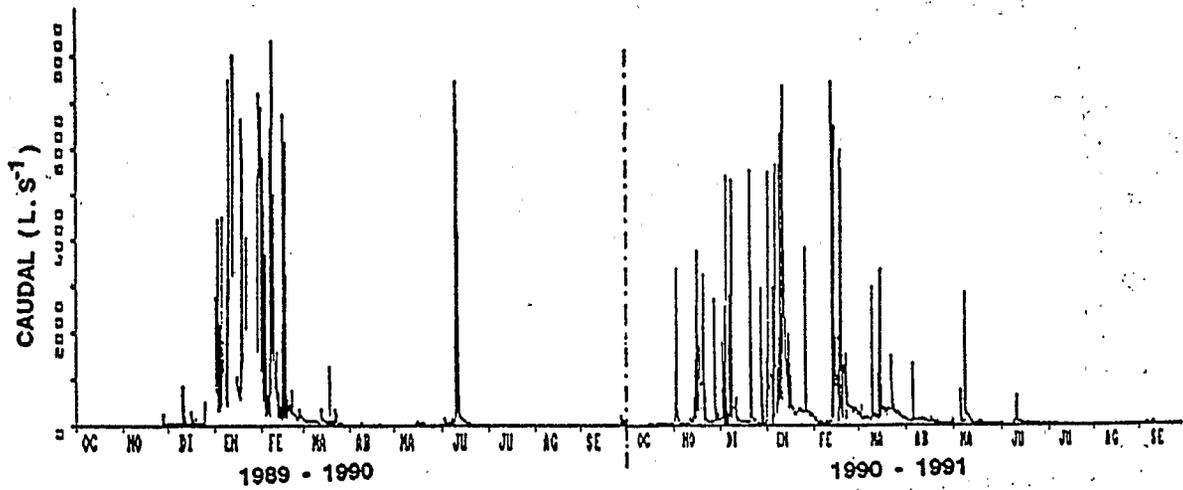


Figura 6: Variación del caudal instantáneo durante los años 1989-1990 y 1990-1991 sobre la cuenca del río Achumani (l/s)

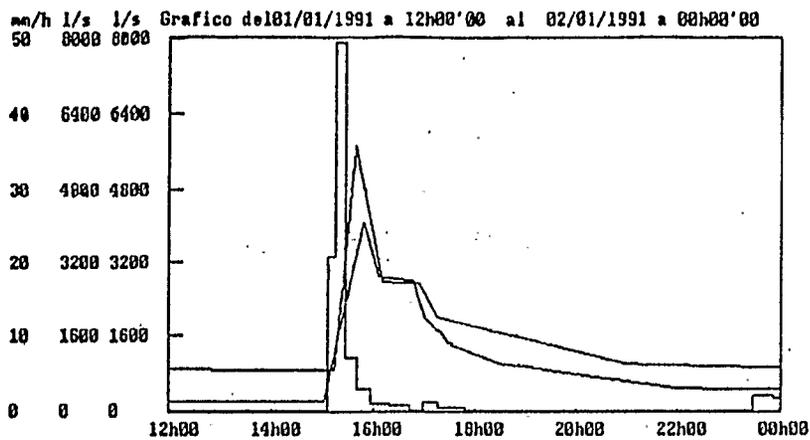


Figura 7: Hidrógrafos de la crecida del 1/1/1991 sobre las 2 cuencas de Huayllani y Achumani

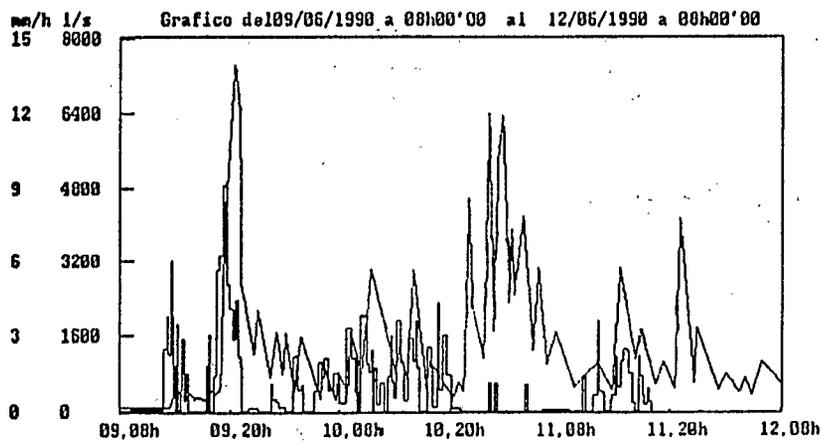


Figura 8: Hidrógrafo complejo debido a una sucesión de aguaceros del 9 al 13 de junio de 1990 (cuena de Achumani)

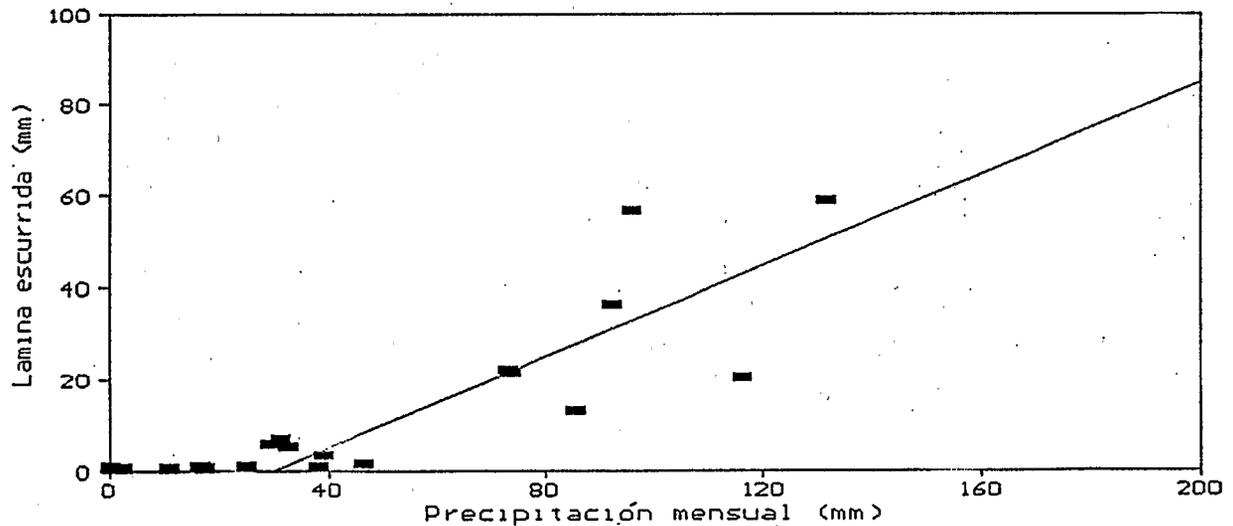


Figura 9: Relación precipitación - lámina escurrida a escala mensual sobre la cuena de Achumani (38.9 km<sup>2</sup>)