

# Balances Hidrológicos y Estimación de Caudales Extremos en la Amazonía

Juan Fernando Salazar  
Posgrado en Recursos Hidráulicos  
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín

Germán Poveda  
Posgrado en Recursos Hidráulicos  
Universidad Nacional de Colombia sede Medellín

Luis Fernando Salazar  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de tempo e estudos Climáticos,  
Cachoeira Paulista, SP, Brazil

**Resumen.** Se estimaron caudales medios y extremos en la cuenca del río Amazonas usando balances hidrológicos de largo plazo y escalamiento estadístico de procesos hidrológicos. En el cálculo de estos balances se considera la variabilidad espacial de los campos hidrológicos. Se construyeron mapas de la media y la desviación estándar de los caudales máximos y mínimos anuales sobre la red de drenaje del río Amazonas, considerando 6 métodos de estimación de la evaporación real: Choudhury, Coutagne, Morton, Penman, Turc y Zhang, y regionalizando para 6 cuencas: Amazonas, Solimoes, Madeira, Negro, Xingu y Tapajos. Los resultados permiten estimar el valor de la media y la desviación estándar de los caudales medios y extremos en cualquier punto de la red de drenaje. En la comparación entre los valores estimados y los observados se observa un buen ajuste.

## 1. Introducción

Se hicieron estimaciones de caudales medios y extremos en toda la cuenca del río Amazonas mediante el uso de balances hidrológicos de largo plazo y dentro del marco del escalamiento estadístico de procesos hidrológicos. El cálculo de los balances de agua de largo plazo considera la variabilidad espacial de los campos hidrológicos, en los cuales las cuencas se consideran como los volúmenes de control básicos para la estimación. Este trabajo representa un esfuerzo sistemático que apunta hacia la estimación de promedios de largo plazo de las principales variables hidrológicas, usando la información disponible, principios físicos y técnicas de estimación estadística.

Los resultados están organizados de la siguiente manera: en la sección 2 se describen los datos utilizados, en la sección 3 se presentan los métodos de cálculo usados para obtener los resultados que se reportan en la sección 4, en la cual se incluyen también las validaciones realizadas.

## 1. Datos

---

Se utilizaron series de caudales diarios de 90 estaciones de medición distribuidas por toda la cuenca del río Amazonas. Esta información, así como la cartografía base, fue suministrada por el proyecto HYBAM (*Hydro-Geodynamique Actuelle du Bassin Amazonien*). En la figura 1 se muestran las cinco principales subcuencas de la Amazonía así como la red de drenaje y las estaciones de medición utilizadas. Los mapas de evaporación y precipitación utilizados en los balances fueron tomados de Salazar (2004).

## 2. Métodos

La asunción fundamental para la regionalización de la media y la desviación estándar de la distribución de los caudales extremos anuales, es que tales parámetros estadísticos se relacionan con los caudales medios anuales a través de una ley potencial. De ese modo se pueden establecer las siguientes relaciones (Poveda *et al.*, 2005 y referencias allí citadas):

$$\mu_{Q_{\max}} = pref1(Q)^{\exp1} = pref1[A(P - E)]^{\exp1} \quad (1)$$

$$\sigma_{Q_{\max}} = pref2(Q)^{\exp2} = pref2[A(P - E)]^{\exp2} \quad (2)$$

$$\mu_{Q_{\min}} = pref3(Q)^{\exp3} = pref3[A(P - E)]^{\exp3} \quad (3)$$

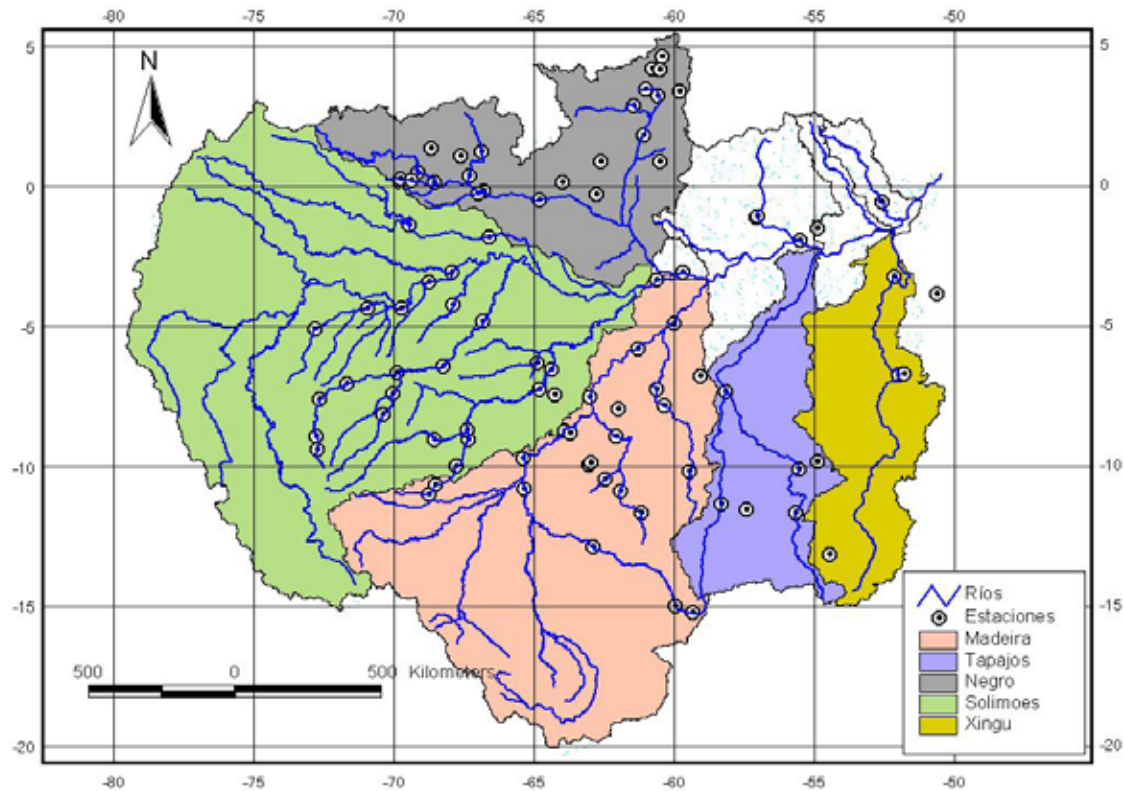


Figura 1. Principales subcuencas de la Amazonía, red de drenaje y estaciones de medición de caudales.

$$\sigma_{Q_{\min}} = pref_4(Q)^{\exp_4} = pref_4[A(P - E)]^{\exp_4} \quad (4)$$

Donde,  $\mu_{Q_{\max}}$  y  $\sigma_{Q_{\max}}$  son, respectivamente, la media y la desviación estándar de los caudales máximos,  $A$  es el área de drenaje,  $P$  es la precipitación media acumulada en el área  $A$ ,  $E$  es la evaporación media acumulada en el área  $A$  y  $Q$  es el caudal medio multianual. Análogamente se definen las variables para los caudales mínimos.  $pref_1$  y  $exp_1$  son respectivamente el prefactor y el exponente de la ley potencial (1). Así mismo se definen los prefactores y exponentes de las relaciones (2) a (4). Estos últimos son los parámetros que se obtienen como característicos de una cierta cuenca (región).

Es importante notar que la obtención de  $P$  y  $E$  implica agregar espacialmente estas variables siguiendo las direcciones de flujo, determinadas en cada cuenca por la topografía que se representa mediante un modelo digital de elevación (MDE). Esto se hizo mediante el software HIDROSIG desarrollado en el Posgrado en Recursos Hídricos (Universidad Nacional de Colombia, 2003; Vélez, J. I. *et al.*, 2000).

### 3. Resultados

Se construyeron mapas de 4 variables: (i) media de los caudales máximos anuales, (ii) desviación estándar de los caudales máximos anuales, (iii) media de los caudales mínimos anuales y (iv) desviación estándar de los caudales mínimos anuales. Para los balances se consideraron 6 mapas diferentes de evaporación según el método usado: (i) Choudhury, (ii) Coutagne, (iii) Morton, (iv) Penman, (v) Turc y (vi) Zhang (Salazar, 2004). La regionalización se hizo para toda la cuenca del río Amazonas, así como para las 5 mayores subcuencas de la Amazonía: (i) Solimoes, (ii) Madeira, (iii) Negro, (iv) Xingu y (v) Tapajos. De ese modo, se construyeron en total 144 mapas (no mostrados en este documento pues la forma efectiva de visualizarlos es mediante algún software de sistemas de información geográfica, SIG) que corresponden a todas las posibles combinaciones entre las 4 variables estimadas, en cada una de las 6 cuencas consideradas, con cada uno de los 6 métodos de estimación de la evaporación involucrados. Como insumo para la construcción de los mapas anteriores y también como resultado de interés, se construyeron mapas de los valores estimados de largo plazo de la media y la desviación estándar de los caudales medios anuales.

Los mapas construidos permiten conocer el valor estimado de la media y la desviación estándar de los caudales en cualquier punto de la red de drenaje.

Los valores de las variables extraídos de los mapas fueron comparados con los valores observados (OBS) con el propósito de validar los balances. De ese modo se construyeron las gráficas que aparecen en las figuras 2 a 13. En estas figuras se usa la siguiente convención para diferenciar los métodos de estimación de la evaporación en el balance: Coutagne (COU), Choudhury (CHO), Morton (MOR), Penman (PEN), Turc (TUR) y Zhang (ZHA). En cada caso la línea azul sólida representa el resultado ideal, es decir, cuando el valor estimado es igual al observado. Los resultados se presentan separadamente para cada cuenca.

#### Cuenca del río Amazonas

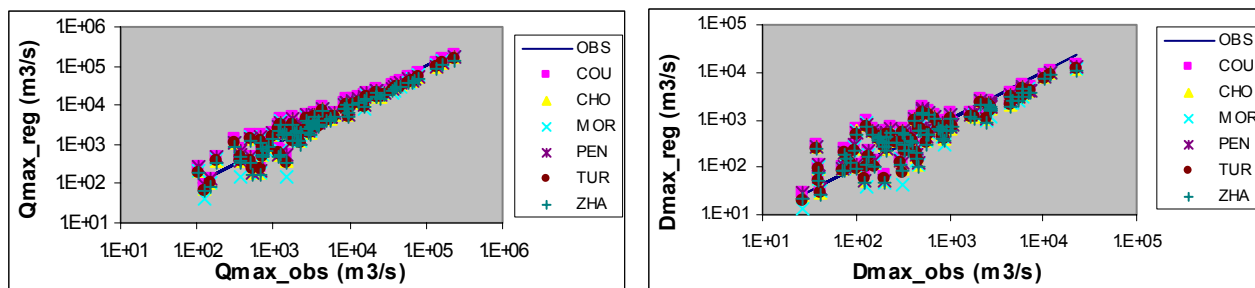


Figura 2. Comparación entre los caudales máximos anuales regionalizados ( $Q_{max\_reg}$ ) y los observados ( $Q_{max\_obs}$ ) (izquierda), y entre las desviaciones estándar de los caudales máximos anuales regionalizadas ( $D_{max\_reg}$ ) y las observadas ( $D_{max\_obs}$ ) (derecha) en toda la cuenca del río **Amazonas**, considerando diferentes balances de agua según el método usado para la estimación de la evaporación.

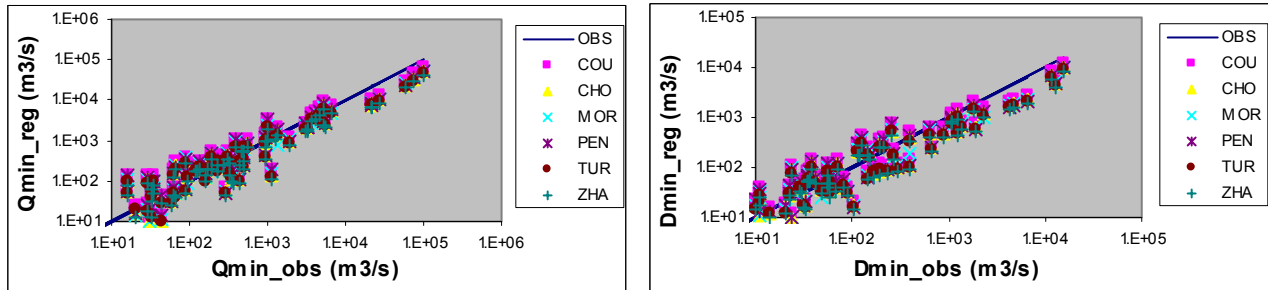


Figura 3. Comparación entre los caudales mínimos anuales regionalizados ( $Q_{min\_reg}$ ) y los observados ( $Q_{min\_obs}$ ) (izquierda), y entre las desviaciones estándar de los caudales mínimos anuales regionalizadas ( $D_{min\_reg}$ ) y las observadas ( $D_{min\_obs}$ ) (derecha) en toda la cuenca del río **Amazonas**, considerando diferentes balances de agua según el método usado para la estimación de la evaporación.

### Cuenca del río Solimoes

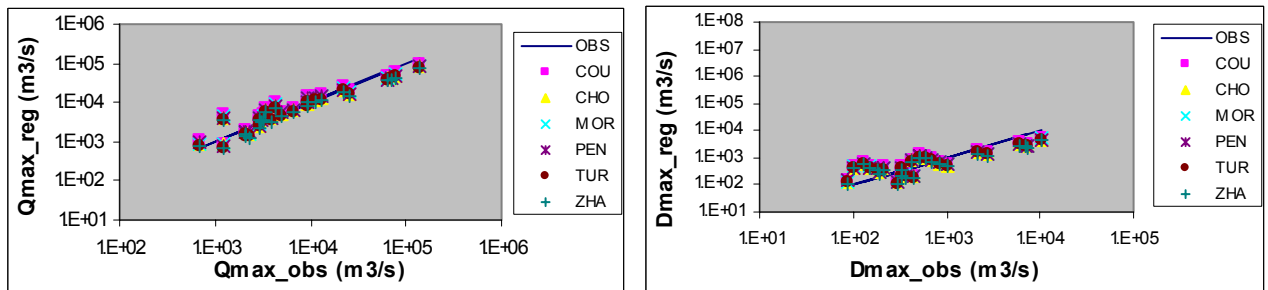


Figura 4. Comparación entre los caudales máximos anuales regionalizados ( $Q_{max\_reg}$ ) y los observados ( $Q_{max\_obs}$ ) (izquierda), y entre las desviaciones estándar de los caudales máximos anuales regionalizadas ( $D_{max\_reg}$ ) y las observadas ( $D_{max\_obs}$ ) (derecha) en la cuenca del río **Solimoes**, considerando diferentes balances de agua según el método usado para la estimación de la evaporación.

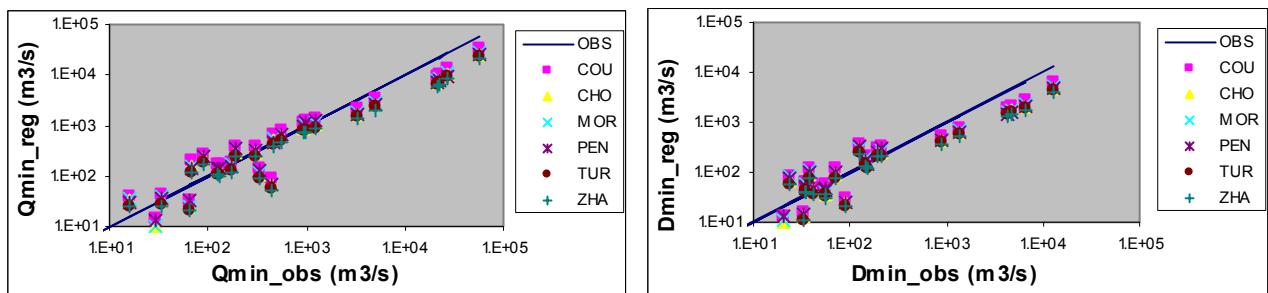


Figura 5. Comparación entre los caudales mínimos anuales regionalizados ( $Q_{min\_reg}$ ) y los observados ( $Q_{min\_obs}$ ) (izquierda), y entre las desviaciones estándar de los caudales mínimos anuales regionalizadas ( $D_{min\_reg}$ ) y las observadas ( $D_{min\_obs}$ ) (derecha) en la cuenca del río **Solimoes**, considerando diferentes balances de agua según el método usado para la estimación de la evaporación.

## Cuenca del río Madeira

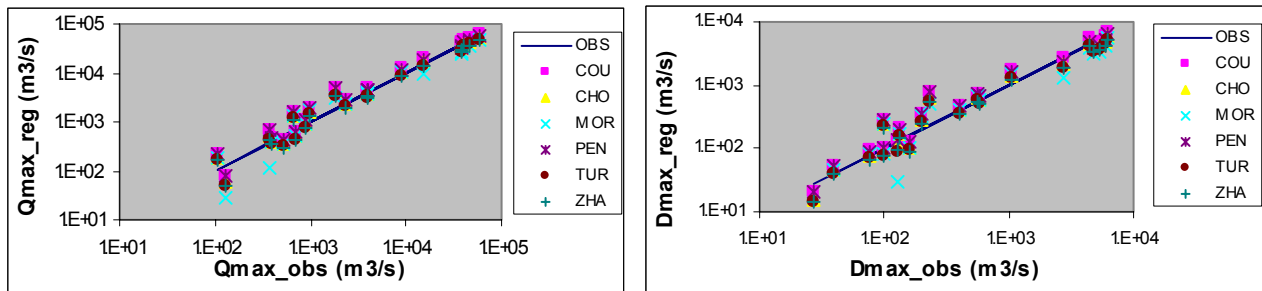


Figura 6. Comparación entre los caudales máximos anuales regionalizados ( $Q_{max\_reg}$ ) y los observados ( $Q_{max\_obs}$ ) (izquierda), y entre las desviaciones estándar de los caudales máximos anuales regionalizadas ( $D_{max\_reg}$ ) y las observadas ( $D_{max\_obs}$ ) (derecha) en la cuenca del río **Madeira**, considerando diferentes balances de agua según el método usado para la estimación de la evaporación.

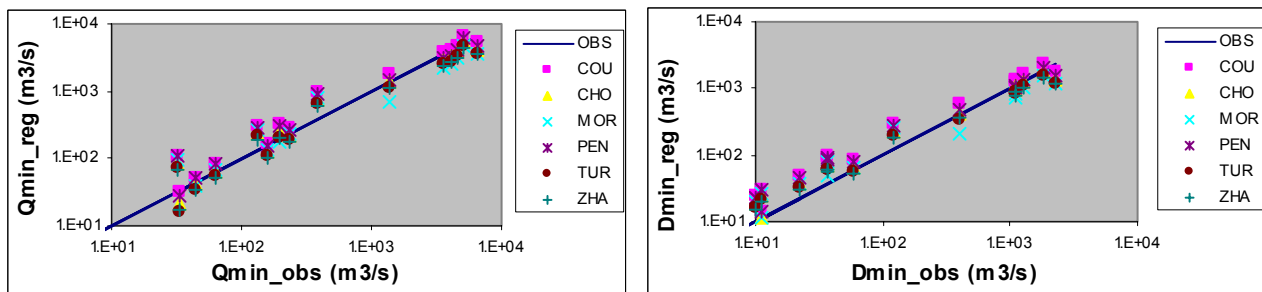


Figura 7. Comparación entre los caudales mínimos anuales regionalizados ( $Q_{min\_reg}$ ) y los observados ( $Q_{min\_obs}$ ) (izquierda), y entre las desviaciones estándar de los caudales mínimos anuales regionalizadas ( $D_{min\_reg}$ ) y las observadas ( $D_{min\_obs}$ ) (derecha) en la cuenca del río **Madeira**, considerando diferentes balances de agua según el método usado para la estimación de la evaporación.

## Cuenca del río Negro

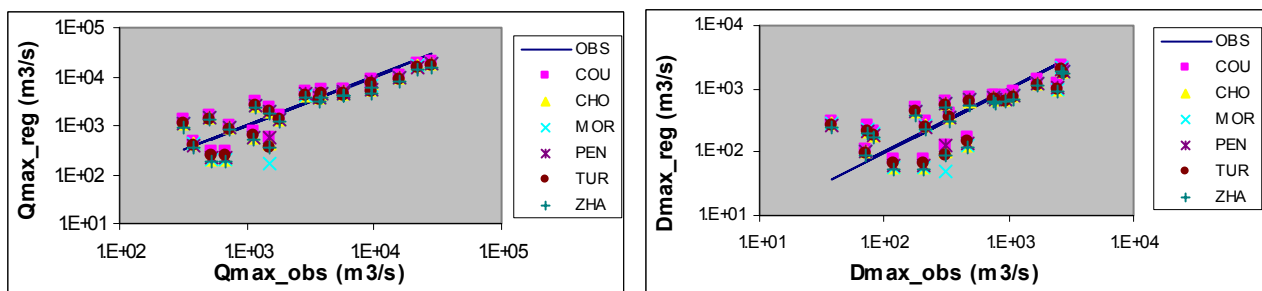


Figura 8. Comparación entre los caudales máximos anuales regionalizados ( $Q_{max\_reg}$ ) y los observados ( $Q_{max\_obs}$ ) (izquierda), y entre las desviaciones estándar de los caudales máximos anuales regionalizadas ( $D_{max\_reg}$ ) y las observadas ( $D_{max\_obs}$ ) (derecha) en la cuenca del río **Negro**, considerando diferentes balances de agua según el método usado para la estimación de la evaporación.

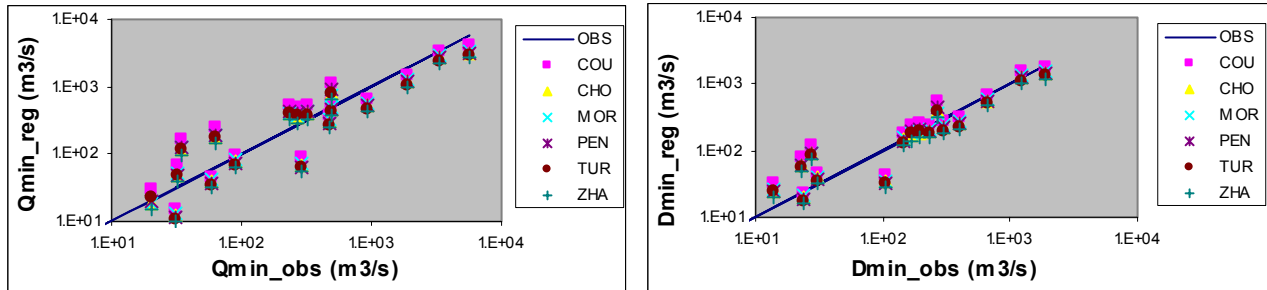


Figura 9. Comparación entre los caudales mínimos anuales regionalizados ( $Q_{min\_reg}$ ) y los observados ( $Q_{min\_obs}$ ) (izquierda), y entre las desviaciones estándar de los caudales mínimos anuales regionalizadas ( $D_{min\_reg}$ ) y las observadas ( $D_{min\_obs}$ ) (derecha) en la cuenca del río **Negro**, considerando diferentes balances de agua según el método usado para la estimación de la evaporación.

**Cuenca del río Xingu**

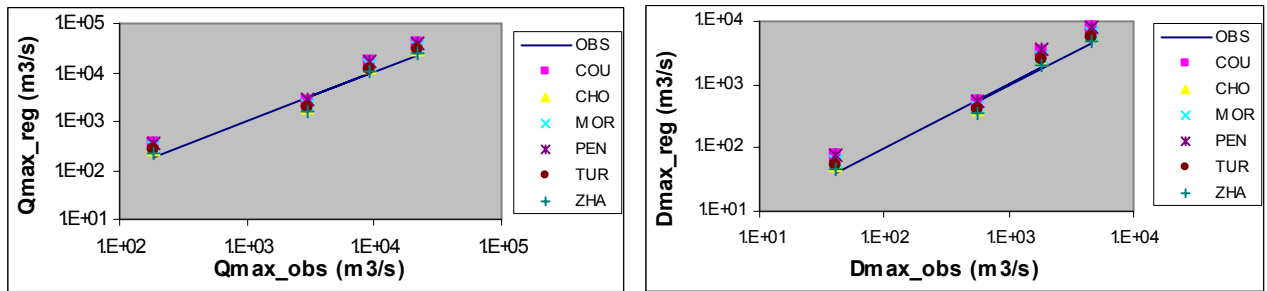


Figura 10. Comparación entre los caudales máximos anuales regionalizados ( $Q_{max\_reg}$ ) y los observados ( $Q_{max\_obs}$ ) (izquierda), y entre las desviaciones estándar de los caudales máximos anuales regionalizadas ( $D_{max\_reg}$ ) y las observadas ( $D_{max\_obs}$ ) (derecha) en la cuenca del río **Xingu**, considerando diferentes balances de agua según el método usado para la estimación de la evaporación.

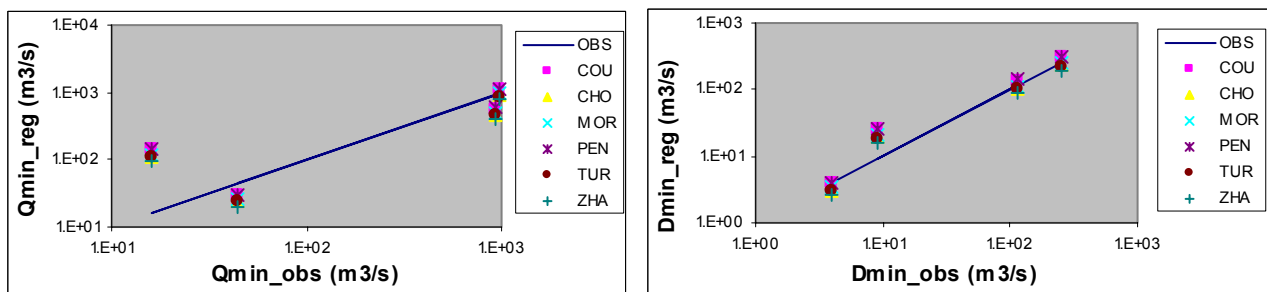


Figura 11. Comparación entre los caudales mínimos anuales regionalizados ( $Q_{min\_reg}$ ) y los observados ( $Q_{min\_obs}$ ) (izquierda), y entre las desviaciones estándar de los caudales mínimos anuales regionalizadas ( $D_{min\_reg}$ ) y las observadas ( $D_{min\_obs}$ ) (derecha) en la cuenca del río **Xingu**, considerando diferentes balances de agua según el método usado para la estimación de la evaporación.

## Cuenca del río Tapajos

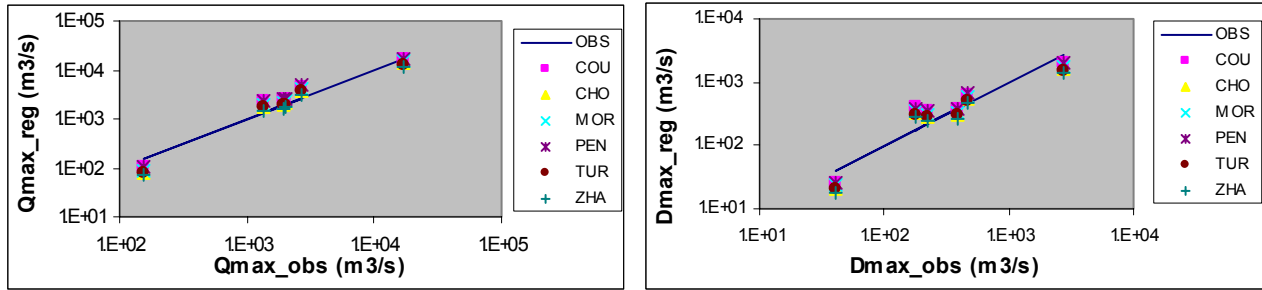


Figura 12. Comparación entre los caudales máximos anuales regionalizados ( $Q_{max\_reg}$ ) y los observados ( $Q_{max\_obs}$ ) (izquierda), y entre las desviaciones estándar de los caudales máximos anuales regionalizadas ( $D_{max\_reg}$ ) y las observadas ( $D_{max\_obs}$ ) (derecha) en la cuenca del río **Tapajos**, considerando diferentes balances de agua según el método usado para la estimación de la evaporación.

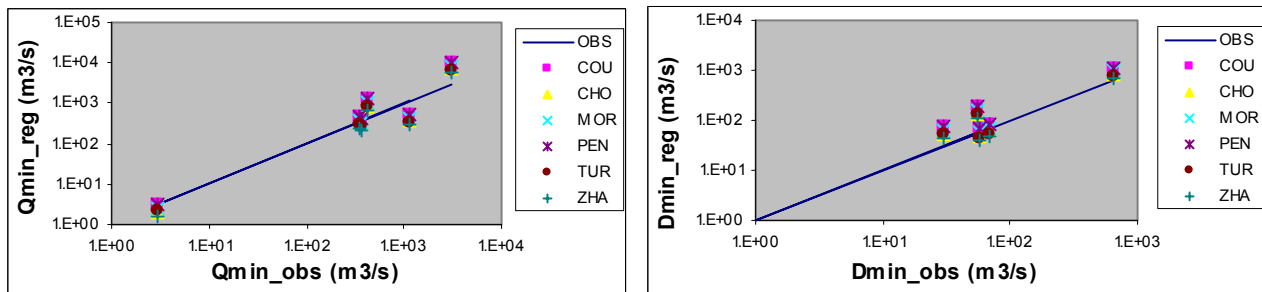


Figura 13. Comparación entre los caudales mínimos anuales regionalizados ( $Q_{min\_reg}$ ) y los observados ( $Q_{min\_obs}$ ) (izquierda), y entre las desviaciones estándar de los caudales mínimos anuales regionalizadas ( $D_{min\_reg}$ ) y las observadas ( $D_{min\_obs}$ ) (derecha) en la cuenca del río **Tapajos**, considerando diferentes balances de agua según el método usado para la estimación de la evaporación.

Para evaluar cuantitativamente la bondad de las estimaciones se evaluaron los errores cuadrático medio (RMS) y cuadrático medio porcentual (RMSP) según las expresiones:

$$RMS = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_1^N (X_{obs} - X_{est})^2} \quad (5)$$

$$RMSP = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_1^N \left( \frac{X_{obs} - X_{est}}{X_{obs}} \right)^2} \quad (6)$$

donde  $N$  es el número de datos,  $X_{obs}$  es el dato observado y  $X_{est}$  es el dato estimado. En las tablas 1 a 4 se presentan los valores del  $RMSP$  (No se presentan los del  $RMS$  ).



Tabla 1. *RMSP* (%) para las estimaciones de los caudales máximos anuales.

Cuenca	Método de estimación de la evaporación					
	COU	CHO	MOR	PEN	TUR	ZHA
Amazonas	8.5	6.4	6.9	7.3	5.9	5.5
Solimoes	14.4	11.7	12.1	11.5	9.9	10.0
Madeira	15.5	10.3	10.8	14.4	8.5	8.3
Negro	21.8	17.4	18.4	17.5	16.7	15.1
Xingu	36.8	17.9	23.2	37.7	17.2	12.8
Tapajos	19.0	11.8	14.2	19.7	11.4	11.5

Tabla 2. *RMSP* (%) para las estimaciones de las desviaciones estándar de los caudales máximos anuales.

Cuenca	Método de estimación de la evaporación					
	COU	CHO	MOR	PEN	TUR	ZHA
Amazonas	16.6	14.1	14.7	14.6	12.7	12.2
Solimoes	29.3	25.2	26.1	25.7	22.3	21.9
Madeira	16.9	12.4	12.4	16.0	10.6	10.3
Negro	38.7	33.9	35.2	33.4	31.7	30.1
Xingu	35.6	16.5	21.9	36.6	15.7	11.1
Tapajos	25.0	19.3	21.1	25.1	17.6	17.2

Tabla 3. *RMSP* (%) para las estimaciones de los caudales mínimos anuales.

Cuenca	Método de estimación de la evaporación					
	COU	CHO	MOR	PEN	TUR	ZHA
Amazonas	17.3	12.0	13.0	15.7	10.5	9.3
Solimoes	15.4	12.0	13.8	12.2	10.5	10.7
Madeira	29.4	20.5	21.6	28.0	16.1	15.5
Negro	30.7	19.7	17.8	26.0	18.0	15.4
Xingu	195.6	151.3	164.3	198.7	146.1	128.0
Tapajos	53.2	31.5	40.0	53.8	29.2	23.9

Tabla 4. *RMSP* (%) para las estimaciones de las desviaciones estándar de los caudales mínimos anuales.

Cuenca	Método de estimación de la evaporación					
	COU	CHO	MOR	PEN	TUR	ZHA
Amazonas	12.5	8.7	9.5	11.6	7.6	7.3
Solimoes	18.5	13.9	16.0	15.5	12.0	11.7
Madeira	22.1	13.8	15.8	20.4	10.7	9.6
Negro	45.4	30.0	15.6	45.7	23.8	23.2
Xingu	46.2	29.8	34.1	47.4	28.1	23.9
Tapajos	48.8	27.6	36.0	50.0	26.8	19.8

Las estimaciones de los caudales mínimos en la cuenca del río Xingu producen errores de más del 100% que se consideran anómalos, debido a posibles imprecisiones en los datos observados que resultan tener mucho peso dado el pequeño número de datos para esta cuenca. En general, los errores son más grandes cuando se considera esta cuenca por separado. Sin considerar la cuenca del Xingu se observa que:

- Los errores en los caudales máximos estimados son siempre menores del 22%, siendo menores cuando la evaporación se estima mediante los métodos de Turc y Zhang.
- El mayor error en las desviaciones estándar de los caudales máximos se encuentran para el río Negro (38.7% con el método de Coutagne). Nuevamente los métodos que exhiben un mejor desempeño son los de Turc y Zhang.
- En la cuenca del río Tapajos se encuentran los mayores errores en las estimaciones de los caudales mínimos (53.8% con el método de Penman y 53.2% con el método de Coutagne). De nuevo las mejores estimaciones se logran con la evaporación estimada mediante los métodos de Turc y Zhang.
- Las mejores estimaciones de las desviaciones estándar de los caudales mínimos se obtienen con los métodos de Turc y Zhang (errores siempre menores del 28.1%). Los mayores errores se encuentran al usar los métodos de Coutagne y Penman.

#### 4. Conclusiones

Los resultados sugieren la validez de las suposiciones implícitas en las ecuaciones (1) a (4) sobre la relación entre la media y la desviación estándar de los caudales extremos y los caudales medios multianuales. Así mismo, justifican la estimación de estos últimos mediante balances hidrológicos de largo plazo. Este planteamiento ofrece alternativas, basadas tanto en la física como en la estadística de los procesos hidrológicos, para la estimación de caudales en cuencas con deficiencias en información.

Los métodos de estimación de la evaporación que producen mejores estimaciones de los caudales extremos y de sus desviaciones estándar son, en general, el de Turc y el de Zhang. En el mismo sentido, las peores estimaciones se encuentran al usar los métodos de Coutagne y Penman.

#### 5. Referencias

- Poveda, G., J. Vélez, O. Mesa, A. Cuartas, J. Barco, R. Mantilla, J. Mejía, C. Hoyos, J. Ramírez, L. Ceballos, M. Zuluaga, P. Arias, B. Botero, M. Montoya, J. Giraldo y D. Quevedo. Linking long-term water balances and statistical scaling to estimate river flows along the drainage network of Colombia. Sometido a *Journal of Hydrologic Engineering* (2005).
- Salazar, L. F., 2004. Patrones de escalamiento hidroecológico en la Amazonía: Renormalización de flujos de agua y energía para estimar la evaporación y escalamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Tesis de Maestría, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.
- Vélez, J. I., G. Poveda y O. Mesa, 2000. Balances hidrológicos de Colombia. Topográficas, Medellín.
- Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, 2003. HIDROSIG, versión 3.0 Beta, Manual de Usuario.