

Zonas semiáridas y su modelación hidrológica (lluvia-escorrimento)

Khalidou M. Bâ

Carlos Díaz

Centro Interamericano de Recursos del Agua
Universidad Autónoma del Estado de México

José Llamas

Universidad Laval, Canadá

Hilario Llanos

Universidad del País Vasco, España

El presente trabajo se encuentra circunscrito dentro de la modelación matemática de flujos superficiales para cuencas semiáridas. Con la finalidad de esclarecer los conceptos de aridez, sequía y modelación matemática en hidrología, se han incluido definiciones pertinentes. Por otro lado, el modelo hidrológico OTTHYMO que utiliza el método del SCS (Soil Conservation Service, USA) y el modelo de Nash respectivamente como funciones de producción y de transferencia, han sido aplicados a pequeñas cuencas de la región del Sahel, África. Las simulaciones realizadas demostraron la pertinencia del modelo para reproducir y predecir de manera apropiada los caudales de las cuencas semiáridas estudiadas. Finalmente, el análisis de sensibilidad demostró que la variación del error relativo de las precipitaciones netas es del 87% manifestado por el error relativo promedio de la transformación lineal de la retención potencial máxima. Asimismo se observó que el incremento del número de recipientes tiene como efecto el aumento de los caudales máximos sin aumentar el tiempo pico del mismo y, por otro lado, que el aumento del tiempo pico del caudal máximo genera una atenuación de la creciente.

Palabras clave: semiáridas, modelos hidrológicos, OTTHYMO, caudal, hidrogramas, Sahel, parámetros, sensibilidad.

Introducción

Existen varios caminos para definir los conceptos de zona árida y semiárida. La definición de aridez, en términos de planeación y manejo de recursos hídricos según Wiener (1972), está relacionada con las condiciones y el acceso del recurso agua que limitan seriamente la sobrevivencia o el crecimiento de una economía. Sin embargo, en términos operativos, una región o un país son considerados áridos o semiáridos cuando la cantidad o la calidad o ambas condiciones del agua representan una variable crítica controladora de su planeación y desarrollo.

Por otro lado, una definición para los conceptos de zona árida y semiárida, en términos hidrológicos, es la adoptada para la elaboración de la carta de distribución mundial de las zonas áridas de la Organización

de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés) (nota técnica MAB Núm. 7, 1979). Esta definición se fundamenta en el valor del cociente de la altura de precipitación media anual con respecto a la evapotranspiración potencial media anual: P/ETP . Este parámetro tiene un valor comprendido en el intervalo de 0.03 y 0.20 para las zonas áridas, para las zonas semiáridas entre 0.20 y 0.50 y para las zonas hiperáridas tiene un valor inferior a 0.03.

Es importante señalar la diferencia conceptual que existe entre aridez y sequía, toda vez que ambas condiciones se caracterizan por la ausencia de agua:

- La aridez es un estado climático permanente
- La sequía es un proceso extremo que se presenta en el tiempo y en el espacio

A estos fenómenos meteorológicos frecuentemente se les asocia entre sí, ya que en las regiones más secas es donde se presenta una variabilidad acentuada en la precipitación; las consecuencias económicas de una sequía se reflejan con mayor impacto; se acentúa la carencia de personal preparado en la toma de decisiones oportunas, y porque el fracaso de las inversiones realizadas en la agricultura y aprovechamientos del agua pueden representar pérdidas económicas de gran importancia para la sociedad.

La terminología y definiciones asociadas con la aridez y la sequía generan confusión semántica, sin embargo, es muy difícil realizar una separación conceptual de los parámetros que definen cada uno de estos fenómenos. Por lo anterior, es necesario realizar una clasificación de conceptos a través de una escala de sequedad con respecto a los ejes de disponibilidad de agua y transformación del medio ambiente (Vlachos, 1983). Dicha clasificación se muestra en el cuadro 1.

1. Clasificación conceptual por grados de sequedad (Vlachos, 1983)

Disponibilidad de agua

		Desequilibrios temporales	Deficiencias permanentes
Transformaciones en el medio ambiente	Producido por la naturaleza	<p><i>A. Sequías</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - persistencia en precipitaciones menores a la media - variabilidad en frecuencia, duración y severidad - ocurrencia impredecible - reducción de disponibilidad de agua en zona afectada - disminución en la capacidad de conducción de la red hidrográfica 	<p><i>B. Aridez</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - condiciones de baja humedad en toda la zona - altos grados de insolación - variaciones extremas de temperatura - alta variabilidad en la precipitación en el tiempo y en el espacio - bajas precipitaciones medias anuales - baja capacidad de conducción de la red hidrográfica
	Efectos	<ul style="list-style-type: none"> - erosión eólica y deterioro de suelos cultivables - reducción de flora y fauna - reducción de calidad de aire: polvos - aparición de pestes y enfermedades - aumento de la demanda de agua 	<ul style="list-style-type: none"> - producción agrícola limitada - actividades de extracción e industriales limitadas por disponibilidad del recurso agua - asentamientos humanos dispersos - subsistencia de economías agrícolas
	Respuesta	<ul style="list-style-type: none"> - regulación de uso de agua, racionalización y/o reciclado - medidas institucionales de uso durante la crisis 	<ul style="list-style-type: none"> - recuperación de suelos: irrigación - secuencia en la concesión de uso de suelo - obras hidráulicas de almacenaje y conducción de agua
	Características		
Inducido por el hombre	Efectos	<p><i>C. Déficit</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - sobreexplotación de acuíferos - nivel de agua en embalses menor a la prevista - degradación de suelos - condiciones de escurrimiento incrementadas - disminución de recarga de acuíferos - capacidad alterada de conducción en la red hidrográfica 	<p><i>D. Desertificación</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - minado de acuíferos - pérdida de los sistemas ribereños - pérdida de nutrientes en suelos - daños de las capas superficial y subsuperficial de suelos - aumento de inundaciones repentinas y en escurrimientos - deterioro y/o pérdida de capacidad de conducción en la red hidrográfica
	Características	<ul style="list-style-type: none"> - sistemas hidrológicos afectados localmente - deterioro de la calidad del agua; intrusión salina - conflictos entre usuarios del agua 	<ul style="list-style-type: none"> - erosión por viento y agua - salinización de suelos - agritamiento y/o compactación de suelos - salinización de aguas - abatimiento de acuíferos: subsidencias - cambios microclimáticos: calidad del aire - alteración de la estructura social - cambios en las bases de la economía - pérdida de suelos cultivables
	Respuesta	<ul style="list-style-type: none"> - regulación de uso de agua, racionalización y/o reciclado - aumento del valor del agua - medidas de mitigación institucionales - innovaciones tecnológicas - cambios en el uso de suelos 	<ul style="list-style-type: none"> - medidas de rehabilitación de suelos - regulación en el uso de suelo: optimización v.s. maximización de uso - innovaciones en el manejo de los recursos y tecnologías - medidas de conservación de los ecosistemas
	Características		

La mayor parte de las características hidrológicas para las zonas definidas como áridas y semiáridas son similares ya que todas ellas presentan:

- Baja humedad en toda la zona
- Valores altos de insolación
- Variación extrema de temperatura
- Baja precipitación media anual
- Ausencia o insuficiencia de red hidrográfica

Sin embargo, ciertas características son propias de regiones bien delimitadas, por ejemplo:

- Una similitud con respecto a un periodo de lluvias definido
- Un diagrama de precipitaciones simples
- Homogeneidad en altas temperaturas
- Poca superficie con cubierta vegetal
- Una red hidrográfica deficiente

Por otro lado, un escenario común en las zonas clasificadas como semiáridas es que el 90% de la precipitación total anual ocurre tan sólo en el 10% del periodo de lluvias de la región. Vale la pena mencionar que, en contraste con las regiones húmedas donde frecuentemente el mecanismo rector del flujo superficial es el grado de saturación del suelo, en las regiones áridas y semiáridas los escurrimientos superficiales, producidos por la precipitación, se controlan mediante un mecanismo de infiltración excedida, mejor conocido como un flujo, de tipo *hortoniano*, que obedece a las siguientes condiciones de funcionamiento:

$$q = p - \phi \quad \text{si } p > \phi \quad \text{y} \quad q = 0 \quad \text{si } p < \phi$$

donde:

q : escurrimiento producido,
 p : precipitación,
 ϕ : índice de infiltración.

Modelos matemáticos en hidrología (clasificación)

El análisis de los fenómenos hidráulicos, para su previsión y el diseño de obras, se ha extendido más allá de estudios puntuales. Ahora cubren regiones geográficas, aumentando la complejidad en cuanto al número de variables internas y ambientales así como de las interrelaciones entre los diferentes factores que intervienen en el sistema estudiado. Por ello, el modelo matemático se ha convertido en una herramienta indispensable para el especialista en recursos hídricos.

Clarke (1973) define al modelo matemático como la representación simplificada de un sistema complejo en el que su mismo comportamiento es representado por un conjunto de ecuaciones lógicas, necesarias para expresar las relaciones entre variables y parámetros, que representan el estado del sistema (cuenca) y su evolución bajo la influencia de ciertas variables.

Los modelos estadísticos utilizan métodos y técnicas estadísticas para identificar relaciones entre las *solicitaciones* y respuestas de un sistema, y relegan a un segundo plano las características físicas del fenómeno en estudio. Los modelos de tipo estadístico pueden ser clasificados como de regresión y correlación, probabilístico o estocástico.

Los modelos determinísticos estudian los procesos hidrológicos a partir del comportamiento físico de los parámetros del fenómeno, bajo diferentes *solicitaciones*, por lo que se requiere de un conocimiento profundo del funcionamiento del sistema. Este tipo de modelos pueden ser clasificados como empíricos y conceptuales y están caracterizados por la relación unívoca entre *solicitud* y respuesta.

Etapas de elaboración de un modelo matemático

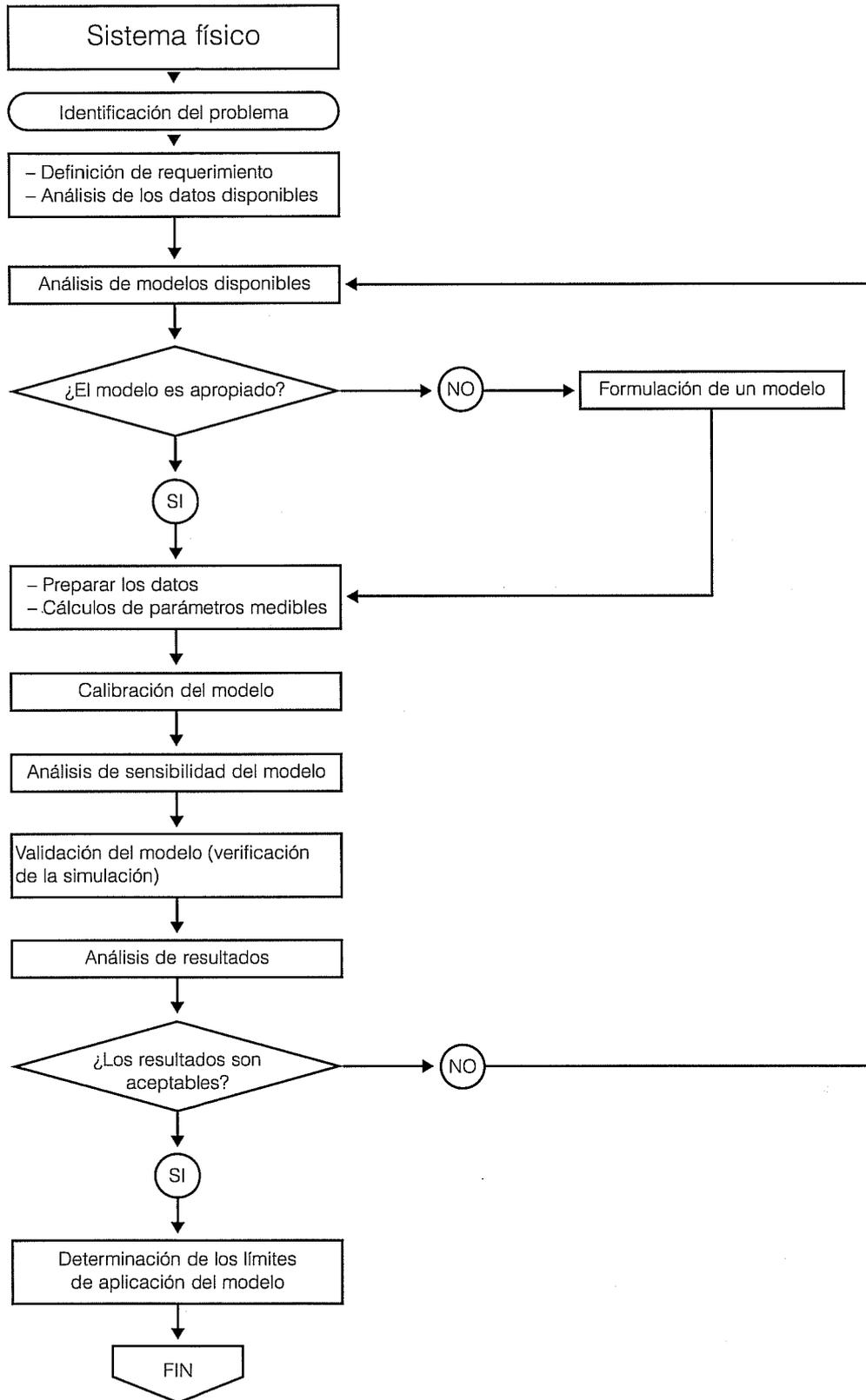
Antes de la creación o selección de un modelo, es preciso definir claramente el fenómeno hidrológico por analizar, así como la disponibilidad de datos básicos. Posteriormente, debe llevarse a cabo la adaptación del modelo en el orden y a través de las etapas siguientes:

- Identificación o formulación, o ambas
- Calibración
- Validación y límites de aplicación

En la primer etapa, se identifican los procesos hidrológicos que controlan la respuesta de la cuenca y se considera la disponibilidad de los datos de base para finalmente transformarlos en un programa computarizado que proporcione soluciones numéricas.

La aplicación de un modelo requiere la determinación de parámetros propios a cada cuenca (calibración). En un modelo, es posible distinguir dos tipos de parámetros que caractericen al sistema físico: aquéllos que son medibles (superficie, pendiente, rugosidad, etc.) y aquéllos que son conceptuales. La calibración es la etapa que permite la atribución de valores a los parámetros conceptuales que representan características de la cuenca como capacidad de retención y almacenamiento, constantes de infiltración y de percolación, etcétera.

1. Diferentes etapas en la selección o construcción de un modelo matemático



En ocasiones, algunos parámetros conceptuales se evalúan indirectamente mediante parámetros medibles de la cuenca. Así pues, el número óptimo de parámetros es el que minimiza o maximiza, según sea el caso, la función objetivo elegida. Vale la pena mencionar, que existen algunos parámetros que tienen poca influencia sobre la función y otros que son interdependientes, particularmente si el número de parámetros es elevado. Por lo anterior, algunos investigadores sugieren la realización de un análisis de sensibilidad con la finalidad de identificar estos dos tipos de parámetros.

Una vez calibrados los diferentes parámetros del modelo se procede a su verificación (validación), utilizando datos de entrada diferentes a los considerados en su calibración. Por último, es importante señalar que todo modelo matemático tiene límites de aplicación, pues este ha sido concebido bajo objetivos específicos e hipótesis de simplificación orientados a las necesidades de un objetivo en particular, por lo que estos últimos deben ser claramente enunciados. La ilustración 1 muestra un diagrama de flujo en donde se señalan las diferentes etapas en la selección o construcción de un modelo matemático.

Aplicación de un modelo matemático hidrológico de lluvia-escorrentamiento para una zona semiárida: el modelo OTTHYMO

El modelo OTTHYMO es una versión modificada del modelo HYMO desarrollado por Williams & Hann (1973). Wisner ha realizado en su laboratorio de la Universidad de Ottawa varias investigaciones con el objeto de mejorar el modelo original y sobre todo adecuarlo a condiciones urbanas (Wisner & Kassem, 1982; Jobin, 1982; Jordan & Wisner, 1983; Consuegra, 1987). Este modelo puede simular los escurrimientos tanto en zonas urbanas como rurales e incluso en ambas al mismo tiempo.

Esta última cualidad ha hecho que el modelo sea una herramienta de gran utilidad en los planes maestros de drenaje donde el objetivo es la evaluación del impacto por urbanización. El hietograma promedio puede discretizarse en periodos muy cortos (5, 10, 15 min). El cálculo de escurrimientos en zonas urbanas y rurales son efectuados respectivamente por los submodelos URBHYD y NASHYD.

- URBHYD es un modelo conceptual que utiliza dos recipientes en paralelo para simular separadamente las contribuciones de las partes permeables e impermeables. En el presente trabajo, sólo se analizan los escurrimientos en zona rural semiárida, por lo

que se presenta únicamente como ejemplo de aplicación el modelo NASHYD aplicado a cuencas rurales semiáridas de la región del Sahel, África.

- NASHYD está construido por una función de producción, método del SCS y una función de transferencia, método de Nash (1957) para el cálculo del hidrograma unitario.

Parámetros importantes para el estudio de zonas semiáridas

El método del SCS propone como función de producción la expresión siguiente:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (1)$$

donde:

- F : la infiltración acumulada (mm),
- S : retención potencial máxima (mm)
- Q : volumen total escurrido (mm)
- P : volumen total precipitado (mm)
- I_a : pérdidas por abstracción inicial (mm).

Suponiendo que $F = P - I_a - Q$, la ecuación (1) se transforma en la ecuación clásica del SCS y donde S está relacionado con un parámetro CN como se indica en la ecuación (3):

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (2)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{mm}) \quad (3)$$

el parámetro CN es adimensional y es una transformación lineal de la retención potencial máxima (S). Por otro lado, la función de producción señalada contiene dos parámetros I_a y CN , y para su determinación existen dos métodos; las curvas del SCS (USDA, 1972) y el método de CN^* (Jordan & Wisner, 1983, Consuegra, 1987).

Curvas establecidas por el SCS

En la ecuación (2) una vez establecidas las pérdidas iniciales I_a , sólo queda por encontrar el valor del parámetro CN para estimar la retención potencial máxima y finalmente la precipitación neta. El método del SCS considera que las pérdidas iniciales son iguales al 20%

de las pérdidas por retención ($I_a = 0.2 S$), reduciendo así el número de parámetros de la función de producción a uno.

Los valores de CN se encuentran documentados en cuadros en función del tipo de suelo, su ocupación y las condiciones anteriores de humedad (SCS, 1972). Los valores de CN están indicados para tres condiciones de humedad diferentes, AMCI, AMCII, AMCIII y representan respectivamente los estados de humedad seco, medio y saturado.

La clasificación anterior se estableció después del análisis exhaustivo de un gran número de pequeñas cuencas rurales. El método del SCS considera que las condiciones de humedad se caracterizan por el volumen de precipitación ocurrido en los cinco días precedentes a la precipitación estudiada (Rallison & Crowsley, 1979). Algunos modelos tales como HYMO (Williams & Hann, 1973), OTTHYMO (Jordan & Wisner, 1983) utilizan el criterio antes mencionado para la determinación de los dos parámetros.

La experiencia ha mostrado que los valores de I_a obtenidos bajo la hipótesis del SCS son muy elevados, teniendo como consecuencia una subestimación del volumen realmente escurrido. Aaron *et al.* (1977) reportan que esta hipótesis es válida únicamente para tormentas donde la precipitación es superior a 60 mm, Fogel *et al.* (1980) proponen un coeficiente igual a 0.15. Springer *et al.* (1980) han desarrollado varios estudios, tanto en cuencas húmedas como en semiáridas, que manifiestan, en la mayor parte de los casos, un coeficiente inferior al de 0.20 propuesto por el SCS. Golding (1979) ha preferido establecer una relación entre I_a y S para tres clases de CN , es decir:

$$\begin{array}{lll} I_a = 0,075 S & \text{si} & CN < 70 \\ I_a = 0,10 S & \text{si} & 70 < CN < 90 \\ I_a = 0,20 S & \text{si} & CN > 90 \end{array}$$

Método de CN^*

Estudios realizados por Jobin (1982) en una cuenca experimental suiza demostraron que los resultados son más apropiados si se consideran los índices de precipitación anteriores a los observados en la estimación de las pérdidas iniciales I_a .

La humedad inicial de los suelos de una cuenca es un factor importante en el análisis de relaciones lluvia-escorrimento, sin embargo, este parámetro es difícil de evaluar debido a los problemas prácticos inherentes a las medidas sistemáticas, por lo que se justifica el uso de un índice que caracterice el grado de saturación basado únicamente en los valores de precipitación diaria ocurridos en la cuenca. La justificación de

esta técnica fue presentada por Kohler & Linsley (1951) considerando que la velocidad de decaimiento de la humedad de los suelos es proporcional a su humedad.

Los índices de humedad, basados en las precipitaciones anteriores son de varios tipos, y sólo los resultados de un análisis de lluvia-escorrimento permiten la evaluación del tipo y la asignación de los valores de parámetros eventuales. De manera general, se tienen en consideración las precipitaciones medias y su mayor o menor anterioridad. Los principales tipos de índices propuestos son:

$$IPA_i = (P_{i-1} + IPA_{i-1})e^{-\mu t} \quad (4)$$

$$IPA_i = c \cdot IPA_{i-1} + P_{i-1} \quad (5)$$

donde:

IPA_i : índice de saturación del día i (anterior a la tormenta de altura P_i)

IPA_{i-1} : índice de saturación del día $i-1$ (IPA anterior a la tormenta de altura P_{i-1})

P_{i-1} : precipitación diaria del día $i-1$

μ, c : coeficientes

t : intervalo en días y fracción de días entre las tormentas $i-1$ e i .

Para el cálculo del IPA del día i , se debe conocer la serie pluviométrica de todo el periodo correspondiente, estableciendo el IPA al inicio del periodo como nulo. Consecuentemente se trata de analizar los caudales para identificar si una precipitación generó un escurrimiento significativo y representarla en una gráfica, teniendo como abscisa al IPA y como ordenada la precipitación, señalando si hubo o no escurrimiento. Así, los dos tipos de eventos pueden separarse por una curva que representa el umbral del escurrimiento I_a .

Asimismo, con la ecuación (3) es posible calcular los CN de los hidrogramas y relacionarlos con los valores de IPA mediante una gráfica: por esta razón se le denomina método de CN^* (Jordan & Wisner, 1983, Consuegra, 1987). Esta gráfica permite obtener un valor de CN designado ahora CN^* para una condición antecedente de humedad específica.

Función de transferencia

Nash (1957) consideró que una cuenca, en su modelación, se encuentra constituida por una cadena de recipientes de agua que se vacían en cascada hasta su desembocadura. El hidrograma unitario, HU, de Nash

es, consecuentemente, un modelo conceptual basado en una cascada de n recipientes en serie. La forma de este HU es comparable a la de una función de distribución de probabilidad de tipo asimétrica y está basada, precisamente, en la función *Gamma*. Así, el almacenaje S en un recipiente es proporcional al caudal de salida Q , ($S=KQ$) y el caudal de salida del último recipiente en el tiempo t es:

$$q(t) = \frac{1}{K_n \Gamma(n)} \left(\frac{t}{K_n} \right)^{n-1} e^{-\frac{t}{K_n}} \quad (6)$$

donde:

- $q(t)$: coordenada del HU en el tiempo t
- $\Gamma(n)$: función *Gamma*
- K_n : coeficiente de almacenamiento de cada recipiente
- n : número de recipientes

para $dq/dt = 0$, el caudal es maximizado, el tiempo de pico del hidrograma t_p está en función de n y de K_n , es decir:

$$t_p = (n-1) K_n \quad (7)$$

El hidrograma unitario instantáneo, HUI, puede expresarse como un término adimensional por los parámetros de la ecuación de la distribución *Gamma*:

$$q = q_p \left(\frac{t}{t_p} \right)^{(n-1)} e^{-(1-n)\left(\frac{t}{t_p}\right)} \quad (8)$$

donde:

- t_p : tiempo de pico del hidrograma unitario
- n : número de recipientes
- q_p : caudal máximo del HUI

con
$$q_p = \frac{1}{K_n \Gamma(n)} (n-1)^{n-1} e^{1-n} \quad (9)$$

Las características del hidrograma unitario están definidas por los parámetros n y t_p . El modelo de Nash es un modelo simple pues sólo es necesario determinar estos dos parámetros.

Aplicación del modelo OTTHYMO a las cuencas Polaka y Tchalol, Burkina Fasso

Las cuencas Polaka y Tchalol, a su vez subcuencas del Mare d'Oursi de Burkina Fasso, cuentan con una superficie de 9.14 y 9.28 km², respectivamente, y tienen una pendiente promedio de 8.10 y 7.60 m/km. La pluviometría promedio anual, en el periodo analizado, es de 364 mm en Polaka y de 350 mm en Tchalol.

El coeficiente de escurrimiento promedio de Polaka, 14.8%, es bajo comparado con las otras cuencas de la región (Bâ, 1994). Por ejemplo para Tchalol es del 27.4%, es decir, prácticamente el doble. Sin embargo, el reducido coeficiente de escurrimiento de Polaka se explica por su alta permeabilidad aguas arriba, pues está ocupada por un suelo arenoso en gran parte cultivado. Es importante señalar que estos accidentes geográficos conforman una red de cuencas experimentales en las que se ha instalado la instrumentación necesaria para la medición de caudales.

Bâ (1994) demostró que el método de CN^* no es aplicable a estas cuencas ni a la región, y que el *IPA* no interfiere significativamente en la obtención de la lluvia neta. Por otro lado Ribestein (1992), en el desarrollo de una investigación de comparación de funciones de producción sobre ocho cuencas de la región semiárida del Sahel y de Camerún, encontró que únicamente en las dos más extensas el *IPA* es sensible y justifica su importancia por el caudal de base que se presenta durante el periodo de lluvias. Finalmente concluye que para las otras seis cuencas, más pequeñas y en regiones más áridas, el *IPA* no es un parámetro válido del estado de humedad inicial previo a las avenidas.

Por lo anteriormente expuesto, los parámetros de la función de producción han sido determinados a partir de las curvas establecidas por el SCS para los diferentes tipos de suelos. Las pérdidas iniciales se estimaron de acuerdo a la clasificación de Golding (1979) descrita en párrafos anteriores y se calibraron los parámetros n y t_p de la función de transferencia.

La minimización de las diferencias ha sido el criterio de aceptación seleccionado para la calibración: por un lado, entre los caudales máximos observado y calculado y, por otro, entre los volúmenes escurridos calculado y observado. La selección de los caudales máximos como parámetro de calibración, de aplicación frecuente para el dimensionamiento de infraestructuras hidráulicas, está fundamentada en la estimación de avenidas, particularmente las de periodo de retorno de diez años, como las de regiones semiáridas, sobre todo las del Sahel.

La calibración del modelo fue realizada por optimización, a través del método de Rosembrok (1960) utilizando los criterios citados anteriormente. Los parámetros óptimos encontrados para Polaka y Tchalol son $n = 5$ y $t_p = 0.75$, y $n = 8$ y $t_p = 1.5$, respectivamente.

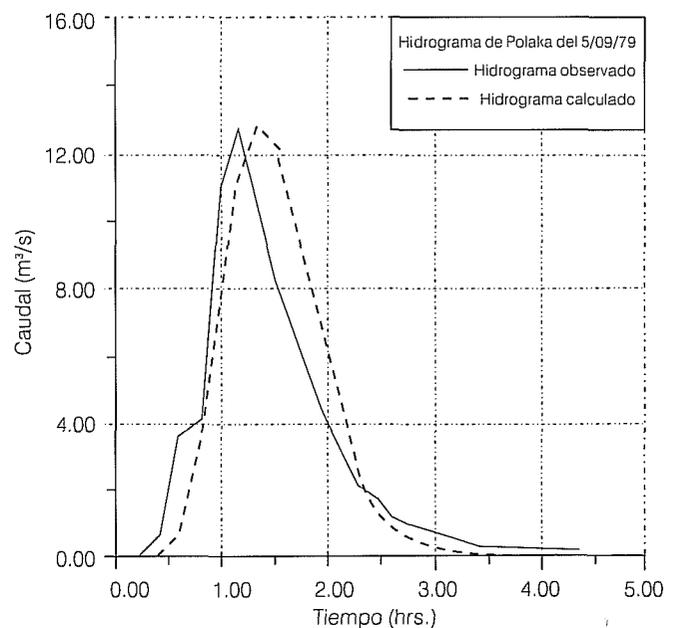
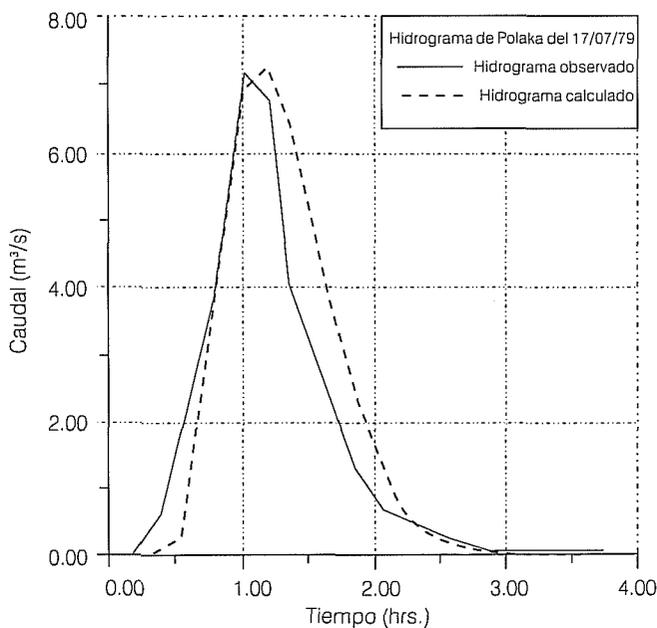
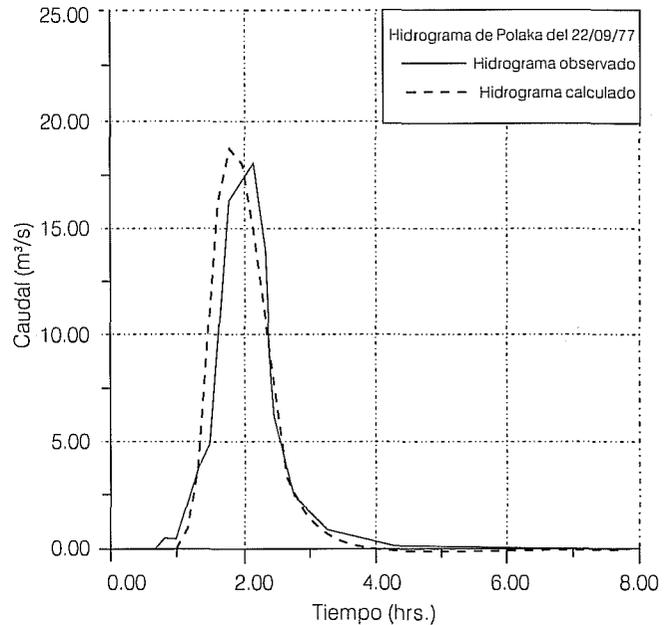
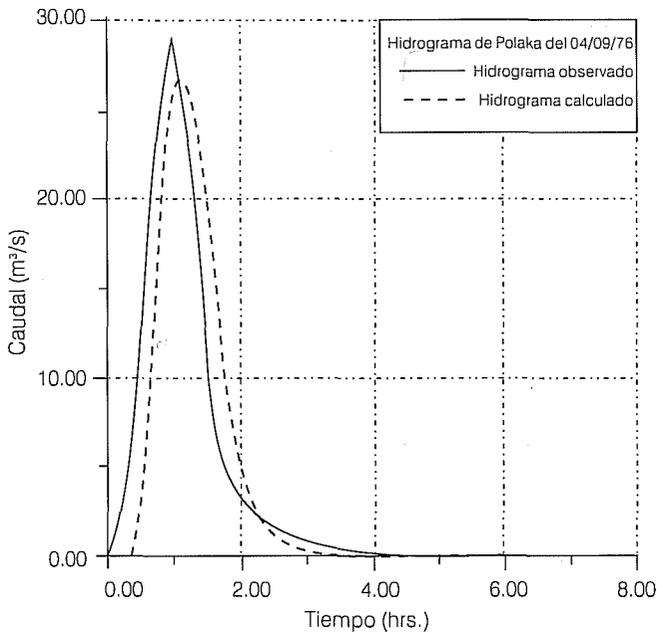
Por otro lado, los diferentes hidrogramas y criterios numéricos utilizados demuestran que el uso del subprograma NASHYD del modelo OTTHYMO es apropiado para simular el escurrimiento en cuencas semiáridas.

La ilustración 2 muestra diferentes hidrogramas de

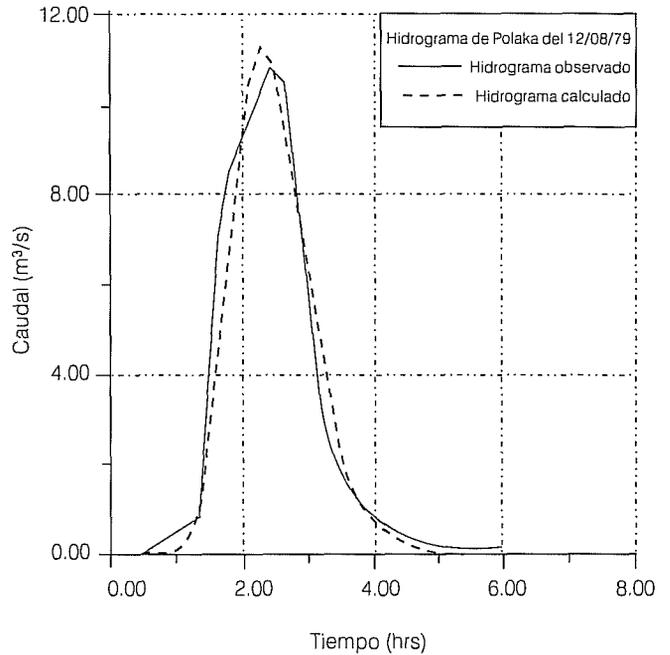
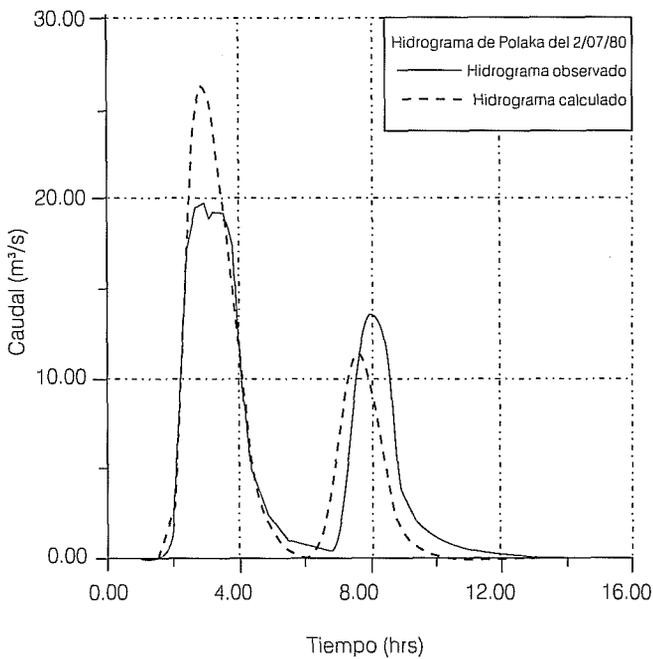
verificación (eventos no utilizados en la calibración del modelo) para diferentes tormentas, demostrando así la pertinencia del modelo para la simulación del escurrimiento en Polaka y Tchalol.

Para ilustrar la influencia del parámetro CN sobre la función de producción, se calcularon las sensibilidades relativas definidas por los cocientes de las diferencias relativas $\partial Pn/Pn0$ y $\partial CN/CN0$, donde Pn es la precipitación neta y $Pn0$ su valor de referencia. Dichas sensibilidades relativas son adimensionales, lo que

2. Hidrogramas observados y calculados de las cuencas Polaka y Tchalol con OTTHYMO



2. Hidrogramas observados y calculados de las cuencas Polaka y Tchalol con OTTHYMO (continuación)



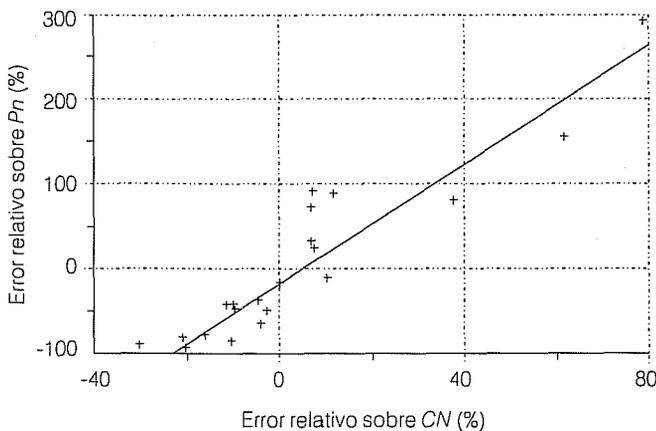
permite la comparación entre modelos y cuencas. La ilustración 3, representa la sensibilidad relativa promedio de CN sobre la precipitación neta de las cuencas estudiadas.

La variación del error relativo de las precipitaciones netas es explicada en un 87% por el error relativo promedio del parámetro CN . Esta misma ilustración muestra que un error del 20% sobre CN puede provocar un error de más del 75% sobre la precipitación neta.

Con el propósito de analizar la sensibilidad de los parámetros n y t_p de la función de transferencia, la metodología seguida consistió en variar estos parámetros uno a uno manteniendo el otro en su valor optimizado.

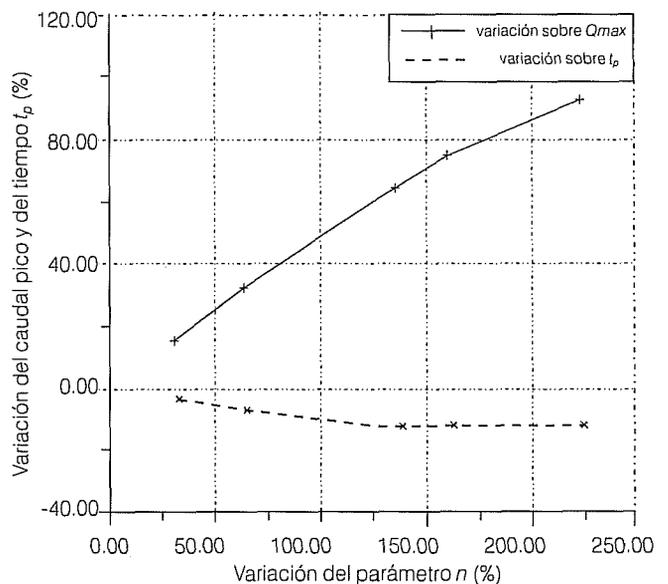
Se calculó la variación del caudal máximo y el tiempo-

3. Sensibilidad de CN

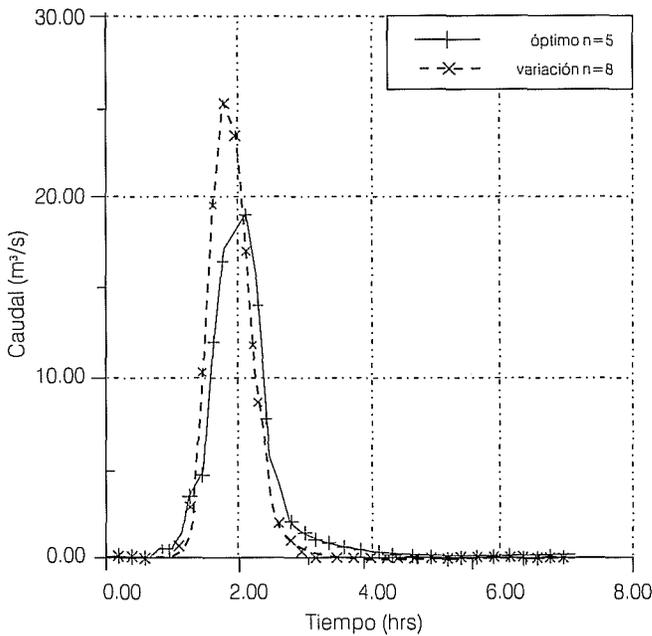


po pico del mismo, para cada una de las variaciones de los parámetros con referencia a las ilustraciones 4 y 5, el incremento de n genera un aumento del caudal máximo que puede llegar hasta el 100% de este parámetro y el error sobre el caudal máximo se mantiene inferior al 50%. Sin embargo, el aumento de n presenta muy poca influencia sobre el tiempo de respuesta de la cuenca, el cual se reduce ligeramente.

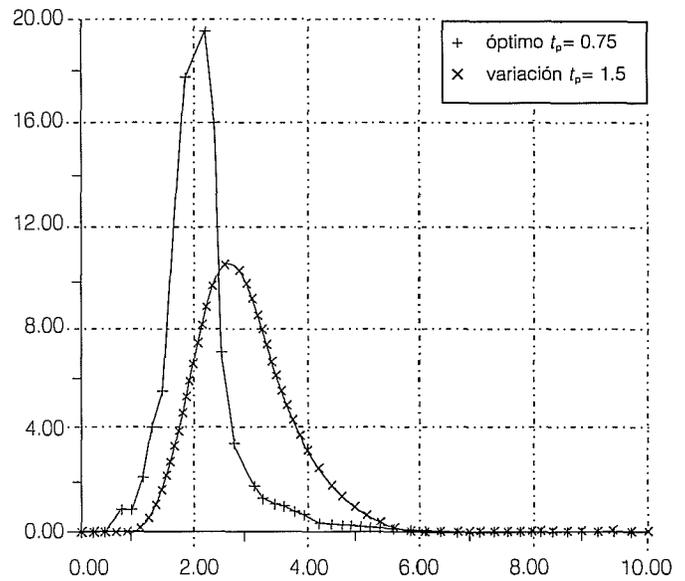
4. Efecto de n sobre el caudal máximo y el tiempo pico del mismo



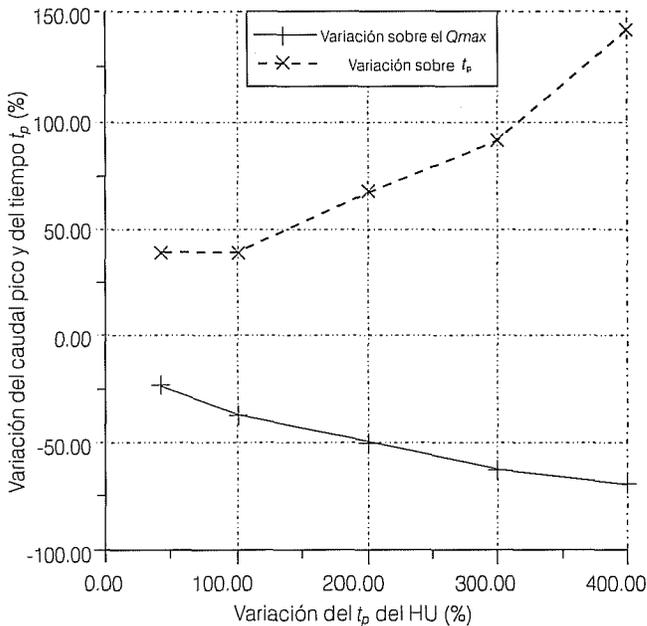
5. Efecto de n sobre un hidrograma



7. Efecto de t_p sobre un hidrograma



6. Efecto de t_p del HU sobre el caudal máximo y el tiempo pico del mismo



Asimismo, de acuerdo con las ilustraciones 6 y 7, el incremento de t_p produce una respuesta mucho más lenta y un caudal máximo menor, es decir una atenuación de la avenida. Un error del 50% sobre t_p propicia un incremento de más del 30% sobre el tiempo pico del caudal máximo y una reducción simultánea del 25% sobre el valor de dicho caudal.

Conclusión

Los resultados obtenidos del estudio de cinco cuencas de la región del Sahel en el continente africano -en el presente trabajo sólo se presentan dos como ejemplo- muestran que el modelo OTTHYMO es una herramienta útil para reproducir y muy probablemente para predecir los caudales generados por una tormenta en cuencas semiáridas. Sin embargo, es importante señalar que la utilidad de un modelo no puede ser generalizada y debe realizarse un análisis que dependerá de la cuenca o región en estudio para la estimación y calibración de los parámetros particulares que rigen el comportamiento del fenómeno.

Asimismo el método del SCS, utilizado en la función de producción, mostró excelentes cualidades como técnica para la reconstitución y predicción apropiada de la lluvia neta. Lo anterior es válido si las pérdidas iniciales I_a y el parámetro CN son bien determinados. Finalmente, el análisis de sensibilidad demostró que la variación del error relativo de las precipitaciones netas es explicada en un 87% por el error relativo promedio del parámetro CN . Asimismo se observó que, el incremento del parámetro n tiene como efecto el aumento de los caudales máximos sin incrementar el tiempo pico del mismo y por otro lado el aumento de t_p genera una atenuación de la creciente.

Recibido: mayo, 1994
Aprobado: diciembre, 1994

Referencias

- Aaron, G.M.; A.C., Miller; D.P., Lakatos. *Infiltration Formula Based on SCS Curve Number*. Journal of Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers, pp. 419-427, 1977.
- Bâ, K.M. *Critères de Sensibilité des Modèles Mathématiques en Hydrologie*, thèse de doctorat, Université Laval, 262 p., 1994.
- Bâ, K.M.; J., Llamas; D.C., Díaz; R., Lagacé. *Funciones de producción de algunas cuencas sahelianas*, Ingeniería Hidráulica en México, pp.1-5. mayo-dic. 1993.
- Clarke, R.T. *Mathematical Models in Hydrology*. Food and Agricultural Organisation, Irrigation and Drainage Paper no 19, 282 p., Rome, 1973.
- Consuegra-Zammit, D. *Vérification du Modèle Hydrologique OTTHYMO et Propositions pour son Application*. Thèse Msc, Université d'Ottawa, 273 p. + annexes, 1987.
- Fogel, M.M.; L.H., Hekman; L., Duckstein. *Predicting Sediment Yield from Strip - Mined Lands*. Symposium on Watershed Management, Boise, Idaho. Journal of Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers, pp.176-187, 1980.
- Golding, B.C. *Runoff Curve Number with Varying Site Moisture*. Journal of Irrigation and Drainage Div., American Society of Civil Engineers, 105, pp. 434-438, 1979.
- Jobin, D.I. *Application du Modèle Otthymo sur un Bassin Expérimental Suisse*, thèse M. Eng., Département de Génie Civil, Université d'Ottawa, 1982.
- Jordan, J.P. y P., Wisner. *Description du Modèle OTTHYMO & Exemples d'Application*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, IGR n° 172; aussi, Université d'Ottawa, département de Génie Civil, 1983.
- Kohler, M.A. y R.K., Linsley. *Predicting the Runoff from Storm Rainfall*. U.S. Weather Bureau, Dep. of Commerce, Washington, Research Paper n° 34, 9p., 1951.
- Nash, J.E. *The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph*. International Association of Scientific hydrologic n° 45 (3) pp.114-121, 1957.
- Rallison, R.E. *Cromsley Discussion of "Runoff Curve Numbers with Varying Site Moisture"*, Journal of Irrigation and Drainage Division, 105, pp.439-441, 1979.
- Ribestein, P. *Modèles de Crues et Petits Bassins Versants du Sahel*. La Houille Blanche, n° 1, pp.85-91, 1992.
- Soil Conservation Service (SCS), U.S.D.A. (U.S. Dept. of Agriculture), *Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall*. National Engineering Handbook. Section 4 - Hydrology . Washington, pp.10.1-10.24, 1972.
- Rosenbrock, H.H. *An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function*. Computer Journal (Vol. 4 p.p. 175-184), 1960
- Soil Conservation Service (SCS), U.S.D.A. (U.S. Dept. of Agriculture), *Tech. Bulletin n° 1518*, Agricultural Research Service, Washington, D.C., 1975.
- Springer, E.P.; B.J. McGurk; R.H., Hawkins; G.B., Coltharp. *Curve Numbers from Watershed Data*. Symposium on Watershed Management, Boise, Idaho. Journal of Irrigation and Drainage Div., American Soc. of Civil Eng., pp. 938-950, 1980.
- UNESCO, *Carte de la Répartition Mondiale des Zones Arides*. Note technique MAB, No. 7, Paris, 1979.
- Vlachos, E. *Social Impacts of Droughts*, published in *Coping with Droughts*, editors V. Yevjevich, L. Cunha, E. Vlachos, Water Resources Publications, Chapter 3, pp.44-73, WRP, Littleton, Colorado, USA, 1983.
- Wiener, A. *The Role of Water in Development, An analysis of Principles of Comprehensive Planning*, Chapter 32, pp. 419-428, McGraw Hill, Water resources and environmental engineering series, New York, USA, 1972.
- Williams J.R. y R.W., Hann. *HYMO, A Problem-Oriented Computer Language for Hydrologic Modeling*. User's Manual, ARS-S-9, U.S. Dept. of Agriculture, 1973.
- Wisner, P. y A.M., Kassem. *Analysis of Dual Drainage Systems by OTTSWMM*. Proceedings First International Seminar on Urban Drainage Systems. Southampton, England. Pitman Advanced Publishing Program, 1982.

Abstract

Bâ, K.M., et al "Semi-arid Zones and Their Hydrological Modelling (Rainfall-Runoff)". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol X. Num. 2, pages 21-31, May-August, 1995.

This paper focuses on the mathematical modeling of runoff for semi-arid watersheds. In order to clarify concepts like aridity, drought and mathematical modeling in hydrology, appropriate definitions have been included. On the other hand, the OTTHYMO hydrological model, that uses the USDA Soil Conservation Service, Model) and the Nash method has been applied respectively to represent the production and transference functions in small watersheds from the Sahel region in Africa. The simulations performed showed the model accuracy by reproducing and predicting flows in the semi-arid watersheds studied. Finally, the sensibility analysis developed showed that up to 87% of the variation of the relative error of net rainfall is explained by the mean relative error of the linear transformation of the maximum potential retention. Moreover, it has been observed that an increase in the number of reservoirs produces an increase in the peak flow, without increasing the time peak. However, a higher value of time peak of the unit hydrograph produces a peak attenuation.

Key Words: semi-arid, hydrological models, OTTHYMO, flow, hydrograms, Sahel, parameters, sensibility.