

# Minimum hydrologic characterization for research in experimental watersheds with limited availability of information in arid lands

Caracterización hidrológica mínima para estudios en cuencas experimentales con disponibilidad limitada de información en zonas áridas

Sánchez-Cohen Ignacio<sup>1</sup>; Velásquez-Valle Miguel A.<sup>1</sup>; Esquivel-Arriaga Gerardo<sup>1</sup>; Bueno-Hurtado Palmira<sup>1</sup>; Pedroza-Sandoval Aurelio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera. Canal Sacramento km. 6.5, Gómez Palacio Durango. C.P. 35140. Tel: (871) 1490105.

Correo-e: [sanchez.ignacio@inifap.gob.mx](mailto:sanchez.ignacio@inifap.gob.mx) (\*Autor para correspondencia)

<sup>2</sup> Universidad Autónoma Chapingo. Unidad Regional Universitaria Zonas Áridas. Dom. Conocido, Bermejillo, Durango.

## Abstract

This study departs from the need of knowing the differences between representative and experimental watersheds since from here research protocols are designed for the parametrization of variables of the hydrologic cycle. Low instrumentation in research watersheds calls for the use of algorithms for the analysis of the scarce information as the foundation for the minimum instrumentation needed for characterizing experimental watersheds in arid lands. The objective of the paper is to provide the theoretical basis for the characterization of experimental watersheds without instrumentation as prerequisite for the planning of soil and water conservation in ecosystems where the pluvial regime is scarce and erratic under low availability of information. Analysis and evaluation methods are presented for runoff water harvesting structures.

**Keywords:** watersheds, hydrology, evaluation, methods.

## Resumen

En el presente estudio se parte de la necesidad de conocer la diferencia entre cuencas representativas y cuencas experimentales, ya que de aquí se desprenden los protocolos de investigación para la parametrización de las variables del ciclo hidrológico. La poca disponibilidad de instrumentación en cuencas experimentales hace necesario el uso de algoritmos para el análisis de la escasa información como fundamento para la instrumentación mínima necesaria para caracterizar cuencas experimentales de zonas áridas. De aquí que el objetivo del trabajo sea proveer los elementos teóricos esenciales para la adecuada caracterización de cuencas experimentales desprovistas de instrumentación como requisito esencial para la planeación en la conservación del suelo y agua en ecosistemas cuyo régimen pluvial es errático y escaso y bajo condiciones de poca disponibilidad de información. Se presentan métodos de análisis y de evaluación de obras de captación de escurrimientos.

**Palabras clave:** cuencas, hidrología, evaluación, métodos

## Introduction

It is imperative that in watershed research the criteria for the establishment and study of hydrological processes are known suggesting the most appropriate methods and possible ways to guide the research. A common denominator in watershed studies is the lack of essential data and understanding of methods of analysis to interpret and understand the physical phenomena that occur in watersheds. It is also necessary to establish that in watershed studies, the classical statistical methods are not always applicable to hydrological data, and on the other hand, if proper procedures are not followed, the resulting information is of limited application by not developing the appropriate methodology for extrapolation to different watersheds from those where the research has been developed.

Research in watersheds must be considered in such a way expressing clearly the existing mathematical and physical relationships between components of the hydrological cycle, for that reason the main objectives of this research are the prediction and quantitative estimation of these components. Such research should be developed in experimental watersheds (under the influence of man) where “modifiable” variables are controlled by management of natural resources. Sanchez et al. (2007) proposes a conceptual framework for the design of watershed research. It is therefore important to distinguish between experimental watersheds and representative watersheds.

*Representative watersheds* are those selected as typical of the hydrology of an area, i.e. watersheds that are supposed hydrologically to be similar to the region and are used for intensive research on specific problems of the hydrological cycle, or part of it, as long as natural conditions remain relatively stable. Thus, an adequate network of representative watersheds may reflect the hydrological characteristics of a region and its variations in large natural areas.

*Experimental watersheds* are those that have a certain homogeneity in terms of soil and vegetation and also have relatively uniform physical characteristics. The aim of these watersheds is the study of the effects that would occur when modifying one or more of its natural features in the processes of the hydrological cycle (UNESCO, 1970).

In watersheds, the main vicissitude in the interests of proper planning in the management and conservation of water resources is the lack of information and lack of adequate hydrological monitoring schemes (Sánchez, 2005). Typically, the water use in watersheds refers to harvesting rainwater, it implies the use of soil and vegetation management practices that protect water

## Introducción

Es imperante que en la investigación de cuencas hidrológicas se conozcan los criterios para el establecimiento y estudio de los procesos hidrológicos sugiriendo los métodos más adecuados así como los caminos posibles por donde ha de orientarse la investigación. Un común denominador en los estudios de cuencas es la falta de datos esenciales y la comprensión de métodos de análisis que permitan interpretar y comprender los fenómenos físicos que en las cuencas ocurren. También es necesario asentar que en los estudios de cuencas los métodos de la estadística clásica no son siempre aplicables a los datos hidrológicos, y por otra parte, si no se siguen los procedimientos adecuados, la información resultante es de aplicación limitada al no haberse desarrollado la metodología apropiada para su extrapolación a cuencas diferentes a aquella en donde se ha desarrollado la investigación.

La investigación en cuencas debe de plantearse de tal manera que se exprese de manera clara las relaciones físicas y matemáticas existentes entre los componentes del ciclo hidrológico, de ahí que los objetivos principales de la investigación en este contexto sea la predicción y estimación cuantitativa de estos componentes. Este tipo de investigación debe desarrollarse en cuencas experimentales (sometidas a la influencia del hombre) donde se tenga bajo control las variables “modificables” por manejo de los recursos naturales. Sánchez et al. (2007), plantea un esquema conceptual para el diseño de la investigación en cuencas. Resulta entonces importante distinguir entre cuencas experimentales y cuencas representativas.

*Las cuencas representativas* son aquellas seleccionadas como típicas de la hidrología de una región, es decir, cuencas que se suponen hidrológicamente semejantes a la región y se utilizan para investigaciones intensivas sobre problemas específicos del ciclo hidrológico, o parte de él, siempre que se mantengan unas condiciones naturales relativamente estables. De esta forma, una adecuada red de cuencas representativas puede reflejar las características hidrológicas de toda una región y sus variaciones en grandes zonas naturales.

*Las cuencas experimentales* son aquéllas que tienen una cierta homogeneidad en cuanto a suelo y vegetación y que además presentan características físicas relativamente uniformes. El objetivo de estas cuencas es el estudio de los efectos que se producirían al modificar deliberadamente una o varias de sus características naturales en los procesos del ciclo hidrológico (UNESCO, 1970).

En cuencas hidrológicas, la principal vicisitud en aras de la adecuada planeación en el manejo y conservación

quality and promote its conservation without damaging the land, and taking into consideration technological, economic and institutional aspects when concerning programs of direct technology transfer to direct users (Barbosa et al., 2011). The need for rainwater harvesting and conservation is justified when water requirements (WR) of crops are compared to rainfall (PP) from which three scenarios may arise (Hudson, 1987): a) If PP is lower than WR, the strategy should include soil treatments to increase the runoff into the growing area and the use of water stress tolerant crops; b) if PP is equals to WR, the strategy must be directed towards the conservation of PP maximizing water storage in the soil profile and storage of surplus for later use and c) when PP is greater than WR in which case the strategy would be aimed at reducing the potential problems of soil erosion and store surplus for later use.

Another obstacle to the planning and development of agricultural activities in arid lands is the erratic and scarce rainfall (Velásquez et al., 2013; Sánchez, 2005; Sánchez et al., 1997) and the availability of information for the proper planning of management of natural resources. In arid ecosystems, climate variables become important and within these rainfall defines the productive capacity or productive potential of cultivated species (Sánchez et al., 2013).

In this situation, rational starting point for proper planning of agriculture in rainfed areas subject to climatic uncertainty, is represented by the balance of moisture in the soil to be in a position to obtain an objective assessment of productive risk under conditions of climate variability. It is also absolutely necessary the hydrological characterization within the domain of evaluation of any management practice that could boost in the interest of overcoming the climate risk.

Based on the above, the objective of this study is to provide the theoretical elements essential for proper characterization of experimental watersheds with little instrumentation, as essential requirement for planning water conservation in ecosystems whose rainfall regime is erratic and under conditions of limited availability of information.

## Materials and methods

### Hydrologic characterization of the study site

The methods described apply to any watershed, especially to experimental watersheds where highlights the study of hydrological processes. In this situation, it is desirable to maintain "control" of response variable from the studies.

Regarding the watershed as a base unit for the planning of production chains, it is necessary to characterize the

del recurso hídrico, es la carencia de información y la falta de esquemas adecuados de monitoreo hidrológico (Sánchez, 2005). Comúnmente, el aprovechamiento hidrológico en cuencas se refiere a la captación de agua de lluvia, misma que implica el uso de prácticas de manejo del suelo y vegetación que protejan la calidad del agua y promuevan su conservación sin deteriorar el suelo, y tomar en consideración aspectos tecnológicos, económicos e institucionales cuando se trata de programas de transferencia de tecnología directa a usuarios (Barbosa et al., 2011). La necesidad de la conservación y captación del agua de lluvia queda justificada cuando se comparan los requerimientos hídricos (RH) de los cultivos con la precipitación pluvial (PP) de donde pueden resultar tres escenarios (Hudson, 1987): a) Si PP es menor que los RH, la estrategia debe incluir tratamientos del suelo para incrementar el escurrimiento hacia el área de cultivo, así como el uso de cultivos tolerantes al estrés hídrico; b) si la PP es igual a los RH la estrategia se debe de dirigir hacia la conservación de la PP maximizando el almacenamiento en el perfil del suelo y el almacenamiento de los excedentes para posterior uso y c) cuando la PP es mayor que los RH en cuyo caso la estrategia estaría enfocada a reducir los problemas potenciales de erosión del suelo y almacenar los excedentes para posterior uso.

Otro obstáculo para la planeación y desarrollo de actividades agrícolas en zonas áridas es lo errático y escaso de la precipitación pluvial (Velásquez et al., 2013; Sánchez, 2005; Sánchez et al., 1997) al igual que la disponibilidad de información para la adecuada planeación del manejo de los recursos naturales. En ecosistemas áridos las variables climáticas adquieren importancia y dentro de éstas la precipitación pluvial define por mucho la capacidad productiva o potencial productivo de las especies cultivadas (Sánchez et al., 2013).

En esta situación, el punto racional de partida para una adecuada planeación de la agricultura en zonas de temporal sujetas a la incertidumbre climática, lo constituye el balance de humedad en el suelo para estar en posibilidades de obtener una apreciación objetiva del riesgo productivo bajo condiciones de variabilidad climática. También es absolutamente necesario la caracterización hidrológica dentro del dominio de evaluación de cualquier práctica de manejo que se pudiera impulsar en aras de sobre llevar el riesgo agro climático.

Con fundamento en lo anterior, el objetivo del presente trabajo es la de proveer los elementos teóricos esenciales para la adecuada caracterización de cuencas experimentales con poca instrumentación, como requisito esencial para la planeación en la conservación del agua en ecosistemas cuyo régimen pluvial es errático y escaso y bajo condiciones de poca disponibilidad de información.

hydrological aspect of the watershed. This process is commonly performed using a geographic information system to consider the spatial distribution of biotic-physical properties that define the hydrological behavior of the study site. It is also an essential procedure for hydrological modeling of physical processes in the watershed. In this situation, we must consider that spatial variability of physical properties and climate in watersheds are significant and therefore, it is important to control them as a function of the objective sought in the studies.

Additional information on the watershed of interest can be obtained from different sources available on the website of: CONABIO, CONAFOR, INEGI, among others. From INEGI, hydrological characteristics of watersheds can be obtained as outlined in Table 1.

### Climatic characteristics

The climatic characteristics of the watershed studied are of crucial importance, since rainfall is the catalyst of all hydrological processes, Table 2 and Figure 2 are an example of the base information for this process.

To capture the spatial variability of rainfall in the watershed of interest, it is necessary to have a certain

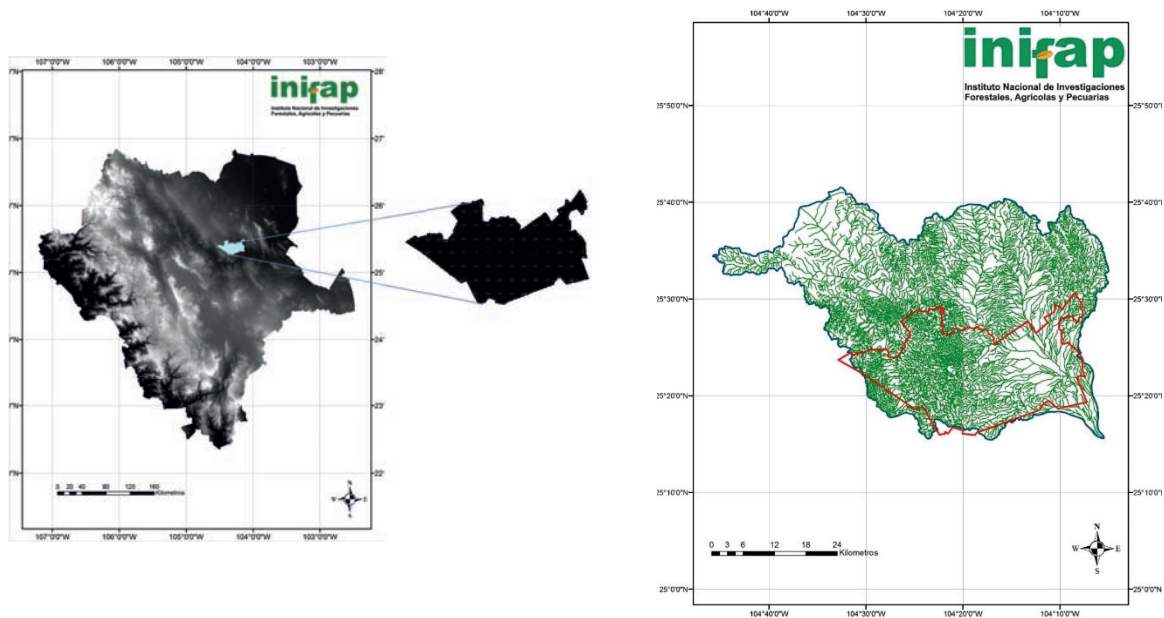
## Materiales y métodos

### Caracterización hidrológica del sitio de estudio

Los métodos descritos aplican a cualquier cuenca hidrológica, especialmente a cuencas experimentales donde destaca el estudio de procesos hidrológicos. En esta coyuntura, es deseable mantener el “control” de las variables respuesta de los estudios.

Considerando a la cuenca hidrológica como unidad base de la planeación de las cadenas productivas, es necesario caracterizar el aspecto hidrológico de la cuenca. Este proceso comúnmente se realiza mediante un sistema de información geográfica para considerar la distribución espacial de las propiedades físicas – bióticas que definen el comportamiento hidrológico del sitio de estudio. También es un procedimiento esencial para la modelación hidrológica de procesos físicos en la cuenca. En esta tesitura, es necesario considerar que la variabilidad espacial de propiedades físicas, así como del clima en cuencas hidrológicas, es considerable y por lo tanto, su observación es función del objetivo buscado en los estudios.

Información adicional de la cuenca de interés puede ser obtenida de diferentes fuentes disponibles en la WEB



**Figure 1. Altitudinal geographical environment and characterization of the hydrological network as a platform for hydrological studies. As an example in the hydrological region Nazas Aguanaval (RH36), watershed Nazas – Rodeo, sub-watershed stream Naitcha. The municipality of San Luis del Cordero is framed.**

**Figura 1. Entorno altitudinal geográfico y caracterización de la red hidrológica como plataforma para estudios hidrológicos. Como ejemplo en la región hidrológica Nazas Aguanaval (RH36), cuenca Nazas – Rodeo, sub cuenca Arroyo Naitcha. El inserto enmarca al municipio de San Luis del Cordero.**

**Table 1. Physical characteristics of the watershed.**

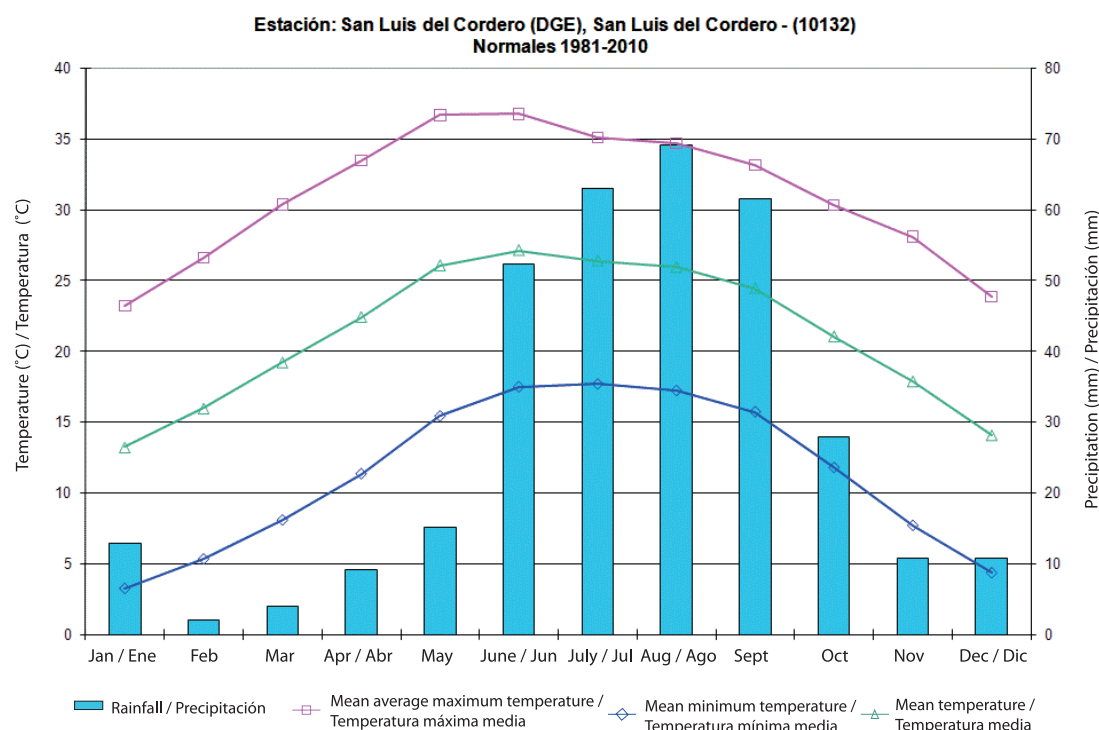
Characteristic	Value	Comments
Type exorheic		Internal drainage
Perimeter	274.8 km	
Area	1,892 km <sup>2</sup>	
Drainage density	3,1877	Result of dividing the total length of the streams through the area that contains them.
Compactness coefficient	1.78	Relationship between the perimeter of the watershed and that of an equivalent area ( $kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$ )
Maximum elevation	2,500 msnm	
Minimum elevation	1,240 msnm	
Average gradient	14.68 %	
Length of the mainstream	93,076 m	
Slope of the mainstream	0.85 %	Used to calculate the flow rate in the gauging station.
Sinuosity	1.44	When the route of the channel deviates from a straight line; It is the ratio of the actual distance between two points of the channel and that of the straight line joining points. Channel without sinuosity has a value of 1. Values > 1.5 are winding

**Cuadro 1. Características físicas de la sub cuenca.**

Rasgo	Valor	Observaciones
Tipo exorreica		Drenaje interno
Perímetro	274.8 km	
Área	1,892 km <sup>2</sup>	
Densidad de drenaje	3,1877	Resultado de dividir la longitud total de las corrientes por el área que las contiene.
Coefficiente de compacidad	1.78	Relación entre el perímetro de la cuenca y aquél de un área equivalente ( $kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$ )
Elevación máxima	2,500 msnm	
Elevación mínima	1,240 msnm	
Pendiente promedio	14.68 %	
Longitud de la corriente principal	93,076 m	
Pendiente de la corriente principal	0.85 %	Usado para el cálculo de la velocidad de flujo en la estación de aforo.
Sinuosidad	1.44	Cuando el trazado del cauce se aparta de una línea recta; es la relación entre la distancia real entre dos puntos del cauce y aquella de la línea recta que une a los puntos. Cauce si sinuosidad tiene un valor de 1. Valores > a 1.5 son sinuosos

**Table 2. Summary of the climate normals for San Luis del Cordero, Durango.**  
 Concentrate of climate normals of the period (1981-2010)  
 Weather station: San Luis del Cordero (DGE), 10132.  
 Municipality: San Luis del Cordero, Geographic Coordinate:-104.28, 25.42  
**Cuadro 2. Resumen de Normales climatológicas para el municipio de San Luis del Cordero en el estado de Durango.**  
 Concentrado de normales climatológicas del periodo (1981-2010)  
 Estación climática: San Luis del Cordero (DGE), 10132.  
 Municipio: San Luis del Cordero, Coordenada Geográfica:-104.28, 25.42

Variable	Jan/Ene	Feb	Mar	Apr/Abr	May	Jun	Jul	Aug/Ago	Sep	Oct	Nov	Dec/Dic	Annual/ Annual
Mean maximum temperature (°C) / Temperatura máxima media (°C)	23.2271	26.6245	30.3697	33.4778	36.675	36.7627	35.0807	34.6748	33.158	30.3197	28.0901	23.854	31.026175
Maximum maximum temperature (°C) / Temperatura máxima maximum (°C)	37	38	34	37	38	40	30	39	40	40	39	25	40
Mean minimum temperature (°C) / Temperatura mínima media (°C)	3.2297	5.3177	8.0664	11.3326	15.4065	17.4773	17.6732	17.2092	15.7123	11.777	7.6864	4.3345	11.999373
Minimum minimum temperature (°C) / Temperatura mínima minimum (°C)	-8	-0.1	5	5	9	11	19	12	7	2	-5	1	-8
Mean temperature (°C) / Temperatura media (°C)	13.2284	15.9711	19.21805	22.4052	26.04075	27.12	26.37695	25.942	24.43515	21.04835	17.8825	14.09425	21.512774
Average daylight temperature (°C) / Temperatura diurna media (°C)	19.101651	21.907688	25.106221	27.947154	31.167491	31.687504	30.525413	30.2228692	28.921094	26.087677	23.766148	19.909065	26.362983
Average night temperature (°C) / Temperatura nocturna media (°C)	7.3551489	10.034512	13.329879	16.863246	20.914009	22.552496	22.228487	21.655308	19.949206	16.009023	12.010352	8.2794349	15.931758
Thermal oscillation (°) / Oscilación térmica (°)	19.9974	21.368	22.333	22.1452	21.2685	19.2854	17.475	17.4656	17.4457	18.5427	2.437	19.5195	19.268227
Rainfall (mm) / Precipitación (mm)	12.796	1.944	3.9583	9.15	15.1167	52.308	63	69.0875	61.5913	27.876	10.8125	10.72	338.3603
Maximum rainfall in 24 hours (mm) / Precipitación máxima en 24 horas (mm)	14	21	0	4	47	50	24	61	65	32	41	40	75
Number of days with rain / Número de días con lluvia	2.22	0.67	0.69	1.58	2.04	5.81	7.52	7.70	6.67	4.19	1.79	1.76	42.64
Evaporation (mm) / Evaporación (mm)													
Potential evapotranspiration (mm) / Evapotranspiración potencial (mm)													
Photoperiod (hr) / Fotoperiodo (hr)	10.59	11.18	11.85	12.61	13.23	13.56	13.44	12.92	12.21	11.48	10.8	10.44	12.025833



**Figure 2. A climate diagram from San Luis del Cordero, Durango.**

**Figura 2. Climograma para el municipio de San Luis del Cordero en el estado de Durango.**

number of pluviographs according to the characteristics of rain and physiography of the watershed. Figure 3 shows two proposals to determine the number of pluviographs necessary for these features.

Desirable information for process simulation are the conditional probabilities of rain (transition matrices) and the intensity duration frequency curves (Figure 4).

At the bottom of Figure 4, we can see the conditional probability that one day may rain since there was no rain the day before (PWD) and the probability that one day may rain, since the day before also rained (PWW) for the months of the year. So, for the month of July, for example, these probabilities are 17 and 41% respectively. This information is useful in the process of random generation of precipitation in simulation models of water balance and as a basis for weather forecast (Sánchez et al., 1997).

## Runoff

### Runoff capacity of the watershed

There are several methods for estimating runoff in watersheds, perhaps the most recurrent empirical method in the literature is the Numerical Curve (NC). This method is essentially a coefficient that reduces the total rainfall to potential runoff after deducting losses

tales como: CONABIO, CONAFOR, INEGI, entre otras. De este último se pueden obtener los rasgos hidrológicos de las cuencas como se señala en el Cuadro 1.

### Características climáticas

Las características climáticas de la cuenca de estudio son de crucial importancia, ya que la precipitación pluvial es el catalizador de todos los procesos hidrológicos, en el Cuadro 2 y la Figura 2 son un ejemplo de la información base para este proceso.

Para capturar la variabilidad espacial de la precipitación pluvial en la cuenca de interés, es necesario contar con un determinado número de pluviógrafos de acuerdo a las características de la lluvia y de la fisiografía de la cuenca. La Figura 3 muestra dos propuestas para determinar el número de pluviógrafos necesarios para estas características.

Información deseable para la simulación de procesos, son las probabilidades condicionales de lluvia (matrices de transición) así como las curvas de intensidad duración frecuencia (Figura 4).

En la parte baja de la Figura 4, se puede apreciar la probabilidad condicional de que un día ocurra lluvia dado que el día anterior no ocurrió (PWD) así como la probabilidad de que un día llueva, dado que el

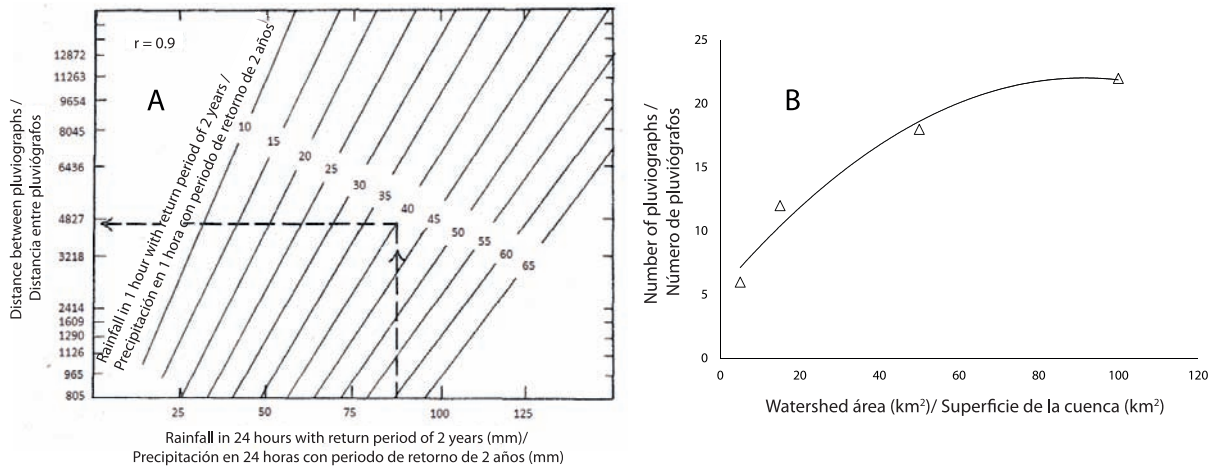
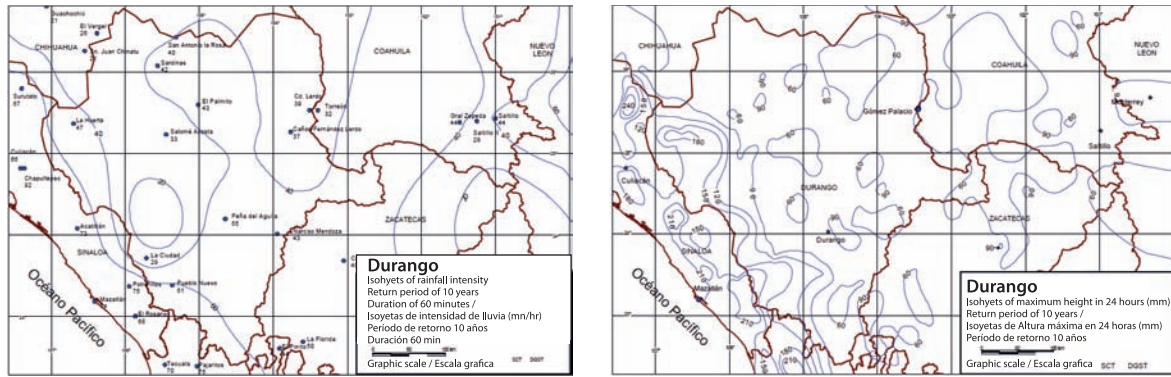


Figure 3. a) Number of pluviographs required for experimental watersheds in accordance with rainfall in 1 to 24 hours with return period of two years. Analysis of 15 watersheds with variants densities from pluviographs (Hershfield 1965). b) Number of pluviographs for experimental watersheds in accordance with the surface of the watershed area (Burton and Pitt, 2002).

Figura 3. a) Número de pluviógrafos requeridos para cuencas experimentales en función de la precipitación que ocurre en 1 y 24 horas con periodo de retorno de dos años. Análisis de 15 cuencas con densidades variantes de pluviógrafos (Hershfield, 1965). b) Número de pluviógrafos para cuencas experimentales en función de la superficie de la cuenca. (Burton y Pitt, 2002).



PWD	PWW
0.04	0.43
0.02	0.19
0.01	0.20
0.03	0.36
0.04	0.32
0.12	0.43
0.17	0.41
0.18	0.48
0.14	0.47
0.07	0.44
0.04	0.27
0.04	0.43

Figure 4. Isolines of rainfall intensity for a return period of 10 years with duration of 60 minutes (left) and maximum rainfall in 24 hours with return period of 10 years (right) and conditional probabilities for the 12 months of the year for the weather station of San Luis del Cordero, Durango.

Figura 4. Isoleías de intensidad de precipitación para un periodo de retorno de 10 años con duración de 60 minutos (derecha) y lluvia máxima en 24 horas con periodo de retorno de 10 años (izquierda) y probabilidades condicionales para los 12 meses del año para estación climológica San Luis del Cordero en el estado de Durango.

by evaporation, absorption, perspiration and surface water storage, so, the higher the value of NC, the greater the potential runoff (USDA, 1986 ; Hawkins et al, 2002). The equation of the method of the numerical curve is based on the simplification of the rain event, building on the following corollary: the amount of rainfall in excess or direct runoff (Q) is always less than or equal to the amount of rainfall (Pp) also, after runoff begins, the additional amount of water retained in the watershed (Fa) is less than or equal to a maximum retention potential (S). The equation describing the potential run-off with this method is:

$$Q = \frac{(Pp - 0.5Sb)^2}{Pp + 0.95Sb} \quad (1)$$

and

$$Sa = \frac{25400}{CN} - 240 \quad (2)$$

with

$$Sb = 1.33Sa^{1.15} \quad (3)$$

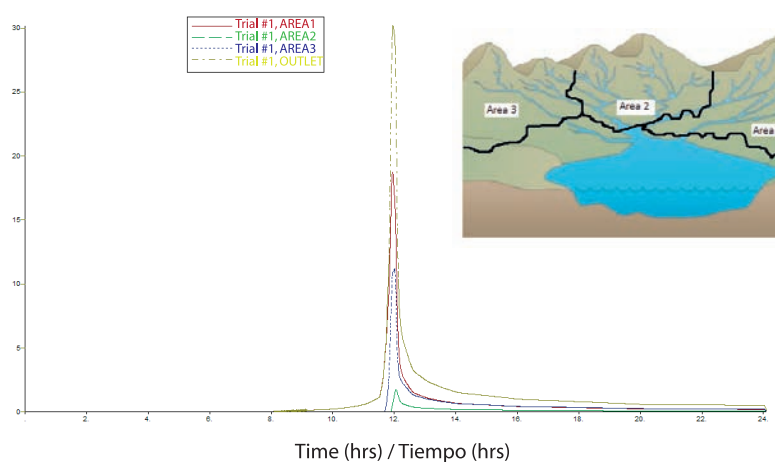
Applying Equation 1 to the sub-watersheds that distinguish any hydrological region, we can get partial potential of each sub-watershed and even the outflow hydrograph from each area. This procedure can detect the sensitivity of each watershed to the change in land use represented by the value of NC. There are freely available simulation models that systematize this method; this is the case of the model WinTR55 (Figure 5).

día anterior también llovió (PWW) para los meses del año. Así, para el mes de julio, por ejemplo, estas probabilidades son del 17 y 41 % respectivamente. Esta información es útil en el proceso de generación aleatoria de precipitación en los modelos de simulación del balance hídrico y como base para el pronóstico y predicción del clima (Sánchez et al., 1997).

## Escurrimiento

### Capacidad de escurrimiento de la cuenca

Existen diversos métodos para estimar el escurrimiento en cuencas, de éstos, quizá el método empírico más recurrente en la literatura sea el de Curva Numérica (CN). Este método es esencialmente un coeficiente que reduce la precipitación total a escurrimiento potencial después de descontar las pérdidas por evaporación, absorción, transpiración y almacenamiento superficial, luego entonces, mientras más alto sea el valor de CN, mayor será el escurrimiento potencial (USDA, 1986; Hawkins et al., 2002). La ecuación del método de la curva numérica se basa en la simplificación del evento de lluvia, fundamentándose en el siguiente corolario: la cantidad de lluvia en exceso o escurrimiento directo (Q) es siempre menor o igual a la cantidad de precipitación (Pp), además, después de que el escurrimiento empieza, la cantidad adicional de agua retenida en la cuenca (Fa) es menor o igual a algún potencial máximo de retención (S). La ecuación que describe el escurrimiento potencial con este método es:



**Figure 5. Applying the model WinTR55 to a watershed. Each area is characterized by its potential for runoff (CN) regarding: vegetation cover, condition of the vegetation cover and hydrological soil group. The model is freely available in the URL from U.S. Natural Resource Conservation Service (NRCS): [www.nrcs.usda.gov](http://www.nrcs.usda.gov).**

**Figura 5. Aplicación del modelo WinTR55 a una cuenca. Cada área está caracterizada por su potencial de producir escurrimiento (CN) considerando: cubierta vegetal, condición de la cubierta vegetal y grupo hidrológico del suelo. El modelo puede ser obtenido gratuitamente de la URL del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS) de los Estados Unidos de Norte América: [www.nrcs.usda.gov](http://www.nrcs.usda.gov).**

Table 3. Standard values of numerical curve (NC) for using Equation 1<sup>1</sup>Cuadro 3. Valores estándar de Curva Numérica (CN) para el uso de la Ecuación 1<sup>1</sup>

Land use/Usos del suelo	Coverage / Cobertura	Treatment or practice/Tratamiento o práctica	Hydrologic conditions/Condición hidrológica	Group of soils / Grupo de suelos			
				A	B	C	D
				Numerical curve / Curva numérica			
Fallow land/Suelo en descanso		Straight rows/Surcos rectos		77	86	91	94
Weeding/Cultivo de escarda		Straight rows/Surcos rectos	Bad/Mala	71	81	88	91
		Straight rows/Surcos rectos	Good/Buena	67	78	95	89
		Contour line/Curva a nivel	Bad/Mala	70	79	84	88
		Contour line/Curva a nivel	Good/Buena	65	75	82	86
		Terrace and Contour line/Terraza y curva a nivel	Bad/Mala	66	74	80	82
		Terrace and Contour line/Terraza y curva a nivel	Good/Buena	62	71	78	81
Dense crops/Cultivos tupidos		Straight rows/Surcos rectos	Bad/Mala	65	76	84	88
		Straight rows/Surcos rectos	Good/Buena	63	75	83	87
		Contour line/Curva a nivel	Bad/Mala	63	74	82	85
		Contour line/Curva a nivel	Good/Buena	61	73	81	84
		Terrace and Contour line/Terraza y curva a nivel	Bad/Mala	61	72	79	82
		Terrace and Contour line/Terraza y curva a nivel	Good/Buena	59	70	78	81
Legumes in row or rotating forage/Leguminosas en hilera o forraje en rotación		Straight rows/Surcos rectos	Bad/Mala	66	77	85	85
		Straight rows/Surcos rectos	Good/Buena	58	72	81	85
		Contour line/Curva a nivel	Bad/Mala	64	75	83	85
		Contour line/Curva a nivel	Good/Buena	55	69	78	83
		Terrace and Contour line/Terraza y curva a nivel	Bad/Mala	63	73	80	83
		Terrace and Contour line/Terraza y curva a nivel	Good/Buena	51	67	76	80
Grasslands/Pastizales		Sin tratamiento mecánico	Bad/Mala	68	79	86	89
		Sin tratamiento mecánico	Regular	49	69	79	84
		Sin tratamiento mecánico	Good/Buena	39	61	74	80
		Curva a nivel	Bad/Mala	47	67	81	88
		Curva a nivel	Regular	25	59	75	83
		Curva a nivel	Good/Buena	6	35	70	79
Cutting grasslands/Pasto de corte			Good/Buena	30	58	71	78
Forest/Bosque			Bad/Mala	45	66	77	83
			Regular	36	60	73	79
			Good/Buena	25	55	70	77
Unpaved roads/Caminos de tierra			Good/Buena	72	82	87	89
Paved roads/Caminos pavimentados			Good/Buena	74	84	90	92

The hydrologic soil group "A" corresponds to sandy soils with high hydraulic conductivity; the hydrological group "D" stands for clayey soils with low hydraulic conductivity. The soil type "B" are somewhat less light than "A" and soil type "C" are lighter than soil type "D" / El grupo hidrológico de suelo "A" corresponde a suelos arenosos con alta conductividad hidráulica; el grupo hidrológico "D" corresponde a suelos de textura arcillosa con baja conductividad hidráulica. Los suelos tipo "B" son un tanto menos ligeros que "A" y los suelos tipo "C" menos pesados que "D".

NC standard values are shown in Table 3.

### Capacity of the drainage of the watershed

To know the volume ( $m^3$ ) and water expenditure ( $m^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ ) entering into the harvesting water system per unit of time, the main channel or access channel to the harvesting water system should be characterized hydraulically.

It is desirable to have adequate minimal instrumentation to automate the process of capacity data in the channels of interest. Commonly, the instruments measure the depth (water depth,  $h$ ) on the channel to use it in the continuity equation or the equation of the hydraulic section that concerns (commonly weirs); however, under conditions of low availability of resources for this purpose, this automation can be replaced by direct measurement in the field. As an example, Figure 6 shows the capacity scale of the Arroyo Naitcha in the area of rainfed agriculture in San Luis del Cordero, Durango, where direct measurements of hydraulic depth can be performed.

The expenditure  $Q$  in the capacity section is calculated by the continuity equation as follows:

$$Q = A \cdot V \quad (4)$$

Where  $A$  is the area of the hydraulic section ( $m^2$ ) and  $V$  ( $m \cdot \text{seg}^{-1}$ ) the flow rate.

It is desirable that the flow rate is measured directly in the field using specific instrumentation; in this sense, there are numerous options of instruments. Figure 6 shows an option. When direct measurement is not possible, then it is necessary to characterize the condition of the drainage system to obtain the parameters of the Manning's equation.

The water velocity in channels is related to the slope of the gradient of energy and friction. An equation commonly used to analyze the flow in open channels is the Manning's equation:

$$V = \left(\frac{1}{n}\right) R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

where  $V$  is the velocity ( $m \cdot \text{seg}^{-1}$ ),  $n$  is a roughness coefficient,  $R$  is the hydraulic radius which is the quotient of the area and the wet perimeter ( $w$ ),  $S$  is the slope of the energy gradient ( $m \cdot m^{-1}$ ). For uniform flow, the slope of the channel bottom is the same as the slope of the energy gradient. In the case of the watershed Arroyo Naitcha the value of  $n$  from Manning's equation is approximately 0.055 which corresponds to a hydraulic section with rocky and sandy bottom and irregular sections with vegetation (Limerinos, 1970; Chow et al., 1998).

$$Q = \frac{(Pp - 0.5Sb)^2}{Pp + 0.95Sb} \quad (1)$$

$y$

$$Sa = \frac{25400}{CN} - 240 \quad (2)$$

con

$$Sb = 1.33Sa^{1.15} \quad (3)$$

Aplicando la Ecuación 1 a las subcuencas que distinguen a alguna región hidrológica, se pueden obtener las potencialidades parciales de cada subcuenca e inclusive el hidrograma de salida de cada área. Con este procedimiento se puede detectar la sensibilidad de cada cuenca al cambio en el uso del suelo representado por el valor de CN. Existen modelos de simulación de libre acceso que sistematizan este método; tal es el caso del modelo WinTR55 (Figura 5).

Valores de CN estándar se muestran en el Cuadro 3.

### Aforo de la red de drenaje de la cuenca

Para conocer el volumen ( $m^3$ ) y el gasto ( $m^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ ) de agua que ingresa al sistema de captación por unidad de tiempo, se debe caracterizar hidráulicamente el cauce principal o el cauce de acceso a la obra de captación de agua.

Es deseable contar con la instrumentación mínima adecuada para automatizar el proceso de adquisición de datos de aforo en los cauces de interés. Comúnmente, los instrumentos miden el tirante (altura de agua,  $h$ ) en el cauce para utilizarlo en la ecuación de continuidad o en la ecuación de la sección hidráulica que compete (comúnmente vertedores); sin embargo, bajo condiciones de poca disponibilidad de recursos para tal efecto, esta automatización puede ser reemplazada por la medición directa en campo. Como ejemplo, la Figura 6 muestra la escala de aforo del Arroyo Naitcha en el área de agricultura de temporal del municipio de San Luis del Cordero, Durango, de donde se pueden realizar mediciones directas de tirante hidráulico.

El gasto  $Q$  en la sección de aforo se calcula mediante la ecuación de continuidad como:

$$Q = A \cdot V \quad (4)$$

donde  $A$  es el área de la sección hidráulica ( $m^2$ ) y  $V$  ( $m \cdot \text{seg}^{-1}$ ) la velocidad del flujo.

Es deseable que la velocidad del flujo se mida de manera directa en campo con instrumentación expofeso; en este sentido, existen numerosas opciones de instrumentos. En la Figura 6 se muestra una opción. Cuando la medición directa no sea posible, entonces es necesario

To calculate the area ( $A$ ) we must know the hydraulic section of the gauging point; for the specific case pointed by Figure 5, a rectangular figure with a defined hydraulic section can be assumed and we can get the load ratio ( $h$ ) expenditure ( $Q$ ) using equations 4 and 5. Manning roughness coefficient ( $n$ ) should be verified in the field and the hydraulic radius " $R$ " must refer to the measurement scale in successive increments of the depth ( $h$ ). And thus, we obtain the calibration curve mentioned in the lower part of Figure 6.

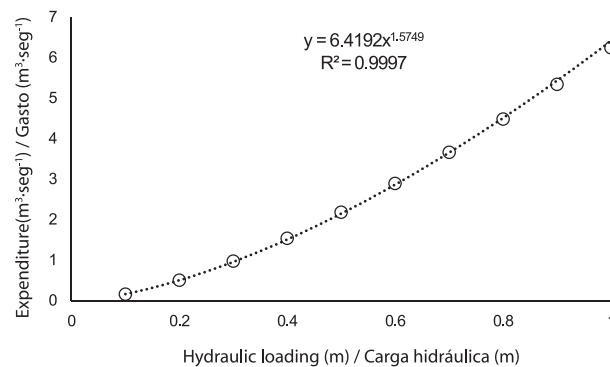
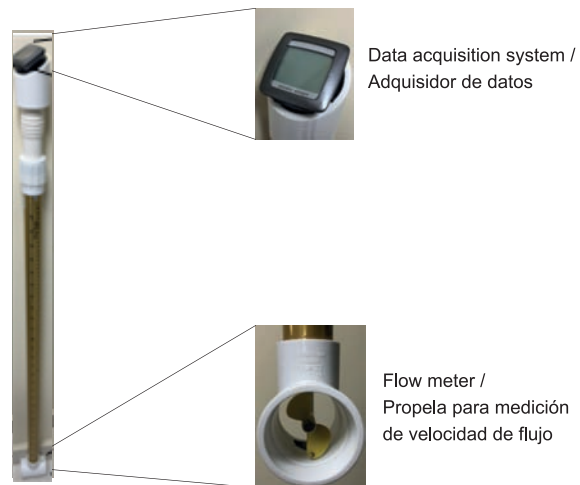
Table 4 shows an example of the curve relating hydraulic loading ( $h$ ) against expenditure ( $Q$ ) in the channel shown in Figure 5, using equations 1 and 2. The length of the ridge is 4.72 m. Area calculations, wet perimeter and hydraulic radius were made every 10 cm (0.1 m). Manning coefficient was 0.055 and the friction slope was 0.085. By plotting the data of  $Q$  Vs  $H$ , we obtain the calibration curve which indicates the bottom of Figure 6.

caracterizar las condiciones de la red de drenaje para obtener los parámetros de la ecuación de Manning.

La velocidad del agua en canales se relaciona con la pendiente del gradiente de energía y a la fricción. Una ecuación que comúnmente se usa para analizar el flujo en canales abiertos es la de Manning:

$$V = \left(\frac{1}{n}\right) R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

donde  $V$  es la velocidad ( $\text{m}\cdot\text{seg}^{-1}$ ),  $n$  es un coeficiente de rugosidad,  $R$  es el radio hidráulico que es el cociente del área y el perímetro de mojado ( $\text{m}$ ),  $S$  es la pendiente del gradiente de energía ( $\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ). Para flujo uniforme, la pendiente del fondo del canal es la misma que la pendiente del gradiente de energía. Para el caso de la cuenca del arroyo Naitcha el valor de  $n$  de la ecuación de Manning es aproximadamente de 0.055 que corresponde a una sección hidráulica con fondo de piedra - arena y secciones irregulares con vegetación (Limerinos, 1970; Chow et al., 1998).



**Figure 6. Gauging station in the mainstream of subwatershed Arroyo Naitcha, San Luis del Cordero, Durango; Hydraulic rectangular section, velocity meter (FP101-FP201 Global Flow Probe®) and calibration curve of the section capacity.**

**Figura 6. Estación de aforo en cauce principal de la sub cuenca Arroyo Naitcha, municipio de San Luis del Cordero, Durango; sección hidráulica rectangular, medidor de velocidad (FP101-FP201 Global Flow Probe®) y curva de calibración de la sección de aforo.**

Direct measurement of the hydraulic depth (height of water) is the best choice to calculate the flow in the drainage of the watershed. To this end, there are also numerous equipment designed for this process as limnigraphs, ultrasonic meter and others. Whatever the method of measurement chosen, it is necessary to know the hydraulic section of the gauging structure (Table 5).

For uncoated channels (common situation in uninstrumented watersheds), an approximation should be made to a hydraulic section known as that outlined in Table 5. In the table, hydraulic sections show the variation of the relative speed of the channel.

### Using weirs

Although the channel shown in Figure 5 is not a weir per se, the hydraulic section approximates to a geometric figure whose area is easily obtained with some of the equations listed in Table 5 and where

Para el cálculo del área ( $A$ ) se debe conocer la sección hidráulica del punto de aforo; para el caso específico que señala la Figura 5 se puede asumir una figura rectangular con una sección hidráulica definida y se puede obtener la relación carga ( $h$ ) gasto ( $Q$ ) utilizando las ecuaciones 4 y 5. El coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) se debe verificar en campo y el radio hidráulico “ $R$ ” se debe referir a la escala de medición en incrementos sucesivos de tirante ( $h$ ). De esta manera se obtiene la curva de calibración que se señala en la parte baja de la Figura 6.

En el Cuadro 4 se muestra un ejemplo de la obtención de la curva que relaciona carga hidráulica ( $h$ ) contra el gasto ( $Q$ ) en el cauce que se muestra en la Figura 5, aplicando las ecuaciones 1 y 2. La longitud de la cresta es de 4.72 m y los cálculos de área, perímetro de mojado y radio hidráulico, se realizaron cada 10 cm (0.1 m). El coeficiente de Manning considerado es de 0.055 y la pendiente de fricción es de 0.085. Al graficar los datos

**Table 4. Arranging information to obtain the calibration curve of the hydraulic section in Figure 6. (Only a fraction of the information is displayed).**

**Cuadro 4. Ordenamiento de información para la obtención de la curva de calibración de la sección hidráulica de la Figura 6. (Se muestra solo una fracción de la información).**

L	H	A	h	V	Pm	R=A/Pm	n=0.055	S=0.085	R 2/3	Velocity/ Velocidad	Q
4.72	0.1	0.472	0.1	0.0472	4.92	0.09593496	18.1818182	0.09219544	0.2095646	0.35128912	0.16580847
4.72	0.2	0.944	0.2	0.1888	5.12	0.184375	18.1818182	0.09219544	0.32394257	0.54301871	0.51260966
4.72	0.3	1.416	0.3	0.4248	5.32	0.26616541	18.1818182	0.09219544	0.41377833	0.69360868	0.98214989
4.72	0.4	1.888	0.4	0.7552	5.52	0.34202899	18.1818182	0.09219544	0.48907479	0.81982668	1.54783277
4.72	0.5	2.36	0.5	1.18	5.72	0.41258741	18.1818182	0.09219544	0.55421378	0.92901792	2.19248228
4.72	0.6	2.832	0.6	1.6992	5.92	0.47837838	18.1818182	0.09219544	0.61166603	1.02532403	2.90371765
4.72	0.7	3.304	0.7	2.3128	6.12	0.53986928	18.1818182	0.09219544	0.66301865	1.11140544	3.67208357
4.72	0.8	3.776	0.8	3.0208	6.32	0.59746835	18.1818182	0.09219544	0.70937619	1.18911369	4.49009328
4.72	0.9	4.248	0.9	3.8232	6.52	0.65153374	18.1818182	0.09219544	0.75155011	1.25980902	5.35166873
4.72	1	4.72	1	4.72	6.71	0.70238095	18.1818182	0.09219544	0.7901602	1.32453038	6.25178339

applying Equations 4 and 5, we can approximate the expenditure per depth unit ( $h$ ) and time ( $t$ ). On the other hand, the expenditure on an open channel can be measured by a weir, which can have different forms and types of operation depending on the objective. For flows in the range of 30 to 300 liters per second, we recommend thin-walled weirs (Chávez, 2001).

The relationship between the discharge and the height above the weir crest may be obtained mathematically by making the following assumptions of flow behavior:

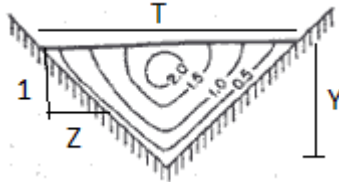
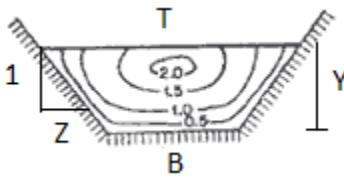
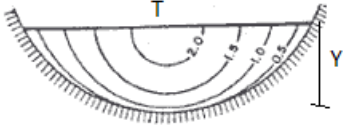
1. In the case of upstream of the weir, flow is uniform and pressure varies with depth according to the hydrostatic ( $p=\rho gh$ ).
2. The free surface remains horizontal to the plane of the weir and all particles passing over the weir move

de Q Vs H se obtiene la curva de calibración que señala la parte baja de Figura 6.

La medición directa del tirante hidráulico (altura de agua) es la mejor opción para el cálculo de flujo en la red de drenaje de la cuenca. Para tal efecto, también existen numerosos equipos diseñados para este proceso como limnigrafos, medidor ultrasónico y otros. Cualquiera que sea el método de medición elegido, es necesario conocer la sección hidráulica de la estructura de aforo (Cuadro 5).

Para cauces no revestidos (situación común en cuencas hidrológicas no instrumentadas), se deberá hacer una aproximación a una sección hidráulica conocida como las que se señala en el Cuadro 5. En el cuadro, las secciones hidráulicas mostradas, señalan la variación de la velocidad relativa del cauce.

**Table 5. Common hydraulic sections in channels.**  
**Cuadro 5. Secciones hidráulicas comunes en canales.**

Hydraulic section/ Sección hidráulica	Area (a)	Wetted perimeter (P)/Perímetro mojado (p)	Hydraulic radius®/ Radio hidráulico®	Water mirror (t)/ Espejo agua (t)
	$ZY^2$	$2Y\sqrt{1+Z^2}$	$\frac{ZY}{2Y\sqrt{1+Z^2}}$	$2ZY$
	$(B+2Y)Y$	$B+2Y\sqrt{1+Z^2}$	$\frac{(B+2Y)Y}{B+2Y\sqrt{1+Z^2}}$	$B+2ZY$
	$\frac{2}{3}TY$	$T+\frac{8Y^2}{3T}$	$\frac{2T^2Y}{3T+8Y^2}$	$\frac{3A}{2Y}$

horizontally (the free surface actually drops as it approaches to the weir).

3. The pressure across the sheet of liquid which passes over the weir crest is the atmospheric pressure.
4. The effects of viscosity and surface tension are negligible.

With these assumptions we can then establish the ideal flow model, applying the Bernoulli flow equation between points 1 and 2, and having:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (6)$$

where P is the static pressure at which the fluid is subjected, due to molecules surrounding it,  $\rho$  is the fluid density, g is the acceleration of gravity (9.8 m·seg<sup>-2</sup>), V is the velocity of flow and Z is the height of water on a reference level.

According to the assumption 3 above noted, it can be established that,  $\frac{P}{\rho g}$  so that on the left side of the equality in equation 6 is , then having:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (7)$$

Solving for we obtain:

$$V_2 = \left[ \left( h - Z_2 + \frac{V_1^2}{2g} \right) 2g \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

The discharge “Q” through a fraction of thickness “Z” is given by equation 4 where the area will be = bvz and “b” is the width of the weir. One can therefore write:

$$\frac{\partial Q}{\partial Z} = V_2 \cdot b \partial Z \quad (9)$$

Then:

$$Q = b \int_0^h = V_2 \cdot \partial z \quad (10)$$

V<sub>2</sub> is given by Equation 8, so that by replacing 10 and doing algebraic manipulations we obtain:

$$Q = b \sqrt{2g} \int_0^h \left[ h - z + \frac{V_1^2}{2g} \right]^{\frac{1}{2}} \partial Z \quad (11)$$

Solving, we obtain:

$$Q = \frac{2}{3} b \sqrt{2g} \left[ \left[ h - z + \frac{V_1^2}{2g} \right]^{\frac{3}{2}} \right]_0^h \quad (12)$$

Since the speed V<sub>1</sub> depends on Q, the solution of this equation must be obtained from iterations; however,

## Uso de vertedores

Si bien, el cauce mostrado en la Figura 5 no es un vertedor per se, la sección hidráulica se aproxima a una figura geométrica cuya área es fácilmente obtenida con algunas de las ecuaciones que se señalan en el Cuadro 5 y de donde aplicando las Ecuaciones 4 y 5, se puede aproximar el gasto por unidad de tirante (h) y tiempo (t). Por otro lado, el gasto en un canal abierto puede ser medido mediante un vertedor, el cual puede ser de diferentes formas y tipos de operación en función del objetivo. Para flujos en el rango de 30 a 300 litros por segundo, se recomiendan los vertedores de pared delgada (Chávez, 2001).

La relación entre la descarga y la altura sobre la cresta del vertedero, puede obtenerse matemáticamente haciendo las siguientes suposiciones del comportamiento del flujo:

1. Aguas arriba del vertedero el flujo es uniforme y la presión varía con la profundidad de acuerdo con la hidrostática ( $p = \rho gh$ ).
2. La superficie libre permanece horizontal hasta el plano del vertedero y todas las partículas que pasan sobre el vertedero se mueven horizontalmente (en realidad la superficie libre cae cuando se aproxima al vertedero).
3. La presión a través de la lámina de líquido que pasa sobre la cresta del vertedero es la atmosférica.
4. Los efectos de la viscosidad y de la tensión superficial son despreciables.

Con estas suposiciones se puede entonces establecer el modelo de flujo ideal, aplicando la ecuación de flujo de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 se tiene que:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (6)$$

donde P es la presión estática a la que está sometido el fluido, debido a las moléculas que lo rodean,  $\rho$  es la densidad del fluido, g es la aceleración de la gravedad (9.8 m·seg<sup>-2</sup>), V es la velocidad del flujo y Z es la altura del agua sobre un nivel de referencia.

Acorde a la asunción 3 arriba anotada, se puede establecer que,  $\frac{P}{\rho g}$  por lo que en el lado izquierdo de la igualdad en la ecuación 6 es , teniendo entonces que:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (7)$$

Resolviendo para se obtiene:

$$V_2 = \left[ \left( h - Z_2 + \frac{V_1^2}{2g} \right) 2g \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

the approach velocity  $V_1$  is very small in general, thus equation 12 can be simplified as (Sotelo 1994).

$$Q = \frac{2}{3} b \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

Since the conditions of operation of a weir as that described in reality differ somewhat in design, a discharge coefficient ( $C_d$ ) is introduced in Equation 13, which depends on the load with which operates the weir in a given time ( $h$ ), the design load ( $y$ ) and the height of the peak ( $p$ )

$$Cd = 0.602 + 0.083 \frac{h}{p} \quad (14)$$

Therefore, Equation 13 becomes:

$$Q = Cd \frac{2}{3} b \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}} \quad (15)$$

For triangular weirs, the equation for calculating the runoff is:

$$Q = 1.49h^{2.48} \quad (16)$$

### Obtaining the hydrograph

A hydrograph is a graph showing the change of the water flow over time, for example, the expenditure of a channel in  $m^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ . The data sets obtained in the gauging where time is related to height are used to form the hydrograph and then using the calibration curve of the scale we obtain the expenditure. The area under the curve defining the hydrogram is the total volume of contribution of the runoff event. Figure 7 shows an example of a hydrogram.

To know the volume provided by a hydrograph is necessary to determine the area under the curve that describes it. For this, we have the numerical method (Matthews, 2004) and analytical method. The first method involves splitting the area in geometric figures in a known way and calculate the area of each segment such that the sum of all the segments will approximate the total area.

Using the numerical solution, the runoff volume for each segment indicated in Figure 6, can be calculated as follows:

$$V = \frac{f(a) + f(b)}{2} \cdot (b - a) \quad (17)$$

The accuracy of the numerical solution can be improved if the area of the hydrogram is divided into as many trapezoidal segments ( $n$ ) of equal magnitude (width) in which case, observing the nomenclature of Figure 6, the amplitude would be  $h = \frac{x_2 - x_1}{n}$ ; then the general equation for calculating the volume would be:

La descarga "Q" a través de una fracción de espesor "Z" estará dada por la ecuación 4 en donde el área será =  $b\delta z$  y "b" es el ancho del vertedor. Se puede entonces anotar:

$$\frac{\partial Q}{\partial Z} = V_2 \cdot b \delta Z \quad (9)$$

Entonces:

$$Q = b \int_0^h \delta z = V_2 \cdot \delta z \quad (10)$$

$V_2$  está dado por la Ecuación 8, por lo que sustituyendo en 10 y haciendo manipulaciones algebraicas se tiene que:

$$Q = b \sqrt{2g} \int_0^h \left[ h - z + \frac{V_1^2}{2g} \right]^{\frac{1}{2}} \delta Z \quad (11)$$

Resolviendo, se obtiene:

$$Q = \frac{2}{3} b \sqrt{2g} \left[ \left[ h - z + \frac{V_1^2}{2g} \right]^{\frac{3}{2}} \right]_0^h \quad (12)$$

Ya que la velocidad  $V_1$  depende de  $Q$ , la solución de esta ecuación debe obtenerse iteraciones; sin embargo, la velocidad de aproximación  $V_1$  es en general muy pequeña, por lo que la ecuación 12 se puede simplificar como (Sotelo 1994).

$$Q = \frac{2}{3} b \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

Dado que las condiciones de operación de un vertedor como el descrito en la realidad difieren un tanto de las de diseño, se introduce en la Ecuación 13 un coeficiente de descarga ( $C_d$ ) que sucintamente depende de la carga con que opera el vertedor en un momento dado ( $h$ ), la carga de diseño ( $y$ ) y la altura de la cresta ( $p$ ).

$$Cd = 0.602 + 0.083 \frac{h}{p} \quad (14)$$

Por lo que la Ecuación 13 cambia a:

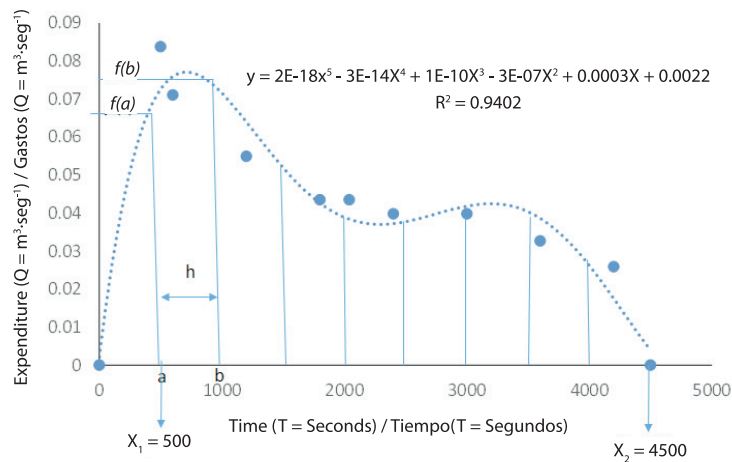
$$Q = Cd \frac{2}{3} b \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}} \quad (15)$$

Para vertederos triangulares la ecuación para el cálculo del escurrimiento es:

$$Q = 1.49h^{2.48} \quad (16)$$

### Obtención del hidrograma

Un hidrograma es una gráfica que muestra el cambio del flujo de agua a través del tiempo, por ejemplo, el gasto de un cauce en  $m^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ . Las series de datos que se



**Figure 7. Hydrograph and adjustment function for volume calculation provided (gauging date July 9, 2014 in the experimental watershed of the river Naitcha, San Luis del Cordero, Durango). Special care should be given to the units for the time to be properly removed and the volume (liter<sup>3</sup>) is shown.**

**Figura 7. Hidrograma y función de ajuste para el cálculo del volumen aportado (Fecha de aforo 9/jul/2014 en la cuenca experimental del río Naitcha, municipio de San Luis del Cordero, Durango). Especial cuidado se deberá prestar a las unidades para que el tiempo se elimine adecuadamente y arroje el volumen (litro<sup>3</sup>).**

$$V = h \left( \frac{f(x_0) + f(x_1)}{2} \right) + h \left( \frac{f(x_1) + f(x_2)}{2} \right) + h \left( \frac{f(x_{n-1}) + f(x_n)}{2} \right) \quad (18)$$

The analytical approach to determine the volume of the hydrograph involves the exact solution obtained when integrating the mathematical function that describes it. This function can be obtained through any software package that allows to adjust observed data to different polynomial functions. For example, the polynomial model describing the hydrogram ( has been indicated in Figure 6. Thus, the total volume would be:

$$V = \int_{x=0}^{x_n} f(x) dx \quad (19)$$

Applying the general rules of integral calculus, we find that the volume of the hydrograph is 4,995 m<sup>3</sup>. This volume would be enough to irrigate five hectares with irrigation depth of 10 cm.

#### Assessing runoff water harvesting structures

This type of evaluation is to quantify if the structure is functioning as designed, therefore it is necessary to know the volume of water collected. Commonly, water harvesting structures in poor rainfed areas have truncated cone shape as shown in Figure 8.

The volume in this water harvesting structure is found by the following equation:

$$V = \pi h \frac{R^2 + r^2 + Rr}{3} \quad (20)$$

obtienen en el aforo donde se relaciona tiempo contra altura sirven para la formación del hidrograma y posteriormente, mediante la curva de calibración de la escala se obtiene el gasto. El área debajo de la curva que define al hidrograma es el volumen total de aportación del evento de escurrimiento. La Figura 7 muestra un ejemplo de un hidrograma.

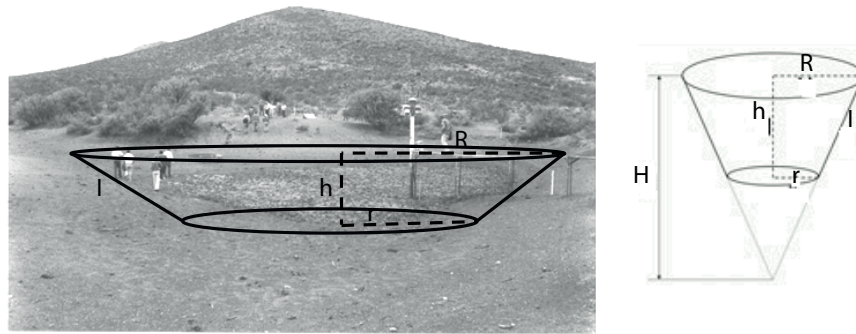
Para conocer el volumen que aporta un hidrograma es necesario determinar el área debajo de la curva que lo describe. Para esto existen el método numérico (Matthews, 2004) y el analítico. El primero consiste en fraccionar el área en figuras geométricas de forma conocida y calcular el área de cada segmento de tal forma que la sumatoria de todos los segmentos dará una aproximación del área total.

Usando la solución numérica, el volumen del escurrimiento para cada segmento que señala la Figura 6, se puede calcular como:

$$V = \frac{f(a) + f(b)}{2} \cdot (b - a) \quad (17)$$

La precisión de la solución numérica se puede mejorar si se divide el área del hidrograma en el mayor número posible de segmentos trapezoidales (n) de igual magnitud (anchura) en cuyo caso, observando la nomenclatura de la Figura 6, la amplitud sería  $h = \frac{x_2 - x_1}{n}$ ; entonces la ecuación general para el cálculo del volumen quedaría:

$$V = h \left( \frac{f(x_0) + f(x_1)}{2} \right) + h \left( \frac{f(x_1) + f(x_2)}{2} \right) + h \left( \frac{f(x_{n-1}) + f(x_n)}{2} \right) \quad (18)$$



**Figure 8. Common geometry in watering places or structures to collect water in areas with poor rain.**  
**Figura 8. Geometría común en obras de abrevadero o de captación en zonas con temporal deficiente.**

Where  $R$  is the radius of the mirror of the structure,  $r$  is the radius of the base,  $h$  is the height or distance between the centers of these two surfaces,  $I$  is the apothem of figure that is described as:

$$I = \sqrt{h^2 + (R - r)^2} \quad (21)$$

The variables have been defined above.

The equation 20 can be described differentially as:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \pi \frac{R^2 + r^2 + R \cdot r}{3} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (22)$$

Taking as example the maximum expenditure point of the hydrograph in Figure 6 ( $0.08 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1} \approx 80 \text{ liters} \cdot \text{seg}^{-1} = \frac{\partial V}{\partial t}$ ) and assuming the structure to collect water is similar to that shown in Figure 7 with radius greater  $R = 5 \text{ m}$  and a smaller radius  $r = 2 \text{ m}$ , then equation 22 is obtained:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\frac{\partial V}{\partial t}}{\frac{\pi R^2 + r^2 + R \cdot r}{3}} = 0.0025 \text{ m} \cdot \text{seg}^{-1} \quad (23)$$

That is, the water level in the pool or structure rises 0.25 cm per second input regarding the input expenditure as constant.

### Analysis of critical periods

In terms of water balance in rainwater harvesting structures, a critical period can be defined as the length of time that the offer (rainfall + runoff) does not meet demand (evaporation + uses). Thus, a water collection system is said to operate satisfactorily if the following expression is satisfied:

$$\theta_s \geq \max \left\{ \int_{t_1}^{t_2} [D_t - Q_t] \partial t \right\} \quad (24)$$

La aproximación analítica para conocer el volumen del hidrograma consiste en la solución exacta que se obtiene al integrar la función matemática que lo describe. Esta función se puede obtener mediante cualquier paquete computacional que permita ajustar datos observados a diferentes funciones polinomiales. Por ejemplo, el modelo polinómico que describe al hidrograma (se ha señalado en la Figura 6. De aquí que el volumen total sería:

$$V = \int_{x=0}^{x_1} f(x) \partial x \quad (19)$$

Aplicando las reglas generales del cálculo integral, se obtiene que el volumen del hidrograma es  $4,995 \text{ m}^3$ . Este volumen sería suficiente para irrigar cinco hectáreas con una lámina de riego de 10 cm.

### Evaluación de obras de almacenamiento del escurrimiento

En este tipo de evaluación se busca cuantificar si la obra está funcionando de acuerdo a lo diseñado, para esto es necesario conocer el volumen de captación. Comúnmente las obras en zonas de temporal deficiente son de tipo cono truncado como se aprecia en la Figura 8.

El volumen en estas obras de captación se encuentra mediante la siguiente ecuación:

$$V = \pi h \frac{R^2 + r^2 + Rr}{3} \quad (20)$$

Donde  $R$  es el radio del espejo de la obra,  $r$  es el radio de la base,  $h$  es la distancia o altura entre los centros de estas dos superficies,  $I$  es la apotema de la figura descrita que se encuentra como:

$$I = \sqrt{h^2 + (R - r)^2} \quad (21)$$

Where  $\theta_s$  is the storage capacity,  $D_t$  is the demand in the interval of time "t",  $Q_t$  are the inputs to the system. The maximum cumulative difference is the ability that the system should have.

### Index of functionality (If)

This value is indicative of the functionality of the structure according to the design specifications. Its optimum value is unit and as the value is separated from this structure, it tends to be deficient given their structural characteristics. This index was calculated as follows:

$$If = \frac{6.06V^{\frac{2}{3}}}{S_1 + S_2} \quad (25)$$

Where V is the storage volume,  $S_1$  and  $S_2$  are the template and mirror surfaces respectively.

### Filling rate ( $I_h$ )

This index denotes the capacity of the structure to store the surfaces runoffs. Its optimum value is the unit. As the value deviates from the unit this means that the structure was oversized or underestimated in process of design (Estrada et al., 2004)

$$I_h = \frac{Vm}{Va} \quad (26)$$

Where Vm is the maximum volume stored and Va is the volume that the structure is able to store. The value of 1 is the one that comes before the volume at elevation overflow. It is necessary to clarify that if the structure never overflows, then we can say that it works under design limits; on the other hand, if the value of  $I_h$  is very small ( $I_h \rightarrow 0$ ) then the structure was over designed.

### Physical characterization of soil receptors of runoffs

One of the fundamental aspects in watershed studies is the quantification of the water balance in the soil. This becomes relevant in watersheds with agricultural exploitation. In this context, knowledge or physical characterization of the soil is crucial.

The dynamics of water in soil is governed by the forces acting on it (soil water potential), such forces correspond to certain moisture content in soil (Boudeguer, 1976; Bilskie, 2001). The soil water potential will define the capacity of absorbing, storing and speed of water loss strongly determined by the particles of sand, silt and clay (Reid, 2004).

The relationship between moisture and water potential is measurable experimentally and is graphically represented by the curve moisture retention

Las variables se han definido anteriormente.

La ecuación 20 puede ser descrita en forma diferencial como:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \pi \frac{R^2 + r^2 + R.r}{3} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (22)$$

Si se toma como ejemplo el gasto máximo del hidrograma de la Figura 6 ( $0.08 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1} \approx 80 \text{ litros} \cdot \text{seg}^{-1} = \frac{\partial V}{\partial t}$ ) y asumiendo una obra de captación similar a la mostrada en la Figura 7 con radio mayor  $R = 5 \text{ m}$  y un radio menor  $r = 2 \text{ m}$ , entonces de la ecuación 22 se obtiene:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\frac{\partial V}{\partial t}}{\frac{\pi R^2 + r^2 + R.r}{3}} = 0.0025 \text{ m} \cdot \text{seg}^{-1} \quad (23)$$

Es decir, el nivel del agua en el estanque u obra de captación subirá 0.25 cm cada segundo considerando el gasto de entrada como constante.

### Análisis de periodos críticos

En términos de balance de agua en obras de captación de agua de lluvia, un periodo crítico se puede definir como el lapso de tiempo en que la oferta (precipitación + escurrimiento) no satisfacen la demanda (evaporación + usos). Así, un sistema de captación de agua se dice que opera satisfactoriamente si la siguiente expresión se satisface:

$$\theta_s \geq \max \left\{ \int_{t_1}^{t_2} [D_t - Q_t] \partial t \right\} \quad (24)$$

Donde  $\theta_s$  es la capacidad de almacenamiento,  $D_t$  es la demanda en el intervalo de tiempo "t",  $Q_t$  son las entradas al sistema. La diferencia máxima acumulada es la capacidad que deberá tener el sistema.

### Índice de funcionalidad (If)

Este valor es un indicativo de la funcionalidad de la obra acorde a las características de diseño. Su valor óptimo es la unidad y a medida que el valor se separa de esta la obra tiende a presentar deficiencias dadas sus características estructurales. Este índice se calcula como:

$$If = \frac{6.06V^{\frac{2}{3}}}{S_1 + S_2} \quad (25)$$

Donde V es el volumen de almacenamiento,  $S_1$  y  $S_2$  son las superficies del espejo y plantilla respectivamente.

### Índice de llenado ( $I_h$ )

Este índice denota la capacidad de la obra para almacenar los escurrimientos superficiales. Su valor óptimo es la

(Boudegue, 1976). This curve depends on the size and pore distribution and mineralogy of each soil, however, there is no single curve for a given soil, as they vary according to the method used for their production, besides phenomena present in soil such as hysteresis caused by the processes of wetting and drying the soil (Castañeda and Reyes, 2004).

Curves of moisture retention are mainly used for: a) determining a moisture index available in the soil, that is, the portion of water that can be absorbed by plants, b) estimating certain moisture values typical of the relationship soil-water-plant such as field capacity and permanent wilting point, c) classifying soils, d) detecting changes in the soil structure, and e) determining the relationship between the soil moisture tension and other physical properties (Martínez-Fernández, 1995).

### Energy state of soil moisture

An important aspect in characterizing the soil in arid lands, is the knowledge of the impact of soil water status in crop yields. For this, based on the soil moisture retention curves, we can estimate the tension of the water in the soil to which the crop can be subjected between two consecutive sampling periods, or periods of rain / runoff. Thus, as an example, the moisture retention curves listed in Figure 9 are used for this purpose and in order to reference the results of crop growth to the energy content of the soil moisture.

unidad. A medida que el valor se aparta de la unidad, implica que la obra fue sobredimensionada o subestimada en el proceso del diseño, (Estrada et al., 2004)

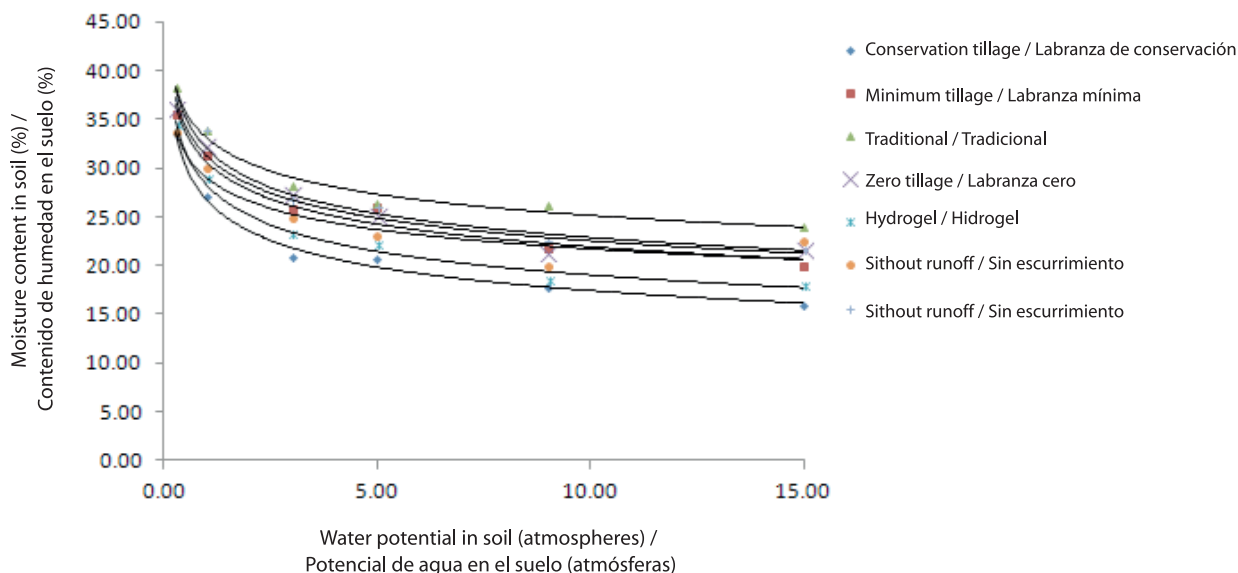
$$I_h = \frac{Vm}{Va} \quad (26)$$

Donde  $V_m$  es el volumen máximo almacenado y  $V_a$  es el volumen que la obra es capaz de almacenar. El valor de 1 es el que antecede al volumen en la cota de desbordamiento. Es menester aclarar que si la obra nunca desborda, entonces se puede decir que funciona bajo los límites de diseño; por otro lado, si el valor de  $I_h$  es muy pequeño ( $I_h \rightarrow 0$ ) entonces la obra fue sobre diseñada.

### Caracterización física de suelos receptores de escurrimiento

Uno de los aspectos fundamentales en estudios de cuencas hidrológicas es la cuantificación del balance de agua en el suelo. Esto adquiere relevancia en cuencas con explotación agropecuaria. En este contexto, el conocimiento o caracterización física del suelo es de crucial importancia.

La dinámica del agua en el suelo está regida por las fuerzas que en ella actúan (potencial de succión), dichas fuerzas corresponderán a cierto contenido de humedad en el suelo (Boudegue, 1976; Bilskie, 2001). El



**Figure 9. Moisture retention curves under different tillage treatments.**

**Figura 9. Curvas de retención de humedad bajo diferentes tratamientos de labranza.**

Soil moisture retention curves identified in Figure 9 follow a potential function as:

$$T = kPs^n$$

Where  $P_s$  is the percentage of moisture in the soil,  $k$  and  $n$  are regression constants. This equation can be manipulated so that from a voltage soil moisture, the equation yields the moisture content at that voltage. The adjustment parameters of the retention curves indicated in Figure 9 are shown in Table 6. If we want to know the average tension on a sampling or rain interval, then:

$$T = \int_{Ps1}^{Ps2} kPs^n = \int_{Ps1}^{Ps2} \frac{k}{n+1} Ps^{n+1} = \frac{k}{n+1} \int_{Ps1}^{Ps2} Ps^{n+1} = \frac{k}{n+1} [Ps^{n+1}]_{Ps1}^{Ps2} \quad (27)$$

From where

$$\hat{T} = \frac{\frac{k}{n+1} [Ps2^{n+1}] - [Ps1^{n+1}]}{Ps2 - Ps1} \quad (28)$$

## Results and discussion

While this paper is not the result of a study per se, it details the minimum procedures recommended for characterizing watersheds and subsequent analysis of detailed information. However, it is relevant to consider the characterization of the study watersheds and to establish a priori the field measurement protocols.

potencial de succión del suelo definirá la capacidad de éste para absorber, almacenar y la velocidad de pérdida del agua que estará a su vez, fuertemente determinado por las partículas de arena, limo y arcilla (Reid, 2004).

La relación entre la humedad y el potencial de succión, es generalmente medible en forma experimental y es representada gráficamente por la curva de retención de humedad (Boudeguer, 1976). Esta curva depende del tamaño y distribución de los poros, así como de la mineralogía de cada suelo, sin embargo, no existe una única curva para un determinado suelo, ya que varían de acuerdo al método empleado para su obtención, además de fenómenos presentes en el suelo como la histéresis, causada por los procesos de humedecimiento y secado del suelo (Castañeda y Reyes, 2004).

Las curvas de retención de humedad se utilizan principalmente para: a) determinar un índice de humedad disponible en el suelo, es decir, la porción de agua que puede ser absorbida por las plantas, b) estimar determinados valores de humedad característicos de la relación suelo-agua-planta, como la capacidad de campo o el punto de marchitamiento permanente, c) clasificar los suelos, d) detectar cambios en la estructura del suelo, y e) determinar la relación entre la tensión de la humedad del suelo y otras propiedades físicas (Martínez-Fernández, 1995).

## Estado energético de la humedad del suelo

**Table 6. Parameters of the equations of the curves of soil moisture retention of the form  $T=kPs^n$ .**

**Cuadro 6. Parámetros de las ecuaciones de las curvas de retención de humedad del suelo de la forma  $T=kPs^n$ .**

Treatment/Tratamiento	Exponent/Exponente	Coefficient/Coeficiente	R <sup>2</sup>
Conservation tillage/ Labranza de conservación	-0.87	26.81	0.98
Minimum tillage/Labranza mínima	-0.14	30.65	0.96
Traditional/Tradicional	-0.12	33.13	0.97
Zero tillage/Labranza cero	-0.14	31.28	0.96
Hydrogel/Hidrogel	-0.17	28.33	0.98
Without runoff/Sin escurrimiento	-0.12	29.04	0.89
Without runoff/Sin escurrimiento	-0.14	32.03	0.97

This becomes important especially in simulation studies and modeling of hydrological processes. The use of each model involves the characterization for the sake of parameterization; i.e. "the problem defines the model to be used and not otherwise." After selecting the model (depending on the purpose, scale and available information), measurement protocols are designed for the required field variables. This simple process optimizes the time and resources available for the development of research.

## Conclusions

In this study we have settled the indispensable minimum requirements for instrumentation and methods of analysis of hydrological monitoring in experimental watersheds. Even though it is desirable to have the largest possible number of instruments, this is not the case in most of the watersheds of the country where there is no clear history of experimental watersheds. Also, as background, the importance of differentiating the "representative" from the "experimental" watersheds has been mentioned. In the experimental watersheds is where the research protocols should be developed. The main theme of scientific research is the study of the effects of the changes caused by human activity in the context of changes to the hydrological regime. This includes any changes in land use (such as reforestation), conditioning thereof (leveling) influence that would produce the use of water resources through pumping, artificial recharge, etc. It is also desirable that such research is developed in paired watersheds in which, in one of them, the initial natural condition is maintained as a reference point.

Another key aspect in the development of research in experimental watersheds is the modeling and simulation of hydrological processes. The observed data are the basis for calibration of any model, hence the importance of instrumentation.

*End of English version*

## References / Referencias

- Barbosa Moreno, F.; Gómez Cárdenas, M.; Sánchez Cohen, I.; Ariza Flores, R.; Díaz Padilla, G.; Orozco Cirilo, S.; Contreras Hinojosa, J.; Guajardo Panes, R. 2011. Principales obras de recarga de acuíferos. Folleto Técnico No. 23 INIFAP CIRPAS. Etna Oaxaca. 93 p.
- Boudeguer, J. A. Q. 1976. Características físicas del suelo relacionadas con el riego en siete huertos de paltos del piedmont en la zona de Quillota. Tesis de licenciatura. Universidad Católica de Valparaiso. Escuela de Agronomía. Valparaiso, Chile.
- Bilskie, J. 2001. Soil water status: content and potential. Campbell Scientific, Inc. App. Note: 2S-1 <http://s>.

Un aspecto preponderante en la caracterización del suelo en zonas áridas, es el conocimiento del impacto del estado hídrico del suelo en el rendimiento de los cultivos. Para esto, partiendo de las curvas de retención de humedad del suelo se puede estimar la tensión del agua en el suelo a la que el cultivo puede estar sometido entre dos periodos consecutivos de muestreo, o periodos de lluvia / escurrimiento. Así, como ejemplo, las curvas de retención de humedad que se señalan en la Figura 9 se utilizan con esta finalidad y para poder referenciar los resultados del crecimiento del cultivo al contenido energético de la humedad en el suelo.

Las curvas de retención de humedad del suelo señaladas en la Figura 9 siguen una función potencial como:

$$T = kPs^n$$

Donde Ps es el porcentaje de humedad en el suelo, k y n, son constantes de regresión. Esta ecuación se puede manipular para que partiendo de una tensión de humedad en el suelo, arroje el contenido de humedad de éste a esa tensión. Los parámetros de ajuste de las curvas de retención que señala la Figura 9 son los que se muestran en el Cuadro 6. Si se desea conocer la tensión media en un intervalo de muestreo o de lluvia, entonces:

$$T = \int_{Ps1}^{Ps2} kPs^n = \int_{Ps1}^{Ps2} \frac{k}{n+1} Ps^{n+1} = \frac{k}{n+1} \int_{Ps1}^{Ps2} Ps^{n+1} = \frac{k}{n+1} [Ps^{n+1}]_{Ps1}^{Ps2} \quad (27)$$

De donde

$$\hat{T} = \frac{\frac{k}{n+1} [Ps2^{n+1}] - [Ps1^{n+1}]}{Ps2 - Ps1} \quad (28)$$

## Resultados y discusión

Si bien el presente documento no es resultado de un estudio per se, se detallan los procedimientos mínimos recomendados para la caracterización de cuencas y posterior análisis de información. Sin embargo, es pertinente considerar la caracterización de las cuencas de estudio y establecer a priori los protocolos de medición en campo. Esto adquiere relevancia sobre todo en estudios de simulación y modelación de procesos hidrológicos. El uso de cada modelo implica la caracterización pertinente en aras de parametrización; es decir, "el problema define el modelo a usar y no lo contrario". Una vez seleccionado el modelo (en función del objetivo, la escala y la información disponible), se diseñan los protocolos de medición para obtener en campo las variables requeridas. Este simple proceso optimiza el tiempo y recursos disponibles para el desarrollo de la investigación.

campbellsci.com/documents/ca/technical-papers/soilh20c.pdf (2 de Abril de 2014).

- Burton, G. A.; Pitt, R. 2002. Stormwater Effects Handbook. A toolbox for Watershed Managers, Scientists and Engineers. Lewis Publishers. Fl. USA. 875 pp.
- Castañeda, M. M. C.; Reyes, A. H. A. 2004. Solución numérica de la ecuación de Richards. Tesis de licenciatura. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga.
- Chávez, Ariostro. 2001. Vertedores. Serie Autodidáctica de Medición. Instituto Mexicano de Tencología del Agua. Cuernavaca Morelos, México. 27 pp.
- Chow, V. T.; Mhidment, D. R.; Mays, L. W. 1998. Applied Hydrology. Mc. Graw Hill. Co. 557 p.
- Estrada, J.; Rivera, M.; Lamachere G., J. L.; Sánchez Cohen, I. 2004. Funcionamiento y balance de agua en bordos para abrevadero. Folleto Científico No. 16. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Durango México. 68 pp.
- Hawkins, R. H.; Jiang, R.; Woodward, D. E.; Hjelmfelt, A. T.; Van Mullem, J. A. 2002. "Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio". Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada (U.S. Geological Survey). Última Consulta, julio 2015
- Hershfield, D. M. 1965. On the spacing of rain gages, in Proceedings of the WMO/IASH Symposium on Design of Hydrometeorologic Networks, Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ., 67, 72-79
- Hudson, Norman W. 1987. Soil and water conservation in semi-arid areas. Soil Resources, Management and Conservation Service. FAO Land and Water Development Division. Rome.
- Martínez-Fernández, J. 1995. Medida de curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación. Avances en la Investigación en Zona no saturada. Departamento de Geografía. Universidad de Salamanca.
- Limerinos, J. T. 1970. Determination of the Manning Coefficient from Measured Bed Roughness in Natural Channels. Geological Survey Water Supply Paper 1898 - B. Washington. E.U.A. 47 p.
- Matthews, John H. 2004. Simpson's Rule for numerical Integration. Numerical analysis in Pascal: The art of scientific computing. Cambridge University Press.
- Reid, G. 2004. Improving soil moisture. NSW Department of primary industries. www.dpi.nsw.gov.au (5 de noviembre de 2013).
- Rojas, A. L. 2001. La labranza mínima como práctica de producción sostenible en granos básicos. Agronomía mesoamericana 12 (2): 209-212.
- Sánchez Cohen, I. 2005. Fundamentos para el manejo integral del agua. Una aproximación de simulación de procesos. Libro científico No. 2 INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio Durango, México. 272 p.
- Sánchez Cohen, I.; Lopes, V. L.; Slack, D. C.; Fogel, M. 1997. Water balance model for small - scale water

## Conclusiones

En la presente publicación se han asentado los requisitos mínimos indispensables en cuanto a instrumentación y métodos de análisis del monitoreo hidrológico en cuencas experimentales. Si bien es deseable contar con la mayor instrumentación posible, este no es el caso en la mayoría de las cuencas del país en donde no se tiene un antecedente claro de cuencas experimentales. También, a manera de antecedente, se ha mencionado la importancia de distinguir las cuencas "representativas" de las "experimentales". Es en éstas últimas donde se deberán desarrollar los protocolos de investigación. El principal tema de investigación científica es el estudio de los efectos de los cambios debidos a la acción del hombre en el contexto de las alteraciones al régimen hidrológico. Esto incluye cualquier modificación en la utilización del suelo (tal como la reforestación), acondicionamiento de la misma (nivelación de suelos), influencia que produciría el empleo de los recursos de agua mediante bombeo, recarga artificial, etc. También es deseable que este tipo de investigación se desarrolle en cuencas apareadas en las que, en una de ellas, se mantiene la condición natural inicial como punto de referencia.

Otro aspecto medular en el desarrollo de la investigación en cuencas experimentales es la modelación y simulación de procesos hidrológicos. Los datos observados son la base para la calibración de cualquier modelo de ahí la importancia de la instrumentación.

## Fin de la versión en español

- harvesting systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 123. No. 2. pp. 123 - 128.
- Sánchez Cohen, I.; Velasquez Valle, M.; Catalan Valencia, E.; Inzunza Ibarra, M. A.; Esquirol Arriaga, G.; Bueno Hurtado, P.; Díaz Padilla, G. 2013. Modelo de Balance Hídrico Como Apoyo a Toma de Decisiones en Zonas Agrícolas Bajo Incertidumbre Climática. Folleto Técnico No. 28. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio Durango. 53 pp.
- Sánchez Cohen, I.; González Barrios, J. L.; Díaz Padilla, G.; Ojeda Bustamante, W.; Muñoz Villalobos, A.; Velásquez Valle, M. A.; González Cervantes, G. 2007. Modelo Conceptual en el Manejo Integral del Agua. En: Procesos Hidrológicos en Zonas Áridas y Semi - Áridas. De la Investigación a la Acción. Libro Científico No. 3. INIFAP CENID RASPA. pp 2 - 19.
- Sotelo Ávila, G. 1994. Apuntes de Hidráulica II, Capítulo VIII. Diseño Hidráulico de Obras. México, UNAM, Facultad de Ingeniería. pp 509 - 647.

- UNESCO. 1970. Las cuencas representativas y experimentales. Guía internacional de prácticas en materia de investigación. Publicación No. 95. 580 pp.
- United States Department of Agriculture. 1986. Urban hydrology for small watersheds (PDF). Technical Release 55 (TR-55) (Second Edition ed.). Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division.
- Velásquez, M. A.; Medina, G.; Sánchez Cohen, I.; Klaudia Oleschko L.; Ruiz Corral, J. Gabor Korvin, A. 2013. Spatial Variability of the Hurst Exponent for the Daily Scale Rainfall Series in the State of Zacatecas, Mexico. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. American Meteorological Society. Vol. 52. pp 2771-2780.