
Capítulo VII

Funcionamiento Hidrodinámico del Suelo en una Cuenca del Norte de México Utilizando la Simulación de Lluvia

Dr. Guillermo González Cervantes, Dr. Juan Estrada Avalos,
Dr. Jean Yves Loyer y Dr. J. P. Rossignol

CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| INTRODUCCIÓN | 102 |
| MÉTODO DE APROXIMACIÓN | 102 |
| Selección y ubicación de los sitios experimentales | 104 |
| Dinámica del agua en la superficie de los suelos | 104 |
| RESULTADOS | 107 |
| Caracterización físico-química de la superficie de los suelo | 107 |
| Simulación de lluvia y escurrimiento | 108 |
| CONCLUSIONES | 112 |
| LITERATURA CITADA | 114 |

INTRODUCCIÓN

El norte de México presenta un clima de árido a semiárido con un gradiente de precipitación pluvial anual de 250 a 600 mm según la altitud (Buendía, 1998; Estrada, 1999). Bajo estas condiciones climáticas las actividades agrícolas son poco favorables, de ahí que los agricultores se orienten hacia una explotación de la ganadería extensiva (1/9 UA) (Anaya 1998, Anaya y Barral, 1995) como principal actividad económica; para ello intentan aprovechar al máximo el agua de escurrimiento durante la temporada de lluvias (julio-octubre) mediante la construcción de pequeños bordos de retención ubicados en la partes bajas de las cuencas vertientes, el resto del año tienen que hacer uso del agua subterránea para abreviar el ganado (Anaya y Barral, 1995, Barral *et al.*, 1993).

Dada la fragilidad de los ecosistemas presentes en las zonas áridas y semiáridas, resalta la importancia de hacer un buen uso del agua de escurrimiento y un almacenamiento eficaz en los pequeños bordos de retención (Descroix *et al.*, 1997). Bajo este contexto se desarrolló esta investigación -al nivel del funcionamiento hidrodinámico de los suelos- (Audry, 1973; Delhoume, 1996; Viramontes, 2000; Descroix *et al.*, 2002), a través de su comportamiento en superficie (infiltración-escurrimiento) (Horton, 1933; Lafforgue, 1977; Collinet y Valentin, 1979; Lafforgue y Casenave, 1980; Asseline, 1997; Delhoume, 1997). El objetivo del presente capítulo es describir el enfoque experimental utilizado en una cuenca vertiente del norte de México para estudiar el funcionamiento hidrodinámico de la superficie del suelo.

MÉTODO DE APROXIMACIÓN

Los trabajos de campo se realizaron en la cuenca vertiente de Carboneras (1.06 km²) dentro de las instalaciones del rancho Atotonilco (450 km²), propiedad dedicada a la explotación de ganadería extensiva; el rancho se localiza entre los meridianos 24° 33' y 24° 50' de latitud norte y los paralelos 103° 34' y 103° 50' de longitud oeste, dentro del municipio de Cuencamé, Dgo., (Figura 1).

El clima semiárido de la región (Nouvelot y Descroix, 1996) se caracteriza por una precipitación media anual de 450 mm, con una estación de lluvias estival -de mayo a septiembre- donde se precipita entre el 80 y 90 por ciento del total de la lluvia. Las lluvias invernales -de noviembre a enero- representan entre el 10 y 15 por ciento de este total (Estrada, 1999). Desde el punto de vista geológico, Carboneras se sitúa en el contacto de los materiales eruptivos y sedimentarios (Loyer y Moriaud, 1996), (Figura 2).

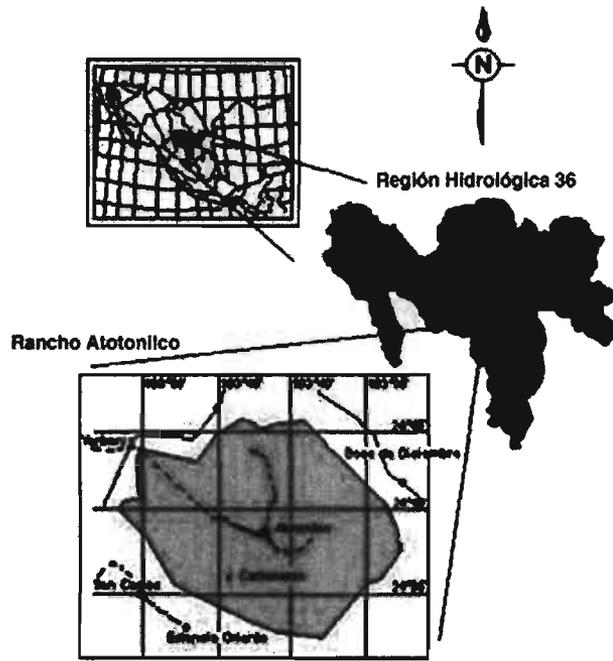


Figura 1. Ubicación del área de estudio (Estrada, 1999).

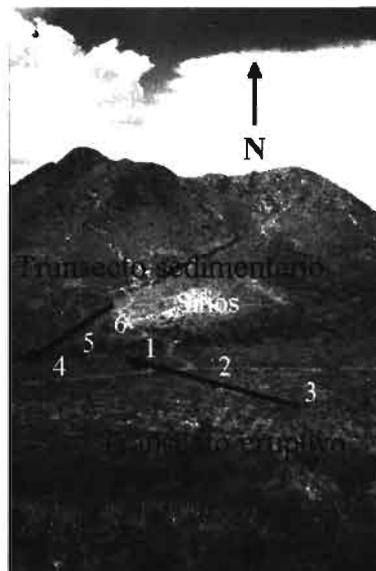


Figura 2. Cuenca vertiente de Carboneras y sitios experimentales (González, 2002).

Selección y ubicación de los sitios experimentales.

Posterior a la descripción edafológica de 112 pozos en la cuenca de Carboneras (González, 2002) permitió seleccionar y ubicar dos transectos (Figura 2) a fin de incluir los diferentes componentes topográficos de una vertiente (parte alta, con pendiente fuerte; parte media con pendiente moderada, y parte baja con pendiente débil) en dos situaciones geológicas (Castillo *et al.*, 1999), una vertiente sobre substrato calcáreo del cretácico (transecto sedimentario), la otra sobre substrato eruptivo del cuaternario (transecto eruptivo); en cada vertiente se seleccionaron tres sitios representativos para su estudio, estos sitios son representativos desde el punto de vista geológico, edafológico, morfológico y de vegetación. De esta forma en el Cuadro 1 se describen los sitios seleccionados.

Dinámica del agua en la superficie de los suelos.

Para el estudio de la relación escurrimiento-infiltración en la superficie se utilizó el simulador electrónico de lluvias (Asseline y Valentin, 1978; Casenave, 1986; Albergel, 1987) (Figura 3) que permite simular lluvias de diferentes intensidades (18 a 145 mm h^{-1}) durante un tiempo definido (Albergel y Thebe, 1986).



Figura 3: Simulador electrónico de lluvias.

Cuadro 1. Descripción de los sitios representativos y de las parcelas.

| Ubicación | Transecto eruptivo (TE) | | | Transecto sedimentario (TS) | | |
|----------------------|-------------------------|-------------------|------------|-----------------------------|----------|------------|
| | Parte alta | Parte media | Parte baja | P. alta | P. media | P. baja |
| Litología | Riolita | Caliche y riolita | Aluviones | Caliche | Caliche | Coluviones |
| Sitios | 3 | 2 | 1 | 6 | 5 | 4 |
| Pendiente (%) | 17 | 18 | 7 | 19 | 9 | 8 |
| Prof. del suelo (cm) | 20 | 25 | >200 | 15 | 140 | 150 |
| Pendiente % | 17 | 18 | 7 | 19 | 9 | 8 |

El protocolo de lluvias artificiales se definió a partir de las principales características de la lluvia natural: frecuencia e intensidad de la lluvia diaria y el intervalo entre dos eventos lluviosos (Estrada, 1999). Enseguida se instalaron 18 parcelas de 1 m² a razón de tres parcelas por sitio, sobre las cuales se aplicaron tres lluvias simples (Thiebaut *et al.*, 1999) con el fin de aplicar la misma cantidad de agua (22.5 litros), según el protocolo y cronología descritos en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Protocolo de simulación de lluvia para la cuenca de Carboneras.

| | Parcela 3-1 | | Parcela 3-2 | | Parcela 3-3 | |
|----------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------|
| | Intensidad mm h ⁻¹ | Duración mn | Intensidad mm h ⁻¹ | Duración mn | Intensidad mm h ⁻¹ | Duración mn |
| Lluvia 1 | 90 | 15 | 30 | 45 | 60 | 22 |
| Lluvia 2 | 90 | 15 | 30 | 45 | 60 | 22 |
| Lluvia 3 | 90 | 15 | 30 | 45 | 60 | 23 |

Las lluvias 1 y 2 tuvieron un intervalo de 20 minutos. Las lluvias 2 y 3 el intervalo fue de un día.

La lluvia 1 se aplicó sobre un suelo seco (1 a 2 por ciento de humedad ponderal, 1.3 a 2.6 por ciento de humedad volumétrica) sobre los primeros 5 cm de profundidad. La lluvia 2 se inició sobre un suelo húmedo (21 a 22 por ciento de humedad ponderal, 26 a 28 por ciento volumétrica). La lluvia 3 con un contenido de humedad volumétrico del 20 al 22 por ciento.

1. Fase de imbibición. Corresponde al total de la lluvia que se infiltra o se acumula en la superficie de la parcela. En esta fase no se presenta escurrimiento.
2. Fase de transición. Una vez que inicia el escurrimiento, éste aumenta progresivamente, el cual está en correlación con una disminución progresiva de la infiltración.
3. Fase de régimen de movimiento permanente. Corresponde al equilibrio entre el escurrimiento y la infiltración, donde el agua que escurre alcanza un máximo (Rx), mientras que el agua que se infiltra un mínimo (Fn).
4. Fase de vacío. Corresponde a la parte final de la simulación, donde el escurrimiento disminuye hasta desaparecer rápidamente.

RESULTADOS

Primeramente se describieron los estados de superficie de las parcelas (1 m²) al método de puntos cuadrantes utilizando líneas de espacios regulares (Brown, 1954; Daget y Poissonet, 1969 y 1971). Esta descripción permite considerar los obstáculos que las gotas de lluvia pueden encontrar al llegar a la superficie del suelo. La presencia o ausencia de estos obstáculos puede aumentar o disminuir la capacidad de infiltración o escurrimiento.

En el Cuadro 3 se observan los valores promedio de la cobertura total expresados en por ciento. La lectura de este cuadro muestra recubrimientos de la superficie contrastantes; por ejemplo, la cubierta vegetal (pastos) generalmente se reduce en la mayoría de los sitios inferior al 12 por ciento, pero resaltan los sitios dos y seis con una tasa de cobertura superior al 21 por ciento.

La cobertura total de piedras es superior al 21 por ciento para los sitios dos, tres y seis, pero el sitio uno se distingue por la nula presencia de piedras.

Con relación al suelo desnudo, la tasa de cobertura es superior al 70 por ciento para los sitios uno y tres; (70 y 80 %) del transecto eruptivo cuatro y cinco, y (74 y 75 %) del transecto sedimentario.

Cuadro 3. Principales características de la superficie de las parcelas de los dos transectos.

| Sitios | Transecto eruptivo | | | Transecto sedimentario | | |
|-----------------------------|--------------------|----|----|------------------------|----|----|
| | 3 | 2 | 1 | 6 | 5 | 4 |
| Cobertura total piedras (%) | 22 | 21 | 0 | 31 | 11 | 12 |
| Cobertura vegetal (%) | 8 | 25 | 20 | 22 | 15 | 13 |
| Cobertura del Suelo (%) | 70 | 54 | 80 | 47 | 74 | 75 |

Caracterización físico-química de la superficie del suelo.

Enseguida se realizó el análisis físico-químico del horizonte superficial (0–5 cm). Los resultados se muestran en el Cuadro 4 y comprende el contenido de arena, limo, arcilla, carbón total, carbonato de calcio y el pH.

La observación en este cuadro permitió organizar y agrupar los suelos. Con base en la textura, en general son suelos arenosos para casi todos los sitios, con un contenido en limo homogéneo (entre 6 y 11 %), excepto el sitio cuatro del transecto sedimentario que presenta un contenido importante de arcillas (31 %).

Así también, la distribución del carbón total generalmente es homogénea, con una ligera superioridad para los suelos del transecto sedimentario.

La distribución espacial del carbonato de calcio (CaCO_3) (González, 2002), donde los suelos de la parte media del transecto eruptivo (sitio 2) presentan un contenido importante de CaCO_3 (3.5 %), al contrario de los suelos de la parte baja del transecto sedimentario (sitio 4), donde no se reporta la presencia de este compuesto químico.

Dada La descripción de los estados de superficie y la distribución superficial del CaCO_3 en la cuenca, permitieron agrupar los suelos para su estudio en suelos con carbonatos (sitios 2, 6 y 5), y sin carbonatos (sitios 3, 1 y 4).

Cuadro 4. Resultados del análisis granulométrico y químico de los suelos.

| Sitio | Transecto eruptivo | | | Transecto sedimentario | | |
|---------------------------|--|-----|-----|------------------------|-----|-----|
| | 3 | 2 | 1 | 6 | 5 | 4 |
| | Horizonte superficial del suelo (0-5 cm) | | | | | |
| Arena (%) | 72 | 74 | 75 | 71 | 69 | 58 |
| Limo (%) | 7 | 6 | 9 | 6 | 7 | 11 |
| Arcilla (%) | 21 | 20 | 16 | 23 | 24 | 31 |
| Carbón total (%) | 2 | 2,3 | 1,7 | 3,6 | 2,4 | 2,8 |
| CaCO_3 total (%) | 0 | 3,5 | 0 | 2,5 | 2,3 | 0 |
| pH | 6,8 | 8,1 | 5,9 | 8,2 | 8,2 | 7,7 |

Simulación de lluvia y escurrimiento

Posterior al agrupamiento de los suelos se inició la simulación de lluvia artificial (Casenave, 1982) considerando que los principales factores que influyen en el escurrimiento o infiltración son; la intensidad y duración de la lluvia, tipo de suelo (textura, carbón y carbonatos), estado de la superficie (piedras, vegetación y suelo desnudo) y la pendiente. A continuación se describen las cuatro fases que se presentaron bajo la simulación artificial de lluvia:

1. Fase de imbibición (P_i).

La Figura 4 presenta los valores de la lluvia de imbibición (P_i) en función de intensidad de la lluvia (I) y del contenido de humedad inicial del suelo para todas las parcelas.

Bajo una lluvia de intensidad constante de 30 mm h^{-1} , los suelos sin CaCO_3 (sitios 3, 1 y 4) presentan una P_i que varía de 14 mm en suelo seco, de 3 a 5 mm sobre suelo húmedo y de 4 a 9 mm en suelo drenado. Para estos suelos el agua

total que se infiltra (Cuadro 5) o se acumula en la superficie es del 43 al 60 por ciento en suelo seco, del 14 al 20 por ciento en suelo húmedo y del 41 por ciento en suelo drenado.

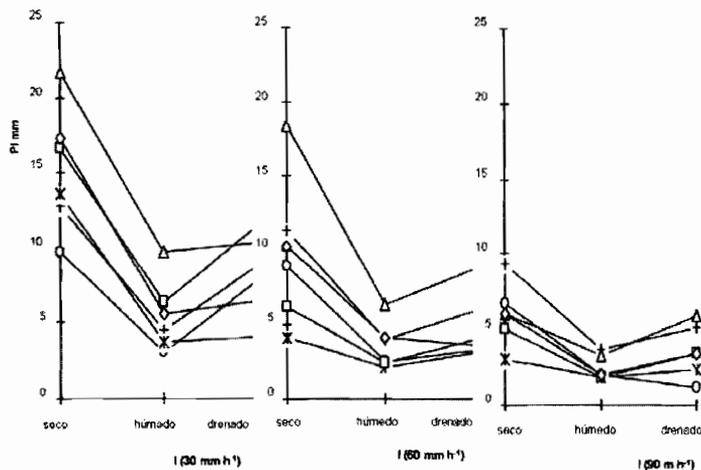


Figura 4. Fase de imbibición (P_i) en función de la intensidad de lluvia (I) para los diferentes estados de humectación inicial del suelo.

Por su parte, los suelos carbonatados (sitios 2, 6 y 5) muestran una variación de la P_i de 17 a 22 mm en suelo seco, de 6 a 10 mm para suelo húmedo y de 7 a 12 mm para suelo drenado, con un total de lluvia infiltrada de 74 a 98 por ciento en suelo seco, de 25 a 43 por ciento para suelo húmedo y de 29 a 52 por ciento para suelo drenado, bajo la misma intensidad de lluvia (30 mm h^{-1}).

Cuadro 5. Representaciones en porcentaje de la fase de imbibición (P_i), en función de la intensidad simulada (I) y de la condición inicial de humedad del suelo.

| Suelo | Humedad inicial del suelo | • Lluvia simulada en mm h^{-1} | | |
|----------------|---------------------------|---|---------------|---------------|
| | | 30 Pi en % | 60 Pi en % | 90 Pi en % |
| Sin carbonatos | Seco | 43 - 60 | 18 - 50 | 13 - 42 |
| | Húmedo | 14 - 20 | 9 - 18 | 8 - 17 |
| | Drenado | 18 - 41 | 14 - 27 | 5 - 23 |
| Con carbonatos | Seco | 74 - 98 | 27 - 82 | 22 - 27 |
| | Húmedo | 25 - 43 | 10 - 28 | 8 - 15 |
| | Drenado | 29 - 52 | 16 - 40 | 15 - 26 |

Al incrementar la intensidad de lluvia a 60 mm h⁻¹ los suelos de la parte alta del transecto sedimentario (sitio 6) presentan una Pi aún importante de 18 mm en suelo seco; de 7 mm en suelo húmedo, y de 9 mm en suelo drenado, con un total de lluvia infiltrada del 82, 31 y de 40 por ciento respectivamente. El resto de los sitios presentan una Pi relativamente importante de 18 a 50 por ciento en suelo seco y reducida en suelo húmedo (de 9 a 28 %) y drenado (14 a 40 %).

Bajo una intensidad de 90 mm h⁻¹ sólo el sitio uno presenta una Pi considerable, 9.5 mm en suelo seco, con una infiltración del 40 por ciento. Para el resto de los sitios el comportamiento de la superficie del suelo es sensiblemente homogénea tanto en suelo húmedo (8 a 17 %) como en suelo drenado (5 a 26 %).

2. Fase de transición.

La suma de la duración de la fase de inhibición (Pi) y la duración de la fase de transición (Tt) corresponde al tiempo necesario (Tit) para que se instale el régimen de movimiento permanente. La Figura 5 representa la Tit en función de la intensidad de lluvia (I) para todos los sitios bajo las tres condiciones de humedad.

La Tit muestra una cierta analogía con las curvas de Pi (Figura 4). La lectura de estas gráficas permite resaltar a los suelos carbonatados (sitios 2, 6 y 5), ya que si la intensidad de lluvia es de 30 mm h⁻¹ la Tit es casi idéntica de 43 a 45 min en suelo seco; es decir, toda el agua se infiltra y no llega jamás a la instalación del régimen de movimiento permanente, aún sobre suelo húmedo el sitio seis se infiltra toda el agua.

A diferencia de los suelos no carbonatados donde la Tit varía de 33 a 38 min, tiempo necesario para que se instale el régimen de movimiento permanente e inicie el escurrimiento. Si el suelo esta húmedo la Tit varía de 13 a 15 min para que inicie el escurrimiento.

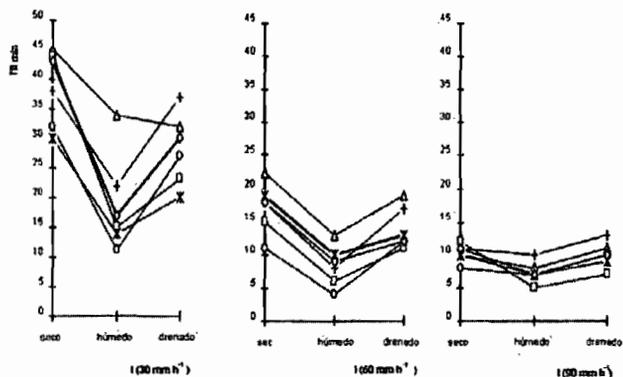


Figura 5. Tiempo necesario de la lluvia (Tit) para que inicie el escurrimiento.

3. Régimen de movimiento permanente.

Para un sitio y una intensidad dada, el régimen de movimiento permanente corresponde a la capacidad mínima de absorción (F_n) en agua por el suelo, que corresponde a la infiltración mínima del suelo con una correlación del escurrimiento máximo en superficie (R_x).

La Figura 6 presenta los histogramas del escurrimiento máximo y la infiltración mínima de los suelos de Carboneras. Los suelos no carbonatados presentan una R_x de 2.7 a 8.5 mm h^{-1} , con una I de 30 mm h^{-1} bajo una condición de suelo seco, y de 4 a 12 mm h^{-1} en suelo húmedo, con un escurrimiento máximo del orden de nueve a 28 por ciento en suelo seco, (Cuadro 6) y de 13 a 40 por ciento en suelo húmedo.

Por su parte, los suelos carbonatados (sitios 2, 6 y 5) bajo la misma intensidad de lluvia (30 mm h^{-1}) no presentan escurrimiento en suelo seco. Pero si la condición inicial del suelo es húmeda, el escurrimiento es del orden de 1 a 5.8 mm h^{-1} .

Al incrementar la intensidad de lluvia (60 mm h^{-1}), solamente el sitio seis no presenta escurrimiento.

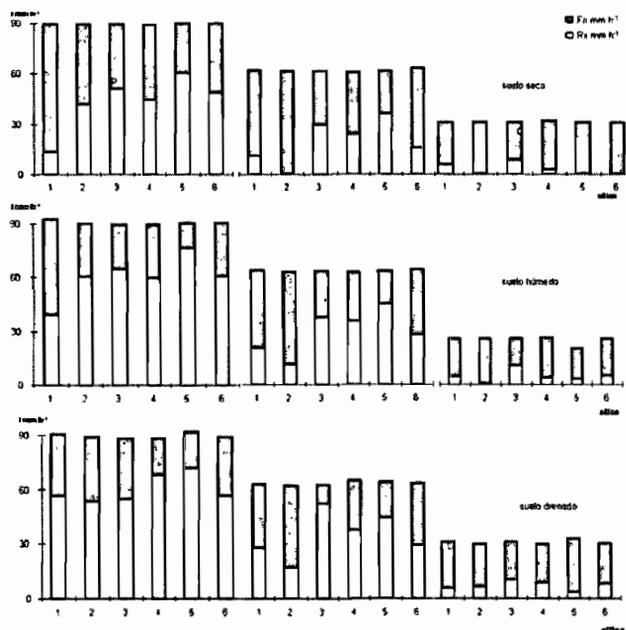


Figura 6. Valores de escurrimiento máximo (R_x) y de infiltración (F_n) en régimen de movimiento permanente para las diferentes intensidades de lluvia (I) y para los diferentes sitios.

Cuadro 6. Representación en porcentaje del escurrimiento máximo (Rx) en función la lluvia simulada y la humectación del suelo.

| Grupo | Humedad del Suelo | Lluvia simulada en mm h ⁻¹ | | |
|------------------|-------------------|---------------------------------------|---------------|---------------|
| | | 30 Rx en % | 60 Rx en % | 90 Rx en % |
| Sin carbonato | Seco | 9 - 28 | 17 - 48 | 15 - 57 |
| | Húmedo | 13 - 40 | 64 - 59 | 44 - 72 |
| | Drenado | 18 - 32 | 45 - 83 | 61 - 75 |
| Con carbonato | Seco | 0 | 0 - 58 | 47 - 67 |
| | Húmedo | 3 - 19 | 18 - 71 | 67 - 85 |
| | Drenado | 12. - 26 | 27 - 71 | 60 - 80 |

Bajo una intensidad de 90 mm h⁻¹ y suelo seco, el escurrimiento es casi idéntico (42 a mm h⁻¹); es decir, de 47 a 67 por ciento del escurrimiento máximo para todos los sitios, excepto el sitio uno que presenta una Rx reducida. (13.9 mm h⁻¹).

CONCLUSIONES

El simulador de lluvias es una herramienta útil y fiable que permite describir la relación escurrimiento-infiltración de un suelo *in situ*.

Es evidente que después de estos resultados la relación escurrimiento-infiltración sobre los suelos de los dos transectos de la cuenca vertiente de Carboneras presenta un comportamiento diferente. Aquí se pueden distinguir tres ambientes receptores del agua:

Suelo seco

Los suelos no carbonatados (sitios 3, 1 y 4) presentan un comportamiento favorable al escurrimiento, que corresponde a la parte baja y alta del transecto eruptivo. En estos suelos el almacenamiento hídrico en la superficie del suelo representa una fracción reducida con relación en el aporte de la lluvia. Por ello, este tipo de suelos favorecen al llenado de los pequeños bordos de retención mediante el escurrimiento superficial.

Suelos carbonatados

Los sitios (2, 6 y 5) presentan un comportamiento favorable a la infiltración, que corresponde a los suelos de las partes alta media y baja del transecto

sedimentario y media del transecto eruptivo. En estos suelos la cantidad de agua infiltrada representa una fracción importante del aporte pluviométrico, afectando la disponibilidad de agua para el llenado de los pequeños bordos de retención.

Suelo húmedo y drenado

El comportamiento hídrico superficial es sensiblemente homogéneo para todos los sitios. Si el suelo está húmedo o drenado, la cantidad de agua que escurre hacia el bordo de retención representa una fracción importante del aporte pluviométrico.

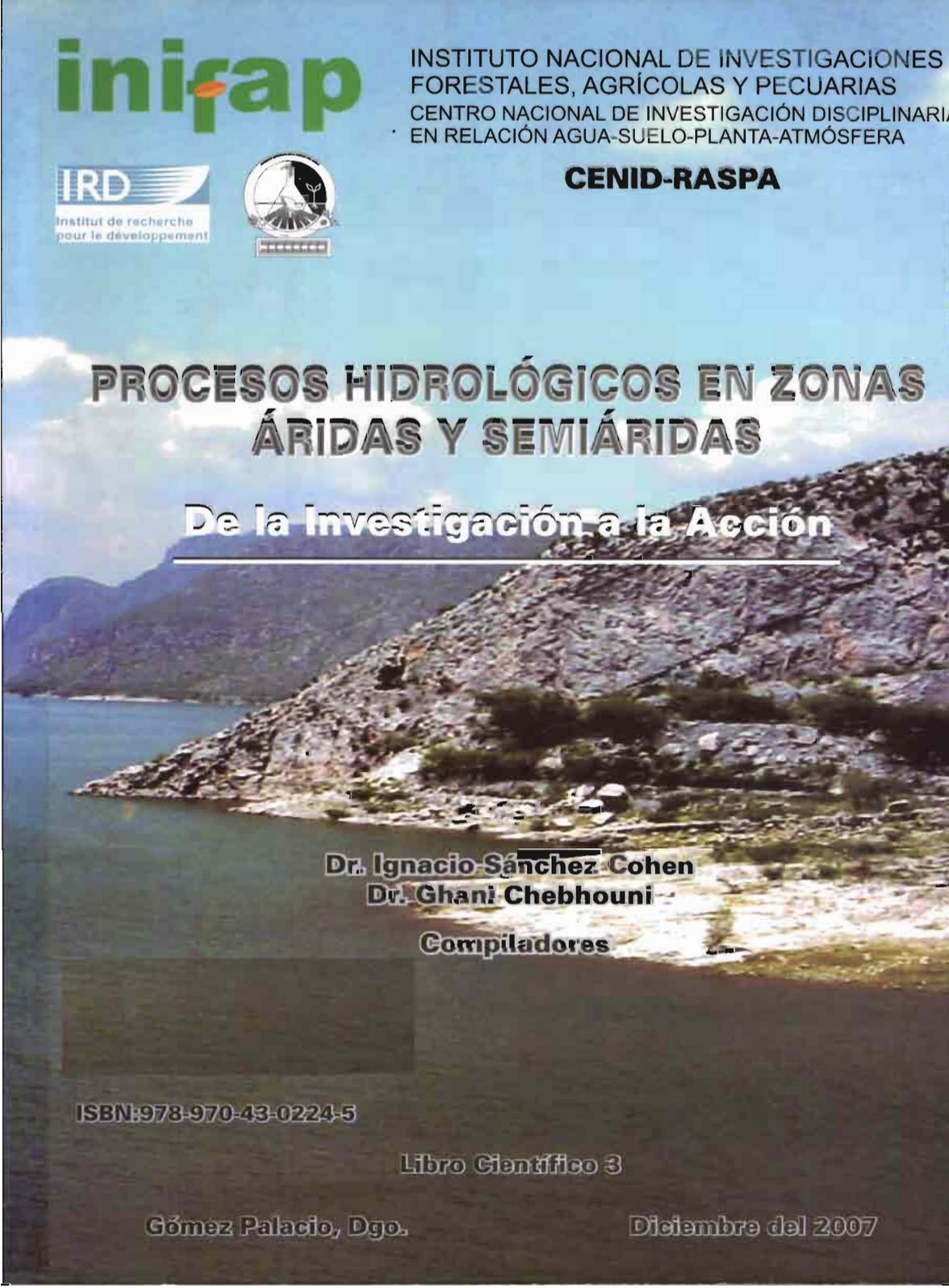
Los resultados encontrados en la relación escurrimiento infiltración de la cuenca de Carboneras son dependientes de la presencia o ausencia del carbonato de calcio en el horizonte superficial (0-5 cm), de la humectación inicial del suelo y de la intensidad de lluvia.

LITERATURA CITADA

- Albergel J. y B. Thebe. 1986. Pluie naturelle. Pluie simulée. Quelle différence sur le ruissellement? ORSTOM, Gouttes et splash, Vol. 3, N° 1.
- ____ J. 1987. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso. Du m² au Km². Etude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse Doct. Université de Paris VI (spécialité : Hydrologie).
- Anaya N., E. 1998. Caracterización y evaluación de la cobertura vegetal en la cuenca del arroyo de Ocuila. Folleto científico N° 10 INIFAP-ORSTOM.
- ____ y H. Barral. 1995. La ganadería y su manejo en relación con los recursos agua y pastizal en la zona semi-árida de México.
- AUDRY, 1973. Perméabilité, méthode Müntz. Dynamique actuelle. *Fiche Technique*.
- Asseline, J., and C. Valentin. 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cahiers d'Hydrologie ORSTOM. Vol XV, N°4, p 321-349.
- ____ 1997. Le simulateur de pluie en 1997 (type ORSTOM, Asseline-Valentin): adaptations aux zones semi-arides et de montagne. IN: De Noni, Georges; Lamachère, Jean-Marie; Roose, Eric (eds.) Erosion en montagnes semi-arides et méditerranéennes. Bulletin - Réseau Erosion (FRA), No 17, p. 272-281.
- Barral, H., I. Orona C. y E. Anaya N. 1993. Manejo ganadero en relación con el recurso agua. Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Region Hidrológica 36.
- Brown, D. 1954. Methods of surveying and measuring vegetation. Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crops. Hurley Berks Bull., No. 42, 1 vol., 223 p.
- Buendía, A. 1998. Análisis hidrológico en parcelas experimentales de la subcuenca Sardinias de la región hidrológica 36. UAAAN-INIFAP-ORSTOM. 59 p.
- Casenave, A. 1982. Le minisimulateur de pluie : conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM, sér. Hydrologie, vol. XIX, n 4 : 207-227.
- ____ 1986. L'apport de la simulation de pluie dans l'analyse des phénomènes de ruissellement et d'infiltration : quelques exemples d'application hydrologiques. In Annales du Comité National Français de Géodésie et Géophysique, vol. 5, 205-218.

- Castillo S., G., J. Y. Loyer, C. G. Gonzalez y R. C. Efrén. 1999. Datos edafológicos 1999, de la cuenca vertiente Carboneras, rancho Atotonilco, estado de Durango–Norte de México.
- Collinet, J., C.Valentin. 1979. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XVII, n° 4.
- Daget, P. et J. Poissonet J. 1969. Analyse phytologiques des Prairies. Applications agronomiques. Cepe-cnrs, montpellier, doc. N° 48, 1 vol., 67 p.
- _____. 1971. Une méthode d'analyse phytologique des prairies. Critères d'application. Ann. Agron., 22, 1 5-41 p.
- Delhoume, J., 1996. Fonctionnement hydro-pédologique d'une toposéquence de sols en milieu aride (Réserve de la Biosphère de Mapimi, Nord-Mexique. Thèse Doct. Université de Poitiers.
- _____. 1997. Fonctionnement hydro-pédologique d'une toposéquence de sols en milieu aride. Reserve de la biosphère de Mapimi, Nord-Mexique. TDM. ORSTOM Editions. Paris, France. 295 p.
- Descroix, L., J. L. González Barrios, J. P. Vandervaere, D. Viramontes y A. Bollery. 2002. An experimental análisis of hydrodynamics behaviour on soils and hills-slopes in a subtropical mountainous environment (Western sierra madre, Mexico). Journal of hydrology. 266 1-14.
- _____. J. F. Nouvelot y J. Estrada. 1997. Geografía de las lluvias en una cuenca del norte de México: Regionalización de las precipitaciones en la Región Hidrológica 36. INIFAP ORSTOM. Gómez Palacio, Dgo.
- Estrada A., J. 1999. Importance et fonctionnement des petits barrages dans une zone semi-aride du Nord-Mexique. Thèse Doct. Université de Montpellier II.
- González C., G. 2002. Fonctionnement hydrodynamique des sols de versant en amont de petits barrages en region semi-aride du Nord Mexique (Ranch Atotonilco). Thèse de doctorat, Université d'Angers, France.
- Horton, R. E. 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. Trans. Amer. Geophys. Union, 14, 446–460.
- Lafforgue, A. 1977. Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Cahiers d'Hydrologie ORSTOM. Vol XIV, n°4.
- _____. et A. Casenave. 1980. Derniers résultats obtenus en zone tropicale sur les modalités de transfert pluie-débit par l'emploi de simulateurs de pluie. La Houille Blanche.

- Loyer, J. Y., S. Moriaud. 1996. Tipología de las unidades de paisaje en la Región Hidrológica 36. Folleto científico No. 6, INIFAP-ORSTOM.
- Nouvelot, J. F. et L. Descroix. 1996. Aridité et sécheresses du Nord-Mexique. Trace (Revista del Centro Francés de Estudios Mexicanos y Centroamericanos, México), No. 30, pp 9-25.
- Thiebaut J. P., G. Gonzalez C. et J. Y. Loyer. 1999. Informe de investigación de simulación de lluvia 1999 en la cuenca Carboneras, rancho Atotonilco, estado de Durango-Norte de México. IRD CENID-RASPA.
- Viramontes P., D. 2000. Comportement hydrodynamique du milieu dans le haut bassin du Nazas (Sierra Madre Occidental, Mexique) causes et conséquences de son évolution. Université Joseph Fourier-Grenoble I, Grenoble, Francia.



inifap

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA
EN RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA



CENID-RASPA

PROCESOS HIDROLÓGICOS EN ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS

De la Investigación a la Acción

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Dr. Ghani Chebhouni

Compiladores

ISBN:978-970-43-0224-5

Libro Científico 3

Gómez Palacio, Dgo.

Diciembre del 2007

**Procesos Hidrológicos
en
Zonas Áridas y Semiáridas**

De la Investigación a la Acción

**Dr. Ignacio Sánchez Cohen
Dr. Ghani Chebhouni**

Compiladores

**INIFAP-CENID RASPA, IRD
2007**

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria
en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.

Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento
Gómez Palacio, Durango. MÉXICO.

Apdo. Postal 41

35150 Cd. Lerdo, Dgo.

Teléfonos y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34

e-mail: inifap.gomez@internetual.com.mx

El contenido de esta publicación podrá reproducirse total o parcialmente con fines específicos de divulgación, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a los autores, al CENID RASPA-INIFAP y al IRD.

ISBN: 978.970-43-0224-5