



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

UNIDAD ACADÉMICA

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO

INTEGRAL DEL AGUA

**ANÁLISIS DEL PROCESO LLUVIA-ESCURRIMIENTO
EN LA CUENCA RÍO CHAPINGO**

T E S I S

**Que como requisito parcial
para obtener el grado de:**



**DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y
USO INTEGRAL DEL AGUA**

DIRECCION GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
Y DE DESARROLLO PROFESIONALES

Presenta:

RICARDO MONTIEL GONZAGA

Bajo la supervisión de: DR. JORGE VÍCTOR PRADO HERNANDEZ

Chapingo, Estado de México, enero 2019



**ANÁLISIS DEL PROCESO LLUVIA-ESCURRIMIENTO EN LA CUENCA RÍO
CHAPINGO**

Tesis realizada por **Ricardo Montiel Gonzaga** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN INGENIERÍA
AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

DIRECTOR:



Dr. Jorge Víctor Prado Hernández

ASESOR:



Ph. D. Laura Alicia Ibáñez Castillo

ASESOR:



Dr. Mario Alberto Vázquez Peña

ASESOR:



Dr. Fermín Pascual Ramírez

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCION GENERAL	1
1.1. OBJETIVOS.....	4
1.1.1. Objetivo general	4
1.1.2. Objetivos específicos	4
1.2. HIPÓTESIS	4
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.4. ORGANIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	5
1.5. LITERATURA CITADA.....	6
2. EVALUACIÓN DEL MODELO DE INFILTRACIÓN DE GREEN-AMPT EN LOS SUELOS DE LA CUENCA RÍO CHAPINGO	7
EVALUATION OF THE GREEN-AMPT INFILTRATION MODEL IN THE SOILS OF THE CHAPINGO RIVER BASIN.....	7
RESUMEN	7
2.1. INTRODUCCION	8
2.2. MATERIALES Y MÉTODOS	9
2.2.1. Modelo de Green-Ampt.....	12
2.2.2. Modelo de Brooks-Corey (1964).....	13
2.2.3. Modelo basado en los datos reportados por Rawls <i>et al.</i> (1983)	13
2.2.4. Modelo de Saxton-Rawls (2006).....	14
2.2.5. Evaluación estadística de los modelos de Green-Ampt.....	14
2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	15
2.4. CONCLUSIONES.....	23
2.5. LITERATURA CITADA.....	24
3. EVALUACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DE LOS MODELOS DE CURVA NUMÉRICA Y GREEN-AMPT EN LA CUENCA RÍO CHAPINGO ...	28
3.1. INTRODUCCION	29
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.2.1. Ubicación de la cuenca y uso de suelo	31
3.2.3. Construcción del modelo hidrológico	33

3.2.4.	Selección de hidrogramas de escurrimiento directo y datos de precipitación.....	33
3.2.5.	Variables de entrada y salida en los modelos hidrológicos.....	34
3.2.6.	Modelo de infiltración de Green-Ampt.....	35
3.2.7.	Modelo de Brooks y Corey para obtener el parámetro ψf	35
3.2.8.	Modelo de escurrimiento de la Curva Numérica	36
3.2.9.	Hidrograma unitario adimensional sintético del SCS	37
3.2.10.	Evaluación estadística de los modelos SCS-CN y Green-Ampt	38
3.3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
3.3.1.	Parámetros del modelo de Green-Ampt.....	39
3.3.2.	Valores de Curva Numérica	40
3.3.3.	Análisis del conjunto de eventos.....	41
3.3.4.	Análisis de los hidrogramas de escurrimiento directo	42
3.4.	CONCLUSIONES.....	48
3.5.	LITERATURA CITADA.....	49
4.	CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS SCS-CN, GREEN-AMPT Y CN4GA EN LA CUENCA RÍO CHAPINGO.....	54
4.1.	INTRODUCCION	55
4.2.	MATERIALES Y MÉTODOS	57
4.2.1.	Área de estudio.....	57
4.2.2.	Construcción de los modelos hidrológicos en HEC HMS.....	58
4.2.3.	Selección de hidrogramas de escurrimiento directo y datos de precipitación.....	58
4.2.4.	Variables de entrada y salida en los modelos hidrológicos.....	59
4.2.5.	Modelo de infiltración de Green-Ampt.....	60
4.2.6.	Modelo de escurrimiento de la Curva Numérica	61
4.2.7.	Modelización hidrológica en el software HEC-HMS.....	62
4.2.8.	Procedimiento Mixto CN4GA	62
4.2.9.	Evaluación estadística de los modelos SCS-CN, Green-Ampt y CN4GA no calibrados y calibrados.....	63
4.3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63

4.3.1. Análisis del volumen total escurrido y escurrimiento pico en eventos no calibrados.....	65
4.3.2. Análisis del volumen total escurrido y escurrimiento pico en eventos calibrados.....	67
4.3.3. Análisis de los hidrogramas de escurrimiento directo estimados con modelos calibrados y no calibrados	68
4.4. CONCLUSIONES.....	74
4.5. LITERATURA CITADA.....	74
5. CONCLUSIONES GENERALES.....	77

INDICE DE TABLAS

Cuadro 1. Características del suelo y sus usos en la cuenca Río Chapingo.	11
Cuadro 2. Valores de ψ_f y K_s usados en los modelos de GA.	16
Cuadro 3. Valores de la RMSE y MRE de la infiltración de los modelos de GA analizados.	17
Cuadro 4. Características del suelo en cada sitio muestreado en la cuenca Río Chapingo.....	32
Cuadro 5. Características de los eventos de lluvia-escurrimiento seleccionados	34
Cuadro 6. Valores de los parámetros de entrada del modelo Green-Ampt.....	39
Cuadro 7. Humedad volumétrica inicial θ_i del suelo registrado antes de cada evento.	40
Cuadro 8. Valores de CN calculados por evento para el modelo de SCS-CN.	41
Cuadro 9. Volúmenes escurridos Q y gastos pico Q_p estimados y medidos por evento.	42
Cuadro 10. Resultados de las pruebas estadísticas de los hidrogramas modelados.	43
Cuadro 11. Características de los eventos de lluvia-escurrimiento modelados en HEC-HMS.	59
Cuadro 12. Valores ponderados por subcuenca de los parámetros del modelo Green-Ampt.....	64


Cuadro 13. Datos hidráulicos e hidrológicos de entrada para el modelo CN4GA en eventos calibrado y no calibrado.....	65
Cuadro 14. Volúmenes de escurrimiento Q y gastos pico Qp observados y estimados con los modelos no calibrados.....	66
Cuadro 15. Volúmenes de escurrimiento Q y gastos pico Qp observados y estimados con los modelos calibrados.....	67
Cuadro 16. Medidas estadísticas de evaluación de la precisión de los hidrogramas de escurrimiento directo estimados con los modelos calibrados y no calibrados.....	68

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de sitios de muestreo en la cuenca Río Chapingo y tipos de suelos.	10
Figura 2. Láminas infiltradas medidas y estimadas con los modelos de Brooks-Corey (1964), SR1 (2006), SR2 (2006) y Rawls et al. (1983) en suelos con agricultura de temporal y pastizal inducido.....	18
Figura 3. Láminas infiltradas medidas y estimadas con los modelos de Brooks-Corey (1964), SR1 (2006), SR2 (2006) y Rawls et al. (1983) en suelos con altos contenidos de materia orgánica con agricultura de temporal, pastizal inducido y reforestación..	20
Figura 4. Láminas infiltradas medidas y estimadas con los modelos de Brooks-Corey (1964), SR1 (2006), SR2 (2006) y Rawls et al. (1983) en suelos compactados y con bajos contenidos de materia orgánica, bajo agricultura de temporal y reforestación.	21
Figura 5. Láminas infiltradas medidas y estimadas con los modelos Brooks-Corey (1964), SR1 (2006), SR2 (2006) y Rawls et al. (1983) en suelos forestales.	22
Figura 6. Subcuencas, tipos de suelos y puntos de muestreo en la cuenca Río Chapingo.....	31
Figura 7. Estructura de los modelos hidrológicos.	33
Figura 8. Representación de los hidrogramas medidos y estimados con los modelos SCS-CN y GA en eventos de volúmenes escurridos menores que $6.35 \times 10^3 \text{ m}^3$. ..	45
Figura 9. Representación de los hidrogramas medidos y estimados con los modelos SCS-CN y GA en eventos de volúmenes escurridos mayores que $8.31 \times 10^3 \text{ m}^3$	47

Figura 10. Subcuencas, usos de suelo y puntos de muestreo en la cuenca Río Chapingo.....	57
Figura 11. Modelo hidrológico de la cuenca río Chapingo realizado en HEC HMS. .	58
Figura 12. Eventos de bajo escurrimiento calibrados y no calibrados modelados con HEC-HMS y CN4GA.	70
Figura 13. Eventos de alto escurrimiento calibrados y no calibrados modelados con HEC HMS y CN4GA.	73

DATOS BIOGRAFICOS

Nombre	Ricardo Montiel Gonzaga	
Año de nacimiento	18 de diciembre de 1980	
Lugar de nacimiento	Atlacomulco, México	
CURP	MOGR801218HMCNNC00	
Licenciatura	Ingeniería en Recursos Naturales Renovables	
Maestría	Análisis Espacial y Geoinformática	
Ámbitos de trabajo	Manejo integral de cuencas, conservación de suelos y aguas, ordenamiento territorial, manejo de sistemas silvícolas, sistemas de información geográfica.	

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Autónoma Chapingo por toda la formación académica recibida, y a todo el personal académico y administrativo.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico otorgado durante mi periodo de estudios de doctorado.
- Al Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso integral del Agua por la formación científica y tecnológica impartida y el apoyo prestado.

A mi comité asesor

- Dr. Jorge Víctor Prado Hernández quien con su sabia dirección de esta investigación, revisiones y correcciones fue posible la realización de los artículos científicos.
- Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo por su valiosa contribución y apoyo en la realización de este trabajo de investigación durante el doctorado.
- Dr. Mario Vázquez Peña por su valioso aporte de revisión y contribución en la realización del trabajo de investigación.

Una mención especial a la comunidad de Tequexquahuac, Texcoco, México y al C. Jorge Pineda Sánchez por el apoyo recibido durante la obtención de datos climáticos.

RESUMEN GENERAL

ANALISIS DEL PROCESO LLUVIA-ESCURRIMIENTO EN LA CUENCA RIO CHAPINGO EVALUATION OF SURFACE RUNOFF FROM THE NUMERICAL CURVE AND GREEN-AMPT MODELS IN THE CHAPINGO RIVER BASIN

Ricardo Montiel Gonzaga¹, Jorge Víctor Prado Hernández²

RESUMEN

La estimación del volumen escurrido con modelos hidrológicos en cuencas no aforadas resulta más económica que usar estaciones hidrométricas; los modelos a usar deben ser evaluados previo a ser implementados. El propósito de esta investigación fue analizar el proceso de lluvia escurrimiento en la cuenca Río Chapingo México; mediante el uso de los modelos SCS-CN, Green-Ampt (GA) y CN4GA integrados en un modelo hidrológico para reproducir los hidrogramas de escurrimiento directo de ocho eventos de lluvia escorrentía. Los parámetros de GA se obtuvieron con tres modelos denominados Brooks-Corey, Rawls y Saxton-Rawls, caracterizados por la forma de obtener la presión capilar del frente de humedecimiento (ψ_f) y la conductividad hidráulica a saturación (K_s), antes de ser usados fueron evaluados con herramientas estadísticas del error, el cual Brooks-Corey resulto ser el mejor. Los resultados de la modelación hidrológica se analizaron con herramientas estadísticas del error. En el análisis de hidrogramas de tres eventos con $Q \geq 8310 \text{ m}^3$ y $Q_p \geq 1.93 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ el modelo GA no calibrado reprodujo mejor los hidrogramas con una RMSE de 0.14 a 0.43 $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$, un MRE de 0.20 a 0.28 y una eficiencia de Nash de 0.92 a 0.95. En cuatro eventos bien definidos con Q inferiores a 6350 m^3 y $Q_p \leq 1.44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, los modelos SCS-CN y GA no calibrados sobrestimaron Q y Q_p con una eficiencia de -1.38 a -7.34. En un evento prolongado ambos modelos estimaron el escurrimiento con una RMSE de 0.07 $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ y un MRE de 0.35 y una eficiencia de 0.71. El modelo CN4GA subestimo Q y Q_p en la mayoría de los eventos no calibrados. En eventos calibrados GA fue con poca diferencia respecto SCS-CN el mejor estimador de los hidrogramas. El modelo CN4GA estimó con menos éxito el escurrimiento pico (Q_p) y subestimó el volumen escurrido.

Palabras Clave: SCS-CN, Green-Ampt, hidrograma observado, humedad inicial del suelo, escurrimiento directo.

ABSTRACT

Estimation of runoff volume with hydrological models in ungauged basins is more economic than using hydrometric stations, the reliability of the models to be used must be evaluated before being implemented. The purpose of this research was to analyze the process of rainfall runoff in the Chapingo River Basin in Mexico; using SCS-CN, Green-Ampt (GA) and CN4GA models already integrated in a hydrological model to replicate the direct runoff hydrograms of eight previously characterized rainfall events. The GA parameters were obtained with three models called Brooks-Corey, Rawls and Saxton-Rawls, characterized by the method of obtain the capillary pressure of the wetting front (ψ_f) and the saturated hydraulic conductivity (K_s), before being used they were evaluated with statistical tools error, which Brooks-Corey was the best. The results of the hydrological modeling were analyzed with statistical error tools. In the analysis of hydrograms of three events with $Q > 8310 \text{ m}^3$ and $Q_p \geq 1.93 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ the uncalibrated GA model was the best estimator of the hydrograms with a RMSE from 0.14 to 0.43 $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$, a MRE from 0.20 to 0.28) and a Nash efficiency of 0.92 to 0.95. In four well defined events with Q less than 6350 m^3 and $Q_p \leq 1.44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, uncalibrated SCS-CN and GA overestimated Q and Q_p with an efficiency of -1.38 to -7.34. In a prolonged event both models estimated runoff with an RMSE of 0.07 $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ and an MRE of 0.35 and an efficiency of 0.71. The CN4GA model underestimated Q and Q_p in most uncalibrated events. In calibrated events GA was by little difference the best hydrogram estimator followed by SCS-CN. The CN4GA model estimated with less success the peak runoff (Q_p) and underestimated the runoff volume.

Keywords: SCS-CN, Green-Ampt, observed hydrogram, initial soil moisture, direct runoff.

Tesis de doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo.

¹Estudiante del doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA).

²Profesor investigador de posgrado Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA).

DEDICATORIA

A mi esposa Leticia García González, a mi hijo Ángel Montiel García y Ariadna Eusebio García

A mis padres Rafael y Mariana; a mis hermanos Gabriel, Jeimy, Sandra, Eric y Rafael por su apoyo, valioso ejemplo de trabajo y perseverancia.

A mis amigos Alejandro Pereda Martínez, Teobaldo Luciano Hernández Cruz y Maximiliano González Martínez por el apoyo brindado durante la obtención de los datos.

1. INTRODUCCION GENERAL

La modelación hidrológica en cuencas hidrográficas que no cuentan con sistemas de aforo es de gran importancia para analizar el escurrimiento superficial, ya que es económico y no requiere de personal operativo, ello implica que los hidrólogos tengan que aplicar técnicas y metodologías para estimar el escurrimiento superficial (Ajmal *et al.*, 2016). Sus estimaciones y resultados podrán usarse para el diseño de obras de excedencia o para crear un sistema de alerta temprana para prevenir a la población de inundaciones, o para estimar el volumen ofertado en un tiempo dado para que los tomadores de decisiones puedan planificar su uso y distribución a los diferentes sectores de la población. La fiabilidad de las estimaciones de los modelos depende en gran medida del tipo de modelo hidrológico a usar, no obstante, previo a su aplicación deben ser evaluados. La modelación de los escurrimientos se ha abordado con diferentes enfoques y metodologías basados en modelos hidrológicos empíricos y teóricos (Landini *et al.*, 2007), modelos físicos y redes neuronales artificiales (Logsdon *et al.*, 2009). En México debido a la poca información hidrométrica y pluviométrica, la modelación hidrológica es de gran importancia ya que permite usar los conocimientos generados por investigadores en cuencas experimentales a cuencas de condiciones ambientales similares con un mínimo de información disponible (Rodríguez *et al.*, 2015). El método racional y el modelo hidrológico de Curva Numérica del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS-CN) son los más aplicados en varios países e incluyendo México (Alonso *et al.*, 2014) y el modelo de Green-Ampt es el menos usado. El modelo físico de Green-Ampt simula de forma aceptable el proceso de infiltración y el escurrimiento superficial; pero tiene la desventaja que requiere mayor cantidad de datos y es insensible a algunos parámetros (Francisco-Nicolas *et al.*, 2010). El modelo SCS-CN es uno de los más comunes y es utilizado para predecir escurrimiento ya que no considera la intensidad y duración de la lluvia, solo la precipitación total; es un modelo aplicable a pequeñas cuencas agrícolas que permite estimar el escurrimiento con precisión aceptable (Sánchez *et al.*, 2003). El modelo de Green-Ampt (GA) es un modelo de infiltración que puede integrarse a un modelo hidrológico para estimar escurrimiento; es un modelo basado en tiempo que puede simular el impacto de la intensidad de la lluvia y duración del proceso

de infiltración. Green y Ampt representa de forma aceptable el movimiento del agua en suelos estratificados (Ma *et al.*, 2011), y para estimar escurrimientos superficiales en cuencas con diferentes usos del suelo y condiciones topográficas (Van Mullen, 1991).

El modelo CN4GA (CN for GA) fue propuesto por Grimaldi *et al.* (2013a), es un modelo mixto que resulta de una combinación de los métodos de SCS-CN y Green-Ampt, ha sido aplicado para estimar la esorrentía en pequeñas cuencas no aforadas de Italia y Estados Unidos el cual ha tenido resultados satisfactorios. Este modelo tiene la idea base de que la abstracción inicial (I_a) y la precipitación efectiva (P_e) calculadas según el enfoque SCS-CN, son utilizados para estimar dos parámetros de GA: el tiempo de estancamiento (t_p) y la conductividad hidráulica efectiva (K_{eff}).

En este trabajo se implementaron los modelos SCS-CN Green- Ampt y el modelo de CN4GA en la cuenca río Chapingo cuya superficie es de 15.46 km² el cual fueron integrados en un modelo hidrológico para estimar el escurrimiento superficial y evaluar la efectividad de estos modelos como herramientas potenciales para usarse para este fin en otras cuencas con características similares a la del río Chapingo. La cuenca usada tiene tres usos de suelo predominantes: zona urbana en la parte baja, agricultura de temporal con bosque reforestado en la zona media; en la parte alta tiene bosque reforestado y bosque de coníferas.

Previo a la modelación hidrológica se hizo un muestreo de suelos en dieciocho sitios de la cuenca los cuales fueron definidos con base al tipo y uso de suelo, y en un laboratorio se determinaron sus características físicas. Se obtuvieron los parámetros hidráulicos de GA para cada sitio muestreado con tres modelos de GA denominados Brooks-Corey (1964), Rawls *et al.* (1983) y Saxton-Rawls (2006), el cual se caracterizaron por la forma de obtener la presión capilar en el frente de humedecimiento (ψ_f) y la conductividad hidráulica a saturación (K_s). Previo a ser usados los datos obtenidos de GA con los diferentes modelos y con la finalidad de obtener certeza de la representatividad de los datos se evaluaron los parámetros hidráulicos de GA mediante herramientas estadísticas del error. Los parámetros hidráulicos obtenidos para cada sitio muestreado se ponderaron para obtener un valor para cada uno de las ocho subcuencas delimitadas para la cuenca río Chapingo, en el caso de los datos de GA empleados en el modelo CN4GA fueron ponderados para obtener un único valor para la cuenca. Una vez obtenido

los parámetros hidráulicos de GA se procedió a diseñar y alimentar de datos los modelos hidrológicos. Para la modelación se eligieron ocho eventos de lluvia escurrimiento de máximo escurrimiento ocurridos en él año 2014, 2016 y 2017, siete de ellos fueron eventos aislados bien definidos y uno prolongado de baja intensidad con lluvias intermitentes. La obtención de los datos climáticos se recopiló de tres estaciones meteorológicas automatizadas las cuales se construyeron y diseñaron durante los dos primeros años de investigación; las estaciones se instalaron en la parte alta, media y baja de la cuenca. La modelación de SCS-CN y GA se hicieron en el software HEC-HMS y la modelación con CN4GA se empleó el software EBA4SUB. Los modelos no fueron calibrados con el propósito de visualizar la efectividad de los mismos en la reproducción de los hidrogramas observados y emplearlos en cuencas no aforadas; después los modelos fueron calibrados para visualizar de nuevo la efectividad de estos bajo el mismo propósito de estudio. La evaluación de la precisión en la estimación de los hidrogramas de escurrimiento directo realizadas con los modelos SCS-CN, Green-Ampt y CN4GA, se hicieron con las medidas estadísticas raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), el error relativo medio (MRE) y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF) (Nash-Sutcliffe, 1970). La evaluación de la precisión de la estimación de los caudales pico de los eventos (Q_p) se hizo con el Error Relativo (RE).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

- Analizar el proceso lluvia-escurrimiento mediante los modelos del SCS-CN y de infiltración de Green-Ampt, integrados en un modelo hidrológico, para determinar su aplicabilidad en cuencas no aforadas de características similares a la cuenca Río Chapingo.

1.1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar morfométrica y biofísicamente la cuenca del río Chapingo.
- Evaluar los modelos de Rawls, Brooks-Corey, Saxton-Rawls en la estimación de los parámetros hidráulicos (K_s y ψ_f) del modelo de infiltración de Green-Ampt y validar la infiltración estimada mediante mediciones en campo.
- Estimar escurrimiento superficial en la cuenca río Chapingo, empleando los modelos de Green – Ampt, SCS-CN y el modelo mixto CN4GA integrados en un modelo hidrológico, previamente calibrados y sin calibrar.
- Evaluar el error de la estimación de la infiltración, los escurrimientos superficiales estimados mediante herramientas estadísticas del error y Nash-Sutcliffe.

1.2. HIPÓTESIS

La modelación del proceso lluvia-escurrimiento resulta más preciso con los modelos de infiltración basados en principios físicos que en los empíricos y por tanto son una mejor opción para estimar el escurrimiento superficial en cuencas no aforadas.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La cuenca río Chapingo fue elegida para realizar el trabajo de investigación debido a la cercanía para su instrumentación, vigilancia y seguimiento en el monitoreo de la respuesta hidrológica ante la ocurrencia de eventos de lluvia escurrimiento, además es una cuenca que puede usarse para evaluar diversas metodologías referentes al ámbito hidrológico e hidráulico. Los modelos de SCS-CN, Green-Ampt y el modelo mixto CN4GA fueron implementados en la cuenca con la finalidad de evaluar el potencial de los modelos en la estimación de los hidrogramas observados, el modelo con mejor potencial para reproducir los hidrogramas de eventos lluvia escurrimiento será utilizada como una herramienta para estimar el escurrimiento superficial en cuencas con similitudes de forma, vegetación, climas y suelos a la cuenca río Chapingo.

1.4. ORGANIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA TESIS

El proceso de elaboración de la tesis se aplicaron tres modelos de GA para obtener los parámetros hidráulicos y evaluar la representatividad de los mismos, posteriormente se obtuvo un valor ponderado de los parámetros hidráulicos del modelo de GA para cada subcuenca y uno para la cuenca que fueron empleados en los modelos GA y CN4GA respectivamente, los modelos se integraron en un modelo hidrológico para la cuenca río Chapingo y se modelaron en conjunto con el modelo SCS-CN que se desarrolló a la par durante la construcción de modelos. Se verificó la efectividad de las estimaciones realizadas por los modelos mediante pruebas estadísticas del error. El proceso descrito anteriormente se dividió en tres capítulos que describen cómo se fue realizando cada fase hasta cumplir el objetivo propuesto. El **capítulo 1** corresponde al desarrollo y explicación de la introducción, objetivos, hipótesis y justificación del trabajo.

En el **capítulo 2** describe la metodología que se siguió para obtener los parámetros hidráulicos del suelo (ψ_f y K_s) del modelo de infiltración de Green-Ampt, así como la forma en que fueron evaluados los modelos Brooks y Corey (1964), Rawls *et al.* (1983) y Saxton-Rawls (2006) empleados en la obtención de dichos parámetros. En el **capítulo 3** describe la modelación hidrológica con el uso del modelo empírico de SCS-CN y el

modelo físico de infiltración de Green-Ampt para estimar el escurrimiento superficial en la cuenca Río Chapingo, el cual fueron modelados en el software HEC-HMS sin realizar una calibración previa. En el **capítulo 4** describe la modelación hidrológica con el uso de los modelos SCS-CN, Green-Ampt y el modelo mixto CN4GA para estimar el escurrimiento superficial en la cuenca Río Chapingo en eventos calibrados y no calibrados.

1.5. LITERATURA CITADA

- Alonso-Sánchez, H., L. A. Ibáñez-Castillo, R. Arteaga-Ramírez, & M. A. Vázquez-Peña. 2014. Identificación de curva de escurrimiento en tres microcuencas del río Coatán, Chiapas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(4):153-161.
- Francisco-Nicolás, N., A. Turrent-Fernández, H. E. Flores-López, M. R. Martínez-Menes, y J. F. Enríquez-Quiroz. 2010. Estimación del escurrimiento superficial con el método SCS-CN en el trópico subhúmedo de México. *Terra Latinoamericana*. 28:71-78.
- Grimaldi, S., A. Petroselli, and N. Romano. 2013a. Green-Ampt Curve-Number mixed procedure as an empirical tool for rainfall-runoff modelling in small and ungauged basins. *Hydrological processes*. pp: 1253-1264.
- Logsdon, R. A., S. G. Bajwa and V. Vibhava. 2009. Development of a Distributed Artificial Neural Network for Hydrologic Modeling. *In: 7th World Congress on Computers in Agriculture and Natural Resources*. ASABE Publication Number 701P0409. Zazueta, F.S. & Xin, J. (Eds). Reno, Nevada USA.
- Rodríguez L. Y., y N. Marrero de L. 2015. Simulación hidrológica en dos subcuencas de la cuenca del río Zaza de Cuba. *Ing. Hidraul. y Amb.* XXXVI (2):109-123.

2. EVALUACIÓN DEL MODELO DE INFILTRACIÓN DE GREEN-AMPT EN LOS SUELOS DE LA CUENCA RÍO CHAPINGO

EVALUATION OF THE GREEN-AMPT INFILTRATION MODEL IN THE SOILS OF THE CHAPINGO RIVER BASIN

Ricardo Montiel Gonzaga², Jorge Víctor Prado Hernández²

RESUMEN

El uso de modelos matemáticos es una opción rápida para estimar la infiltración durante un evento de lluvia-escorrentía, pero es indispensable evaluar su representatividad para usar con certidumbre sus resultados. El modelo físico de Green-Ampt (GA) ha sido usado por algunas instituciones de México que recomiendan usar los parámetros hidráulicos citados por Rawls del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA); sin embargo, el uso de estos datos para estimar la infiltración del agua genera dudas sobre su representatividad ya que fueron obtenidos a partir de suelos con características físicas, químicas y uso de suelo y vegetación diferentes. El propósito de esta investigación fue evaluar la representatividad de los parámetros hidráulicos del modelo de GA en suelos de la cuenca Río Chapingo, mediante la comparación de láminas infiltradas acumuladas estimadas con los modelos y las obtenidas en campo con el método del doble cilindro en dieciocho sitios de la cuenca. Para ello, se analizaron tres modelos de GA, diferenciados por la forma de obtener la presión capilar en el frente húmedo (ψ_f) y la conductividad hidráulica a saturación (Ks); los modelos se denominaron Brooks-Corey (1964), Rawls *et al.* (1983) y Saxton-Rawls (2006), de este último se derivaron dos submodelos llamados SR1 (2006) y SR2 (2006). La representatividad de los modelos se evaluó mediante las medidas estadísticas denominadas Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (RMSE) y Error Relativo Medio (MRE). Se observó que el mejor modelo fue Brooks-Corey (BC), seguido en forma descendente en precisión por los modelos SR2 (2006), SR1 (2006) y Rawls (1983), por lo que se sugiere usar valores de los parámetros ψ_f y Ks obtenidos mediante pruebas físicas para la cuenca Río Chapingo y en cuencas con suelos de condiciones similares.

Palabras Clave: Infiltración, Green-Ampt, conductividad hidráulica, lamina infiltrada acumulada.

SUMMARY

The use of mathematical models is an alternative option for estimating soil infiltration during a rainfall event, but it is indispensable to evaluate their representativeness in order to use their results with certainty. The Green-Ampt (GA) physical model has been used by some Mexican institutions that recommend using the hydraulic parameters cited by Rawls of the United States Department of Agriculture (USDA); however, the use of these data to estimate water infiltration generates doubts about their representativeness since they were obtained from soils with different physical, chemical characteristics, uses and vegetation. The objective of this research was to evaluate the representativeness of the hydraulic parameters of the GA model in soils of the Chapingo River Basin, Mexico, under the premise that the GA model does not efficiently model infiltration using the Rawls values. For this purpose, the estimated accumulated infiltrated laminae were compared with models and the field measurements with the double cylinder method in 18 sites of the basin. Three GA models were analyzed, differentiated by the way of obtaining the capillary pressure in the wet front (ψ_f) and the hydraulic conductivity to saturation (Ks). The models were named Brooks-Corey (1964), Rawls *et al.* (1983) and Saxton-Rawls (2006), from the latter were derived two sub-models called SR1 (2006) and SR2 (2006). The representativeness of the models was evaluated with statistical measures called the root mean square error (RMSE) and the mean relative error (MRE). The best model was Brooks-Corey, followed in precision by SR2 (2006), SR1 (2006) and Rawls (1983); therefore, it is suggested to use values of the parameters ψ_f and Ks obtained through physical tests for the Chapingo River basin and in basins with soils of similar conditions.

Keywords: water in the soil, Brooks-Corey, hydraulic conductivity, Green-Ampt, saturated flow, modeling in basins.

Tesis de doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo.

¹Estudiante del doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA).

²Profesor investigador de posgrado Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA).

2.1. INTRODUCCION

Los modelos matemáticos orientados a estimar la infiltración del agua en cuencas para la recarga de acuíferos ofrecen una solución rápida, pero su confiabilidad y su costo dependen de su marco conceptual. Algunos de los modelos empíricos tradicionales utilizados para cuantificar la infiltración son Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton-Philip (Ravi y William, 1998) que pueden reproducir satisfactoriamente la infiltración acumulada pero únicamente para las condiciones del suelo en que fueron determinados (Márquez y Guevara, 2011). Otro inconveniente de los modelos empíricos es que no explican la dinámica de la infiltración como los modelos físicos. Se ha observado que el modelo físico de Green-Ampt (GA) representa de forma aceptable el movimiento del agua en suelos estratificados (Ma *et al.*, 2011), así como el escurrimiento superficial en cuencas hidrográficas con diferentes usos del suelo y condiciones topográficas (Van Mullen, 1991). En estudios comparativos entre los modelos de GA y de curva numérica (CN) para estimar escurrimientos superficiales en cuencas, algunos investigadores no encontraron diferencias significativas entre ellos (Kabiri *et al.*, 2013), pero otros encontraron resultados más precisos con el modelo de GA por evento de lluvia y en periodos mensuales para ciertos usos de suelo (Ficklin y Zhang, 2013; Viji *et al.*, 2015). Las afirmaciones y los éxitos obtenidos en trabajos previos muestran que el modelo de GA es aplicable en cuencas y su uso no se restringe solo a suelos agrícolas.

El procedimiento de obtención de los parámetros hidráulicos del modelo GA es fundamental para predecir con buena precisión la infiltración del agua en el suelo; y para obtenerlos, es necesario generar funciones de pedotransferencia, así como aplicar modelos para suelos no homogéneos de una misma región (Landini *et al.*, 2007). Brooks y Corey (1964) propusieron una metodología que permiten calcular la presión de succión en el frente húmedo (ψ_f) a partir de la integración de la ecuación de la conductividad hidráulica relativa. La metodología de Brooks y Corey (1964) fue adaptada por Rawls *et al.* (1983) para la obtención de los parámetros de GA en 1200 suelos de 34 estados de EE. UU., cuyos valores fueron reportados por clase textural. En México, Fuentes (1986) sugiere usar para el diseño de riego por gravedad los parámetros de GA reportados por Brakensiek (1977) y Rawls *et al.* (1983) del Departamento de Agricultura de Estados

Unidos (USDA); respecto al uso de estos parámetros en cuencas forestales de México no hay suficiente investigación que respalde su aplicabilidad.

Los parámetros hidráulicos de GA también pueden ser estimados por el método inverso teniendo datos de infiltración, pero con el inconveniente de que sólo son válidos para las condiciones del suelo en las que fueron determinados por lo que se debe tener cuidado en su extrapolación (Hopmans y Šimůnek, 1999).

Este trabajo se realizó en la cuenca Río Chapingo, México, que en el siglo pasado sufrió procesos de erosión hídrica ocasionados por las actividades agropecuarias y el uso irracional de los bosques; en consecuencia, la parte media de la cuenca fue la más afectada al incrementar los escurrimientos superficiales, formación de cárcavas y ocurrir el arrastre masivo de suelo al ex Lago de Texcoco. Las prácticas de conservación de suelo y agua, así como la restauración forestal efectuadas en las décadas de los setentas del siglo pasado por la entonces Secretaria de Recursos Hidráulicos (SHR) contribuyeron a mitigar la degradación de los recursos naturales de tal forma que la infiltración y los escurrimientos superficiales cambiaron (Cruickshank, 2007).

El objetivo de este estudio fue evaluar la infiltración acumulada en suelos de la cuenca Río Chapingo, bajo la premisa de que la aplicación de los parámetros hidráulicos del modelo de GA reportados por Rawls *et al.* (1983) para los suelos de EE.UU. no reproducen convenientemente el fenómeno de la infiltración en los suelos de la cuenca. Para ello, se evaluaron tres modelos de GA, diferenciados en la forma de obtener la presión capilar en el frente de humedecimiento y la conductividad hidráulica a saturación (ψ_f y K_s), determinándose a través de pruebas físicas y retomados de los valores sugeridos por Brakensiek (1977) y Rawls *et al.* (1983).

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se realizó en la cuenca Río Chapingo, Texcoco, Estado de México y forma parte de la cuenca del Valle de México en la Altiplanicie Mexicana, con coordenadas geográficas extremas 19° 29' 22.83" N, 98° 53' 09.17" O y 19° 25' 15.28" N, 98° 45' 40.31" O y una altitud de 2250 a 3580 msnm.

El trabajo inició con la selección de dieciocho sitios de muestreo de suelos, resultado de un análisis espacial de la información cartográfica de las unidades de suelo de la carta edafológica E14B31 a escala 1:50000, obtenida del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2004), y de la capa de información de uso de suelo y vegetación. De esta forma, los sitios de muestreo resultaron con distintos tipos de: textura, uso de suelo y vegetación (Figura 1, Cuadro 1).

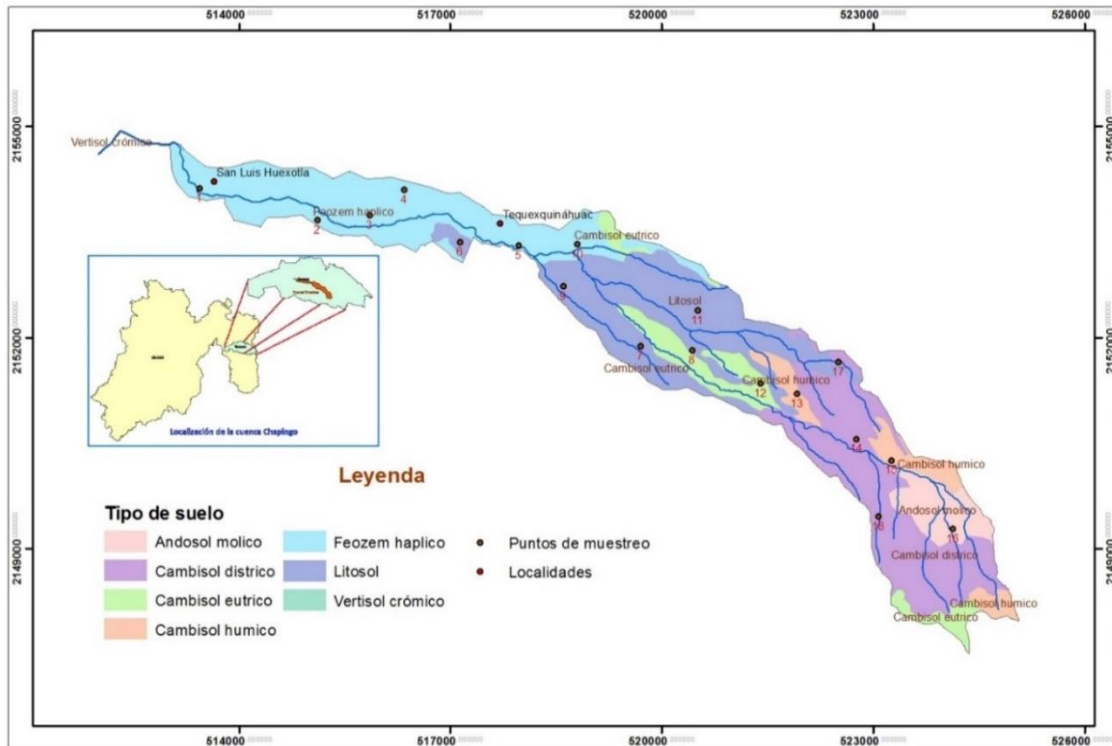


Figura 1. Ubicación de sitios de muestreo en la cuenca Río Chapingo y tipos de suelos.

Cuadro 1. Características del suelo y sus usos en la cuenca Río Chapingo.

Sitio	Textura	Uso de suelo y vegetación	Tipo de suelo
1	Arena francosa	Pastizal Inducido, Agricultura de Temporal	Feozem Háplico
2	Arena francosa	Agricultura de Temporal	Feozem Háplico
3	Franco arenoso	Pastizal Inducido	Feozem Háplico
4	Franco arcillo-arenoso	Agricultura de Temporal	Feozem Háplico
5	Franco arenoso	Pastizal Inducido	Feozem Háplico
6	Franco	Agricultura de Temporal	Litosol
7	Franco arenoso	Reforestación eucalipto, cedro	Litosol
8	Franco arenoso	Reforestación eucalipto, cedro	Litosol
9	Arena francosa	Reforestación de pino, eucalipto y cedro	Litosol
10	Arena francosa	Agricultura de Temporal	Feozem Háplico
11	Franco	Reforestación cedro, pino	Litosol
12	Franco arcillo-arenoso	Pastizal Inducido con Bosque Encino	Cambisol Eútrico
13	Franco arenoso	Agricultura de Temporal, Pastizal Inducido	Cambisol Húmico
14	Franco	Reforestación de cedro	Cambisol Dístrico
15	Franco	Zacatonal con Bosque encino	Cambisol Húmico
16	Franco arenoso	Bosque de encino-abies	Andosol Mólico
17	Franco	Agricultura de Temporal	Cambisol Dístrico
18	Franco arenoso	Bosque de pino	Cambisol Dístrico

En los dieciocho sitios seleccionados se realizó un muestreo de suelos a una profundidad de 0 a 30 cm y en un laboratorio se determinó la textura por el método de Bouyoucos modificado por Day (1965). La densidad real y aparente se determinaron por los métodos del picnómetro y de la parafina, respectivamente, según la metodología establecida por la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

En los sitios de muestreo se realizaron pruebas de infiltración por el método del infiltrómetro, usando un limnómetro de gancho, con centésima de centímetro de precisión, como instrumento de medida de la lámina infiltrada. Las pruebas de infiltración tuvieron una duración de 2.5 a 3 horas con cargas constantes de 10 cm. La toma de lectura de la lámina infiltrada fue de 30 segundos durante los primeros 15 minutos, de 1 minuto al concluir la primera hora y cada 5 minutos hasta el final de la prueba. Con la información recabada se obtuvo la infiltración acumulada observada (IAO).

Las láminas infiltradas estimadas para cada sitio se obtuvieron con la aplicación del modelo de infiltración de Green-Ampt.

2.2.1. Modelo de Green-Ampt

El modelo de Green y Ampt tiene la siguiente forma (Fuentes, 1992; McCuen, 1998)

$$I(t) = K_s t + \gamma \ln \left(1 + \frac{I}{\gamma} \right) \quad \text{con} \quad \gamma = (h + \psi_f)(\theta_s - \theta_i) \quad (1)$$

donde; $I(t)$ es la infiltración acumulada (cm) en el tiempo t (h); ψ_f es la presión capilar en el frente de humedecimiento (cm); h es el tirante de agua sobre la superficie (cm); θ_s es el contenido de humedad a saturación del suelo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_i es el contenido de humedad inicial del suelo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) y K_s es la conductividad hidráulica a saturación (cm h^{-1}).

El modelo de Green-Ampt tiene las siguientes hipótesis fundamentales: El suelo es homogéneo y la humedad antecedente es uniforme en todo el perfil. El flujo del agua en el suelo es vertical en forma de pistón, está totalmente saturado desde la superficie hasta el frente húmedo, por debajo, el suelo continúa en las condiciones previas a la precipitación, y medida que el frente húmedo avanza estas condiciones permanecen validas (Tucci, 1993).

Los parámetros hidráulicos ψ_f , K_s y θ_s son propiedades particulares de cada suelo. En este trabajo la humedad volumétrica (θ_s) a saturación de cada suelo fue obtenido en laboratorio, considerando una tensión del suelo de 0 bar, la humedad inicial (θ_i) se determinó en campo, previo a los ensayos de infiltración con el infiltrómetro. Los parámetros ψ_f y K_s de la ecuación (1) se obtuvieron con tres modelos que a continuación se describen.

2.2.2. Modelo de Brooks-Corey (1964)

Este modelo fue abreviado como BC, en el que el parámetro K_s resultó de determinaciones en laboratorio con un permeámetro de carga constante y el parámetro ψ_f se obtuvo con la ecuación (2), obtenida por Ogden y Saghafian (1997):

$$\psi_f = \frac{2\lambda + 3}{2\lambda + 2} \left(\frac{\psi_b}{2} \right) \quad (2)$$

donde λ es el índice de distribución del tamaño del poro y ψ_b es la presión de entrada de aire (cm) (Brakensiek, 1977; Saxton y Rawls, 2006).

Los valores de λ y ψ_b se obtuvieron resolviendo simultáneamente las ecuaciones (3) (Van Genuchten, 1980) y (4) (Brooks y Corey, 1964) para la saturación efectiva del suelo (S_e). Para ello, se emplearon las curvas de tensión de humedad obtenidas en laboratorio a tensiones de 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.33, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0, 11.0, 13.0, 15.0, 16.0 y 17.0 bar.

$$S_e = \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \quad \text{para } \psi \geq \psi_b \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \quad (4)$$

donde θ es el contenido de agua en el suelo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), correspondiente a una presión capilar ψ (cm); θ_r es el contenido de agua a humedad residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); y ϕ , es la porosidad total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). El valor de la humedad residual (θ_r) se obtuvo a una tensión de 17 bar y la porosidad total (ϕ) se obtuvo con la ecuación (5):

$$\phi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} * 100 \quad (5)$$

donde ρ_b es la densidad aparente y ρ_s es la densidad real, ambas en g cm^{-3} .

2.2.3. Modelo basado en los datos reportados por Rawls *et al.* (1983)

En este modelo, los valores de los parámetros ψ_f y K_s fueron tomados como los valores medios de las clases texturales, reportados por Rawls *et al.* (1983).

2.2.4. Modelo de Saxton-Rawls (2006)

En este modelo se hicieron dos subdivisiones los cuales se llamaron SR1 (2006) y SR2 (2006), y se diferenciaron en la forma de obtener la conductividad hidráulica a saturación. El submodelo SR1 (2006) usó las ecuaciones de pedotransferencia de Saxton- Rawls (2006) para estimar la presión de entrada de aire (ψ_b) y la conductividad hidráulica a saturación (K_s), en función del contenido de arena, arcilla y materia orgánica como se indica en las ecuaciones (6) y (7), respectivamente:

$$\psi_b = \psi_{et} + (0.02\psi_{et}^2 - 0.113\psi_{et} - 0.70) \quad (6)$$

$$K_s = 1930(\theta_s - \theta_{33})^{(3-\beta)} \quad (7)$$

donde, ψ_{et} es una primera solución del valor de ψ_b (KPa); θ_s es el contenido de humedad volumétrico a saturación ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_{33} es el contenido de humedad volumétrico correspondiente a una tensión de 33 KPa ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); β es la pendiente del logaritmo de la curva de tensión-humedad y todos ellos están en función del contenido de arena, arcilla y materia orgánica. El parámetro ψ_f se obtuvo con la ecuación (2), sustituyendo el valor de ψ_b de la ecuación (6) y el valor de λ , obtenido de resolver simultáneamente las ecuaciones (3) y (4) del modelo de Brooks-Corey (1964).

El submodelo SR2 (2006) usó el mismo procedimiento del submodelo anterior para obtener el valor de ψ_f . El valor de K_s fue obtenido a partir de los calculados con el permeámetro de carga constante.

2.2.5. Evaluación estadística de los modelos de Green-Ampt

La representatividad de los parámetros hidráulicos de los modelos de GA se valoró a través de la evaluación de la precisión en la estimación de las láminas infiltradas acumuladas; para ello, se calculó la Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Error Relativo Medio (MRE), definidos como (Ramesh *et al.*, 2005; Ma *et al.*, 2009):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (8)$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(P_i - O_i)}{O_i} \right| \quad (9)$$

donde N es el número total de observaciones, O_i son los datos observados y P_i los datos estimados.

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de ψ_f estimados con el modelo de Brooks-Corey (1964) y los submodelos SR1 (2006) y SR2 (2006) para las dieciocho muestras se ubicaron dentro del rango de valores reportados por Rawls *et al.* (1983) por clase textural (Cuadros 2). En suelos con agricultura de temporal y pastizales, los modelos de Rawls *et al.* (1983) y Saxton-Rawls (2006) tuvieron similitud en los valores de ψ_f (valores bajos); los valores obtenidos por Brooks-Corey (1964) para estos tipos de suelos no hubo concordancia (valores más altos). En suelos forestales y de reforestación, el modelo de Saxton-Rawls (2006) y Brooks-Corey (1964) tuvieron valores de ψ_f cercanos entre ambos. Del análisis anterior se observó que asignar a un suelo el valor promedio de ψ_f de la clase textural sugerido por Rawls *et al.* (1983), puede resultar erróneo ya que su desviación estándar es considerable.

Los valores de K_s estimados con el permeámetro de carga constante y los estimados con el submodelo SR1 (2006) fueron superiores a los valores promedios de las clases texturales reportados por Rawls *et al.* (1983) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores de ψ_f y K_s usados en los modelos de GA.

Sitio	Brooks-Corey (1964)		Rawls <i>et al.</i> (1983)		Saxton-Rawls (2006)		
	ψ_f (cm)	K_s (cm h ⁻¹)	ψ_f^{\dagger} (cm)	K_s (cm h ⁻¹)	ψ_f (cm)	K_s^{\ddagger} (cm)	K_s^{\S} (cm)
1	13.31	7.06	6.13 (1.35-27.94)	5.98	1.12	9.30	7.06
2	20.18	9.59	6.13 (1.35-27.94)	5.98	5.00	6.91	9.59
3	23.33	3.99	11.01 (2.67-45.47)	2.18	19.11	3.09	3.99
4	26.73	12.54	21.85 (4.42-108.0)	0.30	34.36	0.79	12.54
5	19.07	9.79	11.01 (2.67-45.47)	2.18	11.80	4.06	9.79
6	23.91	1.04	8.89 (1.33-59.38)	0.68	35.59	2.59	1.04
7	17.30	47.60	11.01 (2.67-45.47)	2.18	22.12	2.58	47.60
8	23.32	14.18	11.01 (2.67-45.47)	2.18	21.47	3.27	14.18
9	11.47	31.90	6.13 (1.35-27.94)	5.98	3.46	7.11	31.90
10	26.45	9.41	6.13 (1.35-27.94)	5.98	1.90	9.04	9.41
11	18.80	11.47	8.89 (1.33-59.38)	0.68	32.25	2.24	11.47
12	17.92	4.73	21.85 (4.42-108.0)	0.30	25.14	1.38	4.73
13	19.68	27.12	11.01 (2.67-45.47)	2.18	24.93	1.85	27.12
14	30.32	19.66	8.89 (1.33-59.38)	0.68	45.21	1.91	19.66
15	33.65	109.26	8.89 (1.33-59.38)	0.68	35.33	5.88	109.26
16	26.37	121.15	11.01 (2.67-45.47)	2.18	27.48	7.97	121.15
17	28.83	4.32	8.89 (1.33-59.38)	0.68	31.51	2.13	4.32
18	32.53	172.88	11.01 (2.67-45.47)	2.18	15.06	7.73	172.88

[†]Los valores fuera del paréntesis corresponden a los valores promedio de la clase textural y la información dentro de ellos representan la desviación estándar \pm .

[‡]Valores correspondiente al submodelo SR1 (2006).

[§]Valores correspondiente al submodelo SR2 (2006).

En el Cuadro 3, se aprecia que el mejor modelo para estimar la infiltración acumulada fue el de Brooks-Corey (1964), ya que en 17 de los sitios se obtuvieron los valores más bajos de la RMSE y MRE, excepto en el sitio 15 donde resultó ligeramente menos preciso que

el modelo SR2 (2006). Le siguieron en orden descendente en precisión por SR2 (2006), SR1 (2006) y Rawls *et al.* (1983), a excepción de los sitios uno (SR1 (2006), Rawls *et al.* (1983) y SR2 (2006)) y dos (SR2 (2006), Rawls *et al.* (1983) y SR1 (2006)).

Cuadro 3. Valores de la RMSE y MRE de la infiltración de los modelos de GA analizados.

Sitio	RMSE (cm)				MRE (cm cm ⁻¹)			
	BC [†]	Rawls <i>et al.</i> (1983)	SR1 (2006)	SR2 (2006)	BC [†]	Rawls <i>et al.</i> (1983)	SR1 (2006)	SR2 (2006)
1	1.12	5.08	2.13	5.93	0.10	0.23	0.13	0.32
2	1.00	10.99	9.92	5.60	0.07	0.45	0.41	0.24
3	0.96	7.80	3.68	1.52	0.08	0.46	0.18	0.07
4	4.42	21.97	19.54	4.58	0.19	0.91	0.82	0.18
5	0.70	18.69	14.23	2.77	0.04	0.69	0.52	0.09
6	0.59	3.50	7.26	1.43	0.09	0.51	0.89	0.16
7	2.46	64.96	61.94	4.48	0.05	0.89	0.84	0.10
8	0.76	24.00	19.79	1.05	0.03	0.78	0.64	0.04
9	2.13	47.41	46.43	5.51	0.04	0.78	0.77	0.13
10	1.52	10.66	8.30	7.82	0.13	0.47	0.39	0.37
11	1.11	21.33	14.37	4.02	0.06	0.88	0.59	0.14
12	1.28	8.52	5.21	1.71	0.13	0.80	0.51	0.13
13	3.02	40.46	39.29	3.31	0.08	0.87	0.84	0.06
14	3.28	33.10	26.18	9.61	0.16	0.91	0.67	0.21
15	10.23	106.41	93.81	10.10	0.11	0.98	0.86	0.10
16	9.55	126.57	117.70	9.7	0.10	0.97	0.90	0.10
17	0.44	11.42	4.91	0.73	0.05	0.79	0.30	0.30
18	12.49	129.93	125.52	12.91	0.13	0.99	0.95	0.14

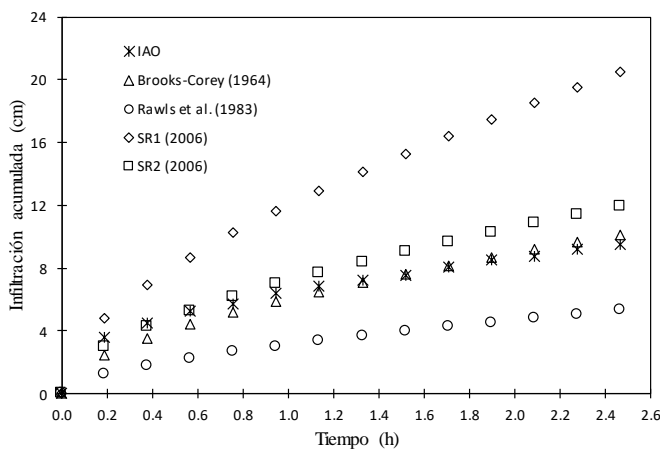
[†] Modelo de Brooks-Corey (1964)

Un aspecto observado en las imprecisiones del modelo de Rawls *et al.* (1983) al estimar la infiltración fue que las texturas de los suelos estudiados no quedaron representadas

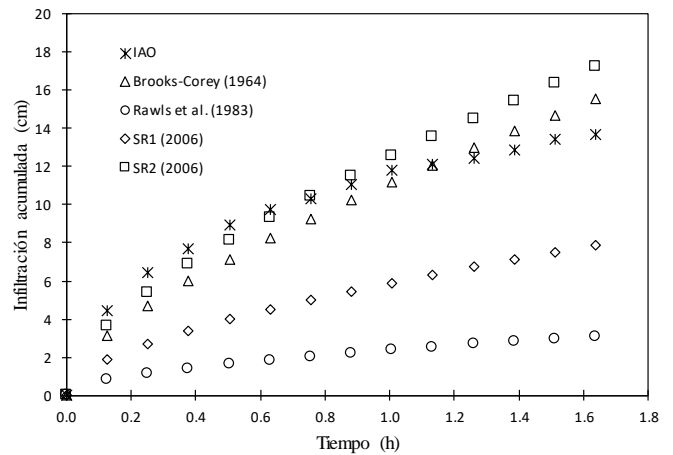
por las texturas medias del estudio de Rawls *et al.* (1983), debido a ello el modelo fue menos preciso en la estimación de la infiltración en los diferentes usos de suelo de la cuenca e inclusive en los suelos agrícolas para el cual fue desarrollado.

Con la finalidad de facilitar el análisis del comportamiento de las láminas infiltradas de los modelos estudiados, los suelos de los sitios de muestreo se integraron en cuatro grupos con características afines, resaltando los sitios donde se presentaron resultados contrastantes.

El primer grupo se integró por los sitios seis y diecisiete (agricultura de temporal) y los sitios uno, tres y doce (pastizal inducido); estos sitios se caracterizaron por tener la tasa de infiltración más baja en la cuenca. Para estos sitios el modelo de Brooks-Corey (1964) estimó mejor la infiltración, a excepción del sitio doce donde tuvo su máximo error (Figura 2).



a) Sitio 6



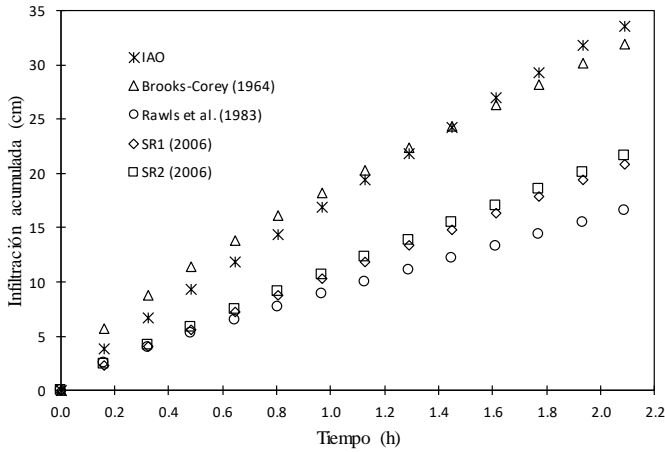
b) Sitio 12

Figura 2. Láminas infiltradas medidas y estimadas con los modelos de Brooks-Corey (1964), SR1 (2006), SR2 (2006) y Rawls et al. (1983) en suelos con agricultura de temporal y pastizal inducido.

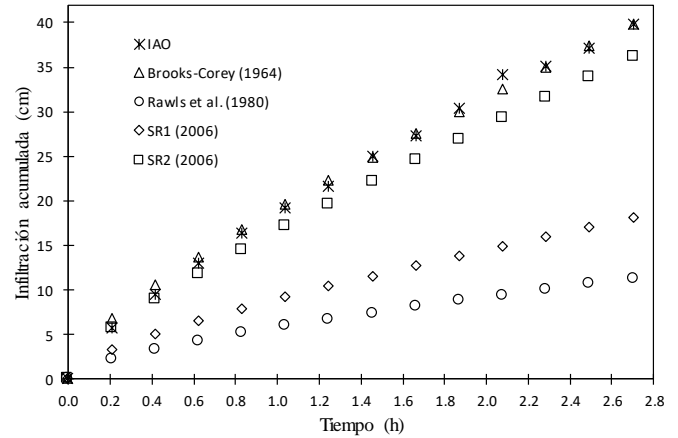
Las estimaciones del submodelo SR2 (2006) fueron muy cercanas a los de Brooks-Corey (1964) en el sitio doce; se observó que este modelo en tiempos largos la infiltración resultó lenta, ocasionando un alejamiento de los valores medidos y por consiguiente un incremento en el error. El modelo SR1 (2006) subestimó la infiltración en cuatro sitios, y

en el sitio seis tuvo el error más alto. El modelo de Rawls *et al.* (1983) subestimó las láminas infiltradas acumuladas en cuatro sitios con el error más alto, solo en el sitio uno (pastizal inducido) tuvo valores cercanos a SR2 (2006). La mejora de la precisión que tuvieron los submodelos SR1 (2006) y SR2 (2006) con respecto a los estimados por el modelo Rawls *et al.* (1983) se debe a que el modelo de Saxton-Rawls (2006) contempló en sus ecuaciones de pedotransferencia las texturas específicas de los suelos, con los contenidos de arena y arcilla, y los contenidos de materia orgánica, además de soportarlo por una base de datos más amplia.

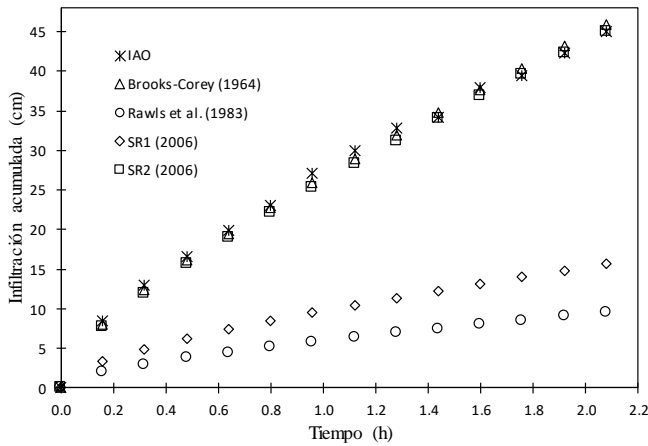
El segundo grupo se integró por los sitios dos, diez, cinco, ocho y once; pertenecen a suelos con uso agrícola de temporal, pastizal inducido y reforestación (Figura 3). En estos sitios la infiltración fue mayor respecto a los sitios del primer grupo (Figura 2); sin embargo, el error encontrado en la modelación de la infiltración fue debido a la existencia de una capa compactada ubicada en los primeros centímetros de profundidad. En el sitio ocho presentó una menor compactación del suelo superficial debido a la mejora del mismo, ocasionadas por las prácticas de restauración de suelos en décadas anteriores, lo cual propició una mayor tasa de infiltración.



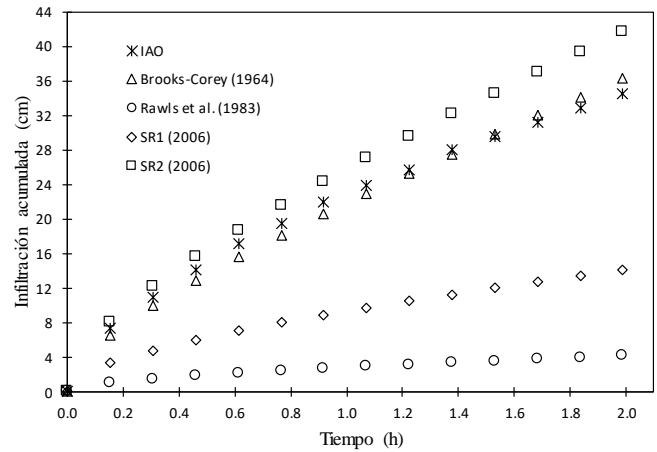
a) Sitio 10



b) Sitio 5



c) Sitio 8



d) Sitio 11

Figura 3. Láminas infiltradas medidas y estimadas con los modelos de Brooks-Corey (1964), SR1 (2006), SR2 (2006) y Rawls et al. (1983) en suelos con altos contenidos de materia orgánica con agricultura de temporal, pastizal inducido y reforestación.

El tercer grupo se integró por los sitios cuatro y trece con uso de suelo de agricultura de temporal y los sitios siete y nueve con reforestación (Figura 4). Los suelos de estos sitios están en proceso de recuperación debido a erosión hídrica y se ubican en la parte media de la cuenca a excepción del sitio cuatro que está en la parte baja de la misma. A diferencia de los sitios del grupo 2 (Figura 3), estos suelos son de mayor profundidad (30 a 50 cm), con el mismo grado de compactación en todo el perfil y con porcentajes de materia orgánica de 0.9-1.5%. En estos sitios se observó una sobrestimación por los modelos Brooks-Corey (1964) y SR2 (2006). El error incremental con respecto a los sitios

del grupo 2 en la estimación de la infiltración en los suelos de los sitios pertenecientes al grupo 3, pudo deberse también al proceso de preparación de las muestras en laboratorio el cual modificó la estructura y porosidad de los suelos compactados; en consecuencia, los valores estimados de ψ_f y K_s pudieron no ser los más representativos. El sitio cuatro fue donde se observó el mayor error por los modelos Brooks-Corey (1964) y SR2 (2006) sin embargo el comportamiento de la curva de infiltración estimada por estos modelos fue similar a los otros tres sitios; una causa atribuible al error de este sitio pudieron ser las mediciones realizadas en campo, debido a que el alto contenido de humedad inicial del suelo generó pequeñas variaciones de las láminas infiltradas en un tiempo corto, las cuales pudieron haber generado errores de medición por la resolución del equipo usado.

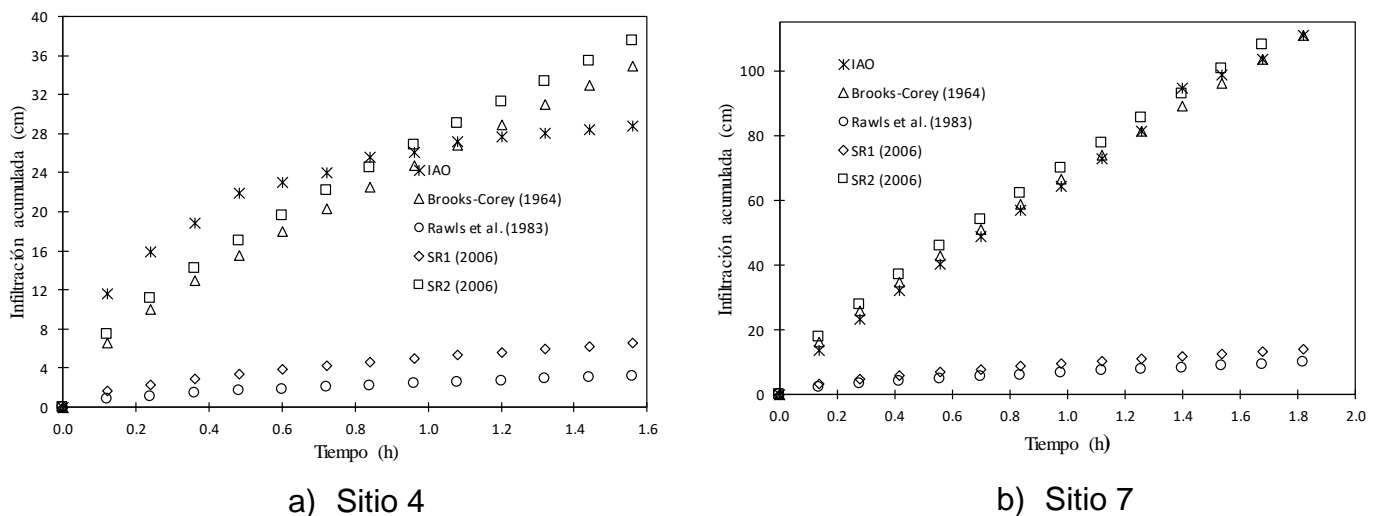


Figura 4. Láminas infiltradas medidas y estimadas con los modelos de Brooks-Corey (1964), SR1 (2006), SR2 (2006) y Rawls et al. (1983) en suelos compactados y con bajos contenidos de materia orgánica, bajo agricultura de temporal y reforestación.

El cuarto grupo se integró por los sitios catorce, quince, dieciséis y dieciocho con suelos de predominio forestal; caracterizados por ser más profundos, homogéneos en los primeros 40 cm de profundidad con contenidos de materia orgánica mayor del 5%, tener profundidades mayores a un metro, y presentar los más altos errores en la infiltración estimada por los tres modelos de GA analizados (Figura 5).

La tendencia de infiltración estimada con los modelos fue similar en los puntos quince, dieciséis y dieciocho a excepción del punto catorce. En el sitio catorce, el suelo presentó

alteración debido a las prácticas de conservación y reforestación realizadas después de ocurrido un incendio forestal; no obstante, de la afectación que hubo del fuego hacia el suelo, en el análisis de materia orgánica todavía se encontraron altos contenidos de este material. El sitio catorce fue el único sitio donde el modelo Brooks-Corey (1964 se ubicó como el segundo más preciso; las posibles causas de la imprecisión encontrada por el modelo de Brooks-Corey (1964) en este sitio, pudo deberse a que durante las pruebas de infiltración realizadas con el doble cilindro, se encontró compactación en los primeros centímetros de suelo, esto influenció una baja tasa de infiltración (Landini *et al.*, 2007), que al ser evaluada la infiltración estimada con la observada ocasionó una sobrestimación. El otro posible error fue ocasionado por el valor de K_s , el cual fue inferior al observado en campo, ya que este parámetro fue obtenido por el método del permeámetro a partir de una muestra alterada, aunado de que este suelo fue más heterogéneo y pudo no presentarse un flujo en forma de pistón como lo plantea la hipótesis de GA. Para el caso de los sitios quince, dieciséis y dieciocho, la imprecisión observada por los modelos Brooks-Corey (1964) y SR2 (2006) se debió principalmente a la forma de obtener K_s a partir de una muestra alterada, ya que en campo los valores observados de este parámetro fueron mayores a los obtenidos por los modelos. De la experiencia observada en este tipo de suelos con alto contenido de materia orgánica, se sugiere obtener el parámetro K_s por otros métodos diferentes a los aquí usados.

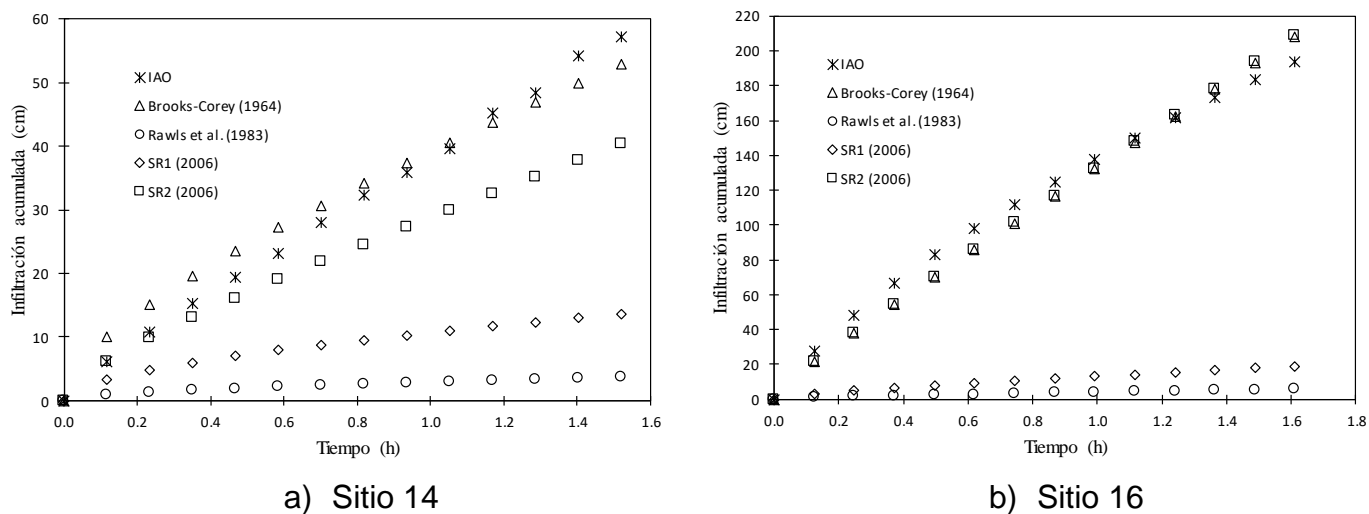


Figura 5. Láminas infiltradas medidas y estimadas con los modelos Brooks-Corey (1964), SR1 (2006), SR2 (2006) y Rawls et al. (1983) en suelos forestales.

El modelo de Brooks-Corey (1964) fue el mejor modelo en el 95% de los casos, resultando con mayor representatividad en suelos agrícolas y pastizales que en suelos forestales. Prado *et al.* (2017), obtuvieron resultados similares con el modelo de Brooks-Corey (1964) en suelos agrícolas de México, y también observaron mejores estimaciones con el uso de valores de ψ_b , β y K_s obtenidos mediante pruebas físicas. Sin embargo, su aplicación requiere equipo y personal especializado y mayor tiempo para obtener las curvas de tensión de humedad y la conductividad hidráulica a saturación. El modelo SR2 (2006) resultó con una precisión cercana al modelo de Brooks-Corey (1964) en el 95% de los sitios analizados, convirtiéndose en una segunda opción para obtener los parámetros de GA para la cuenca río Chapingo; sin embargo, la estimación del parámetro ψ_b resultó compleja, ya que también requirió la curva de tensión de humedad para calcular el parámetro λ y con ello después calcular el parámetro ψ_f .

En suelos con altos contenidos de materia orgánica mayores al 8%, se observó que obtener los valores del parámetro K_s obtenidos en laboratorio a partir de una muestra alterada, o del uso de una base de datos o ecuaciones de pedotransferencia que no contempla altos contenidos de materia orgánica (> 8% de MO) puede ser la no más adecuada (Prado *et al.*, 2017) ya que afectan la estimación de la infiltración en los modelos de GA

De la experiencia obtenida en este trabajo, se sugiere continuar investigando la representatividad del modelo de GA en diferentes usos de suelo en cuencas, con especial énfasis en suelos forestales que es donde se observó menor precisión por los modelos, ya que sus parámetros son más sensibles al uso de suelo que al tipo de suelo (Weber y Apestegui, 2013).

2.4. CONCLUSIONES

El orden descendente en precisión de los modelos para estimar las láminas infiltradas acumuladas fue: Brooks-Corey (1964), SR2 (2006), SR1 (2006) y Rawls *et al.* (1983) e implicó que las pruebas físicas fueron las más convenientes para obtener los parámetros ψ_b y K_s . El modelo de Brooks-Corey (1964) tuvo mejores estimaciones en los suelos

agrícolas y pastizales que en los forestales, y el rango de valores de la RMSE fue de 0.44 a 12.49 cm y del MRE entre 0.03 a 0.19 cm cm⁻¹ en los 18 sitios analizados, por lo que, se sugiere su aplicación en cuencas de México con suelos y características de uso de suelo y vegetación similares a la de la cuenca Río Chapingo. Los valores medios reportados por Rawls *et al.* (1983) por clase textural y recomendados para los suelos de México por algunos autores, resultaron inadecuados con una drástica subestimación en la lámina infiltrada acumulada, con un rango de valores de la RMSE entre 3.5 y 129.9 cm, y del RME entre 0.23 y 0.98. Por lo tanto, se sugiere obtener los parámetros hidráulicos de GA mediante modelos que incluyen pruebas físicas y evitar el uso de información derivada de las características generales de los suelos y no verificada.

2.5. LITERATURA CITADA

- Brooks, R. H., and T. A. Corey. (1964). Hydraulic Properties of Porous Media. Hydrology Paper No. 3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. pp: 1-10.
- Brakensiek, D. L. (1977). Estimating the effective capillary pressure in the Green and Ampt infiltration equation. *Water Resour. Res.* 13(3): 680-682.
- Chow, V. T. (1994). Hidrología aplicada. McGraw-Hill. México D.F. pp: 112-116.
- CruickShank, G. (2007). Proyecto Lago de Texcoco: Rescate Hidroecológico. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México. 140 p.
- Day, P.R. (1965). Hydrometer Method of Particle Size Analysis. In: Black, C.A., Ed., *Methods of Soil Analysis*, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin Argon, pp:562-563.
- Green, W.H., and G. A. Ampt. (1911). Studies on Soil Physics, Part 1, the Flow of Air and Water through Soils. *Journal of Agricultural Science.* 4:11-24.
- Hopmans, J., and J. Šimůnek. (1999). Review of inverse estimation of soil hydraulic Properties. *In: M. Th. Van Genuchten, F. J. and L. Wu (eds.), Proc. Int. Workshop Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porus Media, Part 1*, University of California, Riverside, CA. pp: 643-659.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2004). Carta edafológica Chalco E14B31, representación cartográfica de las características morfológicas, físicas y químicas de los suelos del país 1983. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/buscador/default.html?q=e14b31>. (Consulta: marzo, 2016).
- Ficklin, D. L., and M. Zhang. (2013). A comparison of the curve number and Green-Ampt models in an agricultural watershed. *Transactions of the ASABE*. 56(1): 61-69.
- Fuentes, R., C. (1986). Capítulo I: Caracterización mínima del suelo con fines de riego. In: *Manual para diseño de zonas de riego pequeñas*, De León, M., and R. Robles B. Eds., Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, Méx. pp: 3-15.
- Fuentes, R., C. Haverkamp, and J. Y. Parlange. (1992). Parameter constraints on closed-form soil-water relationships. *Journal of Hydrology*. 134: 117-142.
- Kabiri, R., A. Chan, and R. Bai. (2013). Comparison of SCS and Green-Ampt Methods in Surface Runoff-Flooding Simulation for Klang Watershed in Malaysia. *Open Journal of Modern Hydrology*. 3:102-114.
- Landini A, M., Martínez D., Dias H., Soza E., Agnes D., and Sainato Cl. (2007). Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Ci. Suelo*. 25(2):123-131.
- Ma, Y., S. Feng, H. Zhan, X. Liu, D. Su, S. Kang, and X. Song. (2011). Water Infiltration in Layered Soils with Air Entrapment: Modified Green-Ampt Model and Experimental Validation. *J. Hydrol. Eng.*, 16(8):628-638.
- Márquez, A., and E. Guevara P. (2011). Estimación de parámetros de infiltración en base a propiedades físicas del suelo en una zona agrícola de Venezuela. *Revista Ingeniería UC*. 18: 65-79.
- McCuen, R. H. (1998). *Hydrologic Analysis and Design*. Department of civil engineering, University of Maryland. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. pp: 501-503.

- Ogden, F., B. Saghafian. (1997). Green and Ampt Infiltration With Redistribution. *J. Irrigation Drain Eng.* 123:386-393.
- Prado-Hernández, J. V., F. Pascual, D. Cristóbal, M. Carrillo, F. R. Hernández and A. Martínez. (2017). Evaluation of Green-Ampt infiltration equation in some agricultural soils in Mexico, using USDA information and a modified method from Brooks and Corey. *Interciencia.* 42(9):563-569.
- Ramesh, S. V., Teegavarapu, and V. Chandramouli. (2005). Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *J. Hydrol.* 312(2005): 191-206.
- Ravi, R., JR. Williams. (1998). Estimation of Infiltration Rate in the Vadose Zone: Compilation of Simple Mathematical Models. EPA (Environmental Protection Agency) National Risk Management Research Laboratory. pp: 4-26.
- Rawls, W. J., M. ASCE, L. Donald, Brakensiek, and N. Miller. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *J. Hydraul. Eng.* 109:62-70.
- Saxton, K., W. Rawls. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70(5):1569-1578.
- SEMARNAT (Secretaria de Medioambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. estudios, muestreo y análisis: NOM-021-RECNAT-2000. <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/rn/rn021-02.pdf>. (Consulta: mayo, 2016).
- Tucci, C. E. M. (1993). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre.
- Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(5): 892–898.
- Van Mullem, J. A. (1991). Runoff and peak discharges using Green-Ampt infiltration model. *Journal of irrigation and drainage Engineering.* 117:354-370.

Viji, R., P. Prasanna, and R. Ilangovan. (2015). Modified SCS-CN and Green-Ampt Methods in Surface Runoff Modelling for the Kundahpallam Watershed, Nilgiris, Western Ghats, India. *Aquatic Procedia*, 4:677 – 684.

Weber, J. F., and L. Apestegui. (2013). Parámetros del modelo de infiltración de Green y Ampt en suelos de la ciudad de Córdoba, Argentina. *Cuadernos del Cuhiram*. 19:1-17.

3. EVALUACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DE LOS MODELOS DE CURVA NUMÉRICA Y GREEN-AMPT EN LA CUENCA RÍO CHAPINGO

EVALUATION OF SURFACE RUNOFF FROM THE NUMERICAL CURVE AND GREEN-AMPT MODELS IN THE CHAPINGO RIVER BASIN

Ricardo Montiel Gonzaga³, Jorge Víctor Prado Hernández²

RESUMEN

Los modelos hidrológicos son una opción rápida y de bajo costo para estimar el escurrimiento superficial en un evento de lluvia-escurrimiento en cuencas sin aforos que requieren validación, previo a su uso, para usar con certidumbre sus resultados en la definición de políticas para un manejo racional del recurso agua. El propósito de esta investigación fue evaluar la representatividad del modelo de escurrimiento de Curva Numérica del extinto Servicio de Conservación de Suelos de EE. UU. (SCS-CN) y del modelo de infiltración de Green-Ampt (GA), sin calibrar, integrados en un modelo hidrológico en el software HEC-HMS para reproducir los hidrogramas de escurrimiento directo de siete eventos de lluvia bien definidos y uno prolongado con precipitaciones intermitentes en la cuenca Río Chapingo México, cuya superficie es de 15.46 km², para identificar su potencial como herramienta de apoyo en cuencas no aforadas. El análisis de volúmenes escurridos y gasto pico por evento el modelo SCS-CN estimó mejor el volumen escurrido (RMSE de 5430 m³) y GA el gasto pico (RMSE de 0.72 m³ s⁻¹). En tres eventos con volúmenes escurridos mayores que 8.31 x 10³ m³ y $Q_p \geq 1.93 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ el modelo de GA reprodujo mejor los hidrogramas de escurrimiento directo con una RMSE de 0.14 a 0.43 m³ s⁻¹ y un MRE de 0.20 a 0.28, y una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.92 a 0.95. En cuatro eventos bien definidos con volúmenes escurridos inferiores a 6.35 x 10³ m³ y $Q_p \leq 1.44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ambos modelos estimaron de forma idéntica y no reprodujeron con eficacia los hidrogramas y sobrestimaron el Q con un índice de Nash-Sutcliffe de -1.38 a -7.34. En el evento prolongado ambos modelos estimaron el hidrograma con una RMSE de 0.07 m³ s⁻¹ y un MRE de 0.35 y una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.71.

Palabras Clave: SCS-CN, Green-Ampt, hidrograma observado, humedad inicial del suelo, escurrimiento directo.

SUMMARY

Hydrological models are a fast and low cost option to estimate surface runoff in a rainfall-runoff event in ungauged basins that require validation, prior to their use, to use with certainty their results in the definition of policies for a rational management of the water resource. The purpose of this research was to evaluate the representativeness of the Numerical Curve runoff model of the extinct U.S. Soil Conservation Service. (SCS-CN) and the uncalibrated Green-Ampt (GA) infiltration model, integrated into a hydrological model in the HEC-HMS software to reproduce the direct runoff hydrograms of seven well-defined rainfall events and one prolonged with intermittent precipitation in the Chapingo River Mexico basin, whose surface area is 15.46 km², to identify its potential as a support tool in ungauged basins. The SCS-CN model estimated the runoff volume better (RMSE of 5430 m³) and the GA the peak runoff (RMSE of 0.72 m³ s⁻¹). In three events with runoff volumes greater than 8.31 x 10³ m³ and $Q_p \geq 1.93 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ the GA model better the direct runoff hydrograms with a RMSE of 0.14 to 0.43 m³ s⁻¹ and an MRE of 0.20 to 0.28, and a Nash-Sutcliffe efficiency of 0.92 to 0.95. In four well defined events with runoff volumes less than 6.35 x 10³ m³ and $Q_p \leq 1.44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, both models estimated identically and did not effectively reproduce the hydrograms and overestimated the Q with a Nash-Sutcliffe index of -1.38 to -7.34. In the extended event both models estimated the hydrograph with an RMSE of 0.07 m³ s⁻¹ and an MRE of 0.35 and a Nash-Sutcliffe efficiency of 0.71.

Keywords: SCS-CN, Green-Ampt, observed hydrogram, initial soil moisture, direct runoff.

Tesis de doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo.

¹ Estudiante del doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA).

² Profesor investigador de posgrado Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA).

3.1. INTRODUCCION

La ausencia de estaciones de aforo hidrológico y el alto costo de las instalaciones de estas, permiten a los hidrólogos a estimar la escorrentía superficial directa de las cuencas hidrográficas utilizando diversas técnicas (Ajmal *et al.*, 2016), entre los que se encuentran los modelos hidrológicos. Estos modelos estiman el escurrimiento superficial de una manera, económica y rápida; y permiten entender el proceso de lluvia escurrimiento en las cuencas. El volumen escurrido estimado con cierto grado de certeza ayudará a los administradores del recurso hídrico a definir políticas acertadas sobre su uso. La fiabilidad de las estimaciones de los modelos depende en gran medida del tipo de modelo hidrológico a utilizar, no obstante, previo a su aplicación deben ser evaluados. Los modelos hidrológicos más usados en México son el método racional, Curva Numérica del extinto Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS-CN). El modelo SCS-CN es uno de los más comunes y es utilizado para predecir escurrimiento ya que no considera la intensidad y duración de la lluvia, solo la precipitación total; es un modelo aplicable a pequeñas cuencas agrícolas que permite estimar el escurrimiento con precisión aceptable (Sánchez *et al.*, 2003). El modelo de Green-Ampt (GA) es un modelo de infiltración que puede integrarse a un modelo hidrológico para estimar escurrimiento; es un modelo basado en tiempo que puede simular el impacto de la intensidad de la lluvia y duración del proceso de infiltración. Green-Ampt representa de forma aceptable el movimiento del agua en suelos estratificados (Ma *et al.*, 2011), y para estimar escurrimientos superficiales en cuencas con diferentes usos del suelo y condiciones topográficas (Van Mullen, 1991), el modelo de GA predice con mayor precisión en grandes tormentas que el modelo de SCS-CN, mientras que este último predice mejor en eventos de pequeñas tormentas, la efectividad de SCS-CN se debe a que supone una abstracción inicial antes de la escorrentía superficial y el modelo de GA asume el escurrimiento superficial sólo cuando las tasas de precipitación son mayores que la tasa de infiltración (Ficklin *et al.*, 2013). En cuencas con 50 % urbanas ambos modelos han mostrado que no hay diferencias significativas de error en el gasto pico y en volumen (Kabiri *et al.*, 2013). Los éxitos obtenidos en trabajos anteriores en diferentes países muestran que los modelos SCS-CN y GA son aplicables en cuencas con diferente uso

de suelo y condiciones topográficas. No obstante, el modelo de GA ha sido poco aplicado en cuencas de México y se desconoce su efectividad contra el modelo de SCS-CN, por lo que en este trabajo se planteó evaluar ambos modelos en una cuenca de México.

El trabajo se realizó en la cuenca Río Chapingo, México, la cual sufrió procesos de erosión hídrica en la parte media ocasionada por las actividades agropecuarias y el uso irracional de los bosques; la restauración de la masa forestal y los trabajos de conservación de suelos y aguas implementados en la década de los años setenta del siglo pasado detuvieron el crecimiento de cárcavas y el arrastre del suelo hacia el ex lago de Texcoco de tal forma que los escurrimientos superficiales y la infiltración han cambiado (Cruickshank, 2007). Durante la restauración de la cuenca, la Ex Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) estableció un sistema de aforo para medir el caudal y sedimentos a la salida de la cuenca con la intención de monitorear la respuesta hidrológica a las prácticas realizadas; actualmente el sistema de aforo ha disminuido sus actividades y sólo reporta el caudal diario que se obtiene sin equipo especializado cuyos datos no muestran la fidelidad de los hidrogramas ocurridos durante los eventos de lluvia-escurrimiento. El modelo SCS-CN y el método racional se han aplicado en la cuenca para estimar el escurrimiento superficial con fines académicos, pero sin ser calibrados ya que la información hidrométrica disponible no permite calibrar los modelos hidrológicos. Para solucionar este problema, en el año 2014 se instaló un sistema de aforo automatizado a la salida de la cuenca río Chapingo, la información hidrométrica recabada es usada para evaluar y calibrar las estimaciones de los modelos hidrológicos empleados.

El objetivo de este estudio fue modelar y evaluar el escurrimiento superficial en siete eventos aislados de lluvia bien definidos y uno prolongado de baja intensidad con lluvias intermitentes ocurridos en la cuenca Río Chapingo en los años 2014, 2016 y 2017. Los modelos usados fueron SCS-CN y GA los cuales fueron integrados en un modelo hidrológico para estimar el escurrimiento superficial en esta cuenca. Los modelos hidrológicos no fueron calibrados con el propósito de identificar el potencial de ambos modelos como herramienta de apoyo para estimar el escurrimiento superficial en cuencas no aforadas con características ambientales similares a la cuenca río Chapingo.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Ubicación de la cuenca y uso de suelo

Este trabajo se realizó en la cuenca Río Chapingo que tiene un área de 15.46 km² y está integrada por ocho subcuencas (Figura 6), se ubica en el extremo oriente del municipio de Texcoco, Estado de México. Forma parte de la cuenca del Valle de México en la Altiplanicie Mexicana, entre las coordenadas geográficas extremas 19° 29' 22.83" N, 98° 53' 09.17" O y 19° 25' 15.28" N, 98° 45' 40.31" O, con una altitud de 2250 a 3580 msnm y una pendiente media de 33.16%. En la cuenca predominan los siguientes usos de suelo: zona urbana en la parte baja, agricultura de temporal con bosque reforestado en la zona media; en la parte alta bosque reforestado y bosque de coníferas (Figura 6).

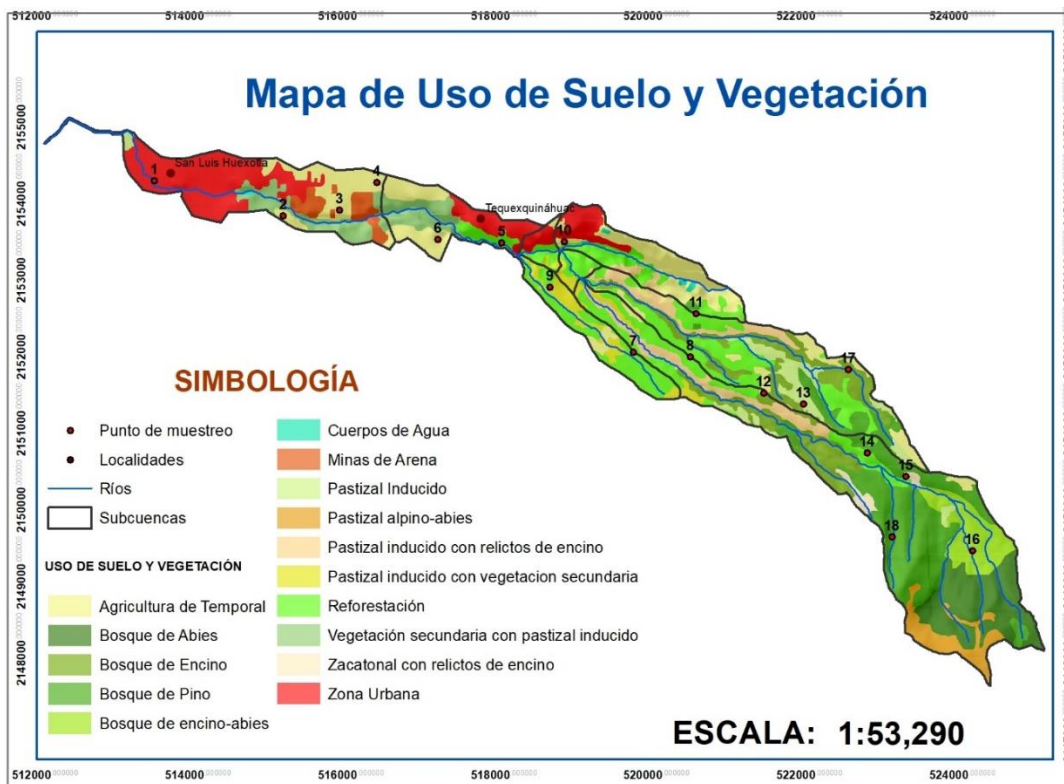


Figura 6. Subcuencas, tipos de suelos y puntos de muestreo en la cuenca Río Chapingo.

3.2.2. Características físicas de los suelos

Se realizó un muestreo de suelos en toda la cuenca a una profundidad de 0 a 30 cm en dieciocho sitios de muestreo diferenciados por el tipo y uso de suelo y vegetación (Cuadro 4) (Figura 6). Las muestras se analizaron en un laboratorio y se les determinó la textura por el método de Bouyoucos modificado por Day (1965), la materia orgánica por el método de Walkley and Black para suelos con porcentajes menores a 8% y el método de calcinación para porcentajes mayores a este valor.

Cuadro 4. Características del suelo en cada sitio muestreado en la cuenca Río Chapingo.

Sitio	Tipo de suelo	Textura	Materia Orgánica (%)
1	Feozem Háplico	Arena francosa	1.1
2	Feozem Háplico	Arena francosa	1.6
3	Feozem Háplico	Franco arenoso	4.0
4	Feozem Háplico	Franco arcillo-arenoso	2.0
5	Feozem Háplico	Franco arenoso	3.5
6	Litosol	Franco	2.7
7	Litosol	Franco arenoso	1.6
8	Litosol	Franco arenoso	1.5
9	Litosol	Arena francosa	0.9
10	Feozem Háplico	Arena francosa	1.9
11	Litosol	Franco	4.0
12	Cambisol Eútrico	Franco arcillo-arenoso	2.6
13	Cambisol Húmico	Franco arenoso	2.6
14	Cambisol Dístrico	Franco	8.8
15	Cambisol Húmico	Franco	9.1
16	Andosol Mólico	Franco arenoso	8.5
17	Cambisol Dístrico	Franco	3.2
18	Cambisol Dístrico	Franco arenoso	9.5

3.2.3. Construcción del modelo hidrológico

El diseño del modelo hidrológico y la modelación del escurrimiento se hizo en el software hidrológico HEC-HMS, el cual fue desarrollado por el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos para simular el proceso de lluvia-escurrimiento dentro de cuencas hidrográficas (USACE ARMY-HEC, 2013). El modelo hidrológico quedó compuesto por ocho subcuencas y tres tramos de canal (Figura 7).

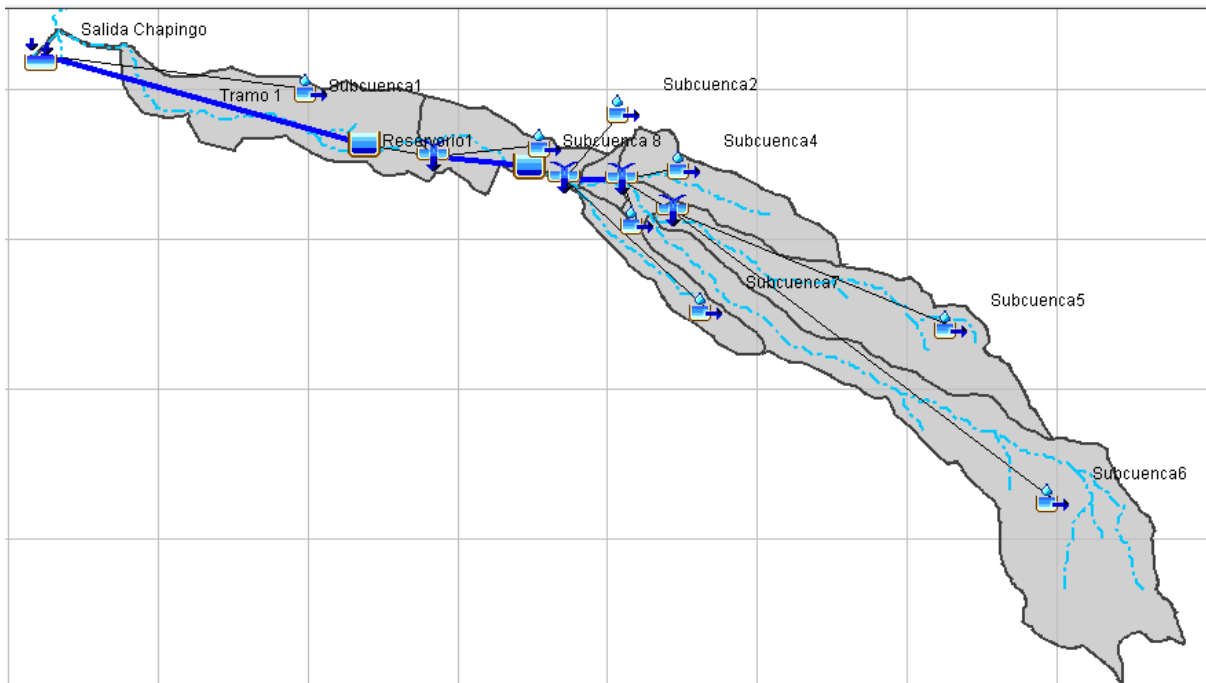


Figura 7. Estructura de los modelos hidrológicos.

3.2.4. Selección de hidrogramas de escurrimiento directo y datos de precipitación

En la cuenca se establecieron cuatro estaciones hidrométricas, dos ubicadas en la parte media de la cuenca, el tercero su ubicó a la mitad del cauce principal y el cuarto se instaló a la salida de la cuenca. Los eventos de lluvia escurrimiento fueron elegidos a partir de un análisis histórico de los hidrogramas ocurridos en los años 2014, 2016 y 2017 de la estación de aforo automatizado a la salida de la cuenca, se tomó como referencia los volúmenes escurridos en el rango de $2.660 \times 10^3 \text{ m}^3$ a $28.650 \times 10^3 \text{ m}^3$ y caudales máximos en el rango de $0.57 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $4.46 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; en este proceso se eligieron ocho

eventos (siete eventos aislados bien definidos y un evento prolongado que se caracterizó por tener lluvias intermitentes y de baja intensidad). Los modelos fueron alimentados con información climática correspondiente a las fechas en que ocurrieron los eventos (Cuadro 5), de los cuales se recabaron de tres estaciones meteorológicas automatizadas ubicadas en la parte baja, media y alta de la cuenca.

Cuadro 5. Características de los eventos de lluvia-escurrimiento seleccionados

Evento	Tipo de evento	Fecha	P (mm)	Duración (h)	Intensidad (mm hr ⁻¹)	Q_p (m ³ s ⁻¹)	Q (m ³)
1	Aislado	07/08/2014	16.00	1.60	15.20	0.64	2660
2	Aislado	11/08/2014	20.60	1.80	14.50	2.86	13250
3	Aislado	28/05/2016	25.00	4.10	17.80	1.44	6350
4	Aislado	11/06/2017	15.90	4.60	4.70	0.96	4960
5	Aislado	04/07/2017	15.50	2.10	2.50	0.54	3600
6	Aislado	12/07/2017	15.50	1.30	15.40	1.93	8310
7	Prolongado	10/08/2017	22.30	20.80	3.20	0.57	10690
8	Aislado	30/08/2017	36.90	2.80	30.00	4.46	28650

3.2.5. Variables de entrada y salida en los modelos hidrológicos

Los modelos SCS-CN y Green-Ampt fueron los implementados en el modelo hidrológico para estimar el escurrimiento superficial en la cuenca. En ambos modelos la variable de entrada fue la precipitación. Las variables de salida para el modelo SCS-CN fue la evapotranspiración y el escurrimiento directo, y para el modelo de GA fueron la infiltración y evapotranspiración, en los dos modelos la evapotranspiración fue calculado por el método de Penman-Monteith; no se incluyó la retención de agua por el follaje y el agua en depresiones. El cálculo de la infiltración se hizo con el modelo de GA y el escurrimiento directo por el modelo SCS-CN, los cuales se especifican a continuación.

3.2.6. Modelo de infiltración de Green-Ampt

El modelo de Green y Ampt (1911), es una representación conceptual física del proceso de infiltración del agua en el suelo con algunas hipótesis simplificadoras del fenómeno, que resulta de combinar la ley de continuidad y la ley de Darcy y se expresa como (Fuentes, 1992; McCuen, 1998).

$$I(t) = K_s t + \gamma \ln \left(1 + \frac{I}{\gamma} \right) \quad \text{con} \quad \gamma = (h + \psi_f)(\theta_s - \theta_i) \quad (1)$$

donde; $I(t)$ es la infiltración acumulada (cm) en el tiempo t (h); ψ_f es la presión capilar en el frente de humedecimiento (cm); h es el tirante de agua sobre la superficie (cm); θ_s es el contenido de humedad a saturación del suelo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_i es el contenido de humedad inicial del suelo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); y K_s es la conductividad hidráulica a saturación (cm h^{-1}).

Los parámetros hidrodinámicos del suelo ψ_f , K_s y θ_s son propiedades únicas de cada suelo y para calcularlos se usaron los siguientes procedimientos: la humedad volumétrica a saturación (θ_s) de cada muestra de suelo fue obtenida en laboratorio considerando una tensión del suelo de 0 bar. La humedad inicial (θ_i) se determinó previo a la ocurrencia de los eventos de lluvia-escurrimiento; para tal efecto, se obtuvo una pequeña muestra del suelo a una profundidad de 30 cm y en un laboratorio se determinó la humedad volumétrica. El parámetro hidráulico K_s se obtuvo en laboratorio con el método del permeámetro de carga constante y el parámetro ψ_f se obtuvo mediante el modelo de Brooks y Corey (1964).

3.2.7. Modelo de Brooks y Corey para obtener el parámetro ψ_f

La presión capilar en el frente de humedecimiento (ψ_f) se calculó con la expresión (2) obtenida por Ogden y Saghafian (1997):

$$\psi_f = \frac{2\lambda + 3}{2\lambda + 2} \left(\frac{\psi_b}{2} \right) \quad (2)$$

donde λ es el índice de distribución del tamaño del poro y ψ_b es bulbo de presión (cm) o presión de entrada de aire (Brakensiek, 1977; Saxton y Rawls, 2006). Los valores de los

parámetros λ y ψ_b se obtuvieron resolviendo simultáneamente las ecuaciones (3) (Van Genuchten, 1980) y (4) (Brooks y Corey, 1964) por el método de mínimos cuadrados, para ello, se usaron las curvas de tensión de humedad obtenidas en laboratorio para valores de tensión de 0.01, 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.33, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0, 11.0, 13.0, 15.0, 16.0 y 17.0 bar. Las ecuaciones (3) y (4), respectivamente son:

$$S_e = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda \quad \text{para } \psi \geq \psi_b \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \quad (4)$$

donde S_e es la saturación efectiva ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), θ es el contenido de agua en el suelo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) correspondiente a una presión capilar ψ (cm); θ_r es la humedad residual ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); y ϕ , es la porosidad total ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). El valor de la humedad residual (θ_r) fue obtenida de la humedad del suelo sometida a una tensión de 17 bar, la porosidad total (ϕ) se obtuvo con la ecuación (5)

$$\phi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} * 100 \quad (5)$$

donde ρ_b es la densidad aparente y ρ_s es la densidad real, ambas en g cm^{-3} , obtenidas por los métodos de la parafina y del picnómetro, respectivamente. Los valores de ψ_f y K_s obtenidos en los sitios de muestreo pertenecientes a cada subcuenca se ponderaron para obtener un valor representativo.

3.2.8. Modelo de escurrimiento de la Curva Numérica

El segundo modelo aplicado fue el propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y el Servicio de Conservación de Suelos (USDA-SCS, 2004) al que se denominó SCS-CN, cuya expresión matemática es:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \text{si } P \geq I_a, \quad Q = 0 \text{ de lo contrario} \quad (6)$$

donde Q, es el escurrimiento en (mm); P, es la precipitación (mm); S, es el potencial máximo de retención (mm); I_a , es la abstracción inicial (mm), definida como una proporción del valor de S:

$$I_a = \lambda S \quad (7)$$

donde λ es el coeficiente de abstracción inicial (adimensional), para cuencas pequeñas su valor estándar es 0.2 (Chow, 1994). El parámetro S depende del tipo de suelo, uso de suelo, condición hidrológica y condición de humedad antecedente (AMC), y se determinó con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (8)$$

donde CN es el valor de la curva numérica y se asignó con las tablas del Manual Nacional de Ingeniería del USDA-NRCS (2009) en función del tipo, uso y condición hidrológica del suelo, de la cobertura vegetal y de las prácticas de manejo (Figura 5). Los valores de la CN se modificaron en función de la condición de humedad antecedente, representada por la precipitación acumulada de los cinco días previos al evento de lluvia. La curva numérica se mantuvo con el mismo valor para la condición de humedad antecedente intermedia (CN(II)) y válida para una precipitación entre 35.5 y 53.3 mm; pero se corrigió para la condición seca (CN(I)) y húmeda (CN(III)), para láminas menores que 35.5 mm y mayores que 53.3 mm, respectivamente, aplicando las Ecuaciones (9) y (10):

$$CN_I = \frac{[4.2 CN_{II}]}{10 - 0.058 CN_{II}} \quad (9)$$

$$CN_{III} = \frac{[23 CN_{II}]}{10 + 0.13 CN_{II}} \quad (10)$$

3.2.9. Hidrograma unitario adimensional sintético del SCS

Las láminas de escurrimiento estimados con los modelos SCS-CN y GA fueron convertidos en hidrograma de escurrimiento directo mediante el método del hidrograma unitario sintético adimensional del SCS, válido para pequeñas cuencas agrícolas (USACE ARMY – HEC, 2013). Para su aplicación se calcularon el caudal pico Q_p ($m^3 s^{-1}$) y tiempo al pico t_p (h) con las ecuaciones (11) y (12), respectivamente:

$$q_p = 2.08 \frac{A}{t_p} \quad (11)$$

$$t_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (12)$$

donde, A es el área de la cuenca (km²), Δt es la duración de la precipitación en exceso (h), y t_{lag} es el tiempo de retraso de la cuenca (h) y se calculó como una fracción del tiempo concentración (t_c), como lo sugiere el NRCS para cuencas no aforadas:

$$t_{lag} = 0.6 t_c \quad (13)$$

El tiempo de concentración se calculó con la fórmula de Kirpich (Aparicio, 2013):

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (14)$$

donde, L y S son la longitud (m) y pendiente (m m⁻¹) del cauce principal, respectivamente.

3.2.10. Evaluación estadística de los modelos SCS-CN y Green-Ampt

La evaluación de la precisión de los hidrogramas de escurrimiento directo, estimados con los modelos SCS-CN y GA, se hicieron con las medidas estadísticas raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), el error relativo medio (MRE) y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF) (Nash-Sutcliffe, 1970). La evaluación de la precisión de la estimación de los caudales pico de los eventos (Q_p) se hizo con el Error Relativo (RE). Estas medidas estadísticas se expresan mediante las ecuaciones (15), (16), (17) y (18), respectivamente (Teegavarapu *et al.*, 2005; Ma *et al.*, 2009):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{calc})^2} \quad (15)$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(Q_{obs} - Q_{calc})}{Q_{calc}} \right| \quad (16)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (17)$$

$$RE = \frac{(Q_{obs} - Q_{calc})}{Q_{obs}} \quad (18)$$

donde: N, es el número total de observaciones; Q_{obs} , son los caudales observados ($m^3 s^{-1}$); Q_{calc} , corresponde a los caudales estimados ($m^3 s^{-1}$); y $\overline{Q_{obs}}$ es la media de los caudales observados.

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1. Parámetros del modelo de Green-Ampt

En este trabajo no se usaron los parámetros hidráulicos reportados por Rawls et al. (1983), ya que observó que asignar a un suelo el valor promedio de ψ_f de la clase textural sugerido por Rawls et al. (1983) y por algunos investigadores de México, puede resultar erróneo ya que su desviación estándar es considerable pudiendo tomar un suelo valores de otra clase textural. Los valores ponderados de ψ_f calculados con el modelo de Brooks-Corey (1964) por subcuenca se ubicaron dentro de los valores reportados por Rawls et al. (1983) a excepción de la subcuenca tres (Cuadro 6); dichos valores dieron resultados satisfactorios en las modelaciones con GA. Los valores de humedad a saturación más altos pertenecieron a las subcuencas (seis y siete) que poseen suelos profundos, alto porcentaje de materia orgánica y están cubiertos con vegetación forestal, en las demás subcuencas la humedad a saturación se estimaron valores más bajo debido a que pertenecen a suelos ocupados con agricultura, pastizales y reforestación, son de bajo contenido de materia orgánica y baja porosidad con respecto a los suelos forestales. Los valores de K_s en las subcuencas tuvieron valores cercanos entre ellos a excepción de las subcuencas dos y ocho cuyos suelos son de textura arenosa y están ocupados por agricultura de temporal (Cuadro 6).

Cuadro 6. Valores de los parámetros de entrada del modelo Green-Ampt.

Subcuenca	Tr [†]	Impermeabilidad [†]	K_s	ψ_f	θ_s
1	48.77	19.84	5.98	215.95	0.50
2	12.25	20.00	9.40	190.71	0.48
3	13.30	10.11	2.30	1295.60	0.54
4	23.97	0.00	5.80	188.02	0.57
5	22.80	0.00	4.70	233.24	0.51
6	27.19	0.00	4.90	179.24	0.57
7	14.92	0.00	4.50	188.02	0.60
8	16.74	14.70	10.10	233.24	0.53

[†]Valores aplicados también para el modelo SCS-CN.

Los valores de humedad inicial promedio del suelo (θ_i) encontrada en la cuenca previo a los eventos de lluvia dos, seis, siete y ocho, estuvieron en el rango de 0.36 a 0.40 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ debido a que les antecedieron precipitaciones intensas y continuas en los cinco días previos. En los eventos uno, tres, cuatro y cinco la humedad del suelo fue menor (0.17 a 0.27 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) debido a la pérdida de humedad por evapotranspiración y las escasas precipitaciones de los cinco a ocho días previos, lluvias que fueron de bajas intensidades e intermitentes.

Cuadro 7. Humedad volumétrica inicial (θ_i) del suelo registrado antes de cada evento.

Sub Cuenca	θ_i ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) del evento de lluvia							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.201	0.500	0.201	0.108	0.174	0.312	0.184	0.272
2	0.285	0.285	0.398	0.095	0.269	0.359	0.255	0.500
3	0.285	0.343	0.302	0.095	0.269	0.359	0.500	0.500
4	0.099	0.106	0.142	0.217	0.376	0.500	0.406	0.353
5	0.456	0.474	0.464	0.152	0.172	0.399	0.387	0.361
6	0.293	0.287	0.261	0.312	0.406	0.474	0.499	0.495
7	0.099	0.101	0.155	0.217	0.376	0.500	0.500	0.348
8	0.098	0.117	0.152	0.238	0.174	0.299	0.184	0.284

3.3.2. Valores de Curva Numérica

Los valores de CN para el modelo SCS-CN correspondieron a las condiciones de humedad seca (CN(I)) e intermedia (CN(II)), debido a que la precipitación acumulada de los cinco días previos a los eventos de lluvia fue de 10.1 a 38.1 mm (Cuadro 8). En las subcuencas uno y cinco con uso de suelo de agricultura de temporal y zona urbana, respectivamente, se observaron los valores más altos de CN (74.67 y 76.02); en las subcuencas dos, cuatro y ocho con uso de suelo de agricultura de temporal se obtuvieron valores intermedios de CN (44.64 a 64.28) y en las subcuencas tres, seis y siete, con uso de suelo forestal, se obtuvieron los valores más bajos de CN (15.78 a 37.58). Dado que la distribución espacial de la lluvia no fue homogénea y las condiciones ambientales son

diferentes en la cuenca, los valores de abstracción inicial para estas tres últimas subcuencas fueron de los más altos; respecto a las otras subcuencas (subcuenca uno, dos, cuatro, cinco y ocho) en las que se observaron los valores más bajos de abstracción inicial dado que los usos de suelo son de agricultura de temporal y pastizal inducido.

Cuadro 8. Valores de CN calculados por evento para el modelo de SCS-CN.

Subcuenca	Evento	Evento	Evento	Evento	Evento	Evento	Evento	Evento
	1	2	3	4	5	6	7	8
	CN(I)	CN(II)	CN(I)	CN(II)	CN(II)	CN(II)	CN(II)	CN(II)
1	56.48	74.67	56.48	56.48	74.67	74.67	56.48[†]	74.67
2	44.64	63.96	44.64	44.64	63.96	63.96	63.96	63.96
3	15.78	35.71	15.78	15.78	35.71	35.71	35.71	35.71
4	44.98	64.28	44.98	44.98	64.28	64.28	64.28	64.28
5	58.07	76.02	58.07	58.07	76.02	76.02	76.02	76.02
6	22.94	42.82	22.94	22.94	42.82	22.94[†]	28.38[†]	42.82
7	17.66	37.58	17.66	17.66	37.58	37.58	37.58	37.58
8	43.52	62.90	43.52	43.52	62.90	62.90	62.90	62.90

[†]Valores pertenecientes a la condición CN (I).

3.3.3. Análisis del conjunto de eventos

El valor promedio y la RMSE del análisis de la información del conjunto de eventos estudiados, mostró que el modelo SCS-CN fue ligeramente mejor que el modelo de GA para estimar el volumen escurrido Q , pero el modelo de GA resultó mejor para estimar el gasto pico Q_p (Cuadro 9). No obstante, usar la media como medidas descriptivas y de dispersión para realizar un análisis estadístico puede ser engañoso por ser el punto de equilibrio de los datos, ya que es muy sensible a la presencia de observaciones extremas (Infante y Zárate, 2012). Dado que los datos analizados no son simétricos, las desviaciones estándar calculada fue muy elevada; el análisis con esta medida de dispersión tampoco mostró certidumbre. La evaluación estadística de los datos con la RMSE fue más congruente, respecto a la media y la desviación estándar, ya que esta

prueba estadística hace la comparación del error entre dos conjuntos de datos (observado y estimado), amplifica y penaliza con mayor fuerza aquellos errores de mayor magnitud, además describe la magnitud del error en términos que serían relativamente más útiles para los responsables de la toma de decisiones. (Armstrong and Collopy, 1992). Este tipo de análisis es útil cuando el interés es conocer el volumen escurrido en un período de tiempo para dimensionar obras de almacenamiento, pero para el análisis del tránsito de avenidas en cauces con fines de prevención de inundaciones y diseño de obras de excedencias se requiere analizar el comportamiento de los hidrogramas de escurrimiento directo estimados en cada evento de lluvia escurrimiento (Mello *et al.*, 2016; Ruan *et al.*, 2016; Stenta *et al.*, 2016).

Cuadro 9. Volúmenes escurridos (Q) y gastos pico (Q_p) estimados y medidos por evento.

Evento	MEDIDO		SCS-CN		GA	
	Q (m^3)	Q_p ($m^3 s^{-1}$)	Q (m^3)	Q_p ($m^3 s^{-1}$)	Q (m^3)	Q_p ($m^3 s^{-1}$)
1	2660	0.64	9040	1.80	9040	1.80
2	13250	2.86	12920	1.62	15850	2.20
3	6350	1.44	13300	2.30	13320	2.30
4	4960	0.96	14270	1.96	14270	1.96
5	3600	0.54	8800	1.35	8800	1.35
6	8310	1.93	9790	1.82	9950	1.86
7	10690	0.57	16280	0.57	16710	0.57
8	28650	4.46	28770	3.89	27980	4.57
Promedio	9810	1.68	14150	1.91	14490	2.07
RMSE			5430	0.84	5580	0.72

3.3.4. Análisis de los hidrogramas de escurrimiento directo

En el cuadro 10 se aprecia que en los eventos aislados de mayor escurrimiento (dos, seis y ocho) la forma de los hidrogramas fue reproducido con eficacia por el modelo de GA (Figura 9), ya que su estimación resultó excelente (0.92 a 0.95) según el criterio de Nash-

Sutcliffe y con los valores de la RMSE, del MRE y el RE más bajos, en rangos de: 0.14 a 0.43 m³ s⁻¹, 0.20 a 0.28 y 2.0 a 23%, respectivamente. En el evento prolongado ambos modelos reprodujeron el hidrograma de escurrimiento y el gasto pico con el mismo error (RMSE de 0.07 m³ s⁻¹, MRE de 0.35 y RE de cero) y la eficiencia (0.71) fue muy buena según Nash-Sutcliffe.

En los eventos de bajo escurrimiento ambos modelos no reprodujeron los hidrogramas con efectividad y tuvieron los valores más altos de la RMSE y MRE, así como valores negativos en los índices de eficiencia de Nash-Sutcliffe que se clasificaron como insuficientes.

Cuadro 10. Resultados de las pruebas estadísticas de los hidrogramas modelados.

Evento	RMSE		MRE		EF		RE	
	SCS-CN	GA	SCS-CN	GA	SCS-CN	GA	SCS-CN	GA
1	0.59	0.59	0.70	0.70	-7.34	-7.34	-1.81	-1.81
2	0.44	0.25	0.31	0.25	0.77	0.92	0.43	0.23
3	0.67	0.67	0.45	0.45	-1.38	-1.39	-0.60	-0.60
4	0.59	0.59	0.58	0.58	-2.71	-2.71	-1.04	-1.04
5	0.35	0.35	0.46	0.46	-7.11	-7.11	-1.50	-1.50
6	0.14	0.14	0.37	0.28	0.93	0.95	0.06	0.04
7	0.07	0.07	0.35	0.35	0.71	0.71	0.00	0.00
8	0.47	0.43	0.26	0.20	0.91	0.93	0.13	-0.02

Los escurrimientos resultaron muy sensibles a la superficie impermeable porque esta no quedó bien caracterizada, ya que el método de la CN no señala con precisión como se deben asignar los valores a este tipo de superficie a los modelos de SCS-CN y GA, por tal razón este factor afectó la modelación de los hidrogramas en eventos definidos de bajo escurrimiento con una sobrestimación del volumen escurrido en las subcuencas uno, dos, tres y ocho.

En los eventos de alto escurrimiento, el modelo SCS-CN se observaron estimaciones muy cercanas al modelo de GA, ya que este modelo no toma en cuenta la intensidad de la lluvia ni la dinámica de infiltración, al ser la precipitación mayor que la abstracción inicial

ocurre el escurrimiento directo, en consecuencia, también es de esperarse que en eventos de mayor magnitud haya un mayor volumen escurrido. A diferencia del modelo SCS-CN, en el modelo de GA, el escurrimiento directo ocurre cuando la intensidad de la lluvia es mayor a la velocidad de infiltración del agua en el suelo, si la humedad inicial del suelo se encuentra más cercano al punto de saturación y la intensidad de la lluvia supera por mucho a la velocidad de infiltración es posible que también ocurra un mayor escurrimiento directo respecto al modelo de SCS-CN, por este motivo es que el modelo de GA obtuvo el menor RMSE en los eventos de alto escurrimiento.

Las subcuencas seis y siete con suelos forestales, la modelación con GA y SCS-CN estimaron una infiltración con poco o nulo escurrimiento y coincidió con lo observado en campo. La modelación del escurrimiento superficial con GA en estas subcuencas mostró resultados satisfactorios al usar el parámetro ψ_f obtenido por el modelo de Brooks-Corey (1964), mismo que fue diseñado para obtener este parámetro para modelar el flujo del agua en sistemas de riego o drenaje en suelos agrícolas con $\leq 8\%$ de materia orgánica. Para estos suelos profundos y homogéneos, la infiltración fue vertical en forma de pistón (Tucci, 1993), fenómeno fue verificado en campo mediante pruebas de infiltración.

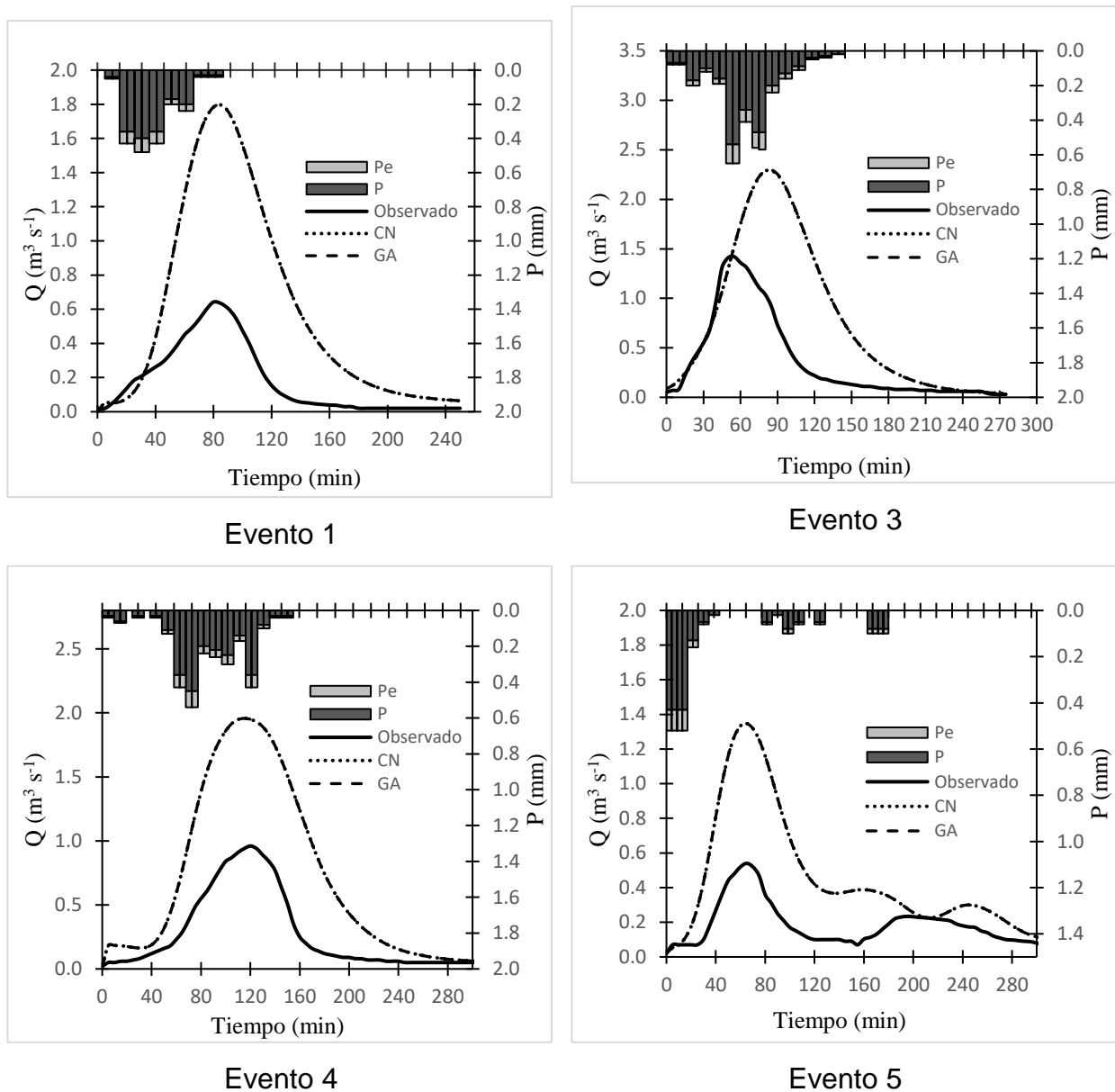


Figura 8. Representación de los hidrogramas medidos y estimados con los modelos SCS-CN y GA en eventos de volúmenes escurridos menores que $6.35 \times 10^3 \text{ m}^3$.

En toda la cuenca, la humedad inicial del suelo (θ_i) del modelo de GA en eventos de alto escurrimiento se encontró que en promedio fue de $0.38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, mientras que en el modelo SCS-CN la abstracción inicial (I_a) promedio fue bajo (46.73 mm) respecto a los eventos de bajo escurrimiento (118 mm); el número de curva empleado en cada subcuenca y cada evento produjo escurrimientos similares a los observados en los sistemas de aforo ubicados al inicio, mitad y salida de los tramos del cauce. Para estos

eventos, se requirió una lámina pequeña (12.8 % promedio de la precipitación) para saturar a los suelos y transformar el resto de la lluvia en escorrentía directa.

El evento 7 (Figura 9) fue un caso especial ya que la precipitación tuvo una duración de 20 horas y la intensidad fue de 3.2 mm h^{-1} , en la salida de la cuenca registró un caudal pico de $0.570 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, en este evento ambos modelos produjeron un gasto pico igual que el observado en el segundo ascenso del hidrograma y la misma sobrestimación del volumen escurrido. La baja intensidad de precipitación de este evento permitió infiltrar 17.88 mm y generar 4.42 mm de escurrimiento, de los 23 mm precipitados.

En el modelo SCS-CN fue difícil saber que factor influyó más en los resultados de los hidrogramas, dado que la I_a contempla: el agua retenida en depresiones, interceptación por follaje, evaporación y la infiltración antes de que comience el escurrimiento (el USDA-NRCS (2004)). En el suelo también fue complicado saber cuál fue la humedad inicial antes del escurrimiento, ya que el modelo SCS-CN no considera un parámetro creíble que explique la retención de humedad antes de la tormenta (Ajmal *et al.*, 2016), sin embargo, en la modelación con SCS-CN, se observó que en la elección del valor de CN debe hacerse con un análisis meticuloso de los factores del cual está en función, dado que el incremento de una unidad en el incremento del valor de CN podría generar un incremento considerable en el escurrimiento (Grimaldi *et al.*, 2013), ya que el modelo SCS-CN es muy sensible a este parámetro que a la intensidad de precipitación (Hawkins, 1993). Respecto a las subcuencas agrícolas fue más fácil la elección de la curva numérica que para áreas forestales, en áreas forestales a menudo se cometen errores en la elección del valor de CN y afectan el cálculo de la escorrentía, ya que los valores de CN en las tablas del manual están orientadas a calcular la escorrentía más exitosamente en cuencas agrícolas y menos exitosas para los pastizales semiáridos y forestales (Kowalik, 2015; Walega, 2015; Tailor, 2016).

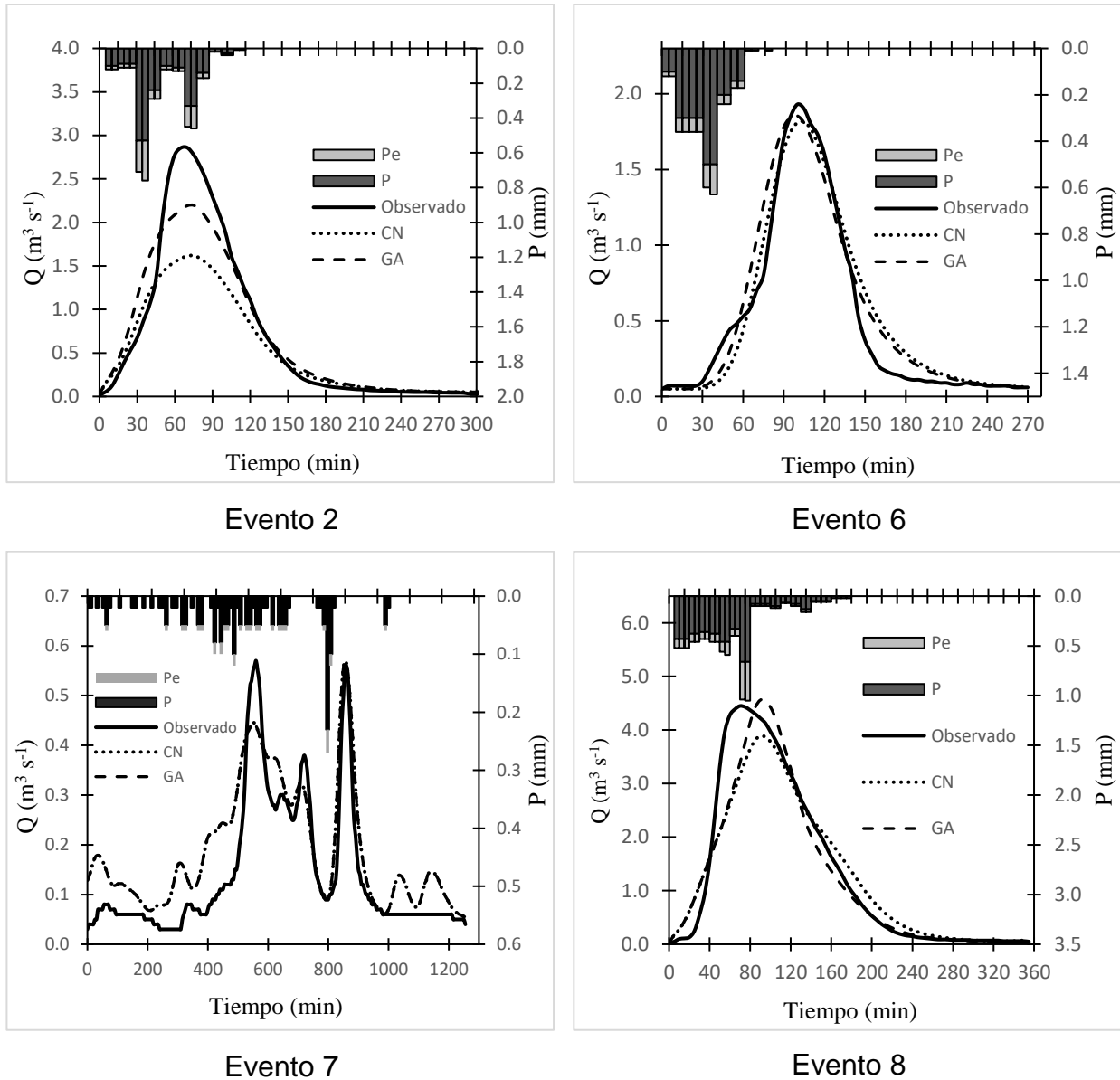


Figura 9. Representación de los hidrogramas medidos y estimados con los modelos SCS-CN y GA en eventos de volúmenes escurridos mayores que $8.31 \times 10^3 \text{ m}^3$.

El modelo de GA presenta mejores resultados en la predicción de volúmenes y gastos pico que el modelo de curva numérica (Van Mullem, 1989; Van Mullem, 1991; Grimaldi *et al.*, 2013); sin embargo la dificultad se encuentra en estimar la presión del frente de succión ψ_f del suelo (Li *et al.*, 2015) así como K_s y θ_s que son propiedades únicas de cada suelo y su obtención demandan altos costos, tiempo y personal especializado; en

cambio el modelo de curva numérica es conceptualmente más simple y es considerado como un adecuado procedimiento a utilizar en las estimaciones de escurrentía (King *et al.*, 1999). En este trabajo no se observó diferencias significativas entre las estimaciones realizadas por los modelos de SCS-CN y GA (Kabiri *et al.*, 2013), sin embargo, el modelo de GA fue el mejor estimador de los hidrogramas de escurrimiento directo en eventos de alto escurrimiento y el modelo de SCS-CN como un segundo modelo potencial a usarse cuando la disponibilidad de datos sea escasa para el uso del modelo de GA.

En este trabajo se observó que el modelo de GA es muy sensible a un ligero incremento en el valor de la humedad inicial (θ_i) y eleva potencialmente el volumen escurrido, obtener este valor previo a los eventos de lluvia escurrimiento se obtienen estimaciones con el menor error posible.

Debido a que las estimaciones realizadas con SCS-CN y GA no representaron fielmente todos los hidrogramas observados, se recomienda realizar la calibración de los modelos e investigar otros métodos de estimación del escurrimiento y la infiltración. Se sugiere dar continuidad al estudio e incluir eventos futuros de mayor volumen y caudal pico ya que el análisis de estos eventos es necesario para definir políticas del manejo hídrico en la cuenca, así mismo se propone la aplicación de los modelos en diferentes cuencas de México con la finalidad de tener certidumbre en la efectividad de los mismos para estimar Q y Q_p .

De la experiencia obtenida en este trabajo, se sugiere usar el modelo de GA para estimar los hidrogramas de escurrimiento directo y los caudales pico en cuencas similares a la cuenca Chapingo con fines de diseño de obras hidráulicas de excedencia y de análisis de avenidas en cauces, mientras que el modelo de SCS-CN se recomienda para el dimensionamiento de obras de almacenamiento.

3.4. CONCLUSIONES

Para el conjunto de datos de volúmenes totales escurridos y gastos pico de los ocho eventos estudiados, el modelo SCS-CN estimó mejor el volumen escurrido con una RMSE de $5.43 \times 10^3 \text{ m}^3$, mientras que el modelo de GA estimó mejor el gasto pico con una RMSE de $0.72 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. En el análisis por hidrograma de escurrimiento directo, en los

eventos de lluvia aislados con escurrimientos mayores que $8.31 \times 10^3 \text{ m}^3$ y $Q_p \geq 1.93 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, el modelo de GA reprodujo mejor los hidrogramas con una RMSE en el rango de 0.14 a $0.43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y un MRE de 0.20 a 0.28 y una eficiencia de Nash en el rango de 0.92 a 0.95. En los eventos de lluvia aislados con escurrimientos menores que $6.35 \times 10^3 \text{ m}^3$ y $Q_p \leq 1.44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ambos modelos no reprodujeron con eficacia los hidrogramas observados y sobreestimaron con la misma magnitud los volúmenes de escurrimiento y los caudales pico, el índice de Nash-Sutcliffe para estos eventos se ubicaron en el rango de -1.38 a -7.34. En el evento de lluvia prolongado, ambos modelos tuvieron una eficiencia de Nash de 0.71 con sobreestimaciones idénticas en el volumen de escurrimiento (RMSE de $0.07 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y MRE de 0.35) y con estimaciones del caudal pico iguales que el valor observado.

3.5. LITERATURA CITADA

- Ajmal, M., T. Ali., and T. Wong. (2016). A CN-Based Ensembled Hydrological Model for Enhanced Watershed Runoff Prediction. *Water*. 8(20):1-17.
- Armstrong, J. S., and F. Collopy. (1992). Error Measures For Generalizing About Forecasting Methods: Empirical Comparisons. *International Journal of Forecasting*. 8 (1992):69-80.
- Aparicio-Mijares, F. J. (2013). Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa. Primera Edición. Grupo Noriega Editores. Mexico D. F. 302 p.
- Brooks, R. H., and T. A. Corey. (1964). Hydraulic Properties of Porous Media. *Hydrology Paper No. 3*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. pp: 1-10.
- Brakensiek, D. L. (1977). Estimating the effective capillary pressure in the Green and Ampt infiltration equation. *Water Resour. Res.*, 13(3), 680-682.
- Chow, V. T. (1994). Hidrología aplicada. McGraw-Hill. México D.F. pp: 150-158.
- CruickShank, G., G. (2007). Proyecto Lago de Texcoco: Rescate Hidroecológico. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México D. F. 140 p.

- Day, P.R. (1965). Hydrometer Method of Particle Size Analysis. *In: Black, C.A., Ed., Methods of Soil Analysis, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin Argon, pp:562-563.*
- Green, W.H., and G. A. Ampt. (1911). Studies on Soil Physics, Part 1, the Flow of Air and Water through Soils. *Journal of Agricultural Science. 4:11-24.*
- Grimaldi, S., A. Petroselli, A., and N. Romano. (2013). Green-Ampt Curve-Number mixed procedure as an empirical tool for rainfall-runoff modelling in small and ungauged basins. *Hydrological processes, pp: 1253-1264.*
- Ficklin, D. L., and M. Zhang. (2013). A comparison of the curve number and Green-Ampt models in an agricultural watershed. *Transactions of the ASABE (ISSN 2151-0032). 56(1): 61-69.*
- Fuentes R., C. (1986). Capítulo I: Caracterización mínima del suelo con fines de riego. *In: Manual para diseño de zonas de riego pequeñas, De León, M., and R. Robles B. Eds., Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, Méx., 3-15.*
- Fuentes, R., C. Haverkamp, and J. Y. Parlange. 1992. Parameter constraints on closed-form soil-water relationships. *Journal of Hydrology. 134: 117-142.*
- Kabiri, R., A. Chan, and R. Bai. (2013). Comparison of SCS and Green-Ampt Methods in Surface Runoff-Flooding Simulation for Klang Watershed in Malaysia. *Open Journal of Modern Hydrology. 3:102-114.*
- Hawkins, R. H. (1995). Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *Journal of irrigation and drainage engineering. 119(2):334-345.*
- King, K. W., J. G. Arnold, and R. L. Bingner. (1999). Comparison of Green-Ampt and Curve Number Methods on Goodwin Creek Watershed Using SWAT. *Transactions of the ASAE. 42(4): 919-925.*
- Kowalik, T., and A. Walega. (2015). Estimation of CN parameter for small agricultural watersheds using asymptotic functions. *Water. 7(3): 939-955.*
- Kale, V. R., and B. Sahoo. (2011). Green-Ampt Infiltration Models for Varied Field Conditions: A Revisit. *Water Resour Manage. 25:3505–3536.*

- Landini A, M., D. Martínez, H. Días, E. Soza, D. Agnes, and Cl. Sainato. (2007). Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Ci. Suelo*. 25(2):123-131.
- Jun Li, J., Z. Wang, C. Liu. (2015). A combined rainfall infiltration model based on Green–Ampt and SCS-curve number. *Hydrol. Process*. 29: 2628–2634.
- McCuen, R. H. (1998). *Hydrologic Analysis and Design*. Department of civil engineering, University of Maryland. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. pp: 501-503.
- Ma, M. Y., F. Shaoyuan, S. Dongyuan, G. Guangyao, and H. Zailin. (2009). Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green–Ampt model and HYDRUS-1D. *Computers and Electronics in Agriculture*. 71S:S40-S47.
- Ma, Y., Feng, S., H. Zhan, X. Liu, D. Su, S. Kang, and X. Song. (2011). Water Infiltration in Layered Soils with Air Entrapment: Modified Green-Ampt Model and Experimental Validation. *J. Hydrol. Eng.*, 16(8):628-638.
- Mello, R. C., L. N. Darrell, L. P. Campos, S. Beskow, and N. Curi. (2016). Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. *Ciência e Agrotecnologia*. 40(1):7-25.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. (1970). River flow forecasting through conceptual models. A discussion of principles. *J. Hydrol*. 10: 282–290.
- Ogden, F., B. Saghafian. (1997). Green and Ampt Infiltration With Redistribution. *J. Irrigation Drain Eng*. 123:386-393.
- Rawls, W. J., M. ASCE, L. Donald, Brakensiek, and N. Miller. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *J. Hydraul. Eng*. 109:62-70.
- Ruan, H., S. Zou, Z. Cong, Y. Wang, Z. Yin, Z. Lu, F. Li, and B. Xu. (2016). Runoff simulation by SWAT model using high-resolution gridded precipitation in the upper Heihe River Basin, Northeastern Tibetan Plateau. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*. pp. 2016-594.

- Sánchez C., I., M. Velázquez V., R. Jasso I. y J. L. González B. (2003). Caracterización de la retención máxima de humedad en el suelo del método SCS-CN. Aplicación a una cuenca de México. Ing. Hidrául. Méx. 18: 111-117.
- Saxton, K., and W. Rawls. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. Soil Sci. Soc. Am. J. 70(5):1569-1578.
- Stenta, H. R., G. A. Riccardi, and P. A. Basile. (2016). Modelación distribuida del escurrimiento superficial en la cuenca del río Tercero-Carcaraña. Aqua-LAC. (8): 44- 57.
- SEMARNAT (Secretaria de Medioambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. estudios, muestreo y análisis: NOM-021-RECNAT-2000. <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/rn/rn021-02.pdf>. (Consulta: mayo, 2016).
- Taylor, D., and N. J. Shrimali. (2016). Surface runoff estimation by SCS Curve Number method using GIS for Rupen-Khan watershed, Mehsana district, Gujarat. J. Indian Water Resour. Soc. 36(4):1-5.
- Teegavarapu, R. S. V., and V. Chandramouli. (2005). Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. J. Hydrol. 312 (2005): 191-206.
- Tucci, C. E. M. (1993). Hidrología: Ciência e Aplicação. Editora da Universidade, UFRGS, Porto Alegre.
- USACE ARMY-HEC US (Army Corp Engineers-Hydrologic Engineering Center). (2013). User's Manual. Washington, D.C. 442p.
- USDA-NRCS (U.S. Department of Agriculture – Natural Resources Conservation Service). (2004). National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 10. Hydrology; U.S. Department of Agriculture, Washington D.C. pp: 10.1-10.22.
- USDA-NRCS (U.S. Department of Agriculture – Natural Resources Conservation Service). (2009). National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 7. Hydrology; U.S. Department of Agriculture, Washington D.C. pp: 7.1-7.2.

- Van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(5): 892–898.
- Van Mullem, J. A. (1989). Applications of the Green and Ampt infiltration model to watershed in Montana and Wyoming. Bozeman, Montana, E.E.U.U.: Montana State University. 101p.
- Van Mullem, J. A. (1991). Runoff and peak discharges using Green-Ampt infiltration model. *Journal of irrigation and drainage Engineering*. 117:354-370.
- Viji, R., P. Prasanna, and R. Ilango. (2015). Modified SCS-CN and Green-Ampt Methods in Surface Runoff Modelling for the Kundahpallam Watershed, Nilgiris, Western Ghats, India. *Aquatic Procedia*, 4:677 – 684.
- Walega, A., and A. Rutkowska. (2015). Usefulness of the Modified NRCS-CN Method for the Assessment of Direct Runoff in a Mountain Catchment. *Acta Geophysica*. 63(5): 1423-1446.

4. CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS SCS-CN, GREEN-AMPT Y CN4GA EN LA CUENCA RÍO CHAPINGO

CALIBRATION OF THE SCS-CN, GREEN-AMPT AND CN4GA MODELS IN THE CHAPINGO RIVER BASIN.

Ricardo Montiel Gonzaga⁴, Jorge Víctor Prado Hernández²

RESUMEN

Conocer la efectividad en la estimación del proceso de lluvia-escurrimiento con modelos hidrológicos en cuencas no aforadas dará certeza a los manejadores del recurso agua para definir buenas políticas de manejo y aprovechamiento. El propósito de esta investigación fue evaluar la representatividad de tres modelos hidrológicos en la reproducción de ocho eventos de lluvia escorrenría ocurridos en la cuenca Río Chapingo, México, cuya superficie es de 15.462 km², los modelos usados fueron SCS-CN (CN), Green-Ampt (GA); y el modelo mixto que integra Curva Numérica y Green-Ampt denominado CN4GA. La modelación hidrológica con CN y GA se hicieron en el software HEC-HMS; CN4GA fue modelado en el software EBA4SUB. La modelación de los hidrogramas se hizo en dos modalidades, en la primera no se calibraron los modelos hidrológicos con la finalidad de evaluar la representatividad de cada modelo en la estimación del volumen escurrido y en la segunda los modelos fueron previamente calibrados. Los hidrogramas estimados se evaluaron mediante pruebas estadísticas del error (RMSE, MRE) y con el coeficiente de Nash-Sutcliffe, el gasto pico fue evaluado con el RE, los cuales mostraron que en los modelos no calibrados GA reprodujo mejor los hidrogramas en eventos de mayor escurrimiento, con los valores más bajos de RMSE y MRE y Q_p con los valores más bajos de RE, SCS-CN estimó mejor Q ; y CN4GA subestimo Q y Q_p con los más altos valores de RMSE y MRE. En los eventos calibrados el modelo de Green Ampt reprodujo mejor los hidrogramas y el escurrimiento pico con valores más bajos de RMSE, MRE y RE, SCS-CN fue el segundo mejor estimador de Q y Q_p , CN4GA fue el de mayor error en la estimación del escurrimiento pico y el escurrimiento superficial.

Palabras Clave: Curva Numérica, Green-Ampt, CN4GA, gasto pico, escurrimiento superficial.

SUMMARY

Knowing the effectiveness in estimating the rainfall-runoff process with hydrological models in ungauged basins will give certainty to water resource managers to define good management and development policies. The purpose of this research was to evaluate the representativeness of three hydrological models in the reproduction of eight rainfall events occurred in the Chapingo River basin in Mexico, whose surface area is 15,462 km²; the models used were SCS-CN (CN), Green-Ampt (GA); and the mixed model that integrates Numerical Curve and Green-Ampt called CN4GA. The hydrological modeling with CN and GA was made in the HEC-HMS software; CN4GA was modeled in the EBA4SUB software. The modeling of the hydrograms was made in two modalities, in the first the hydrological models were not calibrated in order to evaluate the representativeness of each model in the estimation of the drained volume and in the second the models were previously calibrated. The estimated hydrograms were evaluated by statistical error tests (RMSE, MRE) and with the Nash-Sutcliffe coefficient, the peak flow was evaluated with the RE, which showed that in the non-calibrated models GA better estimated the hydrograms in events of greater runoff, with the lowest values of RMSE and MRE and Q_p with the lowest values of RE, SCS-CN better evaluated Q and CN4GA underestimated Q and Q_p with the highest values of RMSE and MRE. In the calibrated events the Green Ampt model better reproduced the hydrograms and peak runoff with lower RMSE, MRE and RE values, SCS-CN was the second best estimator of Q and Q_p , CN4GA was the largest error in the estimation of peak runoff and surface runoff.

Keywords: Numerical curve, Green-Ampt, CN4GA, peak flow, surface runoff.

Tesis de doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo.

¹Estudiante del doctorado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA).

²Profesor investigador de posgrado Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA).

4.1. INTRODUCCION

El uso de los modelos hidrológicos permite estimar el escurrimiento superficial, prevenir desastres naturales por inundación, realizar el balance hidrológico en cuencas, entre otras aplicaciones. Los modelos hidrológicos tienen la ventaja de que evitan establecer sistemas de aforo, contratar personal operativo y realizar una inversión económica, sin embargo, para su aplicación se requiere tener el conocimiento conceptual de los mismos y antes de usarse deben ser evaluados. Definir un modelo que estime el escurrimiento superficial con certidumbre permitirá a los tomadores de decisiones definir las políticas de manejo y aprovechamiento del recurso agua. En México los modelos hidrológicos más usados en cuencas no aforadas son el método racional, Curva numérica del Servicio de Conservación de suelos (SCS-CN) de Estados Unidos y el modelo de infiltración de Green-Ampt (GA), de estos modelos GA este el menos usado debido a la complejidad en obtener la presión del frente de succión ψ_f del suelo (Li *et al.*, 2015) y así como K_s y θ_s que son propiedades únicas de cada suelo. El modelo SCS-CN es conceptualmente menos complejo de entender y de emplearse, no requiere mucho conocimiento sobre hidrología y aplicado a pequeñas cuencas agrícolas permite estimar el escurrimiento con buena precisión (Sánchez *et al.*, 2003). El modelo de infiltración de Green y Ampt (GA) reproduce de forma aceptable la dinámica del movimiento del agua en suelos estratificados (Ma *et al.*, 2011), y para estimar escurrimientos superficiales en cuencas con diferentes usos del suelo y condiciones topográficas (Van Mullem, 1991). El modelo de GA predice con mayor precisión en tormentas grandes mientras que SCS-CN predice mejor en eventos de pequeñas tormentas, SCS-CN supone una abstracción inicial antes de la escorrentía superficial y el modelo de GA asume el escurrimiento superficial sólo cuando la precipitación es mayor la infiltración (Ficklin *et al.*, 2013). En cuencas con 50% de urbanización ambos modelos hidrológicos no han mostrado diferencias significativas de error en la estimación del gasto pico y en volumen (Kabiri *et al.*, 2013); al incluir el parámetro de la profundidad del almacenamiento local efectivo disponible después de que la escorrentía comience en el modelo SCS-CN proporciona una estimación de escorrentía baja comparado con el método de Green-Ampt (Viji *et al.*, 2015). Grimaldi *et al.* (2013a) propusieron un procedimiento mixto denominado CN4GA para cuencas no

aforadas, el cual la cantidad de lluvia neta total calculada con SCS-CN se emplea para calibrar el sistema hidráulico del suelo del modelo GA, los eventos evaluados con este método en cuencas de tamaño variable proporciona hidrogramas con picos más altos y duraciones más cortas en la mayoría de los eventos, este enfoque proporciona resultados más realistas que el método SCS-CN. Li *et al.* (2015) realizaron un modelo integrado de infiltración basado en SCS-CN y GA, añadieron el término de inercia a GA logrando una ecuación de gobierno completa para la infiltración por momento de equilibrio, utiliza SCS-CN para calcular la abstracción inicial, el modelo resuelve el dilema de estimar h_f y supera la limitación de h (encharcamiento en la superficie distinta de cero) y facilita el cálculo de la escorrentía para simulaciones de inundación.

Con base en los antecedentes en trabajos realizados en diferentes partes del mundo con los modelos descritos, este trabajo tuvo como propósito evaluar el escurrimiento superficial estimado con los modelos SCS-CN, GA y el modelo mixto CN4GA de ocho eventos de lluvia-escorrentía ocurridos en la cuenca Chapingo México. Se evaluó la efectividad de cada modelo para predecir la forma de los hidrogramas, estimar el volumen total escurrido y el escurrimiento pico en la cuenca no aforada río Chapingo, la modelación se hizo de maneras en la primera los modelos no se calibraron (NC) usando únicamente los datos calculados meticulosamente con información obtenida en campo y en laboratorio, en la segunda modalidad, los modelos fueron calibrados (C) ajustando algunos de los parámetros hidrológicos. La reproducción de los hidrogramas fue evaluada mediante las pruebas estadísticas de la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), el Error Relativo Medio (MRE) y el coeficiente de Nash-Sutcliffe, el volumen total escurrido (Q) con la RMSE y el gasto pico (Q_p) se evaluó con el error relativo (RE). El modelo con el mejor potencial para predecir los hidrogramas medidos se usará como una herramienta para predecir el escurrimiento superficial en las cuencas no aforadas similares a la cuenca río Chapingo.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1. Área de estudio

El proyecto de investigación se realizó en la cuenca del río Chapingo que tiene un área de 15.47 km² y está integrada por ocho subcuencas (Figura 10). Se ubica en el extremo oriente del municipio de Texcoco, Estado de México y forma parte de la cuenca del Valle de México en la Altiplanicie Mexicana, sus coordenadas geográficas extremas son 19° 29' 22.83" N, 98° 53' 09.17" O y 19° 25' 15.28" N, 98° 45' 40.31" O y altitudes de 2250 a 3580 msnm, tiene y una pendiente de 33.1%.

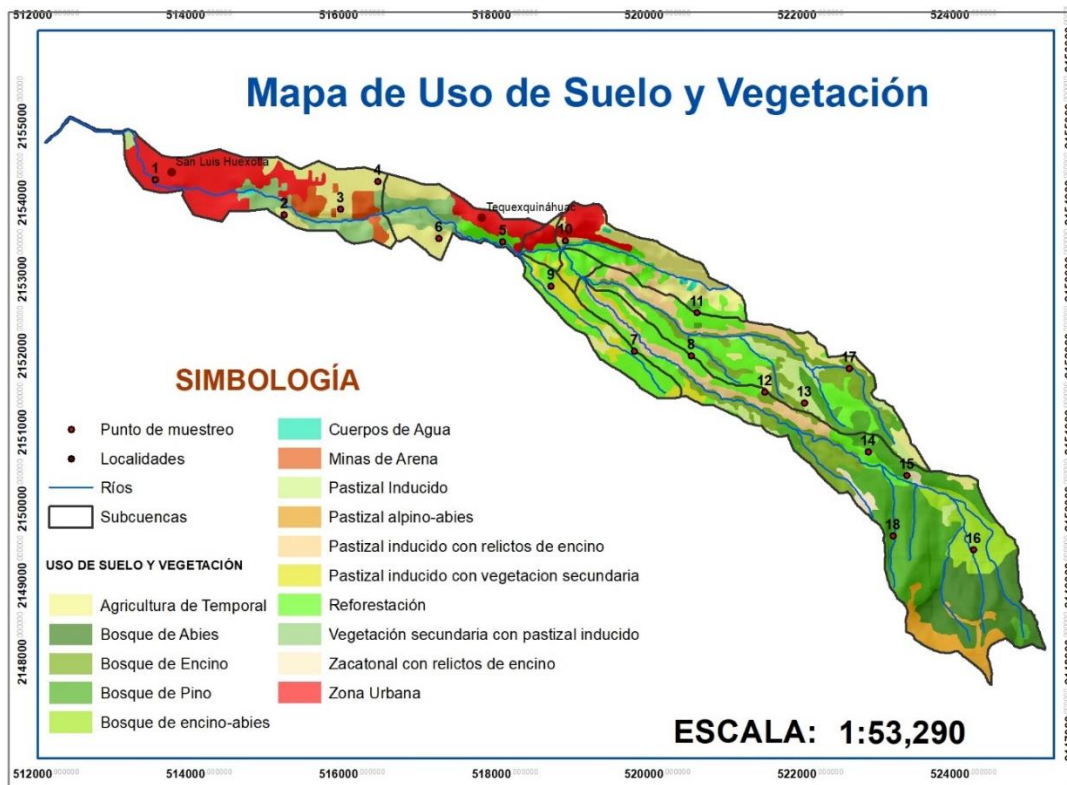


Figura 10. Subcuencas, usos de suelo y puntos de muestreo en la cuenca Río Chapingo.

4.2.2. Construcción de los modelos hidrológicos en HEC HMS

El diseño de los modelos hidrológicos y la modelación del escurrimiento se hizo en el software hidrológico HEC-HMS desarrollado por el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos para simular los procesos de lluvia-escurrimiento dentro de cuencas hidrográficas (USACE ARMY-HEC, 2013), el modelo hidrológico tuvo como componente ocho subcuencas y tres tramos de canal (Figura 11).

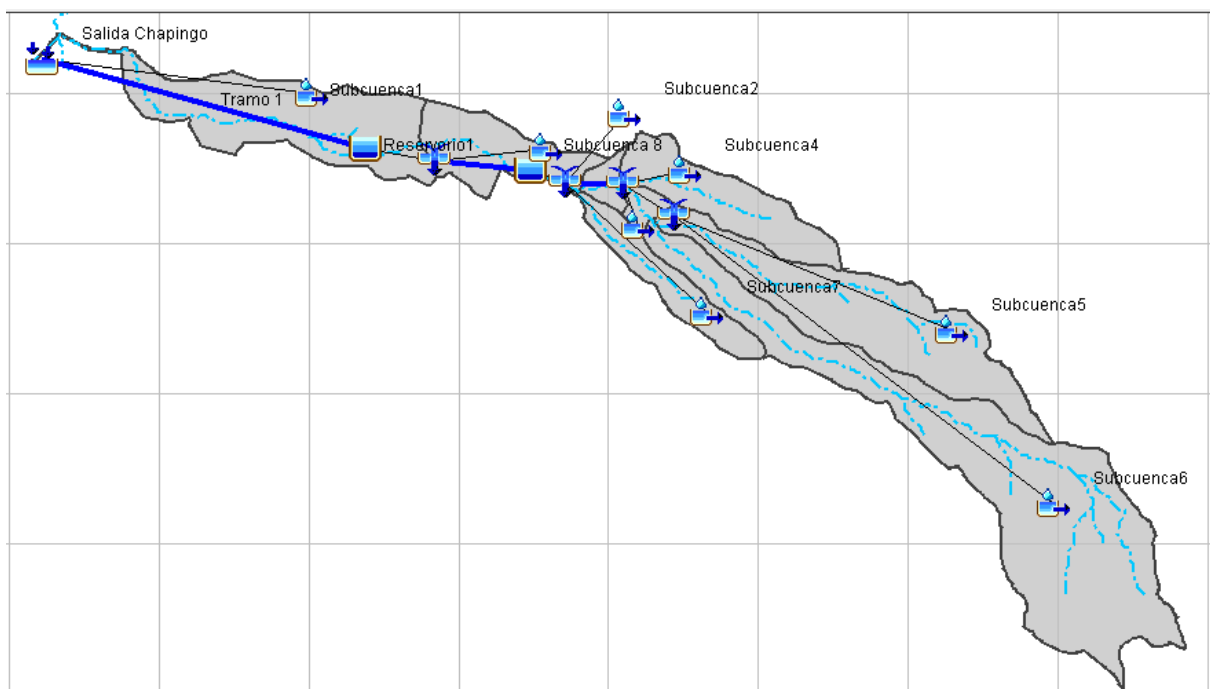


Figura 11. Modelo hidrológico de la cuenca río Chapingo realizado en HEC HMS.

4.2.3. Selección de hidrogramas de escurrimiento directo y datos de precipitación

En la cuenca se establecieron cuatro estaciones hidrométricas, dos ubicadas en la parte media de la cuenca, otro a la mitad del cauce principal y el cuarto se instaló a la salida de la cuenca. Se eligieron ocho eventos de lluvia escorrentía a partir de realizar un análisis histórico de los hidrogramas registrados en los años 2014, 2016 y 2017 a la salida de la cuenca de volúmenes escurridos en el rango de $2.660 \times 10^3 \text{ m}^3$ a $28.650 \times 10^3 \text{ m}^3$

y caudales máximos de $0.57 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $4.46 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; de ellos siete eventos fueron aislados y bien definidos, un evento fue prolongado y se caracterizó por tener lluvias intermitentes y de baja intensidad. Los modelos fueron alimentados con información climática correspondiente a las fechas en que ocurrieron los eventos (Cuadro 11), de los cuales se recabaron de tres estaciones meteorológicas automatizadas ubicadas en la parte baja, media y alta de la cuenca.

Cuadro 11. Características de los eventos de lluvia-escorrentía modelados en HEC-HMS.

Evento	Tipo de evento	Fecha	hp [†] (mm)	d [¶] (h)	i [§] (mm hr ⁻¹)	Q_p ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Q (m^3)
1	Aislado	07/08/2014	16.00	1.60	15.20	0.64	2660
2	Aislado	11/08/2014	20.60	1.80	14.50	2.86	13250
3	Aislado	28/05/2016	25.00	4.10	17.80	1.44	6350
4	Aislado	11/06/2017	15.90	4.60	4.70	0.96	4960
5	Aislado	04/07/2017	15.50	2.10	2.50	0.54	3600
6	Aislado	12/07/2017	15.50	1.30	15.40	1.93	8310
7	Prolongado	10/08/2017	22.30	20.80	3.20	0.57	10690
8	Aislado	30/08/2017	36.90	2.80	30.00	4.46	28650

[†] Altura de la precipitación registrada.

[¶] Duración de la lluvia.

[§] Intensidad de la lluvia.

4.2.4. Variables de entrada y salida en los modelos hidrológicos

Los modelos SCS-CN y Green-Ampt se implementaron en el modelo hidrológico diseñado en HEC HMS, para ambos modelos la variable de entrada fue la precipitación. Las variables de salida para el modelo SCS-CN fueron la evapotranspiración y el escurrimiento directo y para el modelo de GA fueron la infiltración y evapotranspiración; en los dos modelos la evapotranspiración fue calculado por el método de Penman-Monteith. En la modelación no se incluyeron la retención de agua por el follaje y el agua

en depresiones. El cálculo de la infiltración se hizo con el modelo de GA y el escurrimiento directo por el modelo SCS-CN, los cuales se especifican a continuación.

4.2.5. Modelo de infiltración de Green-Ampt

El modelo de Green y Ampt (1911), es una representación conceptual del proceso de infiltración del agua en el suelo con algunas hipótesis simplificadoras del fenómeno, que resulta de combinar la ley de continuidad y la ley de Darcy y se expresa como (Fuentes, 1992; McCuen, 1998).

$$I(t) = K_s + \gamma \ln \left(1 + \frac{I}{\gamma} \right) \quad \text{con} \quad \gamma = (h + \psi_f)(\theta_s - \theta_i) \quad (1)$$

donde; $I(t)$ es la infiltración acumulada (cm) en el tiempo t (h); ψ_f es la presión capilar en el frente de humedecimiento (cm); h es el tirante de agua sobre la superficie (cm); θ_s es el contenido de humedad a saturación del suelo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_i es el contenido de humedad inicial del suelo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); y K_s es la conductividad hidráulica a saturación (cm h^{-1}).

Se hizo un muestreo de suelos en 18 sitios de la cuenca (Figura 10) a una profundidad de 0-30 cm, los cuales fueron elegidos por el uso de suelo y tipo de suelo. A cada suelo muestreado se le determinó el valor de K_s por el método del permeámetro a carga constante. El valor de ψ_f se obtuvo al aplicar la metodología propuesta por Brooks y Corey (1964). La humedad volumétrica a saturación (θ_s) fue obtenida considerando una tensión del suelo de 0 bar; la humedad inicial (θ_i) se determinó previo a la ocurrencia de los eventos de lluvia-escorrentía. Los parámetros hidráulicos de GA obtenidos en los 18 sitios se ponderaron para obtener un solo valor por subcuenca.

4.2.6. Modelo de escurrimiento de la Curva Numérica

El modelo SCS-CN fue propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y el Servicio de Conservación de Suelos (USDA-NRCS, 2004), cuya expresión matemática es:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad \text{si } P \geq I_a, Q = 0 \text{ de lo contrario} \quad (2)$$

donde Q, es el escurrimiento en (mm); P es la precipitación (mm); S es el potencial máximo de retención (mm); I_a es la abstracción inicial (mm), definida como una proporción del valor de S:

$$I_a = \lambda S \quad (3)$$

donde λ es el coeficiente de abstracción inicial (adimensional), para cuencas pequeñas su valor estándar es 0.2 (Chow, 1994). El parámetro S depende del tipo de suelo, uso de suelo, condición hidrológica y condición de humedad antecedente (AMC), y se determinó con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

donde CN es el valor de la curva numérica que está en función del tipo, uso y condición hidrológica del suelo, cobertura vegetal y de las prácticas de manejo. Los valores de CN fueron asignados a partir de las tablas del Manual Nacional de Ingeniería del USDA-NRCS (2009), después se recalcularon de acuerdo a la condición de humedad antecedente (AMC) presentada por la precipitación acumulada de los cinco días previos al evento de lluvia (McCuen, 1998). Después de ponderar los valores de CN para cada subcuenca, se calcularon las láminas de escurrimiento con la ecuación (2).

4.2.7. Modelización hidrológica en el software HEC-HMS

Una vez obtenido los parámetros hidrológicos e hidrodinámicos de modelos SCS-CN y GA, así como los datos climatológicos, se procedió a alimentar de datos a los sistemas hidrológicos y simularlos.

4.2.8. Procedimiento Mixto CN4GA

El tercer modelo usado es el denominado CN4GA (CN for GA) que fue propuesto por Grimaldi *et al.* (2013a), es un modelo mixto que resulta de una combinación de los métodos de SCS-CN y Green-Ampt. Este modelo tiene la idea base de que la abstracción inicial (I_a) y la precipitación efectiva (P_e) calculadas según el enfoque SCS-CN, son utilizados para estimar dos parámetros de GA: el tiempo de estancamiento (t_p) y la conductividad hidráulica efectiva (K_{eff}). El método comienza con la suposición inicial, de una conductividad hidráulica efectiva inicial ($K_{eff-ini}$) para el parámetro de conductividad hidráulica saturada, y luego este parámetro se optimiza para obtener el resultado final de la conductividad hidráulica efectiva optimizada ($K_{eff-opt}$) para el cual el volumen total de la precipitación efectiva proporcionada por CN4GA es igual al proporcionado por SCS-CN (Petroselli *et al.*, 2013).

Los datos hidráulicos ponderados (ψ_f , K_s , θ_s y θ_i) de entrada del modelo CN4GA se derivaron a partir del análisis de las propiedades físicas de los suelos muestreados en los dieciocho sitios de la cuenca, en el caso de θ_i se obtuvo previo a la ocurrencia de los eventos evaluados. El valor de CN_{II} ponderado por subcuenca se obtuvo a partir de los valores de CN_{II} correspondientes a cada uno de los sitios de muestreo. El método de conversión de la lámina escurrida a hidrograma de escurrimiento directo se hace a través del método del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico denominado WFIUH-1 par (Grimaldi *et al.*, 2013), y el tiempo de concentración es calculado mediante la fórmula propuesta por el NRCS (2008) usando el modelo de elevación digital de la cuenca. La modelación hidrológica se realizó en el software EBA4SUB, este modelo no considera la evapotranspiración, la retención por follaje y las pequeñas depresiones.

4.2.9. Evaluación estadística de los modelos SCS-CN, Green-Ampt y CN4GA no calibrados y calibrados

La representatividad de los modelos SCS-CN, GA y CN4GA para estimar hidrogramas de escurrimiento directo ocurridos en cada evento, se obtuvo al evaluar los valores observados y los estimados obtenidos mediante los modelos no calibrados (NC) y calibrados (C) al aplicar la prueba estadística de la Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio (RMSE), el Error Relativo Medio (MRE) y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (1970). La evaluación del volumen escurrido por evento se hizo con la RMSE y evaluación de la exactitud en la predicción del caudal pico (Q_p) por evento se empleó el Error Relativo (RE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{calc})^2} \quad (5)$$

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(Q_{obs} - Q_{calc})}{Q_{calc}} \right| \quad (6)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (7)$$

$$RE = \frac{(Q_{obs} - Q_{calc})}{Q_{obs}} \quad (8)$$

dónde: N, es el número total de observaciones; Q_{obs} , son los caudales observados ($m^3 s^{-1}$); Q_{calc} , corresponde a los caudales estimados ($m^3 s^{-1}$); y $\overline{Q_{obs}}$ es la media de los caudales observados (Teegavarapu *et al.*, 2005; Ma *et al.*, 2009).

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores ponderados de ψ_f calculados con el modelo de Brooks-Corey (1964), se ubicaron dentro de los valores reportados por Rawls *et al.* (1983) a excepción de la subcuenca tres (Cuadro 12). En las subcuencas uno, dos, tres y ocho cuyos suelos están ocupados por agricultura de temporal la conductividad hidráulica fue baja debido a que la

cuenca posee suelos francos compactados, solo en las subcuencas forestales (seis y siete) caracterizadas por tener suelos profundos y alto porcentaje de materia orgánica la conductividad hidráulica fue mayor al igual que la humedad a saturación; en las subcuencas uno, dos, tres, cuatro, cinco y ocho se obtuvieron valores bajos de humedad a saturación debido a que los suelos se han modificado algunas de sus características físicas debido al uso actual del suelo (agricultura, pastizales y reforestación), en estos suelos la porosidad y el contenido de materia orgánica es menor con respecto a los suelos forestales.

Cuadro 12. Valores ponderados por subcuena de los parámetros del modelo Green-Ampt.

Subcuena	K_s (mm h⁻¹)	ψ_f (mm)	θ_s (cm³ cm⁻³)
1	5.98	215.95	0.50
2	9.40	190.71	0.48
3	2.30	1295.60	0.54
4	5.80	188.02	0.52
5	4.70	233.24	0.51
6	4.90	179.24	0.57
7	4.50	188.02	0.60
8	10.10	233.24	0.53

Los valores de CN del modelo SCS-CN correspondieron a las condiciones de humedad seca (CN(I)) e intermedia (CN(II)), esto debido a que la precipitación acumulada de los cinco días previos a los eventos de lluvia fue de 10.1 a 38.1 mm. En las subcuencas uno y cinco con uso de suelo de agricultura de temporal y zona urbana fue donde se observaron los valores más altos de CN (56.48 a 76.02), las subcuencas dos, cuatro y ocho con uso de suelo de agricultura se estimaron los valores intermedios de CN (44.64 a 64.28) y las subcuencas tres, seis y siete con uso de suelo forestal se obtuvieron los valores más bajos de CN (15.78 a 37.58).

En los datos de entrada del modelo CN4GA hubo particularidades de uso; para el caso de los valores ponderados ψ_f , θ_s y K_s se mantuvieron constantes durante la modelación en los ocho eventos, el único valor variable fue la humedad inicial el cual fue más elevado en eventos de alto escurrimiento (Cuadro 13). El tiempo de concentración promedio fue de 1.3 horas en los modelos calibrados mientras que para los no calibrados fue de 1 hora. Los valores promedios de CNII para el modelo CN4GA sin calibrar fue de 77.60 y el promedio de CNII para el calibrado fue de 75.98, aunque la diferencia entre ambos valores de curva numérica fue menor a 2 unidades, el incremento de una unidad en CN incremento potencialmente el escurrimiento superficial (Grimaldi et al., 2013).

Cuadro 13. Datos hidráulicos e hidrológicos de entrada para el modelo CN4GA en eventos calibrado y no calibrado.

Parámetro	Evento							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ψ_f (mm)	237.44	237.44	237.44	237.44	237.44	237.44	237.44	237.44
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59
θ_i (cm ³ cm ⁻³)	0.38	0.41	0.24	0.11	0.17	0.31	0.37	0.38
K_s (mm h ⁻¹)	392.52	392.52	392.52	392.52	392.52	392.52	392.52	392.52
CN _{II} No calibrado	77.60	77.60	77.60	77.60	77.60	77.60	77.60	77.60
CN _{II} Calibrado	80.90	80.50	72.40	72.00	80.40	81.00	73.00	67.70
Tc (h) No calibrado	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Tc (h) Calibrado	1.80	1.60	1.30	1.00	1.00	1.00	1.30	2.00

4.3.1. Análisis del volumen total escurrido y escurrimiento pico en eventos no calibrados

El análisis de resultados de los volúmenes escurridos y escurrimiento pico previos a la calibración mostró que el modelo de SCS-CN tuvo el valor más bajo en la RMSE en la evaluación del volumen escurrido mientras que el modelo de GA obtuvo la RMSE más baja en la evaluación del gasto pico (Cuadro 14). El modelo CN4GA obtuvo los valores más altos de la RMSE en la estimación del volumen escurrido y en gasto pico. Para este

análisis estadístico en específico con el uso de la media y la desviación estándar no mostraron certidumbre en la efectividad de los modelos, pudiendo ser engañoso tomar como válido este tipo de estadísticos, ya que la media por ser el punto de equilibrio de los datos es muy sensible a la presencia de observaciones extremas (Infante y Zarate, 2012), dado que en el análisis se observó una desviación estándar alto. Sin embargo, la evaluación estadística de los datos con la RMSE fue más congruente, ya que esta prueba estadística hace la comparación del error entre dos conjuntos de datos (observado y estimado), amplifica y penaliza con mayor fuerza aquellos errores de mayor magnitud, no obstante, el análisis sigue siendo poco confiable, ya que esta prueba requiere de mayor serie de datos para su aplicación (Armstrong and Collopy, 1992).

Cuadro 14. Volúmenes de escurrimiento (Q) y gastos pico (Q_p) observados y estimados con los modelos no calibrados.

Evento	Observados		CN		GA		CN4GA	
	Q (m^3)	Q_p (m^3s^{-1})	Q (m^3)	Q_p (m^3s^{-1})	Q (m^3)	Q_p (m^3s^{-1})	Q (m^3)	Q_p (m^3s^{-1})
1	2660	0.64	9040	1.80	9040	1.80	540	0.23
2	13250	2.86	12920	1.62	15850	2.20	5640	2.44
3	6350	1.44	13300	2.30	13320	2.30	16350	7.09
4	4960	0.96	14270	1.96	14270	1.96	14850	6.42
5	3600	0.54	8800	1.35	8800	1.35	360	0.15
6	8310	1.93	9790	1.82	9950	1.86	410	0.17
7	10690	0.57	16280	0.57	16710	0.57	2400	1.25
8	28650	4.46	28770	3.89	27980	4.57	80920	25.60
Promedio	9810	1.68	14150	1.91	14490	2.08	15180	5.42
SD	8410	1.38	6480	0.95	6240	1.14	27330	8.62
RMSE			5430	0.84	5580	0.72	19790	8.01

4.3.2. Análisis del volumen total escurrido y escurrimiento pico en eventos calibrados

Los modelos de SCS-CN y GA calibrados no tuvieron resultados diferenciados con respecto al análisis de la media, desviación estándar y la RMSE en la estimación del gasto pico (Cuadro 9); solo en el modelo de CN4GA hubo una diferencia mínima. En orden descendente de precisión para estimar el volumen escurrido (Q) en lo eventos calibrados, fue el modelo SCS-CN con un RMSE de 3530 m³, seguido de GA con 372 m³ y finalmente CN4GA con 6200 m³. El análisis estadístico en los eventos calibrados a partir de la media, desviación estándar fue más aceptable, respecto al análisis de eventos no calibrados, minimizando así la incertidumbre de las estimaciones; sin embargo, la evaluación de las estimaciones de los hidrogramas de escurrimiento directo en eventos calibrados y no calibrados ayudaran a definir efectividad de los modelos. Con el propósito de tener mayor certidumbre en la efectividad de los modelos, se procedió a realizar la evaluación de los hidrogramas estimados con modelos no calibrados y calibrados.

Cuadro 15. Volúmenes de escurrimiento (Q) y gastos pico (Q_p) observados y estimados con los modelos calibrados.

Evento	Observados		CN-SCS		GA		CN4GA	
	Q	Q_p	Q	Q_p	Q	Q_p	Q	Q_p
1	2660	0.64	3550	0.64	3550	0.64	3690	0.62
2	13250	2.86	21390	2.86	20520	2.86	10820	2.81
3	6350	1.44	8620	1.44	8580	1.44	3930	1.3
4	4960	0.96	7750	0.96	7750	0.96	2180	0.95
5	360	0.54	4050	0.54	4050	0.54	1490	0.58
6	8310	1.93	1030	1.93	1030	1.93	3010	1.93
7	10690	0.57	10280	0.57	16390	0.57	2060	0.7
8	28650	4.46	32540	4.46	25870	4.46	15240	4.48
Promedio	9810	1.68	12310	1.68	12130	1.68	5300	1.67
SD	8410	1.38	9850	1.38	8030	1.38	4980	1.37
RMSE			3530	0.00	3720	0.00	6200	0.07

4.3.3. Análisis de los hidrogramas de escurrimiento directo estimados con modelos calibrados y no calibrados

En este tipo de análisis estadístico los modelos SCS-CN y GA fueron los mejores estimadores de los hidrogramas, mientras que el modelo CN4GA obtuvo los valores más altos de RMSE, MRE y EF (Cuadro 16).

Cuadro 16. Medidas estadísticas de evaluación de la precisión de los hidrogramas de escurrimiento directo estimados con los modelos calibrados y no calibrados.

Evento	RMSE			MRE			EF		
	SCS-CN	GA	CN4GA	SCS-CN	GA	CN4GA	SCS-CN	GA	CN4GA
1 [†]	0.59	0.59	0.23	0.70	0.70	5.06	-7.34	-7.34	0.59
1 [‡]	0.10	0.10	0.07	0.54	0.54	0.69	0.77	0.77	0.97
2 [†]	0.44	0.25	1.03	0.31	0.25	2.01	0.77	0.92	0.86
2 [‡]	0.38	0.25	0.53	0.30	0.28	0.27	0.82	0.84	0.96
3 [†]	0.67	0.67	3.32	0.45	0.45	3.92	-1.38	-1.39	-7.42
3 [‡]	0.18	0.18	0.23	0.33	0.33	0.46	0.82	0.82	0.96
4 [†]	0.59	0.59	2.30	0.58	0.58	13.28	-2.71	-2.71	-12.53
4 [‡]	0.18	0.18	0.30	0.36	0.36	3.01	0.67	0.67	0.77
5 [†]	0.35	0.35	0.24	0.46	0.46	5.47	-7.11	-7.11	0.46
5 [‡]	0.07	0.07	0.09	0.29	0.29	2.08	0.72	0.72	0.91
6 [†]	0.14	0.14	1.41	0.37	0.28	24.89	0.95	0.94	0.30
6 [‡]	0.15	0.15	0.41	0.37	0.37	5.24	0.94	0.94	0.85
7 [†]	0.07	0.07	0.46	0.35	0.35	17.40	0.71	0.71	0.00
7 [‡]	0.07	0.07	0.20	0.35	0.34	0.53	0.71	0.72	0.22
8 [†]	0.47	0.43	9.88	0.26	0.20	1.07	0.91	0.93	-7.37
8 [‡]	0.43	0.41	0.50	0.21	0.20	0.31	0.92	0.93	0.97

[†] Eventos de lluvia escurrimiento modelados a partir de modelos no calibrados.

[‡] Eventos de lluvia escurrimiento modelados a partir de modelos calibrados.

En eventos de bajo escurrimiento los modelos no calibrados de SCS-CN y GA tuvieron sobrestimaciones, solo el modelo de CN4GA tuvo el error más bajo (RMSE de $0.23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0.24 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) en los eventos uno y cinco. En eventos de alto escurrimiento GA fue mejor

el mejor estimador de los hidrogramas de escurrimiento directo con una RMSE de 0.14 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ a 0.43 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ y una MRE de 0.20 a 0.28; el modelo SCS-CN fue el segundo mejor modelo estimador (Cuadro 16). En el evento prolongado los modelos SCS-CN y GA tuvieron igual valor de RMSE de 0.07 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, MRE de 0.35 y una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.71; el modelo CN4GA no logro representar el hidrograma para este evento teniendo los valores más altos de error y una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0 (insuficiente).

El análisis de los hidrogramas estimados a partir de los modelos calibrados mostró que el modelo de GA estimó mejor en los ocho eventos con valores de la RMSE de 0.07 a 0.41 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, siete eventos con un MRE de 0.20 a 0.54 y una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.72 a 0.94 (muy bueno a excelente) en los eventos seis y siete. El modelo SCS-CN estimó con eficiencia cinco eventos (tres, cuatro, cinco, seis y siete) con una RMSE de 0.07 a 0.18 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, un MRE de 0.33 a 0.37 y en los eventos seis y siete obtuvo una eficiencia de Nash-Sutcliffe en el rango de 0.71 a 0.94 (muy bueno a excelente); el modelo CN4GA solo logró estimar el evento uno con el error más bajo de RMSE de 0.07 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, en el evento dos tuvo un MRE de 0.27, y en los eventos uno, dos, tres, cuatro, cinco y ocho la eficiencia de Nash-Sutcliffe se ubicó en el rango de 0.77 a 0.97 (muy bueno a excelente).

Respecto a los eventos no calibrados uno, tres, cuatro y cinco de bajo escurrimiento, resultaron muy sensibles a la superficie impermeable porque esta no quedo bien caracterizada en las subcuencas uno, dos, tres y ocho, ya que el método no señala con precisión como se deben asignar los valores a este tipo de superficie a los modelos de SCS-CN y GA en HEC HMS, por tal razón este factor afectó la modelación de los hidrogramas en eventos definidos de bajo escurrimiento con una sobrestimación del volumen escurrido (Figura 12).

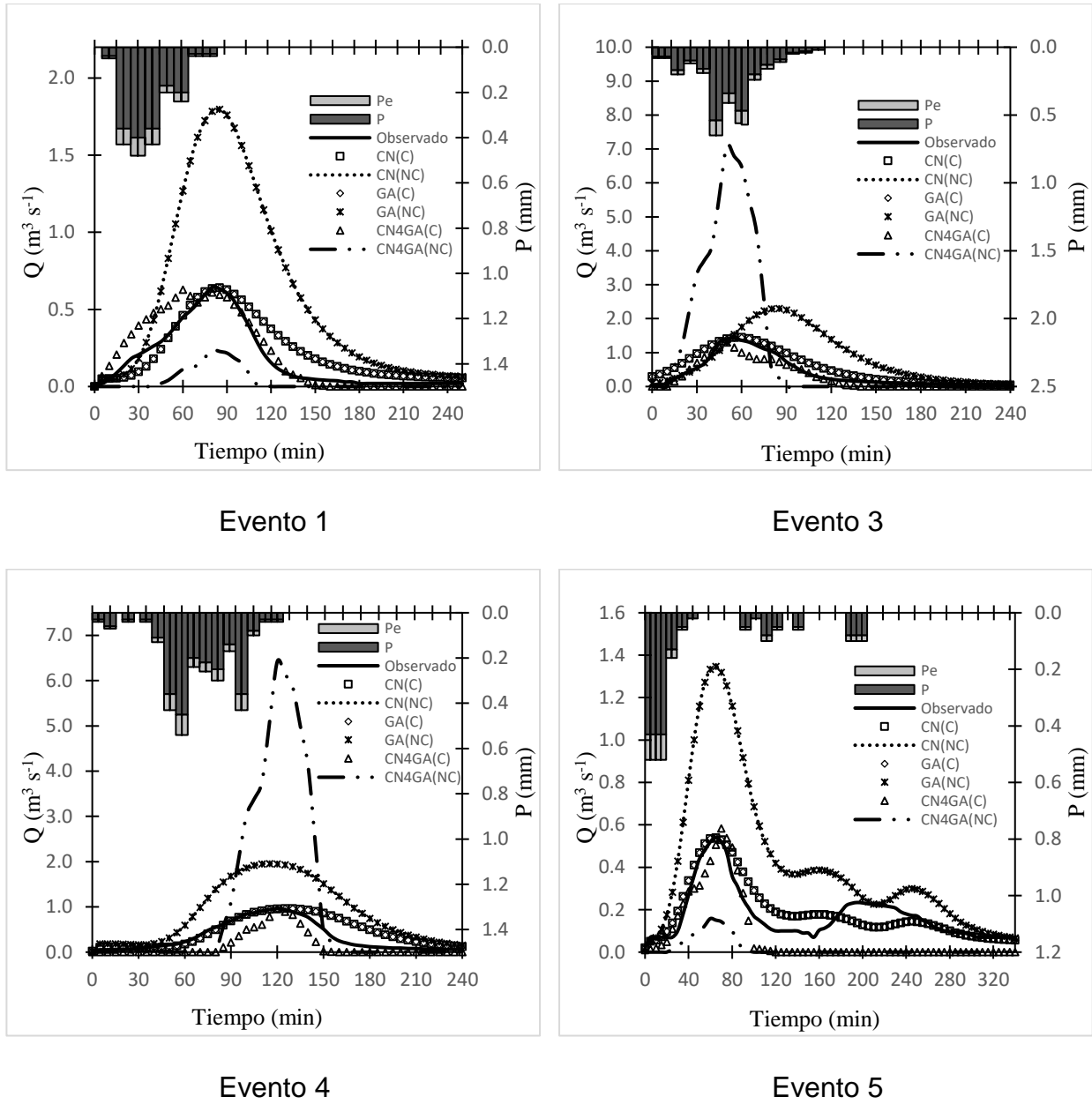


Figura 12. Eventos de bajo escurrimiento calibrados y no calibrados modelados con HEC-HMS y CN4GA.

La modelación con los modelos GA y SCS-CN en eventos no calibrados y calibrados se observó que en las subcuencas seis y siete con suelos forestales, estimaron una infiltración con poco o nulo escurrimiento y coincidió con lo observado en campo. La modelación del escurrimiento superficial con GA para estas subcuencas mostró resultados satisfactorios al usar el parámetro ψ_f obtenido por el modelo de Brooks-Corey

(1964), mismo que fue diseñado para obtener este parámetro para modelar el flujo del agua en sistemas de riego o drenaje en suelos agrícolas con $\leq 8\%$ de materia orgánica. Para estos suelos profundos y homogéneos, la infiltración fue vertical en forma de pistón (Tucci, 1993), fenómeno fue verificado en campo mediante pruebas de infiltración.

En el modelo SCS-CN fue complicado saber cuál fue la humedad inicial antes del escurrimiento, ya que este modelo no considera un parámetro creíble que explique la retención de humedad antes de la tormenta (Ajmal *et al.*, 2016), sin embargo, en la modelación con SCS-CN, se observó que en la elección del valor de CN debe hacerse con un análisis meticuloso de los factores del cual está en función, dado que el incremento de una unidad en el incremento del valor de CN podría generar un incremento considerable en el escurrimiento, ya que el modelo SCS-CN es muy sensible a este parámetro que a la intensidad de precipitación (Hawkins, 1993). En subcuencas agrícolas la elección de la curva numérica fue menos compleja que para áreas forestales, en áreas forestales a menudo se cometen errores en la elección del valor de CN y afectan el cálculo de la escorrentía, ya que los valores de CN en las tablas del manual están orientadas a calcular la escorrentía más exitosamente en cuencas agrícolas y menos exitosas para los pastizales semiáridos y forestales (Kowalik, 2015; Walega, 2015; Tailor, 2016).

El modelo CN4GA no tuvo eficiencia que tuvieron los modelos SCS-CN y GA, la posible causa puede deberse a que el modelo fue diseñado para su uso en pequeñas cuencas no aforadas y estimar la escorrentía usando como datos los valores ponderados de curva numérica y los parámetros hidráulicos de GA, es un modelo que construyó como una alternativa de uso en lugar del método racional (Grimaldi *et al.*, 2013a), además la estructura del modelo es menos compleja e incluye menos componentes hidrológicos como sucede en HEC HMS y las cuencas en donde se ha aplicado tienen condiciones ambientales diferentes a la cuenca río Chapingo.

El modelo Green-Ampt presentó mejores resultados en la predicción de gastos pico que el modelo de curva numérica, en contraparte el modelo de SCS-CN tiene más potencial para estimar el volumen escurrido (Ficklin *et al.*, 2013) esto es debido a que genera hidrogramas de menor valor en el gasto pico (Figura 13), en el caso de los hidrogramas

generados por GA la diferencia de valores en Q_p con SCS-CN ocasiona un exceso de volumen y en consecuencia un mayor error en la estimación del volumen escurrido.

El análisis de los datos de la modelaciones hidrológicas en eventos no calibrados (dos, seis, siete y ocho) (Figura 13) realizada con los modelos SCS-CN y GA mostró que el éxito obtenido se debió a los siguientes factores; en el modelo de GA el alto contenido de humedad inicial en el suelo (θ_i) fue de $0.330 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ respecto al contenido de humedad inicial promedio del suelo ($0.235 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) de los eventos de bajo escurrimiento; y en el modelo SCS-CN la abstracción inicial (I_a) promedio fue de 46.73 mm; para estos eventos en cuestión el suelo solo requirió una pequeña lamina (12.8 % promedio de la precipitación) para saturarse y transformar el resto de la lluvia en escorrentía directa. El evento siete (figura 4) fue un caso especial ya que la precipitación tuvo una duración de 20 horas y la intensidad fue de 3.2 mm h^{-1} , en la salida de la cuenca el sistema de aforo automático registró un caudal pico de $0.560 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y ambos modelos estimaron un caudal pico de $0.590 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, los resultados de la modelización hidrológica con SCS-CN y GA para el evento 7 se observó las condiciones de humedad del suelo θ_i y las abstracciones iniciales I_a permitió infiltrar 17.88 mm de la lluvia precipitada y 4.42 mm fue el exceso de lluvia que se convirtió en escurrimiento directo.

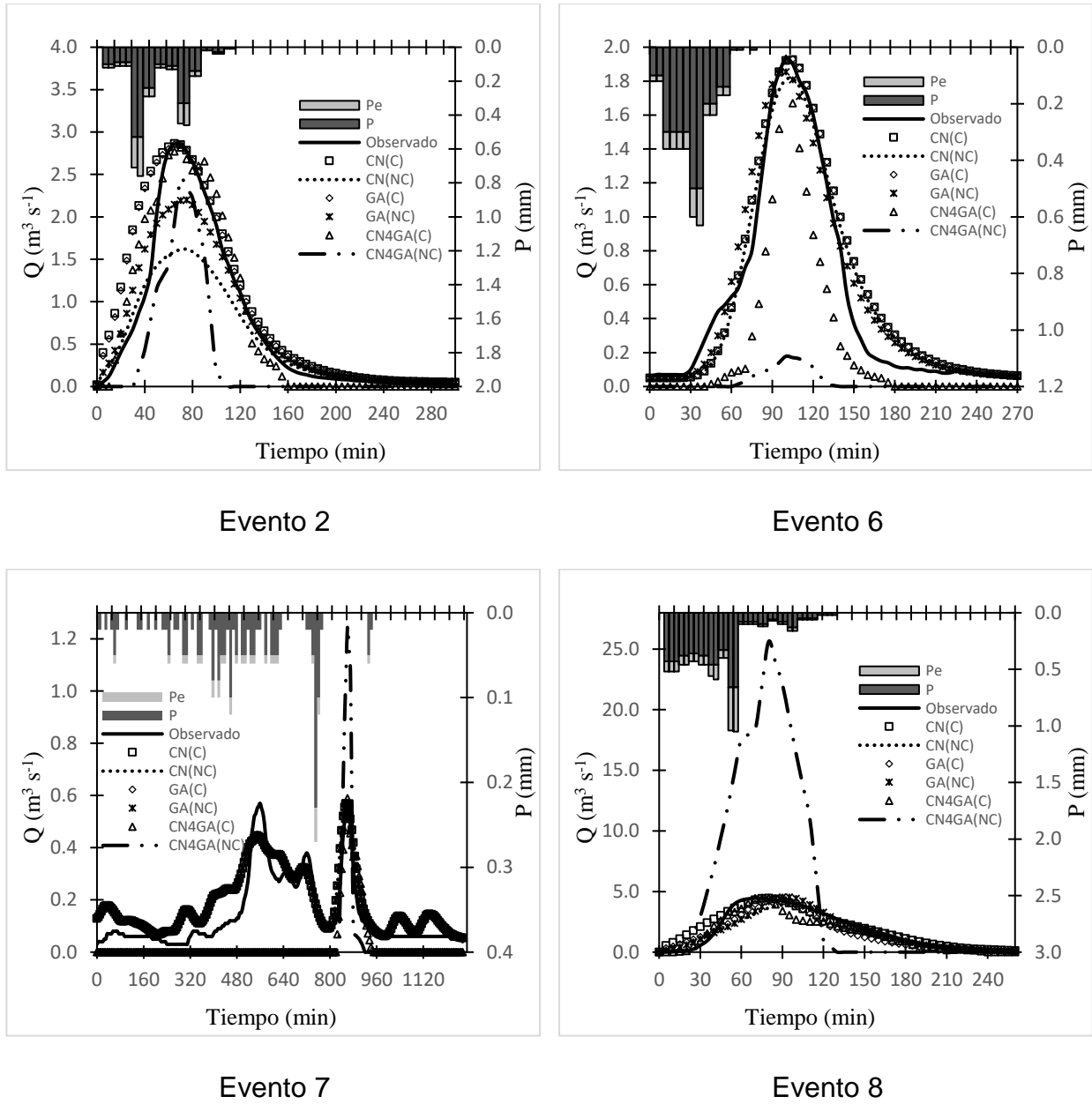


Figura 13. Eventos de alto escurrimiento calibrados y no calibrados modelados con HEC HMS y CN4GA.

En este trabajo se observó que GA es viable de aplicarse a cuencas forestales y agrícolas, su principal desventaja es la obtención de los parámetros hidráulicos por el método de Brooks-Corey (1964). El modelo de SCS-CN es más factible su uso para estimar el volumen para el dimensionamiento de obras de almacenamiento. El modelo CN4GA estimó el escurrimiento superficial en el 87% de los casos cuando los modelos

fueron calibrados, convirtiéndose en una herramienta potencial cuando no se dispone de suficientes datos.

4.4. CONCLUSIONES

En los modelos no calibrados en orden descendente SCS-CN fue el mejor estimador del volumen escurrido, seguido de GA y finalmente CN4GA. El modelo de GA fue el mejor estimador del escurrimiento pico en eventos de lluvia escurrimiento de gasto pico $\geq 1.93 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, el modelo SCS-CN fue el segundo mejor estimador para los mismos eventos. En eventos de gasto pico $\leq 1.44 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ los modelos SCS-CN y GA sobrestimaron el Q_p . El método mixto CN4GA en la mayoría de los eventos sobreestimo el gasto pico.

La modelación de los eventos calibrados con los modelos SCS-CN y Green-Ampt estimaron el gasto pico de igual valor a lo medido, el modelo SCS-CN fue el mejor estimador del volumen escurrido seguido de GA. De los tres modelos analizados el modelo CN4GA estimó con menos éxito el escurrimiento pico (Q_p) y subestimó el volumen escurrido.

4.5. LITERATURA CITADA

Ajmal, M., T. Ali., and T. Wong. (2016). A CN-Based Ensembled Hydrological Model for Enhanced Watershed Runoff Prediction. *Water*. 8(20):1-17.

Armstrong, J. S., and F. Collopy. (1992). Error Measures For Generalizing About Forecasting Methods: Empirical Comparisons. *International Journal of Forecasting*. 8 (1992): 69-80.

Brooks, R. H., and T. A. Corey. (1964). Hydraulic Properties of Porous Media. Hydrology Paper No. 3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. pp: 1-10.

Chow, V. T. (1994). Hidrología aplicada. McGraw-Hill. México D.F. pp: 150-158.

Ficklin, D. L., and M. Zhang. (2013). A comparison of the curve number and Green-Ampt models in an agricultural watershed. *Transactions of the ASABE*. 56(1): 61-69.

- Fuentes, R., C. Haverkamp, and J. Y. Parlange. (1992). Parameter constraints on closed–form soil-water relationships. *J. of Hydrol.* 134: 117-142.
- Green, W. H., and G. A. Ampt. (1911). Studies on Soil Physics, Part 1, the Flow of Air and Water through Soils. *Journal of Agricultural Science.* 4: 11-24.
- Grimaldi, S., A. Petroselli, and F. Nardi. (2013). A parsimonious geomorphological unit hydrograph for rainfall runoff modeling in small ungauged basins. *Hydrological Sciences Journal.* 57 (1): 73–83.
- Grimaldi, S., A. Petroselli, and N. Romano. (2013a). Green-Ampt Curve-Number mixed procedure as an empirical tool for rainfall-runoff modelling in small and ungauged basins. *Hydrological processes.* pp: 1253-1264.
- Hawkins, R. H. (1993). Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *J. of irrigation and drainage eng.* 119(2): 334-345.
- Infante, G. S., and G. P. de L. Zarate. (2012). Métodos estadísticos. Un enfoque interdisciplinario. *La Gaya ciencia.* Tercera edición. 1: 305-336.
- Kabiri, R., A. Chan, and R. Bai. (2013). Comparison of SCS and Green-Ampt Methods in Surface Runoff-Flooding Simulation for Klang Watershed in Malaysia. *Open J. of Modern Hydrol.* 3: 102-114.
- Kowalik, T., and A. Walega. (2015). Estimation of CN parameter for small agricultural watersheds using asymptotic functions. *Water.* 7(3): 939-955.
- Li, J., Z. Wang, and C. Liu. (2015). A combined rainfall infiltration model based on Green–Ampt and SCS-Curve Number. *Hydrol. Process.* 29: 2628–2634.
- McCuen, R. H. (1998). *Hydrologic Analysis and Design.* Department of civil engineering, University of Maryland. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. pp: 156-161.
- Ma, M. Y., F. Shaoyuan, S. Dongyuan, G. Guangyao, and H. Zailin. (2009). Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green–Ampt model and HYDRUS-1D. *Computers and Electronics in Agriculture.* 71S: S40-S47.

- Ma, Y., Feng, S., H. Zhan, X. Liu, D. Su, S. Kang, and X. Song. (2011). Water Infiltration in Layered Soils with Air Entrapment: Modified Green-Ampt Model and Experimental Validation. *J. Hydrol. Eng.* 16(8): 628-638.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. (1970). River flow forecasting through conceptual models. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282–290.
- Petroselli, A., E. Arcangeletti, E. Allegrini, N. Romano, and S. Grimaldi. (2013). The influence of the net rainfall mixed Curve Number – Green Ampt procedure in flood hazard mapping: a case study in Central Italy. *Journal of Agricultural Engineering.* pp: 58-61.
- Rawls, W. J., M. ASCE, L. Donald, Brakensiek, and N. Miller. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *J. Hydraul. Eng.* 109: 62-70.
- Taylor, D., and N. J. Shrimali. (2016). Surface runoff estimation by SCS Curve Number method using GIS for Rupen-Khan watershed, Mehsana district, Gujarat. *J. Indian Water Resour. Soc.* 36(4):1-5.
- Teegavarapu, R. S. V., and V. Chandramouli. (2005). Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *J. Hydrol.* 312 (2005): 191-206.
- (USACE ARMY-HEC) US Army Corp Engineers-Hydrologic Engineering Center. (2013). *User's Manual.* Washington, D.C. 442p.
- USDA-NRCS. (2004). *National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 10. Hydrology;* U.S. Department of Agriculture, Washington D.C. pp: 10.1-10.22.
- USDA-NRCS. (2009). *National Engineering Handbook, Part 630, Chapter 7. Hydrology;* U.S. Department of Agriculture, Washington D.C. pp: 7.1-7.2.
- Van Mullem, J. A. (1991). Runoff and peak discharges using Green-Ampt infiltration model. *J. of Irrigation and Drainage Eng.* 117: 354-370.
- Viji, R., P. Prasanna, and R. Ilango. (2015). Modified SCS-CN and Green-Ampt Methods in Surface Runoff Modelling for the Kundahpallam Watershed, Nilgiris, Western Ghats, India. *Aquatic Procedia*, 4: 677 – 684.

Walega, A., and A. Rutkowska. (2015). Usefulness of the Modified NRCS-CN Method for the Assessment of Direct Runoff in a Mountain Catchment. *Acta Geophysica*. 63(5): 1423-1446.

5. CONCLUSIONES GENERALES

Los modelos de GA estimaron las láminas infiltradas acumuladas en el siguiente orden descendente de precisión: Brooks-Corey (1964), SR2 (2006), SR1 (2006) y Rawls *et al.* (1983) e implicó que las pruebas físicas fueron las más convenientes para obtener los parámetros ψ_b y K_s . Los valores de ψ_f obtenidos con los modelos de GA (Brooks-Corey (1964), SR2 (2006), SR1 (2006)) se ubicaron dentro del rango de valores reportados por Rawls *et al.* (1983) por clase textural; se observó que asignar a un suelo el valor promedio de ψ_f de la clase textural sugerido por Rawls *et al.* (1983), puede resultar erróneo ya que su desviación estándar es considerable. El modelo de Brooks-Corey (1964) en el 95% de los casos estimó la infiltración con el más bajo error estadístico en suelos agrícolas y pastizales que en suelos forestales.

Del análisis de la información del conjunto de eventos estudiados, mostró que el modelo SCS-CN fue ligeramente mejor que el modelo de GA para estimar el volumen escurrido Q , pero el modelo de GA resultó mejor para estimar el gasto pico. En eventos aislados de mayor escurrimiento (dos, seis y ocho) la forma de los hidrogramas fue reproducido con eficacia por el modelo de GA con los valores más bajos de RMSE, MRE y RE. En los eventos de bajo escurrimiento ambos modelos sobrestimaron el volumen escurrido con los valores más altos de la RMSE y MRE, mientras que en el evento prolongado ambos modelos reprodujeron el hidrograma de escurrimiento y el gasto pico con el mismo error (RMSE de $0.07 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, MRE de 0.35 y RE de cero).

El modelo de GA fue muy sensible a ligeros incrementos del valor de la humedad inicial elevando potencialmente el volumen escurrido, mientras que en el modelo de SCS-CN el incremento es debido a los ligeros incrementos en el valor de CN, este último modelo calculó la escorrentía más exitosamente en las subcuencas agrícolas y menos exitosas para los de pastizales y forestales.

Se sugiere usar el modelo de GA para estimar los hidrogramas de escurrimiento directo y los caudales pico en cuencas similares a la cuenca Chapingo con fines de diseño de obras hidráulicas de excedencia y de análisis de avenidas en cauces, mientras que el modelo de SCS-CN se recomienda su aplicación para el dimensionamiento de obras de almacenamiento. Para tener más certeza en las modelaciones, en estudios futuros se sugiere incluir eventos de mayor volumen escurrido y caudal pico ya que la inclusión de este tipo de eventos es más importante para definir las políticas del manejo hídrico, así mismo se propone la aplicación de los modelos en diferentes cuencas de México con la finalidad de tener certidumbre en la efectividad de los mismos para estimar Q y Q_p .

De los tres modelos analizados, el modelo de CN4GA en eventos de bajo escurrimiento sin calibrar estimó los hidrogramas de escurrimiento con mayor error en la mayoría de los casos, a diferencia de la estimación de los hidrogramas en eventos calibrados tuvo una mejor eficiencia en el 87 % de los casos. El modelo resultó ser una herramienta potencial para estimar el volumen escurrido y el gasto pico en cuencas pequeñas que disponen de pocos datos, y para que el modelo tenga el éxito esperado debe ser calibrado previamente.