



UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

MAESTRIA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**HIDRODINÁMICA DE CUATRO SUB-MICROCUENCAS
FORESTALES ALTERADAS**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA

GONZÁLEZ HERNÁNDEZ LIBORIO

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DR. DAVID CRISTÓBAL ACEVEDO



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

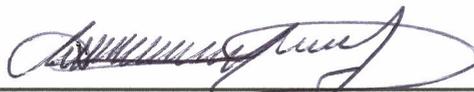
Chapingo, México; enero 2019.



Tesis realizada por **Liborio González Hernández**, bajo la supervisión del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

PRESIDENTE:



DR. DAVID CRISTOBAL ACEVEDO

CODIRECTOR:



DR. ISIDRO VILLEGAS ROMERO

ASESOR:



DR. JOSE LUIS GARCIA RODRIGUEZ

ASESOR:



DR. ANTONIO VILLANUEVA MORALES

Chapingo, Texcoco, Estado de México, enero 2019

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|----|
| INDICE DE CUADROS | 3 |
| ÍNDICE DE FIGURAS | 4 |
| DEDICATORIA..... | 5 |
| AGRADECIMIENTOS | 6 |
| RECONOCIMIENTOS | 7 |
| DATOS BIOGRÁFICOS..... | 8 |
| RESUMEN GENERAL | 9 |
| GENERAL ABSTRACT | 12 |
| 1. INTRODUCCIÓN GENERAL | 15 |
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA | 16 |
| 2.1. Grupo de suelos | 21 |
| 2.2. Condiciones hidrológicas del área de drenaje | 22 |
| 2.3. Uso del suelo | 23 |
| 2.4. Humedad antecedente | 25 |
| 2.4. Bibliografía | 28 |
| 3. MEDICIÓN DIRECTA Y PREDICCIÓN DE LA ESCORRENTÍA EN CUATRO SUB- MICROCUENCAS FORESTALES ALTERADAS | 33 |
| 3.1. RESUMEN | 33 |
| 3.3. INTRODUCCIÓN | 35 |
| 3.3.1. Descripción de métodos NC y MD | 36 |
| 3.3.2. Comparación entre métodos | 38 |
| 3.3.3. Objetivos de la investigación | 39 |
| 3.4. MATERIALES Y MÉTODOS | 40 |
| 3.4.1. Método | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 3.4.2. Procedimiento para la toma de datos | 42 |
| 3.4.3. Descripción de resultados por el método de número de curva | 42 |
| 3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 43 |
| 3.6. CONCLUSIONES | 51 |
| 3.7. BIBLIOGRAFÍA | 51 |
| 4. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA QUE CARACTERIZA LA ESTRUCTURA DE CUATRO SUB-MICROCUENCAS FORESTALES ALTERADAS | 56 |
| 4.1. RESUMEN | 56 |
| 4.2. INTRODUCCIÓN | 58 |
| 4.3.1. Instrumentación de las sub-microcuencas | 60 |
| 4.3.2. Obtención de datos de precipitación | 61 |
| 4.3.3. Obtención de datos de escorrentía | 61 |
| 4.3.4. Características de las sub-microcuencas | 62 |
| 4.3.5. Número de curva que caracteriza las sub-microcuencas | 64 |
| 4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 68 |
| 4.5. CONCLUSIONES | 72 |
| 4.6. BIBLIOGRAFÍA | 73 |
| 5. CONCLUSIONES GENERALES | 78 |
| 6. ANEXOS | 81 |

INDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1 Grupos hidrológicos de suelo por SCS | 22 |
| Cuadro 2. Densidades de cobertura | 22 |
| Cuadro 3. Caracterización hidrológica para varios usos de suelo | 23 |
| Cuadro 4. Curva numérica (NC) para estimar el escurrimiento bajo diferentes complejos suelo - cobertura y manejo (condición de humedad II, y $Ia = 0.2S$) | 24 |
| Cuadro 5. Condición de humedad antecedente como función de la precipitación. .. | 25 |
| Cuadro 6. Curvas numéricas (NC) para condiciones de humedad antecedentes húmeda (III) y seca (I) a partir de las condiciones de humedad media (II). | 26 |
| Cuadro 7. Magnitud de la escorrentía por evento de precipitación obtenida con el método curva numérica (NC) y método directo (MD) en las sub-microcuencas forestales alteradas. | 48 |
| Cuadro 8. Coeficientes de escurrimiento (%) obtenidos con el método de número de curva (NC) y el método directo (MD) | 49 |
| Cuadro 9. Valores de coeficientes de determinación (R^2) y de correlación para la relación de precipitación y escorrentía, obtenido con el método de NC y método directo. | 50 |
| Cuadro 10. Número de curva que caracteriza las sub-microcuencas (considerando la humedad antecedente (ha) y sin considerar la humedad antecedente | 71 |
| Cuadro 11. Números de curva por cantidad de precipitación (considerando la humedad antecedente (ha) y sin considerar la humedad antecedente | 72 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| Figura 1. Diagrama de tanques de captación de escorrentía de las sub- microcuencas..... | 41 |
| Figura 2. Comportamiento precipitación-escorrentía en las cuatro sub- microcuencas forestales..... | 46 |
| Figura 3. Diagrama de tanques de captación de escorrentía..... | 61 |
| Figura 4. Comportamiento de los números de curva..... | 68 |
| Figura 5. Comparación entre números de curva con y sin condición de humedad anterior | 70 |

DEDICATORIA

A Dios, a mis abuelos, a mis padres, tíos, hermanos y sobrinos, quienes han sido la guía y el camino para llegar hasta este punto de mi carrera.

Con su ejemplo, apoyo y palabras, siempre

logré salir adelante aun cuando todo

se complicaba

Los amo.

Liborio González Hernández.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y a la División de Ciencias Forestales por permitirme una vez más ser parte de esta gran institución, por llenarme de conocimientos, experiencias y más que nada por el amor que como estudiantes desarrollamos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento proporcionado durante mis estudios de maestría, por el apoyo para poder realizar una estancia de investigación que abrió mis horizontes del enfoque que otras culturas tienen de la ciencia.

Al Dr. David Cristóbal Acevedo, por su generosidad al brindarme la oportunidad formarme bajo su dedicación y empeño, que, con su amistad y enseñanza, guiaron mi camino.

Al Dr. Isidro Villegas Romero, por su presencia, aportes, comentarios y sugerencias durante el desarrollo de esta investigación, la voluntad de trabajo y la disposición de cada vez sumar conocimiento a mí persona.

Al Dr. José Luis García Rodríguez, por su amistad, apoyo y dedicación en el desarrollo de la investigación, las enseñanzas y consejos que fueron fundamentales en el camino que he recorrido, aprecio mucho su compromiso con la investigación y las mejoras a mi formación.

Al Dr. José Carlos Robredo Sánchez, que sin pensarlo me he encontrado con un gran ser humano, amigo e investigador, agradezco todo ese empeño y dedicación, agradezco los consejos y la guía para este camino por andar

Al Dr. Antonio Villanueva Morales, por su amistad, dedicación y objetividad en la guía para el desarrollo de la investigación, siempre con un buen consejo y dedicación.

A la Coordinación de la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales. A la Dra. Ma. Amparo Borja, por la dedicación y apoyo, a la señora Magali por la dedicación, servicio y amistad. A todos mis profesores de la maestría, siempre agradecido de su dedicación.

A mis amigos y compañeros de la maestría, por esos momentos y vivencias juntos.

RECONOCIMIENTOS

La presente tesis de investigación ha formado parte de los resultados del proyecto de investigación convencional denominado “MONITOREO DE LA EROSIÓN HÍDRICA, PRODUCCIÓN DE AGUA Y SEDIMENTOS EN CUATRO NANOCUENCAS FORESTALES EN EL CAMPO LAS CRUCES”. Registrado ante la DGIP con clave: 18397-C-91 y bajo la autoría del Dr. Isidro Villegas Romero, a quien se le reconoce la participación como Co-director del trabajo de investigación, así como el aporte metodológico en el trabajo desarrollado.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Liborio González Hernández

Fecha de nacimiento: 28 de abril de 1990

Lugar de nacimiento: Chignahuapan Puebla

No. cartilla militar: D-3265268

CURP: GOHL900428HPLNRB04

Profesión: Ingeniero Forestal

Cedula profesional: 11138935



Desarrollo académico

Originario de Ayotla, Zacatlán, Puebla, desarrolló sus estudios de licenciatura en la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO en la DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES en el estado de México., obteniendo el título de Ingeniero Forestal el 26 de diciembre de 2016, con la tesis titulada “Evaluación de un ensayo de procedencias de *Pinus Patula Schiede Ex Schltl. Et Cham.* En Zacualpan, Veracruz”, en primavera del 2017 ingresó al programa de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, en la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.

Realizó una estancia de investigación en la Universidad Politécnica de Madrid, teniendo como producto final el artículo llamado “Determinación del número de curva que caracteriza la estructura de cuatro sub-microcuencas forestales alteradas” siendo el parteaguas de la carrera de investigación.

RESUMEN GENERAL

HIDRODINÁMICA DE CUATRO SUB-MICROCUENCAS FORESTALES ALTERADAS

El estudio de los recursos hídricos es uno de los temas de mayor interés en la actualidad a nivel mundial, ya que, de su aprovechamiento sustentable depende el abasto de agua para los seres vivos del planeta. En el ciclo hidrológico se tienen procesos como precipitación, infiltración y escorrentía, cuya cuantificación y caracterización es importante dentro de los ecosistemas, para un mejor aprovechamiento del agua y la resolución de problemas de impacto.

El comportamiento de la precipitación afecta de manera directa la escorrentía, ya que, de manera general, al incidir sobre la superficie del suelo en los ecosistemas solo tiene dos alternativas que son convertirse en infiltración o en escorrentía. Al convertirse en escorrentía se pueden presentar problemas como la erosión hídrica, inundaciones y deficiencias en la recarga de mantos freáticos, es por ello que su análisis y estimación ayudan a entender su comportamiento de acuerdo a la estructura física de la diversidad de sistemas donde ocurre. El estudio de la escorrentía puede hacerse utilizando modelos de predicción, uno de los más utilizados es el del número de curva (NC) del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS-CN), generado para cuencas de ese país. Sin embargo, es importante determinar su funcionamiento en sistemas de México.

Este estudio tuvo como objetivos a). Definir la adaptabilidad del NC, a través de la comparación de los datos reales de precipitación y escorrentía obtenidos por medición directa (MD) durante 2017 y los obtenidos por predicción utilizando el método NC, en cuatro sub-microcuencas forestales alteradas, y b) establecer el NC que caracteriza la estructura de las cuatro sub-microcuencas forestales alteradas, con datos de aforos obtenidos a lo largo de cinco años (2012-2015, 2017) así como determinar las diferencias en la predicción de la escorrentía, al considerar y no considerar la humedad antecedente.

El estudio se realizó en cuatro sub-microcuencas localizadas en la parte central del predio "LAS CRUCES" del municipio de Texcoco, estado de México, denominadas uno, dos, tres y cuatro con superficies de 2676.58 m², 2056 m², 650 m² y 1435.88 m², respectivamente, con pendiente entre 5 y 23%, suelos francos, franco arcilloso y franco arcillo arenosos, carentes de horizontes A y B homogéneos, el material parental que se observa en los cuatro sistemas es denominado toba volcánica de color café amarillento, muy compacto, con zonas discontinuas con presencia de suelo, generado a través de la acumulación de materia orgánica y otros materiales en el proceso de su formación ocurrido en el tiempo, en la zona se presentan precipitaciones promedio anuales de 613.2 mm.

Las condiciones de las sub-microcuencas tienen como principal característica una pobre cobertura vegetal (47%), con presencia Arborea de *Casuarina equisetifolia* L, *Acacia retinodes* Schl, y *Callitropsis lusitánica*, *Arbutus spp*, *Pinus montezumae* Lamb y *Eucalyptus camaldulensis* Schltl, además de algunos arbustos destacados como el *Senecio salignus* DC, *Symphoricarpus microphyllus*, *salignus* DC, *Juniperus spp* y *Archibaccaris sp*, caracterizándose por estar presentes en agrupaciones localizadas dentro de las sub-microcuencas.

La eficiencia de los métodos se determinó mediante el coeficiente de determinación (R²). Al utilizar el método directo los coeficientes de escurrimiento promedio en la temporada de lluvias de 2017 fueron 2.31, 1.85, 2.96 y 4.7% para las sub-microcuencas uno, dos, tres y cuatro respectivamente, y los obtenidos por el método de NC fueron 4.47, 7.57, 5.38 y 7.35% respectivamente. La heterogeneidad de los coeficientes de escurrimiento obtenidos mediante ambos métodos denota la diferente estructura física de las sub-microcuencas.

En el cálculo del NC para obtener el valor real de esorrentía dado por el método directo, y en el ajuste a la función lineal de los valores de NC obtenidos con relación a la precipitación, el tomar el parámetro de humedad antecedente provocó un ajuste deficiente, ya que la relación presentó una dispersión mayor de los datos. Del mismo análisis se desprende que para precipitaciones bajas (0 a 12.7mm) los NC obtenidos tuvieron una mayor dispersión en función de la precipitación, en comparación con precipitaciones de 12.7 a 32 mm y mayores de 32 mm. Los NC ajustados a las

condiciones generales que caracterizan las sub-microcuencas, mostraron un comportamiento óptimo para precipitaciones altas (>32mm), lo que resulta útil, ya que estas precipitaciones son las que generan una mayor erosión hídrica en los suelos.

Se encontró que, mediante la utilización del método directo y la comparación con el método de NC para la obtención de la escorrentía, fue posible obtener los NC que reflejan la estructura física de las sub-microcuencas, por lo que en los sucesivos se podrán utilizar estos NC con mayor confianza en la predicción de la escorrentía en cada sub-microcuenca, por lo que se pudieron generar modelos predictores bastante exactos para cada situación que en un futuro se presente en los sistemas.

Palabras claves: Número de curva, coeficiente de escurrimiento, sub-microcuencas.

GENERAL ABSTRACT

HYDRODYNAMICS OF FOUR ALTERED FOREST SUB-MICROWATERSHEDS

Studying water resources is one of the most relevant issues in the present, globally, and being able to supply water to all living creature in the world depends on knowing how to efficiently use them. Precipitation, percolation and surface runoff are part of the water cycle; it is important to measure and classify these processes within the ecosystems to efficiently use water and tackle issues regarding the environmental impact.

The precipitation's behaviour directly affects surface runoff because when making contact with the ecosystem soil surface, it can only manifest as percolation or surface runoff. When there is a surface runoff, some issues can arise, such as water erosion, floodings and water table faults; therefore, it is important to analyse and monitor it to fully understand the physical structure behaviour from different environments. Surface runoff studies can be performed by using Numerical Weather Prediction (NWP), such as the curve number (CN) from the US Natural Resources Conservation Service, which is the most common measurement for this purpose and is aimed at obtaining data from the American watersheds. Nevertheless, it is important to determine its functions for the Mexican ecosystems.

This study's goals consist in a) Defining the NC adaptability by comparing actual precipitation and surface runoff data from 2017 that were yielded from the Direct Measurement (DM) method, as well as analysing data from the NWP method, which was recovered from four altered forest sub-microwatersheds; and b) establishing the NC ratio, defining the structure from the four altered forest sub-microwatersheds, with the data from over five years (2012-2015, 2017); plus identifying differentiations in predicting surface runoff by including and removing previous humidity from the measurements.

This study was performed in four altered forest sub-microwatersheds, located in the central part of Mexico, "LAS CRUCES" from the Texcoco municipality in the State of Mexico, where the average level of precipitation in that area is 613.2 mm per year. The locations were tagged as one, two, three and four, and had a surface of 2676.58

m², 2056 m², 650 m² and 1435.88 m², respectively; they were also 5 to 23% steep and held loam, clay and sand clay soils that were assessed. They were deemed to lack A and B homogenous horizons; their parent material consists in a compact, jagged volcanic tuff of brown and yellow shades that can be found in the soil. That surface results from organic matter and other materials stored during their creation process.

The main feature of the sub-microwatersheds consists in having small vegetation covering its surface (47%), which include trees like *Casuarina equisetifolia* L, *Acacia retinodes* Schl, *Callitropsis lusitánica*, *Arbutus spp*, *Pinus montezumae* Lamb and *Eucalyptus camaldulensis* Schltldl, as well as some bushes like *Senecio salignus* DC, *Symphoricarpus microphyllus*, *salignus* DC, *Juniperus spp* y *Archibaccaris sp*, which can be found in groups located in the watersheds.

The method efficiency was determined by the coefficient of determination (R^2). By updating the direct method, the average runoff curve numbers during the 2017 rainy season were 2.31, 1.85, 2.96 and 4.7% for watershed one, two, three and four, respectively. Moreover, the coefficients yielded from NC method were 4.47, 7.57, 5.38 and 7.35%, respectively. The runoff curve number differences obtained in both tests result from the different physicality in the sub-microwatershed structures.

Establishing the previous humidity parameter as the main value to obtain the actual surface runoff value from the direct method when calculating the NC value and the linear function adjustment from the NC value from the precipitation study caused a greater statistical dispersion. Based on the same analysis, it was found that all the low precipitation (0 to 12.7 mm) values from the NC has a greater statistical dispersion, compared to values from 12.7 to 32 mm and figures higher than 32 mm. NC values that were adjusted to meet the general conditions that feature the sub-microwatersheds yielded an optimal performance for high precipitation levels (>32mm), which is useful because those values result in greater water soil erosion. It was found that it was possible to identify NC values that showed the sub-microwatershed structure features by using a direct method and comparing NC values to obtain the surface runoff ratio; in this manner, the researchers were able

to create predicting models that were accurate enough to meet the needs for every potential scenario in the ecosystems in the future.

Keywords: numerical curves, runoff coefficient, sub-microwatersheds

Thesis, Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Liborio González Hernández
Director de Tesis: Dr. David Cristóbal Acevedo

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El estudio de los recursos hídricos, es uno de los temas más importantes que los seres humanos tienen en la actualidad, centrando la importancia en el manejo y aprovechamiento adecuado del agua. De acuerdo con Martínez-Yrizar (2017), la atención oportuna en la solución de los problemas ambientales, evitara que estos lleguen a una situación de degradación permanente y se vuelva irreversible el daño, es por ello que factores tales como el rápido y constante incremento de la población, el cambio climático y la alteración de los sitios de recarga de acuíferos, agrava la oferta de recursos hídricos disponibles (Torres-Bejarano *et al.*, 2016).

En México, una crisis climática severa causada por el mal manejo del agua, es acentuada y coincide con altas tasas de deforestación, así como con la pérdida de los servicios hidrológicos proporcionados por bosques y selvas (Manson., 2004), en la región del Valle de México se observan graves problemas ambientales, en gran medida debidos a procesos de degradación del suelo que son originados por el mal uso de los recursos, ocasionando deficiencias en el abasto y evidente descompensación en la cobertura vegetal, generando problemas de erosión y mal funcionamiento de los sistemas., la erosión del suelo se presenta en el entorno biofísico que comprende suelo, lluvia, topografía, cobertura de la tierra y las interacciones que se dan entre todos estos elementos (Kayet *et al.*, 2018).

Durante muchos años, los investigadores han buscado la manera de establecer metodologías que garanticen una mayor certidumbre de lo que pasa dentro de una cuenca, conociendo así, los diversos procesos que benefician y afectan el funcionamiento. En la actualidad, el estudio de procesos hídricos dentro de una cuenca, que es un sistema abierto y frágil, se convierte en una necesidad básica para el entendimiento de la conducta de las variables reguladoras del sistema y sus derivaciones. Dentro de las grandes cuencas existen elementos de menores dimensiones denominados subcuencas y microcuencas, éstas pueden estar ubicadas en la parte alta, media o baja, siendo terrenos generadores de procesos positivos como la recarga de acuíferos o negativos como la erosión hídrica (Mayer *et al.*,2014).

La estimación de la escorrentía es importante para muchas de las actividades relacionadas con el manejo del agua, procesos de erosión, transporte de contaminantes entre otros. El método del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos (USDA-NRCS, 2004) es uno de los métodos más utilizados en la actualidad para la estimación de la escorrentía, sin embargo, muchos investigadores mencionan limitaciones como la falta de estabilidad del valor del número de curva para diferentes condiciones de humedad antecedente por lo que no se recomienda para simulaciones continuas de largo tiempo (Caviedes-Voullième *et al.*, 2012; Efstratiadis *et al.*, 2014; Sahu *et al.*, 2012).

Con el estudio de la conducta de las cuencas, se puede tener un mejor juicio de las técnicas y mejoras de los procesos que ocurren dentro, generando soluciones para el mejor funcionamiento (Mayer *et al.*, 2014).

Es por ello que en el presente trabajo se analiza el comportamiento de cuatro microcuencas forestales perturbadas que presentan diferentes condiciones estructurales. Con base en esto, a partir de la comparación entre métodos (NC y MD) se examina el estado actual de sus componentes primarios (precipitación y escorrentía) de tal forma, que se puedan ubicar con precisión las correlaciones y diferencias entre métodos, que se generan, poniendo énfasis en la factibilidad de hacer uso del método de NC en sub-microcuencas forestales. Además de establecer un número de curva que haga la caracterización estructural de las cuatro sub-microcuencas forestales, con el fin de ajustar de mejor manera la predicción de la escorrentía a lo que pasa dentro de los sistemas.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

El significado literal de la palabra Hidrología es; “el estudio del agua”. Es la ciencia que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre; sus propiedades físicas y químicas y su relación con el medio ambiente incluyendo a los seres vivos. Desde un punto de vista hidrológico, la precipitación se convierte en la fuente principal de abastecimiento de agua a la superficie terrestre (Aparicio., 1989), siendo uno de los eventos mayor estudiados por la necesidad de obtener un control para el buen uso del recurso (SAGARPA., 2000).

La escorrentía se puede definir como la cantidad de agua de una tormenta que drena o escurre sobre la superficie del suelo después de la precipitación. Cuando se produce, fluye a los cauces incrementando su volumen; a medida que llega agua de las partes más lejanas comienza suavemente a decrecer el caudal al poco tiempo de terminado el evento de lluvia (Gaspari *et al.*, 2007).

La escorrentía es una parte causal de la precipitación que alimenta las corrientes superficiales de la cuenca, subcuenca o microcuenca, si bien, existen distintos tipos de escurrimientos, lo que se define como escorrentía se enfoca al escurrimiento superficial, que por determinados factores evita que una parte de la precipitación se infiltre llegando así a la red de drenaje, siempre moviéndose sobre la superficie del terreno por la acción de gravedad.

Para que la escorrentía suceda hay factores indispensables, dependientes de la precipitación y de las características del terreno, provocando que con las primeras precipitaciones el suelo satisfaga su capacidad de retención y se sature, una vez que la capacidad de infiltración es inferior a la cantidad de lluvia, el agua comenzara a moverse con la gravedad relacionada con la forma del terreno y su pendiente formando una capa delgada de agua interactuando con diferentes componentes que contribuyen a la escorrentía total.

La escorrentía superficial que es provocada por un aguacero se supone relacionada con la precipitación, a la relación que existe entre estas dos variables se le denomina coeficiente de escorrentía, este coeficiente, depende de numerosos factores, dentro de los que se encuentran la precipitación (lluvia, nieve o granizo), la cantidad, la intensidad y distribución en el tiempo del evento, de las condiciones de humedad inicial del suelo antes de la lluvia, del tipo de terreno, de la cobertura y el tipo de sistema que alberga a este fenómeno.

El significado de cuenca es de dominio público y científico, naciendo por ello la necesidad de considerar en momentos, fracciones específicas de estudio, que generalicen componentes para el análisis de los fenómenos para analizar, siendo lo social, económico y operativo parte de los elementos indispensables de división en

la investigación y razonamiento de sucesos, sin ignorar los enfoques territoriales, e hidrológicos que son los tradicionalmente utilizados en estos contextos.

La división del sistema cuenca dependerá de las características que necesiten ser evaluadas y de la capacidad de respuesta que se tenga ante un fenómeno, existen fracciones definidas, la subcuenca, considerada por la facilidad de manejo y representatividad de lo ocurrido en la cuenca. La sub-microcuenca definida como una pequeña unidad que geográficamente pertenece a una subcuenca y una cuenca y que ayuda a determinar eventos mejor localizados dentro de un sistema, diferentes autores discrepan del tamaño de cada unidad pero que, si bien es cierto, cada unidad dependerá de las necesidades de la investigación o de los recursos disponibles, principalmente suelo, agua y vegetación.

En el cálculo del coeficiente de escurrimiento hay diferentes factores que ayudan a enfocar los resultados a los que se quiere llegar, hay formas de calcular escorrentía de manera directa, sin calcular el coeficiente de escurrimiento, o experimentalmente con expresiones y fórmulas que están determinadas ya con anterioridad.

Datos de aforo, es un método donde la salida de flujos es de manera continua y se basa en el tiempo donde no hay precipitación, estableciendo el supuesto que el caudal generado procede de la descarga de los acuíferos dentro de la cuenca, y las únicas aportaciones de escurrimiento son de origen subterráneo. El caudal que se afora constituye la escorrentía total del área de la cuenca, al considerar que la escorrentía total está constituida solo de escorrentía superficial y subterránea, para calcular la escorrentía superficial hay que quitar del valor de caudal aforado que es el valor mínimo aforado de la época estival del año hidrológico, suponiendo que el valor de la escorrentía subterránea es constante.

Determinación de coeficiente de escorrentía, expresado por la relación que existe entre la precipitación neta o escorrentía superficial y la precipitación total, cuando se conoce este coeficiente la escorrentía se calcula multiplicando dicho valor por la precipitación total, el coeficiente de escorrentía no es fijo ya que existe una variación con respecto al tiempo y el espacio dentro de una cuenca por lo general

este método adapta valores medios del coeficiente, siendo durante un intervalo de tiempo que se define como el cociente entre la lluvia neta y la lluvia total precipitada durante el intervalo de tiempo definido.

La estimación a partir de tablas es un método que se aplica cuando no se cuenta con datos suficientes de determinación de la lluvia neta, y el coeficiente es determinado en función de las características que presenta la cuenca, solo en el caso que las características sean heterogéneas, se hace realiza una media ponderada de los diferentes coeficientes de escorrentía generados por la diversidad de la cuenca, y en función de las áreas que ocupa casa zona

La estimación por comparación con otras cuencas cercanas, se basa en el hecho que se conocen los coeficientes de escorrentía de las cuencas próximas o de características similares, con la extrapolación de las características hidroclimáticas y edafológicas de las cuencas y aplicándolo a la cuenca de interés prioritario.

Dentro de la diversidad de métodos de cálculo de la escorrentía superficial o directa, el método de curva numérica desarrollado por el Soil Conservation Service del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Soil Conservation Service Engineering Division, 1972), se caracteriza por ser un método de amplia aplicación y el más utilizado para la determinación de la escorrentía en cuencas, subcuencas, o microcuencas, la mayoría de los métodos de estimación de escorrentía suponen que el periodo de retorno de un evento de escorrentía es el mismo que el de precipitación que causo éste (Hawkins., 2010).

La aplicación del método ayuda a estimar el escurrimiento medio generado por evento de precipitación y el máximo instantáneo, utilizando los datos de precipitación por evento o la precipitación máxima para un periodo de retorno deseado, el máximo potencial de agua que hay en el suelo, las características del suelo, cobertura vegetal, y antecedentes de humedad (Mishra *et al.*, 2003).

La relación simple entre precipitación y escorrentía se planteó en la década de los cuarenta como una aproximación práctica a la relación entre la precipitación y el escurrimiento directo (Mockus., 1949), donde surgió el denominado método del

número de curva (NC) del SCS (1972), que actualmente es usado por el Natural Resources Conservation Service (NRCS) y muchas otras instituciones nacionales e internacionales.

El modelo del NC establece una relación empírica entre el escurrimiento directo Q (mm) y la precipitación P (mm), a escala diaria, como:

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{(P - Ia + S)}, P \geq Ia$$

$Q = 0$, de otra forma

donde, Ia (mm) es la abstracción inicial antes del escurrimiento (almacenamientos superficiales, intercepción por la vegetación, evapotranspiración, infiltración antes de la saturación del suelo y otros factores) y S (mm) es un parámetro de retención, el cual varía espacialmente por cambios en el tipo y uso del suelo, manejo y pendiente; así como por cambios temporales en la humedad del suelo y permite establecer una relación funcional entre P y Q que se utilizan en forma práctica, ya que depende sólo de NC que se puede estimar a partir de información disponible

El parámetro Ia generalmente se expresa en función de S :

$$Ia = kS$$

donde, el valor de k es puesto generalmente como 0.2(USDA-NRCS, 2004) y S es estimado como:

$$S = 25.4 \left(\frac{100}{NC} - 10 \right)$$

donde, NC (0 a 100), adimensional, es función de la humedad antecedente del suelo, la pendiente del terreno, el uso del suelo y sus prácticas de manejo, principalmente.

Tomando en cuenta que para este método, el volumen de escorrentía (Q) resultante de un evento de lluvia (P) se calcula con la fórmula (Chow *et al.*, 1988)

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + (0.8S)}$$

$$Q > 0 \text{ Sí } 0.2 S \leq P$$

Donde:

Q = Ecurrimiento medio (mm).

P = Precipitación por evento (mm).

S = Retención máxima potencial (mm).

Como el potencial máximo de retención de agua del suelo (S) depende de las condiciones del suelo, vegetación y manejo del cultivo, entonces es factible relacionarlo con las curvas numéricas, las cuales son función de los factores antes mencionados. El potencial máximo de retención (S) se obtiene con la ecuación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Donde:

S = Potencial máximo de retención (mm).

CN = Curvas numéricas (adimensional).

Las curvas numéricas son similares al coeficiente de escurrimiento y fueron obtenidas por el Servicio de Conservación de Suelos basados en la observación de hidrogramas procedentes de varias tormentas en diferentes cuencas de los Estados Unidos. Con este método se determina la esorrentía superficial de la precipitación a partir de las características del tipo de suelo, condición hidrológica de la cuenca, uso del suelo y manejo y la condición de humedad antecedente (Chow *et al.*, 1988).

2.1. Grupo de suelos

Utilizando las características texturales de los suelos, el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS) (Cuadro 1), clasificó a aquellos en cuatro grupos de acuerdo con sus características hidrológicas para producir escurrimiento.

Cuadro 1 Grupos hidrológicos de suelo por SCS

| GRUPO DE SUELOS | DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO |
|------------------------|--|
| A | Suelo con bajo potencial de escurrimiento, incluye arenas profundas con muy poco limo y arcilla; también suelo permeable con grava en el perfil. Infiltración básica 8-12 mm/h. |
| B | Suelos con moderadamente bajo potencial de escurrimiento. Son suelos arenosos menos profundos y más agregados que el grupo A. Este grupo tiene una infiltración mayor que el promedio cuando húmedo. Ejemplos: suelos migajones, arenosos ligeros y migajones limosos. Infiltración básica 4-8 mm/h. |
| C | Suelos con moderadamente alto potencial de escurrimiento. Comprende suelos someros y suelos con considerable contenido de arcilla, pero menos que el grupo D. Este grupo tiene una infiltración menor que la promedio después de saturación. Ejemplo: suelos migajones arcillosos. Infiltración básica 1-4 mm/h. |
| D | Suelos con alto potencial de escurrimiento. Por ejemplo, suelos pesados, con alto contenido de arcillas expandibles y suelos someros con materiales fuertemente cementados. Infiltración básica menor 1 mm/h. |

2.2. Condiciones hidrológicas del área de drenaje

La dependencia de la cobertura vegetal y su variación de la densidad de cobertura hace que sea necesario agrupar en tres grupos (Cuadro 2), para la facilidad de los procedimientos de selección de las condiciones específicas de cada sistema.

Cuadro 2. Densidades de cobertura

| CONDICIÓN HIDROLÓGICA | COBERTURA |
|----------------------------------|------------------|
| Buena | > 75 %. |
| Regular | 50 % - 75 % |
| Mala | < 50 % |

La clasificación de la vegetación se realiza de acuerdo al porte que tiene cada espécimen, también se incluye la condición hidrológica y varía con el uso de terreno (Cuadro 3), y con la consideración de las estructuras características del sistema

2.3. Uso del suelo

Cuando los usos de los terrenos varían de áreas de cultivo, pastizales y bosque, se deduce que hay una influencia en el escurrimiento siendo más notorio cuando existen en el terreno obras de protección o siembra de vegetación con fines de conservación y retención. Por lo que para cada tipo de zona y condición se obtuvieron valores de curva numérica, como se observa en el cuadro 4.

Cuadro 3. Caracterización hidrológica para varios usos de suelo.

| USO DEL SUELO | CONDICIÓN HIDROLÓGICA |
|-----------------------------|---|
| Pastos naturales | Pastos en condiciones malas, dispersos, fuertemente pastoreados con menos que la mitad del área total con cobertura vegetal. Pastos en condiciones regulares, moderadamente pastoreados con la mitad o las tres cuartas partes del área total con cubierta vegetal. Pastos en buenas condiciones, ligeramente pastoreados y con más de las tres cuartas partes del área total con cubierta vegetal. |
| Áreas boscosas | Áreas en condiciones malas, tienen árboles dispersos y fuertemente pastoreados sin crecimiento rastrero. Áreas de condiciones regulares, son moderadamente pastoreadas y con algo de crecimiento. Áreas buenas, están densamente pobladas y sin pastorear. |
| Pastizales mejorados | Pastizales mezclados con leguminosas sujetas a un cuidadoso sistema de manejo de pastoreo. Son considerados como buenas condiciones hidrológicas. |
| Rotación de praderas | Praderas densas, moderadamente pastoreadas, usadas en una bien planeada rotación de cultivos y praderas son consideradas como que están en buenas condiciones hidrológicas. Áreas con material disperso, sobrepastoreado son consideradas como malas condiciones hidrológicas. |
| Cultivos | Condiciones hidrológicas buenas se refieren a cultivos los cuales forman parte de una buena rotación de cultivos (cultivos de escarda, praderas, cultivos tupidos). Condiciones hidrológicas malas se refiere a cultivos manejados basándose en monocultivos. |

Cuadro 4. Curva numérica (NC) para estimar el escurrimiento bajo diferentes complejos suelo-cobertura y manejo (condición de humedad II, y $I_a = 0.2S$).

| Uso del suelo | Cobertura | | Grupo de suelos | | | |
|---|--------------------------|-----------------------|-----------------|----|----|----|
| | Tratamiento o práctica | Condición Hidrológica | A | B | C | D |
| Suelo en descanso | Surcos rectos | | 77 | 86 | 91 | 94 |
| | Surcos rectos | mala | 71 | 81 | 88 | 91 |
| Cultivo de escarda | Surcos rectos | buena | 67 | 78 | 85 | 89 |
| | Curva a nivel | mala | 70 | 79 | 84 | 88 |
| | Curva a nivel | buena | 65 | 75 | 82 | 86 |
| | Terraza y curva a nivel | mala | 66 | 74 | 80 | 82 |
| | Terraza y curva a nivel | buena | 62 | 71 | 78 | 81 |
| | Surcos rectos | mala | 65 | 76 | 84 | 88 |
| Cultivos tupidos | Surcos rectos | buena | 63 | 75 | 83 | 87 |
| | Curva a nivel | mala | 63 | 74 | 82 | 85 |
| | Curva a nivel | buena | 61 | 73 | 81 | 84 |
| | Terraza y curva a nivel | mala | 61 | 72 | 79 | 82 |
| | Terraza y curva a nivel | buena | 59 | 70 | 78 | 81 |
| | Surcos rectos | mala | 66 | 77 | 85 | 85 |
| Leguminosas en hilera o forraje en rotación | Surcos rectos | buena | 58 | 72 | 81 | 85 |
| | Curva a nivel | mala | 64 | 75 | 83 | 85 |
| | Curva a nivel | buena | 55 | 69 | 78 | 83 |
| | Terraza y curva a nivel | mala | 63 | 73 | 80 | 83 |
| | Terraza y curva a nivel | buena | 51 | 67 | 76 | 80 |
| | Sin tratamiento mecánico | mala | 68 | 79 | 86 | 89 |
| Pastizales | Sin tratamiento mecánico | regular | 49 | 69 | 79 | 84 |
| | Sin tratamiento mecánico | buena | 39 | 61 | 74 | 80 |
| | Curva a nivel | mala | 47 | 67 | 81 | 88 |
| | Curva a nivel | regular | 25 | 59 | 75 | 83 |
| | Curva a nivel | buena | 6 | 35 | 70 | 79 |
| Pasto de corte | | buena | 30 | 58 | 71 | 78 |
| Bosque | | mala | 45 | 66 | 77 | 83 |
| | | regular | 36 | 60 | 73 | 79 |
| | | buena | 25 | 55 | 70 | 77 |
| Caminos de tierra | | buena | 72 | 82 | 87 | 89 |
| Caminos pavimentados | | buena | 74 | 84 | 90 | 92 |

2.4. Humedad antecedente

El aumento del escurrimiento aumenta a medida que hay mayor humedad en el suelo al momento de presentar la precipitación, es por ello que, en el método de curva numérica la condición de humedad que tiene el suelo producto de los cinco días previos al evento de precipitación es considerada en la estimación del escurrimiento (Cuadro 5).

Cuadro 5. Condición de humedad antecedente como función de la precipitación.

| CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE | PRECIPITACIÓN ACUMULADA DE LOS CINCO DÍAS PREVIOS AL EVENTO (MM) |
|---|---|
| i | 0 - 12.7 |
| ii | 12.7 – 32 |
| iii | > 32 |

Cuando se ha seleccionado el valor de NC (Cuadro 4) se obtiene un valor que está dado por la condición de humedad antecedente intermedia (II), por tal razón, se deben considerar los datos de precipitación de los cinco días previos al evento que se desea utilizar para la predicción del escurrimiento, y si esto es menor de 12.7 mm la condición de humedad antecedente es seca (I) y en el Cuadro 6, se busca el nuevo valor de NC que corresponde a esta condición. Cuando la precipitación es mayor de 32 mm, se busca el valor de la condición de humedad antecedente es húmeda (III).

Cuadro 6. Curvas numéricas (NC) para condiciones de humedad antecedentes húmeda (III) y seca (I) a partir de las condiciones de humedad media (II).

| CN PARA CONDICIÓN II | NC CORRESPONDIENTES A | |
|----------------------|-----------------------|--------------|
| | Condición I | Condición II |
| 100 | 100 | 100 |
| 95 | 87 | 98 |
| 90 | 78 | 96 |
| 85 | 70 | 94 |
| 80 | 63 | 91 |
| 75 | 57 | 88 |
| 70 | 51 | 85 |
| 65 | 45 | 82 |
| 60 | 40 | 78 |
| 55 | 35 | 74 |
| 50 | 31 | 70 |
| 45 | 26 | 65 |
| 40 | 22 | 60 |
| 35 | 18 | 55 |
| 30 | 15 | 50 |
| 25 | 12 | 43 |
| 20 | 9 | 37 |
| 15 | 6 | 30 |
| 10 | 4 | 22 |
| 5 | 2 | 13 |

En caso de no contar con la Cuadro 6, los valores de NC(I) y NC(III), se pueden estimar a partir de NC(II) utilizando las ecuaciones que se presentan a continuación:

$$NC(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

$$NC(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

El método del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos (USDA-NRCS, 2004) es uno de los métodos más utilizados en la actualidad para la estimación de la escorrentía, sin embargo, muchos investigadores mencionan limitaciones como la falta de estabilidad del valor del número de curva para

diferentes condiciones de humedad antecedente por lo que no se recomienda para simulaciones continuas de largo tiempo (Caviedes-Voullième *et al.*, 2012; Efstratiadis *et al.*, 2014; Sahu *et al.*, 2012).

La razón principal por la que el método ha sido adoptado por la mayoría de científicos estudiosos de la hidrología es la simplicidad y aplicabilidad a los sistemas no instrumentados utilizando un solo parámetro conocido como número de curva (NC) que está determinado por las características del sistema como el tipo de suelo, el uso y manejo de la tierra y las condiciones de humedad antecedente (Ajmal *et al.*, 2015a; Ajmal *et al.*, 2015b; Epps *et al.*, 2013; Váðová & Langhammer, 2011), además el método de curva numérica se ha acoplado a varios modelos populares como la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) (Lal *et al.*, 2017; Mishra *et al.*, 2006), análisis espectral lineal modificada (Xu *et al.*, 2016), modelo de escorrentía de Xinanjiang (Lin *et al.*, 2014).

A través del tiempo, la búsqueda de un método que funcione adecuadamente para predecir la escorrentía de los sistemas, ha llevado a los investigadores a desarrollar procesos para entender el comportamiento de la escorrentía. Hawkins *et al.* (1985) interpretó la característica de humedad antecedente como bandas de error en el método de predicción de la escorrentía.

Ajmal *et al.* (2015a, 2015b) señala al método como un proceso altamente dependiente de un solo parámetro que resulta una exactitud variable de acuerdo a los biomas a los que se considere hacer la determinación no tomando en cuenta la variabilidad espacial, tamaños de los sistemas y la aplicación de una abstracción generalizada por el método de 0.2 que resulta subestimado en algunas consideraciones.

Kim *et al.* (2010) mostró que las evaluaciones de escorrentía con el método SCS-CN utilizando las tablas (USDA-NRCS, 2004) no eran satisfactorias y que los valores de NC debían calibrarse de acuerdo a las características generales que se presentan en los sistemas evaluados. Grimaldi *et al.* (2012a, 2012b), considera que la causa principal de las discrepancias entre el modelo basado en eventos y la simulación continua está relacionada con el efecto combinado del esquema de infiltración y los patrones de precipitación simulados.

En la mayoría de los casos en que el método se ha utilizado en México, prescinde del uso de modificaciones, dando por hecho que los valores otorgados, validan la condición del sistema, sin embargo, es también fácilmente observable que las características de suelo, uso del área, pendiente, cobertura vegetal, etc., no son consideradas a detalle para una predicción adecuada de la escorrentía.

2.4. Bibliografía

- Ajmal, M., Moon, G. woo, Ahn, J. hyun, & Kim, T. woong. (2015). Investigation of SCS-CN and its inspired modified models for runoff estimation in South Korean watersheds. *Journal of Hydro-Environment Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.11.003>
- Ajmal, M., Waseem, M., Ahn, J. H., & Kim, T. W. (2015). Improved Runoff Estimation Using Event-Based Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0924-z>
- Ajmal, M., Waseem, M., Wi, S., & Kim, T. W. (2015). Evolution of a parsimonious rainfall-runoff model using soil moisture proxies. *Journal of Hydrology*.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.019>
- Aparicio. J. Francisco. (1989). *Fundamentos de la Hidrología de superficie*. (limusa, Ed.) (primera).
- Baltas, E. A., Dervos, N. A., & Mimikou, M. A. (2007). Technical note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(6), 1825–1829.
<https://doi.org/10.5194/hess-11-1825-2007>
- Caviedes-Voullième, D., García-Navarro, P., & Murillo, J. (2012). Influence of mesh structure on 2D full shallow water equations and SCS Curve Number simulation of rainfall/runoff events. *Journal of Hydrology*.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.006>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. *Water Resources and Environmental Engineering*.

<https://doi.org/10.1016/j.soncn.2011.11.001>

- Doffo, N., & Bonorino, G. G. (2005). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: Un análisis estadístico. *Revista de La Asociación Geológica Argentina*, 60(1), 16–22.
- Efstratiadis, A., Koussis, A. D., Koutsoyiannis, D., & Mamassis, N. (2014). Flood design recipes vs. reality: Can predictions for ungauged basins be trusted? *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1417-2014>
- Epps, T. H., Hitchcock, D. R., Jayakaran, A. D., Loflin, D. R., Williams, T. M., & Amatya, D. M. (2013). Curve number derivation for watersheds draining two headwater streams in lower coastal plain south carolina, USA. *Journal of the American Water Resources Association*. <https://doi.org/10.1111/jawr.12084>
- Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., & Marlats, R. M. (2007). Relación precipitación-escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana,. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, XXXIX (1), 21-28., 39(1900), 21–28. Retrieved from http://t.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/1521/gaspariagrarias39-1.pdf
- Grimaldi, S., Petroselli, A., & Nardi, F. (2012). A parsimonious geomorphological unit hydrograph for rainfall-runoff modelling in small ungauged basins. *Hydrological Sciences Journal*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.636045>
- Grimaldi, S., Petroselli, A., & Serinaldi, F. (2012). Design hydrograph estimation in small and ungauged watersheds: Continuous simulation method versus event-based approach. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.8384>
- Hawkins, R. H. (1979). Runoff curve numbers for partial area watersheds. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0018315528&partnerID=tZOtx3y1>
- Hawkins, R. H. (1993). Asymptotic Determination of Runoff Curve Numbers from

- Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:2\(334\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:2(334))
- Hawkins, R. H., Hjelmfelt, A. T., & Zevenbergen, A. W. (1985). Runoff Probability, Storm Depth, and Curve Numbers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1985\)111:4\(330\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1985)111:4(330))
- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, E., & Van Mullem, J. a. (2010). Continuing evolution of rainfall-runoff and the curve number precedent. In *2nd Joint Federal Interagency Conference* (pp. 2–12).
- Kayet, N., Pathak, K., Chakrabarty, A., & Sahoo, S. (2018). Evaluation of soil loss estimation using the RUSLE model and SCS-CN method in hillslope mining areas. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(1), 31–42.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.11.002>
- Kim, N. W., Lee, J. W., Lee, J., & Lee, J. E. (2010). SWAT application to estimate design runoff curve number for South Korean conditions. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.7638>
- Lal, M., Mishra, S. K., & Pandey, A. (2017). Empirical evaluation of Soil Conservation Service Curve Number inspired sediment yield model Empirical evaluation of Soil Conservation Service Curve Number inspired sediment yield model, (August). <https://doi.org/10.5958/2455-7145.2017.00020.0>
- Lin, K., Lv, F., Chen, L., Singh, V. P., Zhang, Q., & Chen, X. (2014). Xinanjiang model combined with Curve Number to simulate the effect of land use change on environmental flow. *Journal of Hydrology*.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.049>
- Manson, R. H. (2004). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques*, 10(1), 3–20.
<https://doi.org/10.21829/myb.2004.1011276>
- Martínez-Yrizar, A., Álvarez-Sánchez, J., & Maass, M. (2017). Análisis y perspectivas del estudio de los ecosistemas terrestres de México: dinámica

- hidrológica y flujos de nitrógeno y fósforo. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.008>
- Mayer, A., Winkler, R., & Fry, L. (2014). Classification of watersheds into integrated social and biophysical indicators with clustering analysis. *Ecological Indicators*, 45, 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.04.030>
- Michel, C., Andréassian, V., & Perrin, C. (2005). Soil Conservation Service Curve Number method: How to mend a wrong soil moisture accounting procedure? *Water Resources Research*, 41(2), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2004WR003191>
- Mishra, S. K., Singh, V. P., Sansalone, J. J., & Aravamuthan, V. (2003). A modified SCS-CN method: Characterization and testing. *Water Resources Management*, 17(1), 37–68. <https://doi.org/10.1023/A:1023099005944>
- Mishra, S. K., Tyagi, J. V., Singh, V. P., & Singh, R. (2006). SCS-CN-based modeling of sediment yield. *Journal of Hydrology*, 324(1–4), 301–322. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.006>
- Ponce, V. M., & Hawkins, R. H. (1996). Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11))
- SAGARPA. (2000). Hidrología aplicada a las grandes obras hidráulicas. *Colegio De Postgraduados*, 1, 20.
- Sahu, R. K., Mishra, S. K., & Eldho, T. I. (2012). Performance evaluation of modified versions of scs curve number method for two watersheds of maharashtra, India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. <https://doi.org/10.1080/09715010.2012.662425>
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 18–39. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>
- Soil Conservation Service Engineering Division. (1972). Section 4: Hydrology. In

National Engineering Handbook (pp. 10-1-10–22).

Soulis, K. X., Valiantzas, J. D., Dercas, N., & Londra, P. A. (2009). Investigation of the direct runoff generation mechanism for the analysis of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(5), 605–615. <https://doi.org/10.5194/hess-13-605-2009>

Steenhuis, T. S. (1995). Scs Runoff Equation Revisited for Variable Source Runoff Areas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1995\)121:3\(234\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1995)121:3(234))

Torres-Bejarano, F., Padilla Coba, J., Rodríguez Cuevas, C., Ramírez León, H., & Cantero Rodelo, R. (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 32(3), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>

USDA-NRCS. (2004). Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. *National Engineering Handbook*. <https://doi.org/10.1128/AAC.02285-15>

Váòová, V., & Langhammer, J. (2011). Modelling the impact of land cover changes on flood mitigation in the upper lužnice basin. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. <https://doi.org/10.2478/v10098-011-0022-8>

Velásquez-Valle, M. A., Muñoz-Villalobos, J. A., Sánchez-Cohen, I., Macías-Rodríguez, H., & Flores-López, H. E. (2013). Simulación Del Impacto Del Manejo Sobre La Respuesta Hidrológica En Una Cuenca De Pastizal Parcialmente Instrumentada. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XII(1), 7–12. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2012.06.033>

Xu, J., Zhao, Y., Zhong, K., Ruan, H., & Liu, X. (2016). Coupling modified linear spectral mixture analysis and soil conservation service curve number (SCS-CN) models to simulate surface runoff: Application to the main Urban Area of Guangzhou, China. *Water (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/w8120550>

3. MEDICIÓN DIRECTA Y PREDICCIÓN DE LA ESCORRENTÍA EN CUATRO SUB-MICROCUENCAS FORESTALES ALTERADAS

DIRECT MEASUREMENT AND PREDICTION OF RUNOFF IN FOUR ALTERED FOREST SUB-MICROWATERSHEDS

3.1. RESUMEN

Introducción. Los modelos de predicción son importantes pues permiten obtener información de procesos que son difíciles de cuantificar de manera directa, ya que para poder utilizarlos es necesario saber cuál es el grado de aproximación a la realidad.

Objetivo. Caracterizar la relación precipitación escorrentía utilizando el método de curvas numéricas (NC) y el método directo, para obtener: a) magnitud de la escorrentía, b) coeficientes de escorrentía, c) coeficientes de correlación e inferir la bondad del método de predicción de NC.

Materiales y método. En cuatro sub-microcuencas con características generales de pendiente entre 5 y 23%, suelos franco arcillosos y precipitaciones promedio anuales de 613.2 mm, se comparó en método de curva numérica contra la escorrentía real ocasionada por eventos de lluvia en 2017.

Resultados y discusión. La eficiencia del método se determinó mediante el coeficiente de determinación (R^2). En promedio la sub-microcuenca cuatro generó la mayor lámina de escurrimiento; los demás sistemas mostraron un comportamiento por debajo del 50% con respecto a ésta. Los coeficientes de escurrimiento promedio por la temporada fueron 2.31, 1.85, 2.96 y 4.7 % en cada una de las cuatro sub-microcuencas, respectivamente para MD, contra el obtenido con el método de NC que fueron 4.47, 7.57, 5.38 y 7.35 % respectivamente para cada sub-microcuenca.

Conclusión.

Se encontró evidencia que mediante la comparación de métodos con datos de precipitación obtenidos se pueden generar modelos predictores bastante exactos para cada situación que se presente en las cuencas.

Palabras claves: Número de curva, coeficiente de escurrimiento, sub-microcuencas.

SUMMARY.

Prediction models are important because they allow obtaining information from processes that are difficult to quantify directly, since in order to use them it is necessary to know the degree of approximation to reality.

Objective.

Characterize the precipitation runoff relationship using the numerical curve (CN) method and the direct method, to obtain: a) runoff magnitude, b) runoff coefficients, c) correlation coefficients and infer the goodness of the NC prediction method.

Materials and method.

In four sub-microwatersheds with general slope characteristics between 5 and 23%, loamy clay soils and average annual rainfall of 613.2 mm, the numerical curve method was compared against the actual runoff caused by rain events in 2017.

Results and Discussion.

The efficiency of the method was determined by the coefficient of determination (R^2). On average, sub-microwatersheds four generated the largest runoff plate; the other systems showed a behavior below 50% with respect to this one. The average runoff coefficients for the season were 2.31, 1.85, 2.96 and 4.7% in each of the four sub-microwatersheds, respectively for MD, against that obtained with the NC method, which were 4.47, 7.57, 5.38 and 7.35% respectively for each sub-microwatersheds.

Conclusion.

We found evidence that by comparing methods with precipitation data obtained, quite accurate predictive models can be generated for each situation that occurs in the forests.

Keywords: numerical curves, runoff coefficient, sub-microwatersheds.

3.3. INTRODUCCIÓN

El análisis, manejo e interpretación de los recursos hídricos en el mundo es uno de los retos más importantes que los seres humanos tienen en la actualidad. El manejo de los sistemas hídricos centra su atención en los procesos funcionales de un ecosistema, como ríos, lagos y cuencas ayudando a su comprensión en tiempo y espacio. De acuerdo con Martínez-Yrizar *et al.* (2017), la atención oportuna para la solución de problemas ambientales evita que éstos lleguen a un punto de degradación permanente, es decir de no retorno. En ese sentido, factores tales como el rápido y constante incremento de la población, el cambio climático y la alteración de los sitios de recarga de acuíferos, agrava la oferta de recursos hídricos disponibles (Torres-Bejarano *et al.*, 2016), por lo que establecer acciones que ayuden a definir procesos dentro de las cuencas, se convierte en una labor importante para la conservación sostenible, no solo de los recursos naturales, sino también de todo proceso de vida en el planeta.

En México, una crisis climática severa causada por el mal manejo del agua, es acentuada si coincide con altas tasas de deforestación y con la pérdida de los servicios hidrológicos, naturalmente, proporcionados por bosques y selvas (Manson, 2004). En la región del Valle de México se observan graves problemas ambientales, en gran medida debidos a procesos de degradación del suelo originados por un uso inadecuado e irracional del mismo, lo que ocasiona una merma potencial de su productividad y la disminución evidente de la cobertura vegetal. El desarrollo de la erosión del suelo se presenta en el entorno biofísico que comprende suelo, lluvia, topografía, cobertura de la tierra y las interacciones que se dan entre todos estos elementos (Kayet *et al.*, 2018).

Durante muchos años, los investigadores han buscado la manera de establecer metodologías que garanticen una mayor certidumbre de lo que pasa dentro de una cuenca, conociendo así, los diversos procesos que benefician y afectan su funcionamiento. Los métodos directos de medición de variables se generan por la necesidad de conocer la conducta dentro un sistema, surgiendo metodologías para el ajuste de modelos predictores que instituyan el funcionamiento real de los sistemas. Al establecer modelos predictores seguros es posible dejar de lado las

mediciones directas, ya que se convierten en procesos bastante costoso e inoperables para la investigación.

En la actualidad, el estudio de procesos hídricos dentro de una cuenca, que es un sistema abierto y frágil, se convierte en una necesidad básica para el entendimiento de la conducta de las variables reguladoras del sistema y sus derivaciones. Dentro de las grandes cuencas existen elementos de menores dimensiones denominados subcuenas y microcuenas, éstas pueden estar ubicadas en la parte alta, media o baja, siendo terrenos generadores de procesos positivos como la recarga de acuíferos o negativos como la erosión hídrica (Mayer *et al.*, 2014).

Con el estudio de la conducta de las cuencas, subcuenas y microcuenas, se puede tener un mejor juicio de las técnicas y mejoras de los procesos que ocurren dentro de las cuencas, generando modelos predictores de variables de interés para el mejor funcionamiento (Mayer *et al.*, 2014). Analizando los datos obtenidos de manera directa en una cuenca, se establecen condiciones para formular modelos predictores de parámetros que caractericen las cuencas susceptibles a crisis hídricas de manera indirecta y a través de predicciones certeras (Doffo & Bonorino, 2005).

3.3.1. Descripción de métodos NC y MD

Método de número de curva

El método de número de curva desarrollado por el Soil Conservation Service del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de norte América (Soil Conservation Service Engineering Division, 1972), se caracteriza por ser un método de amplia aplicación y el más utilizado para la determinación de la escorrentía en sistemas de cuencas, la mayoría de los métodos de estimación de escorrentía suponen que el periodo de retorno de un evento de escorrentía es el mismo que el de precipitación que causó éste. (Hawkins, 2010).

El éxito en la aplicación del método de NC es debido a explica los factores que afectan la escorrentía en los sistemas, incluidos el tipo de suelo, vocación del suelo, condiciones del suelo y vegetación y las condiciones de humedad antecedente de

los cinco días previos al evento, todos estos incorporados a un único parámetro, el número de curva (Soulis, 2009). Se caracteriza por ser un método que cuenta con variables para la predicción fácilmente comprensibles, razonablemente bien documentados y ampliamente aceptado para su uso en México y otros países. Por otro lado, cuenta también con puntos débiles como el no hacer una consideración del impacto de la intensidad de la lluvia y su distribución temporal, no aborda los efectos de la escala espacial, tiene una alta sensibilidad a los cambios en los valores de su único parámetro (número de curva) y no aborda claramente el efecto de la condición de humedad antecedente (Hawkins, 1993; Michel *et al.*, 2005; Ponce & Hawkins, 1996).

En estudios previos, los criterios desarrollados para la aplicabilidad del método NC requieren esencialmente el conocimiento de los datos de escurrimiento. Sin embargo, el método de NC se desarrolla principalmente para ser aplicado en cuencas hidrográficas no evaluadas, en consecuencia, es necesario analizar sistemáticamente las características clave del sistema que son responsables de este comportamiento a fin de proporcionar algunos indicadores que pudieran facilitar la evaluación y aplicación del método NC en cuencas hidrográficas no explotadas.

Método directo

En la aplicación de un método directo de obtención de escurrimiento se puede considerar cualquier metodología que dé como resultado la medición directa de la escurrimiento de un sistema, se pueden definir diferentes variantes del método, y cada investigador puede dirigir a conveniencia la forma en que considere la obtención de resultados.

Soulis *et al* (2009), utilizó un método directo basado en estaciones hidrométricas, pluviómetros, una estación meteorológica y cuatro registradores de temperatura y humedad relativa. Los datos se registraron con un paso de tiempo de 10 min, además de la red de pluviómetros muy densa, también se prestó especial atención a la calidad de las mediciones de descarga. La estación hidrométrica de la subcuenca superior contó con un vertedero y un registrador digital de nivel de agua, asegurando la precisión de las mediciones de descarga. La segunda estación

hidrométrica con un registrador de nivel de agua digital instalado en una sección transversal natural de la corriente, mientras que las mediciones de descarga de etapa muy frecuentes aseguran la precisión de las mediciones. También se trazaron predicciones de escorrentía del método NC para los valores de NC estimados de acuerdo con las características de cobertura de suelo de la cuenca y las tres categorías de humedad antecedente. Se determinó que no hubo relación entre los valores de escorrentía medido y predicho para ninguna de las dos cuencas hidrográficas.

Baltas *et al* (2007), en un estudio determinaron la relación de abstracción inicial, I_a , de la cuenca., de acuerdo con sus resultados, la razón promedio ($\lambda = I_a / S$) se evaluó para ser igual a 0.037 y 0.014 para la cuenca superior de Lykorrema y toda la cuenca hidrográfica, respectivamente. Las curvas de predicción-lluvia-escorrentía-NC, que se calcularon usando las nuevas relaciones de abstracción iniciales sugeridas, también se trazaron. Se observó que el uso de la relación λ estimada no mejora esencialmente las predicciones obtenidas. También se encontró que, contrariamente a la teoría del método de NC, los eventos de categoría humedad antecedente III no están correlacionados con valores de escorrentía más altos. De hecho, en las cuencas hidrográficas estudiadas se observaron valores de escorrentía mayores en períodos secos (humedad antecedente).

Hawkins (1979) y Steenhuis (1995) también señalaron en sus estudios que la variación del valor de NC, de acuerdo con la categoría de humedad antecedente, no mejora la predicción de escorrentía en cuencas hidrográficas de área parcial.

3.3.2. Comparación entre métodos

Aunque el método de NC fue desarrollado originalmente en el Estados Unidos de norte América y principalmente para la evaluación de la escorrentía de tormentas en pequeñas cuencas agrícolas, pronto evolucionó mucho más allá de su objetivo original y fue adoptado para varios usos de la tierra tales como cuencas hidrográficas urbanizadas y boscosas (Rawls *et al.*, 1981; Mishra y Singh, 1999). La diferencia entre los métodos toma importancia por la situación en que se encuentre la cuenca que se requiere evaluar, el método de NC en la actualidad es utilizado de manera general sin que se tomen las previsiones necesarias para lograr

obtener datos precisos de la escorrentía en la cuencas, el método directo es una forma certera y de confiabilidad pero se vuelve demasiado costoso e inoperable para las condiciones que los bosques presentan, es por ello que el obtener mediante mediciones directas modelos que ayuden a generar mejor confiabilidad en la predicción de la escorrentía, generara una mayor confiabilidad en la obtención de información del sistema.

Para hacer la comparación entre los métodos (NC y MD) es necesario determinar las variables que afectan los resultados de escorrentía, comparando la aplicación de los factores decisivos en el resultado, de igual manera que se tiene que analizar las condiciones bajo las que fue diseñado el método de NC.

La comparación de métodos directos e indirectos de obtención de escorrentía, se ha ejecutado en muchos países en los últimos años. El ajuste, calibración y validación de los modelos que ayuden a mejorar la manera de predecir la escorrentía a través de la inferencia de métodos directos, resulta la mejor forma de llegar a una estimación aceptable, algunos estudios realizados en cuencas de zonas áridas y semiáridas de México, se ha determinado que hay que realizar modificaciones al método de NC para evitar errores de predicción (Velásquez-Valle., 2013).

3.3.3. Objetivos de la investigación

En el presente trabajo se analiza el comportamiento de cuatro sub-microcuencas forestales alteradas que presentan diferentes condiciones estructurales. Con base en esto, a partir de la comparación entre métodos (NC y MD) se examina el estado actual de sus componentes primarios (precipitación, escurrimiento) de tal forma, que se puedan ubicar con precisión las correlaciones y diferencias entre métodos, que se generan, poniendo énfasis en la factibilidad de hacer uso del método de NC en sub-microcuencas forestales alteradas.

En los resultados que se presentan, se comparan los distintos procesos que ocurren dentro de cada una de los cuatro sistemas estudiados, y se analizan las variables precipitación y escorrentía que se registran en éstos, para entender los el porqué de los comportamientos presentes, lo que incluye aquellos aspectos de mayor impacto en la escorrentía y desarrollo del sistema.

Los objetivos de la investigación fueron aplicar el método directo (MD) de medición de la escurrentía y el método de NC para: a) Obtener los valores de los coeficientes de escurrimiento utilizando el método directo y el método de NC. b) Inferir la bondad del método de predicción de NC. c) Determinar la homogeneidad o heterogeneidad del comportamiento de la escurrentía en las cuatro sub-microcuencas forestales alteradas. y d) Determinar el comportamiento de la relación precipitación-escurrentía en cuatro sub-microcuencas forestales alteradas.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Experimento

Esta investigación se llevó a cabo en cuatro sub-microcuencas forestales alteradas (M1, M2, M3, y M4) con pendientes promedio de 5 a 23% y con áreas de 2,056.01 m², 2676.58 m², 650.02 m² y 1435.94 m², respectivamente. Se encuentran dentro del predio denominado "LAS CRUCES", perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo, con una superficie de 326 ha. Las sub-microcuencas se ubican en el municipio de Texcoco, Estado de México, al suroeste del poblado de Tequexquináhuac; en un área dada por las coordenadas 19°27'50.55" a 19°27'6.54" de latitud norte y 98°49'34.65" a 98°48'3.54" de longitud oeste.

El clima que se presentan en las cuatro sub-microcuencas es C(w1), que corresponde a un templado subhúmedo, con una temperatura media anual entre 12°C y 18°C; siendo la que presenta el mes más frío entre -3°C y 18°C, y la del mes más cálido de 22°C. La región presenta índices de aridez elevados y prácticamente nulo exceso de agua, con deficiencia en la época estival. La precipitación anual promedio de la zona de 613.2 mm, la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm, con lluvias de verano que muestran un índice de precipitación-temperatura que oscila entre 43.2 y 55; y un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

En las cuatro sub-microcuencas se encuentra vegetación nativa e introducida, con presencia de bosque de encino, pino y oyamel. También, se observan relictos y especies nuevas de *Pinus montezumae*, *Pinus devoniana*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus resinifera*, *Casuarina equisetifolia* y *Callitropsis lusitánica*

lo que indica un drástico cambio en la vegetación original registrada, además de la existencia de áreas con suelos erosionados, principalmente por efectos de lluvia y viento.

3.4.1. Método

Instrumentación de las sub-microcuencas

Se instalaron pluviómetros de 150 mm, de la marca TRU-CHEK-USA, en bases hechas de alambre a una altura de 50 cm del suelo. Las sub-microcuencas uno y dos están continuas y comparten parteaguas, por tal razón se instaló uno solo pluviómetro para ambas microcuencas, la sub-microcuenca tres está a 500 m de estas, y la sub-microcuenca cuatro a un kilómetro de las primeras.

Se instalaron sistemas de direccionamiento y captación de escorrentía (figura 1) ubicados en la desembocadura de las sub-microcuencas, cada tanque tiene 2 metros de largo, 1.10 metros de ancho y 0.42 metros de alto (B), con una pendiente del 3%, estos tanques tienen una capacidad de un metro cubico, ajustados con una canaleta dosificadora(A) captando la cuarta parte de la escorrentía total, evitando así, que la escorrentía exceda la capacidad del tanque y se pierda la medición.

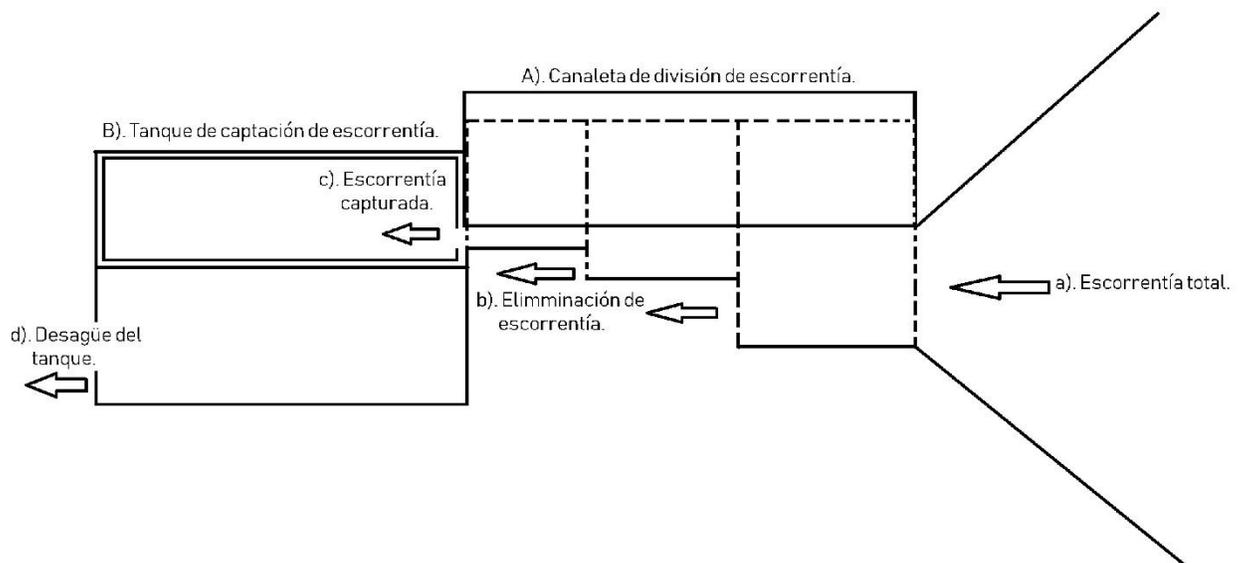


Figura 1. Diagrama de tanques de captación de escorrentía de las sub-microcuencas.

3.4.2. Procedimiento para la toma de datos

Precipitación

La medición de la precipitación fue cada 24 horas, tomando el dato a las 8:00 de la mañana, evitando que en los días soleados se evaporara el agua dentro del pluviómetro, una vez tomado el dato, el pluviómetro se colocaba nuevamente en la base seco y limpio, cada día se tomaba dato de presencia o ausencia de precipitación durante dos meses (10 de agosto del 2017 al 9 de octubre del 2017), con un total de 34 eventos de precipitación registrados, el fin de la temporada se definió con el transcurso de cinco días continuos sin presencia de lluvia y escurrimiento en la zona.

Escorrentía

Los datos de escorrentía se tomaron cada 24 horas, a las 8:00 am, para conocer el dato de escorrentía por evento se midió la altura del agua en la cara superior e inferior del ancho de los tanques, se obtuvo un promedio que se multiplico por el ancho y el largo de los tanques obteniendo un volumen de escorrentía, multiplicándolo después por cuatro que fue la restricción generada por la canaleta dosificadora.

Los tanques se drenaban y limpiaban de impurezas adheridas por el escurrimiento, estaban cubiertos con una estructura y plástico para evitar la entrada de precipitación que alterara el dato de escorrentía, tanto la precipitación como la escorrentía fueron monitoreadas justo cada 24 horas para tener el dato preciso en el tiempo, y aunque no existiera evento de lluvia, se recorría cada una de las sub-microcuencas para evitar problemas o eventualidades.

3.4.3. Descripción de resultados por el método de número de curva

Para el cálculo de la escorrentía por el método de número de curva, se utilizó el dato de precipitación registrada por cada evento de lluvia en las cuatro sub-microcuencas, en este método, el volumen de escorrentía (Q) resultante de un evento de lluvia (P) y al mismo tiempo basada de la ecuación del balance hídrico

$$P = Ia + F + Q,$$

y en la suposición fundamental de que la relación entre la escorrentía y la precipitación efectiva es la misma que la relación entre la retención real y la retención potencial, produciendo la forma básica del método de curva numérica (Soulis *et al.*, 2009) se realizó el cálculo con la siguiente fórmula (Chow *et al.*, 1988).

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + (0.8S)}$$

Como el potencial máximo de retención de agua del suelo (S) depende de las condiciones del suelo, vegetación y manejo del cultivo, entonces se relacionó con los números de curva, las cuales son función de los factores antes mencionados. El potencial máximo de retención (S) se obtuvo con la ecuación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Los NC son similares al coeficiente de escurrimiento y fueron obtenidas en tablas de características de NC. Con este método se determinó la escorrentía a partir de las características del tipo de suelo, condición hidrológica de la cuenca, uso del suelo y manejo y la condición de humedad antecedente (Chow *et al.*, 1988).

3.4.4. Comparación de resultados entre el método de NC y MD

Se determinaron las diferencias y correlaciones existentes entre el método de número de curva y el método directo aplicado a las cuatro sub-microcuencas forestales alteradas, poniendo atención principal a la comparación entre valores de escorrentía obtenidos.

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1. comportamiento de la escorrentía en función de la precipitación

La relación precipitación-escorrentía obtenida por método directo, manifestó el comportamiento esperado, cumpliendo el principio lógico en la mayoría de los eventos de que a mayor precipitación resulta mayor el escurrimiento, esto puede

ser observado en general en cada una de las sub-microcuencas evaluadas (Figura 2). Se observa claramente cómo los valores de precipitación (mm) y los de escorrentía (mm), se diferencian por un margen bastante amplio en la cantidad que precipitó y la cantidad que escurrió, este patrón, está dado por las características estructurales de cada sub-microcuena.

Sobresale el mayor potencial de escorrentía asociado a la sub-microcuena cuatro (Figura 2, Sub-Mic 4), donde se observa que los valores de escorrentía son mayores que las otras tres sub-microcuencas. Por lo tanto, las diferencias encontradas entre los datos de las cuatro sub-microcuencas estuvieron asociados a las diferencias en las características estructurales de cada sistema. El comportamiento diferenciado también se atribuye al comportamiento de la conductividad hidráulica del suelo de cada sistema (7.12, 12.18, 6.87 y 5.41 cm h⁻¹ para las sub-microcuencas uno, dos, tres y cuatro, respectivamente), y capacidad de campo 28.44, 33.57, 43.13 y 34.24 % respectivamente, además de una variabilidad muy marcada en las características estructurales de vegetación de cada una de las sub-microcuencas. Las características de la vegetación en cada sub-microcuena se describen a continuación.

Sub-microcuena uno

Tiene como principal característica una pobre cobertura vegetal (45%), con presencia Arborea de *Casuarina equisetifolia* L (6 individuos), *Acacia retinodes* Schl (22 individuos) y *Eucalyptus camaldulensis* Schldl (16 individuos), además de algunos arbustos destacados como el *Senecio salignus* DC (17 individuos). y *Symphoricarpus microphyllus* (14 individuos), caracterizándose por ser estar presentes en agrupaciones localizadas dentro de la sub-microcuena.

Sub-microcuena dos

Este sistema está caracterizado por la presencia de *Eucalyptus camaldulensis* (78 individuos), las principales especies de árboles y arbustos que encontramos son *Eucalyptus camaldulensis* Schldl y *Callitropsis lusitánica* (4 individuos). Además de arbustos; *Senecio salignus* DC (9 individuos). Y *Symphoricarpus microphyllus* (11

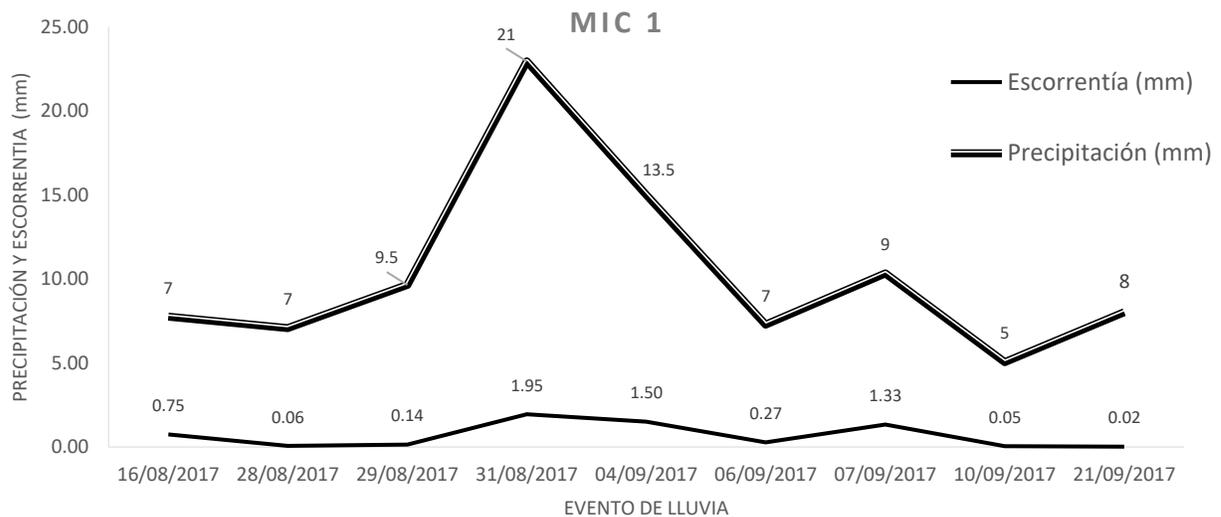
individuos), pero que no representan más del 70% de cobertura del total de superficie del sistema.

Sub-microcuena tres

Con una vegetación predominante de *Callitropsis lusitánica* (16 individuos), las principales especies presentes son Arbóreas: *Callitropsis lusitánica* (16 individuos), *Arbutus spp* (2 individuos) y *Pinus montezumae Lamb* (6 individuos), Arbustivo: *Senecio salignus DC* (3 individuos), *Juniperus spp* (2 individuos) y *Archibaccaris sp* (3 individuos)

Sub-microcuena cuatro

Se caracteriza por la presencia de vegetación de pobre densidad, tiene encontramos *Casuarina equisetifolia L.* (3 individuos), *Callitropsis lusitánica* (42 individuos), *Pinus montezumae Lamb* (1 individuo) y *P. pseudostrobus Lindl* (1 individuo). Además de Arbustos como *Senecio salignus DC* (3 individuos), *Archibaccaris sp* (7 individuos) y *Juniperus spp* (4 individuos).



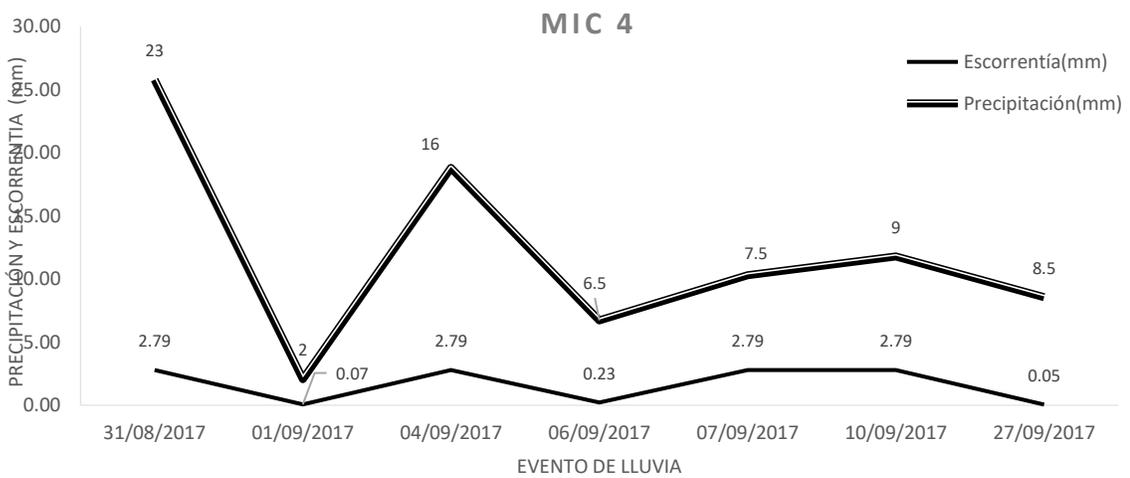
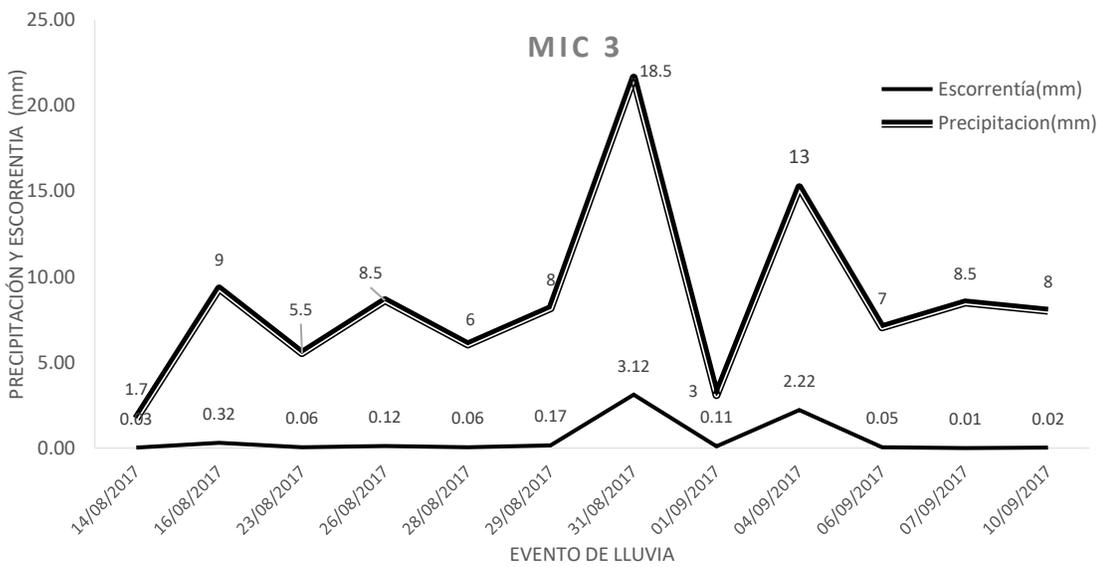
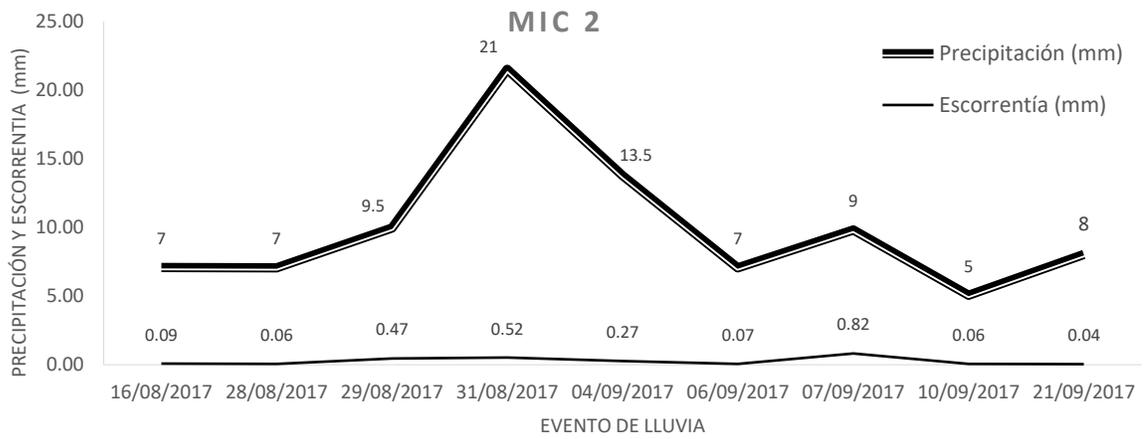


Figura 2. Comportamiento precipitación-escorrentía en las cuatro sub-microcuencas forestales.

3.5.2. Magnitud de la escorrentía de los métodos NC y MD

Los valores de escorrentía que se obtuvieron mediante el método de NC, de manera general, fueron de magnitud mayor que los obtenidos de forma directa en cada una de las sub-microcuencas, encontrando diferencias muy marcadas entre ambos métodos (Cuadro 7), se atribuyó que este comportamiento se da por las diferentes variables que condicionan el funcionamiento de un método de predicción como el de NC, encontrando que la estructura del suelo y subsuelo, cobertura vegetal, pendientes e intensidades de lluvia son factores que provocan modificaciones en la forma de generarse la escorrentía dentro de los sistemas y limitan que el proceso se desarrolle de manera esperada.

Las cuencas con características boscosas suelen contener suelos demasiado permeables (Hawkins, 1993) corroborando que para zonas que son de recarga de mantos freáticos (que mayoritariamente son boscosas), el método de curva numérica es ineficiente, por la diferencia entre variables que contempla y otras variables que modifican la magnitud del escurrimiento, a diferencia de los lugares sin fracturas en el suelo, el método funciona de manera óptima y otorga resultados más reales en el cálculo de la escorrentía.

En el cuadro 7, se presenta el comportamiento de las magnitudes del escurrimiento obtenido de manera directa y el obtenido aplicando el método de NC, se observa que en la sub-microcuenca tres los valores obtenidos con el método de NC se acercan más a los valores obtenidos con la medición directa, haciendo válida la teoría de que el método de curva numérica puede ser aplicado a microcuencas de tamaños muy pequeños, en general el comportamiento del método de NC resulta aceptable, ya que en la mayoría de los eventos el valor de escorrentía predicha se acerca a la medición directa.

Los resultados de la comparación entre el método directo y el método de NC, demuestran que es necesario analizar de manera detallada las condiciones de los sistemas donde se requiere hacer una estimación de escorrentía, ya que, el considerar circunstancias específicas de cada sistema ayuda a realizar una mejor estimación de la escorrentía. Es necesario aplicar pruebas preliminares para

determinar escorrentía superficial, proponiendo modificaciones al método utilizado para descartar sesgos en los resultados obtenidos.

Cuadro 7. Magnitud de la escorrentía por evento de precipitación obtenida con el método curva numérica (NC) y método directo (MD) en las sub-microcuencas forestales alteradas.

| Número de evento | Mic 1 | | Mic 2 | | Mic 3 | | Mic 4 | |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | NC (mm) | MD (mm) |
| 1 | 0.02 | 0.75 | 0.02 | 0.09 | 0.78 | 0.03 | 3.79 | 2.79 |
| 2 | 0.02 | 0.06 | 0.02 | 0.06 | 0.22 | 0.32 | 0.73 | 0.07 |
| 3 | 0.30 | 0.14 | 0.30 | 0.47 | 0.02 | 0.06 | 0.01 | 2.79 |
| 4 | 4.70 | 1.95 | 4.70 | 0.52 | 0.15 | 0.12 | 1.12 | 0.23 |
| 5 | 1.35 | 1.50 | 1.35 | 0.27 | 0.00 | 0.06 | 0.86 | 2.79 |
| 6 | 0.20 | 0.27 | 0.02 | 0.07 | 0.09 | 0.17 | 0.04 | 2.79 |
| 7 | 0.22 | 1.33 | 0.22 | 0.82 | 3.42 | 3.12 | 0.64 | 0.05 |
| 8 | 1.90 | 0.05 | 1.90 | 0.06 | 0.38 | 0.11 | | |
| 9 | 0.09 | 0.02 | 0.09 | 0.04 | 1.19 | 2.22 | | |
| 10 | | | | | 0.02 | 0.05 | | |
| 11 | | | | | 0.15 | 0.01 | | |
| 12 | | | | | 0.09 | 0.02 | | |

3.5.3. Coeficientes de escurrimiento de los métodos NC y MD

El análisis de los coeficientes de escurrimiento medidos y pronosticados (cuadro 8), mostró que el comportamiento fue diferente entre las cuatro sub-microcuencas, ya que en las sub-microcuencas uno, tres y cuatro los valores presentaron diferencias menores (2.16, 2.42 y 2.65 %, respectivamente), mientras que la sub-microcuenca dos presentó una diferencias mayor (5.72%) debido a que el método de predicción no consideró de manera estricta el valor de conductividad hidráulica del suelo mayor en la sub-microcuenca dos (12.19 cm h⁻¹).

Las cuatro sub-microcuencas forestales alteradas presentaron condiciones de alta heterogeneidad, con pequeñas superficies impermeables (de conductividad

hidráulica baja), un suelo de textura gruesa con conductividad hidráulica alta y posible fracturación de suelo por tratarse de zonas de recarga de mantos freáticos, pero también por un suelo de textura media con una conductividad hidráulica moderada.

Por lo tanto, la diferencia entre valores, puede atribuirse a la presencia del área de textura porosa que, para algunas intensidades de lluvia particularmente altas, contribuyó también a la disminución escorrentía superficial total. Se encontró que, de las cuatro sub-microcuencas, la número cuatro se asoció con la mayor lamina de escorrentía de la temporada (11.49 mm); mientras que las microcuencas uno, dos y tres mostraron láminas de 6.07 mm, 2.39mm y 6.30 mm, respectivamente. En el cuadro 8 se muestran los coeficientes de escurrimiento obtenidos a partir de la utilización de los datos de escorrentía utilizando el método de NC y los datos de la medición directa. Se puede observar que el método de NC en lo general predijo de manera satisfactoria la escorrentía.

Conforme a lo anterior se puede afirmar que gran parte de la precipitación se infiltra, por tratarse de un sistema donde la recarga de acuíferos se lleva a cabo. En consideración las tierras altas son áreas de recarga y las tierras bajas son áreas de descarga. Sin embargo, Scanlon *et al.* (2002) expresa que esto es cierto en regiones húmedas, pero que en valles aluviales áridos la recarga ocurre usualmente en topografías bajas como canales o arroyos efímeros, validando que los bajos coeficientes de escorrentía mostrados en las microcuencas tienen algunas afectaciones directas por las variables de tipo suelo y pendiente.

Cuadro 8. Coeficientes de escurrimiento (%) obtenidos con el método de número de curva (NC) y el método directo (MD).

| | MIC 1 | | MIC 2 | | MIC 3 | | MIC 4 | |
|------------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|-----|
| | NC | MD | NC | MD | NC | MD | NC | MD |
| COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO | 4.47 | 2.31 | 07.57 | 1.85 | 5.38 | 2.96 | 7.35 | 4.7 |

3.5.4. Coeficientes de correlación y R² para precipitación-escorrentía (NC MD)

Para las cuatro sub-microcuencas, la relación precipitación escorrentía obtenida con mediciones directas y bajo el método de NC, fueron ajustadas a un modelo polinómico de grado dos (Cuadro 9), en el caso de la sub-microcuenca tres se obtuvo una R² de 0.75 y un coeficiente de correlación de 0.8, en el método directo y una R² de 0.99 y un coeficiente de correlación de 0.74. para el método de número de curva, caracterizándose por ser el sistema con un mejor comportamiento. Para la sub-microcuenca uno, dos y cuatro, se obtuvieron valores generados que reflejan las condiciones estructurales de las sub-microcuencas (Cuadro 9), utilizando el valor de NC bajo la condición de humedad dos con claras diferencias entre los métodos de obtención de escorrentías

Cuadro 9. Valores de coeficientes de determinación (R²) y de correlación para la relación de precipitación y escorrentía, obtenido con el método de NC y método directo.

| Sub-microcuenca | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | NC | MD | NC | MD | NC | MD | NC | MD |
| R ² | 0.72 | 0.94 | 0.72 | 0.6 | 0.99 | 0.75 | 0.48* | 0.47* |
| Coeficiente de correlación | 0.86 | 0.82 | 0.8 | 0.49 | 0.74 | 0.8 | 0.08* | 0.63* |

*Mala correlación de los métodos

Dentro de la sub-microcuenca cuatro no se pudo establecer correlación entre los métodos (cuadro 9), ya que para algunos de los eventos, debido al deterioro y falta de suelo y vegetación, de los eventos ocurridos en la sub-microcuenca al menos la mitad sobrepasaron la capacidad del tanque, esto implicó que la captación del agua no generara datos confiables, no obstante lo anterior, se comprueba que de acuerdo a las tendencias presentadas con anterioridad en la Figura 2, sub-mic 4, el comportamiento de precipitación escurrimiento se podría definir como normal, ya que cuando la precipitación amentó también lo hizo la escorrentía.

3.6. CONCLUSIONES

- Para todas las sub-microcuencas se presentó una relación adecuada entre la precipitación y la escorrentía pues en todas ellas a medida que se incrementó la precipitación también lo hizo la escorrentía.
- El comportamiento de la escorrentía en función de la precipitación fue heterogéneo en las sub-microcuencas, debido a las condiciones físicas estructurales diferentes de cada una de ellas.
- Los coeficientes de escurrimiento obtenidos por el método directo fueron menores en comparación con los obtenidos con el método de curva numérica.
- El coeficiente de escorrentía obtenido con el método de NC resultó más real cuando la conductividad hidráulica fue más alta.
- El método de predicción de curva numérica se comportó de manera diferente en cada una de las sub-microcuencas siendo mejor en algunas y peor en otras, por lo que la predicción fue diferencial.
- el método directo ayudó a conocer que existen factores que el método NC no contempla para las diferentes condiciones de los sistemas.

3.7. BIBLIOGRAFÍA

- Ajmal, M., Moon, G. woo, Ahn, J. hyun, & Kim, T. woong. (2015). Investigation of SCS-CN and its inspired modified models for runoff estimation in South Korean watersheds. *Journal of Hydro-Environment Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.11.003>
- Ajmal, M., Waseem, M., Ahn, J. H., & Kim, T. W. (2015). Improved Runoff Estimation Using Event-Based Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0924-z>
- Ajmal, M., Waseem, M., Wi, S., & Kim, T. W. (2015). Evolution of a parsimonious rainfall-runoff model using soil moisture proxies. *Journal of Hydrology*.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.019>
- Aparicio, J. Francisco. (1989). *Fundamentos de la Hidrología de superficie*. (limusa, Ed.) (primera).

- Baltas, E. A., Dervos, N. A., & Mimikou, M. A. (2007). Technical note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(6), 1825–1829. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1825-2007>
- Caviedes-Voullième, D., García-Navarro, P., & Murillo, J. (2012). Influence of mesh structure on 2D full shallow water equations and SCS Curve Number simulation of rainfall/runoff events. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.006>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. *Water Resources and Environmental Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.soncn.2011.11.001>
- Doffo, N., & Bonorino, G. G. (2005). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: Un análisis estadístico. *Revista de La Asociacion Geologica Argentina*, 60(1), 16–22.
- Efstratiadis, A., Koussis, A. D., Koutsoyiannis, D., & Mamassis, N. (2014). Flood design recipes vs. reality: Can predictions for ungauged basins be trusted? *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1417-2014>
- Epps, T. H., Hitchcock, D. R., Jayakaran, A. D., Loflin, D. R., Williams, T. M., & Amatya, D. M. (2013). Curve number derivation for watersheds draining two headwater streams in lower coastal plain south carolina, USA. *Journal of the American Water Resources Association*. <https://doi.org/10.1111/jawr.12084>
- Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., & Marlats, R. M. (2007). Relación precipitación-escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana,. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, XXXIX (1), 21-28., 39(1900), 21–28. Retrieved from http://t.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/1521/gaspariagrarias39-1.pdf
- Grimaldi, S., Petroselli, A., & Nardi, F. (2012). A parsimonious geomorphological unit hydrograph for rainfall-runoff modelling in small ungauged basins. *Hydrological Sciences Journal*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.636045>
- Grimaldi, S., Petroselli, A., & Serinaldi, F. (2012). Design hydrograph estimation in

- small and ungauged watersheds: Continuous simulation method versus event-based approach. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.8384>
- Hawkins, R. H. (1979). Runoff curve numbers for partial area watersheds. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0018315528&partnerID=tZOtx3y1>
- Hawkins, R. H. (1993). Asymptotic Determination of Runoff Curve Numbers from Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:2\(334\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:2(334))
- Hawkins, R. H., Hjelmfelt, A. T., & Zevenbergen, A. W. (1985). Runoff Probability, Storm Depth, and Curve Numbers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1985\)111:4\(330\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1985)111:4(330))
- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, E., & Van Mullem, J. a. (2010). Continuing evolution of rainfall-runoff and the curve number precedent. In *2nd Joint Federal Interagency Conference* (pp. 2–12).
- Kayet, N., Pathak, K., Chakrabarty, A., & Sahoo, S. (2018). Evaluation of soil loss estimation using the RUSLE model and SCS-CN method in hillslope mining areas. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(1), 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.11.002>
- Kim, N. W., Lee, J. W., Lee, J., & Lee, J. E. (2010). SWAT application to estimate design runoff curve number for South Korean conditions. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.7638>
- Lal, M., Mishra, S. K., & Pandey, A. (2017). Empirical evaluation of Soil Conservation Service Curve Number inspired sediment yield model Empirical evaluation of Soil Conservation Service Curve Number inspired sediment yield model, (August). <https://doi.org/10.5958/2455-7145.2017.00020.0>
- Lin, K., Lv, F., Chen, L., Singh, V. P., Zhang, Q., & Chen, X. (2014). Xinanjiang model combined with Curve Number to simulate the effect of land use change on environmental flow. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.049>
- Manson, R. H. (2004). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques

- de México. *Madera y Bosques*, 10(1), 3–20.
<https://doi.org/10.21829/myb.2004.1011276>
- Martínez-Yrizar, A., Álvarez-Sánchez, J., & Maass, M. (2017). Análisis y perspectivas del estudio de los ecosistemas terrestres de México: dinámica hidrológica y flujos de nitrógeno y fósforo. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.008>
- Mayer, A., Winkler, R., & Fry, L. (2014). Classification of watersheds into integrated social and biophysical indicators with clustering analysis. *Ecological Indicators*, 45, 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.04.030>
- Michel, C., Andréassian, V., & Perrin, C. (2005). Soil Conservation Service Curve Number method: How to mend a wrong soil moisture accounting procedure? *Water Resources Research*, 41(2), 1–6.
<https://doi.org/10.1029/2004WR003191>
- Mishra, S. K., Singh, V. P., Sansalone, J. J., & Aravamuthan, V. (2003). A modified SCS-CN method: Characterization and testing. *Water Resources Management*, 17(1), 37–68. <https://doi.org/10.1023/A:1023099005944>
- Mishra, S. K., Tyagi, J. V., Singh, V. P., & Singh, R. (2006). SCS-CN-based modeling of sediment yield. *Journal of Hydrology*, 324(1–4), 301–322.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.006>
- Ponce, V. M., & Hawkins, R. H. (1996). Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11))
- SAGARPA. (2000). Hidrología aplicada a las grandes obras hidráulicas. *Colegio De Postgraduados*, 1, 20.
- Sahu, R. K., Mishra, S. K., & Eldho, T. I. (2012). Performance evaluation of modified versions of scs curve number method for two watersheds of maharashtra, India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*.
<https://doi.org/10.1080/09715010.2012.662425>
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 18–39. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>

- Soil Conservation Service Engineering Division. (1972). Section 4: Hydrology. In *National Engineering Handbook* (pp. 10-1-10–22).
- Soulis, K. X., Valiantzas, J. D., Dercas, N., & Londra, P. A. (2009). Investigation of the direct runoff generation mechanism for the analysis of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(5), 605–615. <https://doi.org/10.5194/hess-13-605-2009>
- Steenhuis, T. S. (1995). SCS Runoff Equation Revisited for Variable Source Runoff Areas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1995\)121:3\(234\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1995)121:3(234))
- Torres-Bejarano, F., Padilla Coba, J., Rodríguez Cuevas, C., Ramírez León, H., & Cantero Rodelo, R. (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 32(3), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>
- USDA-NRCS. (2004). Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. *National Engineering Handbook*. <https://doi.org/10.1128/AAC.02285-15>
- Váòová, V., & Langhammer, J. (2011). Modelling the impact of land cover changes on flood mitigation in the upper lužnice basin. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. <https://doi.org/10.2478/v10098-011-0022-8>
- Velásquez-Valle, M. A., Muñoz-Villalobos, J. A., Sánchez-Cohen, I., Macías-Rodríguez, H., & Flores-López, H. E. (2013). Simulación Del Impacto Del Manejo Sobre La Respuesta Hidrológica En Una Cuenca De Pastizal Parcialmente Instrumentada. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XII(1), 7–12. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2012.06.033>
- Xu, J., Zhao, Y., Zhong, K., Ruan, H., & Liu, X. (2016). Coupling modified linear spectral mixture analysis and soil conservation service curve number (SCS-CN) models to simulate surface runoff: Application to the main Urban Area of Guangzhou, China. *Water (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/w8120550>

4. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA QUE CARACTERIZA LA ESTRUCTURA DE CUATRO SUB-MICROCUENCAS FORESTALES ALTERADAS

CURVE NUMBER DETERMINATION TO CHARACTERIZE THE STRUCTURE OF FOUR FOREST ALTERED SUB-MICROWATERSHEDS

4.1. RESUMEN

Introducción: Debido a que cada día cobra mayor importancia el manejo del agua, el análisis e interpretación de los procesos que afectan los recursos hídricos en el mundo, es uno de los retos más importantes que los seres humanos tienen en la actualidad.

Objetivo: Determinar el número de curva que caracteriza la estructura general de cuatro sub-microcuencas forestales alteradas, usando datos de aforos obtenidos durante cinco años, así como establecer las diferencias en la predicción de la escorrentía al considerar la humedad antecedente.

Materiales y métodos: En cuatro sub-microcuencas con pendiente entre 5 y 23%, suelos franco arcillosos y precipitaciones promedio anuales de 613.2 mm, se determinó un número de curva general para cada sistema, mejorando la asignación del número según la cantidad de precipitación denominadas bajas, medias y altas (0-12.7mm., 12.7-32mm. y >32mm).

Resultados y discusión: El tomar el parámetro de humedad antecedente provocó un ajuste deficiente, ya que la relación NC-precipitación presentó una dispersión mayor de los datos. La cantidad de precipitación media en los eventos analizados demostró que para precipitaciones bajas (0-12.7mm), los números de curva tienen una deficiencia marcada en la explicación de la escorrentía en función de la precipitación.

Conclusión: Los números de curva ajustados a las condiciones generales que caracterizan las sub-microcuencas, mostraron un comportamiento óptimo para precipitaciones altas (>32mm), lo que resulta útil, ya que estas precipitaciones son las que generan el mayor daño por la escorrentía a los suelos degradados.

Palabras claves: Número de curva, Humedad antecedente, Precipitación.

SUMMARY

Introduction: The study of hydrology back to where the man was intended to the exploitation and management of water, focused on estimating the behavior of systems for even better development.

Objective: Determine the number of curve that characterises the general structure of four forest altered sub-microwatersheds, using data from gauging obtained during five years of observations, as well as establishing differences in consideration of antecedent moisture for runoff prediction.

Materials and methods: In four sub-microbasin management with General characteristics of slope between 5% and 23%, franco soils and annual average precipitation of 613.2 mm, was determined a number of general curve for each system, improving the allocation of the number according to the amount of precipitation in the event with rainfall low, medium and high (0-12.7 mm., 12.7 - 32 mm., > 32mm).

Conclusion: Curve numbers adjusted to conditions that characterize sub-microwatersheds, show a behavior is optimal for high rainfall (>32mm), What is useful, since these are who generate the most damage of the runoff in degraded soils.

Keywords: Number of curve, Antecedent moisture, Precipitation.

4.2. INTRODUCCIÓN

La estimación de la escorrentía es importante para muchas de las actividades relacionadas con el manejo del agua, procesos de erosión hídrica, transporte de contaminantes entre otros. El método del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS-CN) (USDA-NRCS, 2004) es uno de los métodos más utilizados en la actualidad para la estimación de la escorrentía, sin embargo, muchos investigadores mencionan limitaciones como la falta de estabilidad del valor del número de curva para diferentes condiciones de humedad antecedente por lo que no se recomienda para simulaciones continuas de largo tiempo (Caviedes-Voullième *et al.*, 2012; Efstratiadis *et al.*, 2014; Sahu *et al.*, 2012).

La razón principal por la que el método ha sido adoptado por la mayoría de científicos estudiosos de la hidrología es la simplicidad y aplicabilidad a los sistemas no instrumentados utilizando un solo parámetro conocido como número de curva (NC) que está determinado por las características del sistema como el tipo de suelo, el uso y manejo de la tierra y las condiciones de humedad antecedente (Ajmal *et al.*, 2015a; Ajmal *et al.*, 2015b; Epps *et al.*, 2013; Váòová & Langhammer, 2011)., además el método de curva numérica se ha acoplado a varios modelos populares como la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE)(Lal *et al.*, 2017; Mishra *et al.*, 2006), análisis espectral lineal modificada (Xu *et al.*, 2016), modelo de escorrentía de Xinanjiang (Lin *et al.*, 2014).

A través del tiempo, la búsqueda de un método que funcione adecuadamente para predecir la escorrentía de los sistemas, ha llevado a los investigadores a desarrollar procesos para entender el comportamiento de la escorrentía. Hawkins *et al.* (1985) Interpretó la característica de humedad antecedente como bandas de error en el método de predicción de la escorrentía. Ajmal *et al.* (2015a, 2015b) señala al método como un proceso altamente dependiente de un solo parámetro que resulta una exactitud variable de acuerdo a los biomas a los que se considere hacer la determinación, no tomando en cuenta la variabilidad espacial, tamaños de los sistemas y la aplicación de una abstracción generalizada por el método de 0.2 que resulta subestimado en algunas consideraciones. Kim *et al.* (2010) mostró que las evaluaciones de escorrentía con el método NC utilizando las tablas (USDA-

NRCS, 2004) no eran satisfactorias y que los valores de NC debían calibrarse de acuerdo a las características generales que se presentan en los sistemas evaluados. Grimaldi *et al.* (2012a, 2012b), considera que la causa principal de las discrepancias entre el modelo basado en eventos y la simulación continua está relacionada con el efecto combinado del esquema de infiltración y los patrones de precipitación simulados.

En la mayoría de los casos en que el método se ha utilizado en México, prescinden del uso de modificaciones, dando por hecho que los valores otorgados, validan la condición del sistema, sin embargo, es también fácilmente observable que las características de suelo, uso del área, pendiente, cobertura vegetal, etc., no son consideradas para una predicción adecuada de la escorrentía, y que en muchas ocasiones, estas variables tienen una mayor importancia para la estimación, e inclina a los resultados a una determinación incorrecta de la escorrentía superficial. Los objetivos de este trabajo fueron: a) obtener el número de curva que caracteriza las condiciones estructurales de cuatro sub-microcuencas forestales alteradas, b) probar el efecto del uso o exclusión de la humedad antecedente para un mejor ajuste del método de NC. c) Encontrar las limitaciones del uso de la humedad antecedente por el método de NC generadas durante cinco años de mediciones instrumentadas de las sub-microcuencas.

4.3. MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del experimento

El estudio se llevó a cabo en el municipio de Texcoco en el predio denominado "LAS CRUCES", perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo, ubicado al suroeste del poblado de Tequexquináhuac; área dada por las coordenadas 19°27'50.55" a 19°27'6.54" de latitud norte y 98°49'34.65" a 98°48'3.54" de longitud oeste, con una superficie de 326 ha donde se ubican cuatro sub-microcuencas forestales alteradas con pendientes entre 15 y 23% y con áreas de 2,056.01 m², 2676.58m², 650.02m² y 1435.94m², respectivamente.

El clima que se presentan en las cuatro sub-microcuencas es C(w1), que corresponde a un templado subhúmedo, con una temperatura media anual entre 12°C y 18°C; siendo la que presenta el mes más frío entre -3°C y 18°C, y la del mes

más cálido de 22°C. La región presenta índices de aridez elevados y prácticamente nulo exceso de agua, con deficiencia en la época estival. La precipitación anual promedio de la zona de 613.2 mm, la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm, con lluvias de verano que muestran un índice de precipitación-temperatura que oscila entre 43.2 y 55; y un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. En las cuatro sub-microcuencas se encuentra vegetación nativa e introducida, con presencia de bosque de encino, pino y oyamel. También, se observan relictos y especies nuevas de *Pinus montezumae*, *Pinus devoniana*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus resinifera*, *Casuarina equisetifolia* y *Callitropsis lusitánica*, *Senecio salignus* DC, *Symphoricarpus microphyllus*, *Juniperus spp* y *Archibaccaris sp.* lo que indica un drástico cambio en la vegetación original registrada, además de la existencia de áreas con suelos erosionados, principalmente por efectos de lluvia y viento.

4.3.1. Instrumentación de las sub-microcuencas

Para determinar la precipitación de las sub-microcuencas, se colocaron pluviómetros convencionales con capacidad de medición de hasta 150 mm., por evento, dentro de cada sistema a una altura de 50 cm del suelo, considerando los lugares despejados para evitar la intercepción del agua de lluvia con la vegetación, las sub-microcuencas uno y dos, compartieron pluviómetro por ser sistemas contiguos y compartir parteaguas.

En la boquilla o desembocadura (Figura 3), cada sistema contó con una canaleta de división de escorrentía (A), que permitió que el escurrimiento total(a), fuera dirigido dentro y fraccionada hasta obtener una cuarta parte del total de la escorrentía inicial mediante de la eliminación de sobrante (b), donde se contenía en el tanque de captación(c), evitando con esto que la escorrentía sobrepasara la capacidad de captación de los contenedores (B). La canaleta fue fabricada con lámina gruesa, y colocada a la desembocadura de cada uno de los sistemas, y considerando principalmente las condiciones del nivel y división de la escorrentía.

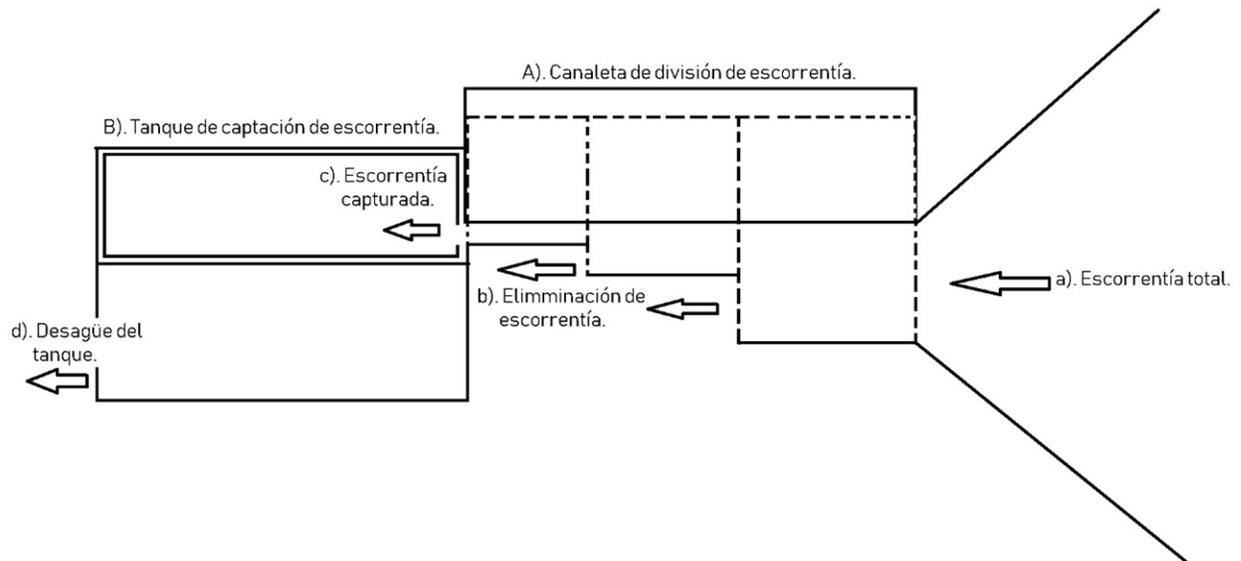


Figura 3. Diagrama de tanques de captación de escorrentía.

4.3.2. Obtención de datos de precipitación

La toma de datos de precipitación se realizó lapsos de 24 horas (8:00 am), la hora de la toma de datos se determinó por la factibilidad de que en días soleados se pudiera evitar la evaporación de los pluviómetros y se generara una medición incorrecta, los pluviómetros se colocaron cada periodo limpios y secos para la siguiente medición, durante los cinco años de medición (2012 a 2015 y 2017), con un total de 358 días de observaciones y 164 eventos con precipitación registrada y considerada para la investigación.

4.3.3. Obtención de datos de escorrentía

Los datos de escorrentía se tomaron también cada 24 horas, a las 8:00 am. Para conocer el dato de escorrentía por evento se midió la altura del agua en la cara superior e inferior del ancho de los tanques, se obtuvo un promedio que se multiplicó por el ancho y el largo de los tanques obteniendo un volumen de escorrentía, multiplicándolo después por cuatro que fue la restricción generada por la canaleta dosificadora.

Los tanques se drenaban y limpiaban de impurezas adheridas por el escurrimiento, se cubrían con una estructura y plástico que evitaba la entrada de precipitación que alterara el dato de escorrentía.

4.3.4. Características de las sub-microcuencas

Sub-microcuenca uno

Está localizada en la parte central del predio "LAS CRUCES", en las coordenadas 519791.00 m E; 2151303.00 m N, con una superficie de 2676.58 m². Las condiciones de la sub-microcuenca tiene como principal característica una pobre cobertura vegetal (45%), con presencia Arborea de *Casuarina equisetifolia* L (6 individuos), *Acacia retinodes* Schl (22 individuos) y *Eucalyptus camaldulensis* Schlt dl (16 individuos), además de algunos arbustos destacados como el *Senecio salignus* DC (17 individuos). y *Symphoricarpus microphyllus* (14 individuos), caracterizándose por ser estar presentes en agrupaciones localizadas dentro de la sub-microcuenca.

Este sistema carece de los horizontes A y B homogéneo, siendo causado por ser una zona con fuerte degradación por erosión hídrica y sin obras de conservación de suelos que pudiera mitigar el proceso. El material parental que se observa es denominado toba volcánica de color café amarillento, muy compacto, con zonas marcadas con presencia de suelo generado a través de la acumulación de materia orgánica y diferentes elementos, ocurrido a través del tiempo de formación de suelo y protección de cubierta vegetal y característica plástica al contacto con precipitaciones moderadas.

Está caracterizada por agrupar tres tipos de clases de textura, que van de franco a franco arcilloso y pasa por franco arcilloso arenoso, la presencia de arcilla podría suponer que se permite una resistencia a la erosión hídrica, sin embargo, la falta de cobertura vegetal es el problema que le afecta con mayor impacto al suelo de esta sub-microcuenca.

La formación de suelo que sucede dentro del sistema es debido a los residuos de plantas que se han incorporado al suelo, el contenido de M.O presente es pobre (1.51 %).

Sub-microcuenca dos

Localizada en las coordenadas 519791.00 m E; 2151268.00 m N, una superficie de 2056 m². Este sistema está caracterizado por la presencia de *Eucalyptus camaldulensis* (78 individuos), alta densidad de copa y cobertura superficial de

materia orgánica en proceso de descomposición, aun bajo la presencia de este tipo de vegetación sigue predominando la tova volcánica de color café amarillento.

Las principales especies de árboles y arbustos que encontramos son *Eucalyptus camaldulensis* Schltl y *Callitropsis lusitánica* (4 individuos). Además de arbustos; *Senecio salignus* DC (9 individuos). Y *Symphoricarpus microphyllus* (11 individuos), pero que no representan más del 70% de cobertura del total de superficie del sistema.

Con las clases de textura franco arcillosa, franca y franco arcillo arenosa, predominando esta última, el contenido de M.O es de 2.43% y de acuerdo al grupo textural puede clasificarse como un contenido de moderado a rico, debido al aporte constante de material vegetal aportado por los eucaliptos, sin embargo, predominan zonas desprovistas de vegetación que dejan el libre contacto de la precipitación y el suelo ligeramente pegajoso y plástico durante la presencia de precipitación y duros cuando están secos.

Sub-microcuena tres

Localizada en las coordenadas 520542.00 m E; 2151257.00 m N, con una superficie de 650 m², con una vegetación predominante de *Callitropsis lusitánica* (16 individuos) la textura presente es franco arcilloso, es decir, suelos ligeramente pegajosos y plásticos durante la presencia de precipitación y duros cuando están secos.

Las principales especies presentes son Arbóreos: *Callitropsis lusitánica* (16 individuos), *Arbutus spp* (2 individuos) y *Pinus montezumae Lamb* (6 individuos), Arbustivo: *Senecio salignus DC* (3 individuos), *Juniperus spp* (2 individuos) y *Archibaccaris sp* (3 individuos), especies que a lo largo del tiempo han sido introducidas por el hombre, conformando una diversidad no representativa del sitio. La cantidad de materia orgánica presente es baja, (0.67%), con base a la clase textural, se clasifica como muy pobre a moderadamente pobre, atribuido a la baja aportación de material vegetal y materia orgánica dentro del sistema.

Sub-microcuenca cuatro

Localizada en las coordenadas: 519591 m E; 2151934 m N, con una superficie de 1435.88 m², se caracteriza por la presencia de vegetación de pobre densidad, tiene una distribución localizada de la vegetación, dejando mucha del área sin presencia de vegetación arbórea y arbustiva, cuenta con algunas zonas de suelo desnudo y zonas cóncavas de posible infiltración de agua antes de que llegue al sistema de registro.

Se caracteriza presentar una textura franca y franca arcillo arenosa, predominando esta última en más del 70 % de la superficie. La presencia de arcilla es de suma importancia en los suelos de origen es toba vítrea grisácea, ya que le proporciona resistencia a la erosión hídrica, aunque mezclado con deficiencia de vegetación esto hace que no tenga una estructura conforme para evitar la erosión

La materia orgánica está formada por la acumulación de los residuos vegetales que a través del tiempo se han descompuesto en depósitos, debido a la composición de la vegetación predominante de *Cupressus sp.* Pero en zonas localizadas y con un bajo porcentaje de protección al suelo, además encontramos *Casuarina equisetifolia L.* (3 individuos), *Callitropsis lusitánica* (42 individuos), *Pinus montezumae Lamb* (1 individuo) y *P. pseudostrobus Lindl* (1 individuo). Además de Arbustos como *Senecio salignus DC* (3 individuos), *Archibaccaris sp* (7 individuos) y *Juniperus spp* (4 individuos).

4.3.5. Número de curva que caracteriza las sub-microcuencas

La mejor forma de establecer la fuerza de predicción de escorrentía que tiene el método de curva numérica en un sistema (sub-microcuenca), es mediante la instrumentación del mismo, ya que es posible determinar los valores reales de precipitación y escorrentía que permiten hacer modificaciones al método de predicción en el NC y establecer una predicción apegada a la realidad. Con esto también se obtiene el NC que caracteriza la estructura del sistema.

La mejor forma de establecer la fuerza de predicción de escorrentía que tiene el método de curva numérica en un sistema (sub-microcuenca), es mediante la instrumentación que permita obtener los valores reales de precipitación y

escorrentía. Una vez conocidos los valores es posible hacer modificaciones al método de predicción en el NC y establecer una predicción apegada a la realidad. Con esto también se obtiene el NC que caracteriza la estructura del sistema.

En este trabajo se realizó una modificación en la forma de obtención del número de curva, basados en el método de curva numérica y bajo la consideración de no usar la humedad antecedente como ajuste de mejora para determinar la escorrentía. Basados en datos de precipitación y escorrentía de cinco años (2012-2015, 2017), se definió el número de curva que caracteriza la estructura de cada sub-microcuenca, con el uso de la ecuación del método (Hawkins, 1979).

La estimación de escorrentía en sistemas de cuenca, esta comúnmente basada en el método generado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, que, bajo consideraciones generales, tiene un comportamiento aceptable, sin embargo, es limitante para medios con variables no consideradas en el método, y que son directamente dependientes del proceso de escorrentía originada dentro del sistema. Es por ello, que, establecer un número de curva específico para cada una de las sub-microcuencas con características estructurales propias, explica el comportamiento de los sistemas en función de factores generados a través de una caracterización *in situ*.

A través del método y las variables específicas descriptivas de cada sub-microcuenca, se ha podido hacer una estimación del número de curva que pertenece a la conformación estructural propia de cada sub-microcuenca.

El método NC estima la escorrentía mediante cantidad de precipitación y retención máxima potencial (S), utilizando valores de curvas numéricas. Las fórmulas para obtener escorrentía y retención máxima potencial son:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}$$

Donde: Q = escurrimiento medio por evento (mm)

P = precipitación efectiva por evento (mm)

S = retención máxima potencial (mm)

Y la condición para que se aplique la ecuación es que la precipitación sea mayor que el umbral de escorrentía ($P > P_o = 0.2 \cdot S$), de lo contrario $Q = 0$

Para el cálculo de la retención máxima potencial se obtiene mediante curvas numéricas de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Para efectos de esta estimación se elaboró un programa en Visual Basic de Excel, que, a través de bucles o ciclos, (en programación, es una sentencia que ejecuta repetidas veces un trozo de código, hasta que la condición asignada a dicho bucle deja de cumplirse) busca el número que se ajuste a la escorrentía medida y por medio del despeje de NC se determine el número que ajuste la estructura de la sub-microcuenca a la escorrentía real obtenida en cada uno de los eventos.

Como se observa en el siguiente comando, el bucle o ciclo comienza desde el número de curva 50 (renglón seis), buscando un número que cumpla dicha característica de igualar la escorrentía obtenida bajo el método directo (renglón ocho) y avanza de 0.01 en 0.01 centésimas de entero hasta que este número se pase (renglón ocho) y regresándose de 0.001 en 0.001 hasta que cumpla la sentencia de que el valor resultante de NC será el que ayude a que la fórmula de estimación de escorrentía sea igual al que se obtuvo de manera directa en cada una de las sub-microcuencas. (*fragmento explicativo de comandos del programa, en el anexo 1 se muestra el programa completo con todos los comandos de ejecución).

***Cells (4, 10) = n**

If Cells (5 + n, 3) > 0 Then

If Cells (5 + n, 4) = 0 Then

nc = 50..... renglón 6 del programa

Cells (5 + n, 7) = NC

po = Cells (3, 8) * (25400 / NC - 254)

Do While po > Cells (5 + n, 3)

nc = NC + 0.01

Cells (5 + n, 7) = NC

po = Cells (3, 8) * (25400 / NC - 254

El análisis de la precipitación y la escorrentía, dio como resultado un valor de número de curva, para cada uno de los eventos. Durante el periodo analizado los eventos se clasificaron en dos grupos, a) eventos con una precipitación mayor a cero y sin escorrentía registrada y, b) eventos registrados con precipitación y escorrentía mayores a cero. De los 358 días registrados con observaciones a sistema, 194 correspondieron a días sin precipitación, 89 fueron días con precipitación, pero sin escorrentía y 75 días con precipitaciones que generaron escorrentía superficial.

En primer lugar, se determinó la condición previa de humedad antecedente en función de la precipitación acumulada en los 5 días anteriores. En los eventos con escorrentía se determinó el valor de número de curva que, al aplicar el método, estimara un valor de escorrentía igual al registrado. Una vez determinados los números de curva en cada evento se procedió a transformar dichos valores a la condición de humedad II, que es la que corresponde a los valores tabulados que habitualmente se utilizan.

El número de curva que caracteriza las cuatro sub-microcuencas, se obtuvo con la mediana de la distribución de dos variables de los datos, divididos en tres bloques, a) para precipitaciones de 0-12.7 mm, b) entre 12.7 y 32 mm y c) >32mm, que representan una homogeneidad de resultados por cada bloque y la cantidad de precipitación necesaria para que se considere el cambio entre condiciones (I, II y III)

Dentro de la distribución de dos variables que presentan los datos divididos en bloques, se obtuvo la mediana que es el valor representativo del total de valores, igualando dicho valor al número de curva que ajusta la estructura de cada sub-microcuenca por cada bloque de cantidad de precipitación, lo que da como resultado un número de curva ajustado a la estructura de cada sub-microcuenca por cada intensidad de precipitación.

4.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los números de curva resultantes del análisis de la precipitación y escorrentía de los cinco años de mediciones (2012-2015, 2017), fueron obtenidos del ajuste del método de número de curva (NC) a la estructura de las cuatro sub-microcuencas y es representativo de las condiciones específicas que determinaron la escorrentía en cada sistema, sin embargo, este ajuste presentó deficiencias en la correlación de la precipitación con el número de curva resultante (Figura 4), presentando coeficientes de determinación bajos, $R^2 = 0.33, 0.26, 0.50$ y 0.34 , y valores de número de curva menores conforme aumentó la precipitación.

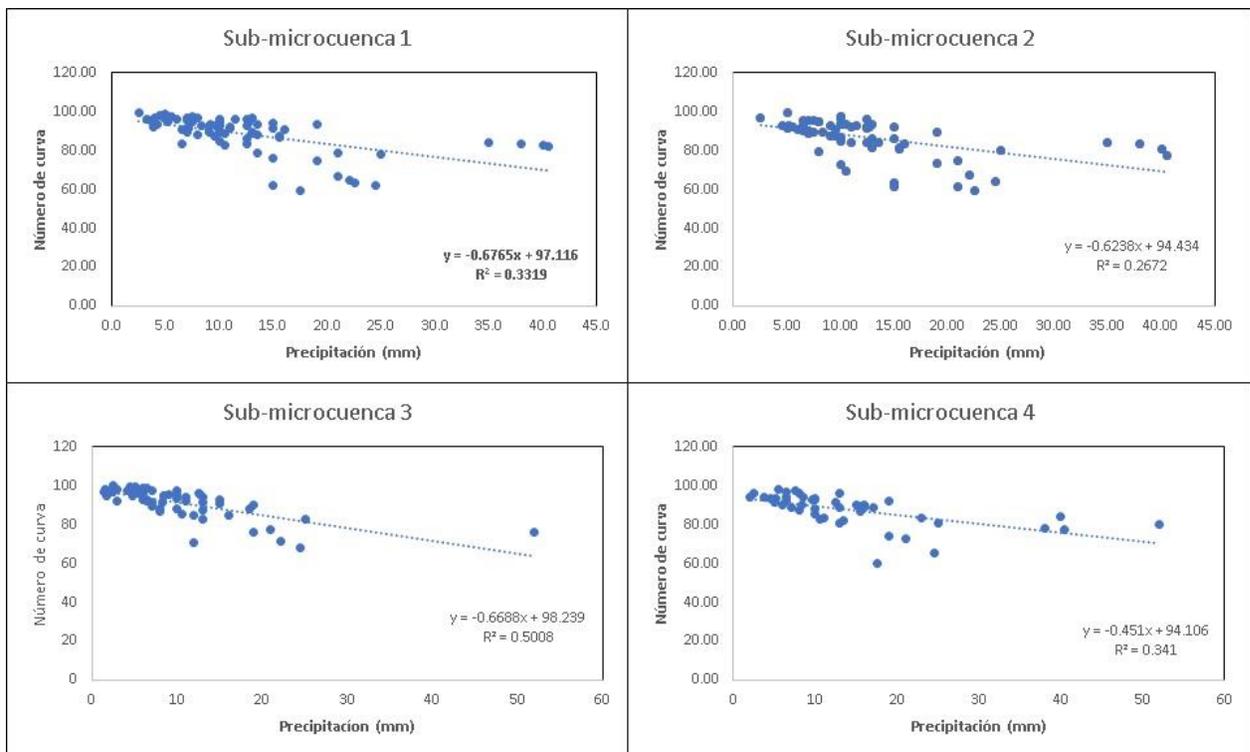


Figura 4. Comportamiento de los números de curva.

La tendencia de disminución del valor de número de curva presentada en la correlación NC-precipitación, es explicada por el comportamiento que tienen los suelos de la zona, pues al contacto con el agua de lluvia se vuelven plásticos, haciendo que se provoquen tapones en las grietas y poros del suelo que transportan el agua de infiltración, provocando que mientras estos sellos no se rompan una gran cantidad de agua se convierte en escorrentía.

En la Figura 5 se observa que en las cuatro sub-microcuencas, el uso de la condición de humedad antecedente afectó el ajuste del número de curva, con puntos más dispersos y con menor tendencia en la relación entre la precipitación y el número de curva, al ajustar los datos a un modelo lineal aplicado antes y después de considerar la humedad antecedente, con una R^2 entre 0.78 y 0.84 para el caso de los números de curva sin considerar la humedad antecedente, y una R^2 entre 0.26 y 0.50 para el caso de los números bajo su consideración, estos resultados son contrarios a lo encontrado por Lal *et al.* (2017) que dice que la humedad antecedente mejora la predicción de la escorrentía en el modelo.

En los valores límites considerados para las precipitaciones bajas, medias y altas (0 a 12.7mm, 12.7 a 32mm, y >32mm, respectivamente), se detectó que la precipitación tiene otro efecto en los sistemas, la precipitación comienza a romper este tipo de sellos provocados por la mezcla de suelo y agua y deja libre los poros y grietas formadas, y comienza la infiltración que para este punto se vuelve más grande que la escorrentía, tomando en cuenta que esta zona es un área de recarga de mantos freáticos y que bajo esa condición el suelo se encuentre fracturado, provocando que el método de curva numérica sea deficiente en el cálculo, ya que no considera esta variable.

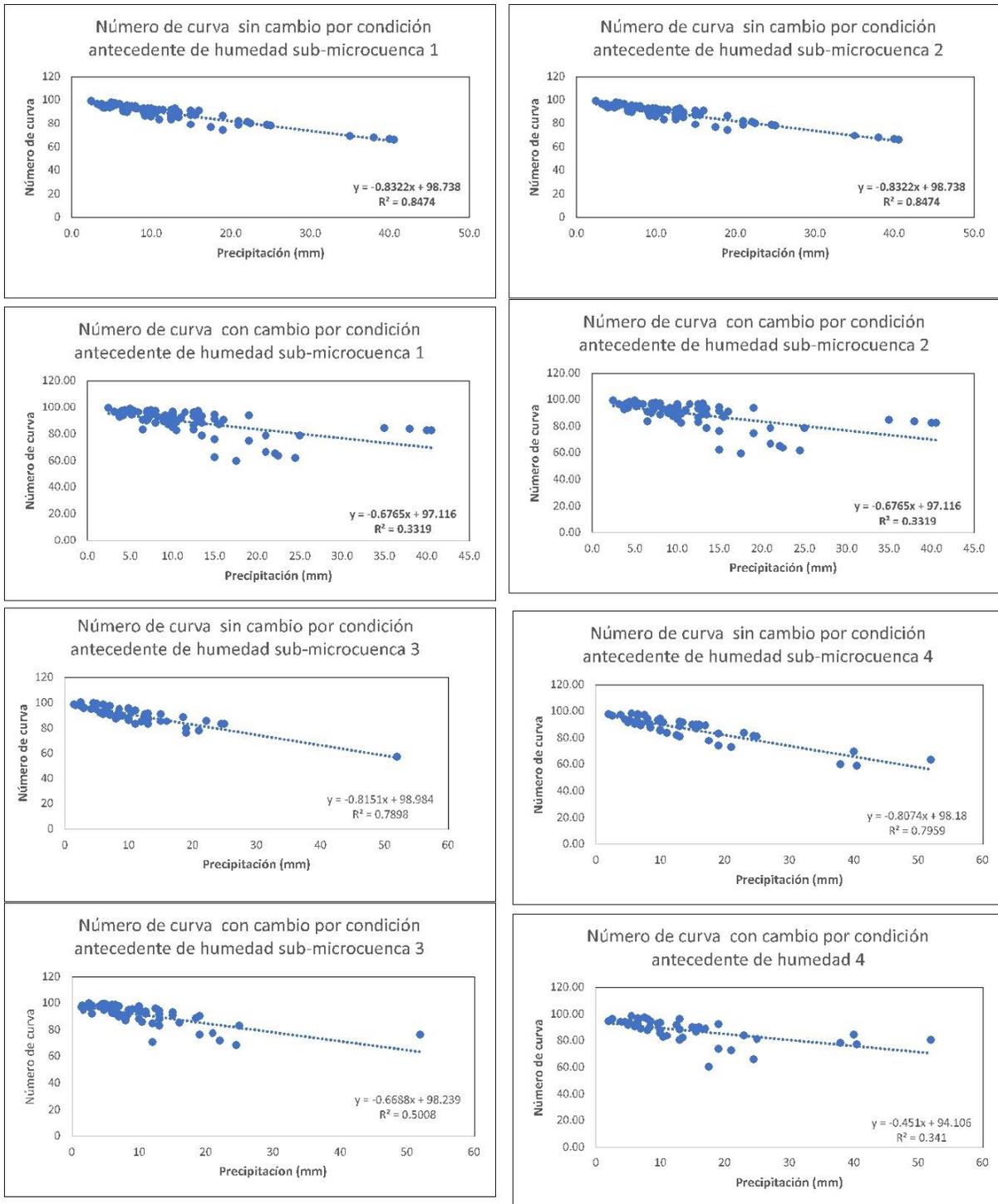


Figura 5. Comparación entre números de curva con y sin condición de humedad antecedente

El número de curva que caracteriza cada sub-microcuenca está basado en los parámetros del método de NC, analizados durante cinco años, el comportamiento de los sistemas determinó el número de curva característico de las condiciones estructurales de cada una de las cuatro sub-microcuencas, mediante la mediana del conjunto de datos de números de curva obtenidos por medio del programa Visual Basic explicado anteriormente, considerando la mediana ya que es un parámetro que se deshace de los valores atípicos, ya que al tratarse de mediciones en campo la investigación no está exenta, los números de curva que caracterizan cada sistema (Cuadro 10), representa el comportamiento de precipitación y escorrentía que predomina en los sistemas y bajo la estructura de vegetación y suelos predominantes de las condiciones del lugar.

Cuadro 10. Número de curva que caracteriza las sub-microcuencas (considerando la humedad antecedente (ha) y sin considerar la humedad antecedente.

| | Sub-mic 1 | | Sub-mic2 | | Sub-mic3 | | Sub-mic 4 | |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | sin ha* | con ha* |
| Mediana | 89.89 | 91.57 | 85.88 | 89.23 | 91.46 | 93.35 | 89.38 | 89.80 |
| Media | 88.48 | 88.78 | 84.45 | 84.73 | 90.52 | 91.29 | 86.74 | 87.71 |

En el cuadro 10, se observa el número de curva que dio como resultado la caracterización estructural de cada una de las sub-microcuencas, siendo este número de curva el que mejor se ajusta para la estimación de la escorrentía dentro de los sistemas, siempre y cuando esta estructura no tenga modificaciones relevantes de condiciones físicas y estructurales.

Se encontró evidencia concreta que el comportamiento de las sub-microcuencas también estaba caracterizado por rangos de precipitación que se presentaron, se determinó el número de curva que caracteriza la estructura de las sub-microcuencas por rangos de precipitación (Cuadro 11), ayudando a ser más exactos en las predicciones que se tienen para cada magnitud. Mejorando la efectividad de la consideración del uso de un número de curva específico para condiciones específicas de los sistemas.

Cuadro 11. Números de curva por cantidad de precipitación (considerando la humedad antecedente (ha) y sin considerar la humedad antecedente.

| | | sub-mic 1 | | sub-mic 2 | | sub-mic3 | | sub-mic4 | |
|--------------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | sin ha | con ha |
| baja | media | 91.91 | 93.04 | 87.26 | 87.54 | 93.38 | 94.04 | 91.88 | 92.09 |
| | mediana | 92.71 | 93.57 | 89.32 | 90.75 | 94.63 | 95.23 | 92.03 | 93.16 |
| media | media | 84.63 | 80.27 | 81.97 | 79.32 | 84.52 | 84.33 | 84.79 | 83.09 |
| | mediana | 86.58 | 82.75 | 81.59 | 81.59 | 85.13 | 86.48 | 86.94 | 86.94 |
| alta | media | 67.62 | 83.25 | 65.10 | 81.54 | 57.33 | 76.19 | 62.87 | 80.05 |
| | mediana | 67.30 | 83.05 | 66.27 | 82.36 | 57.33 | 76.19 | 61.62 | 79.25 |

4.5. CONCLUSIONES

- Los valores de número de curva derivados del modelo de curva numérica tuvieron una mejor correlación cuando se dejó fuera la consideración de humedad antecedente en la obtención del número de curva que caracteriza la condición estructural de las sub-microcuencas.
- El ajuste de los valores de número de curva fue indispensable para una mejor satisfacción en la predicción de la escorrentía, debido a que, los valores de tablas que se usan comúnmente son demasiado generales y solo pueden tomarse en cuenta cuando las condiciones del sistema son similares a las que se desarrolló el modelo.
- El uso de la condición de humedad antecedente como variable muy importante, ya que en algunos de los casos el uso de la humedad antecedente puede ser causante de errores en la inexperiencia de su comportamiento con los diferentes tipos de suelo.

- La incorporación del contenido de humedad antecedente en la determinación de la esorrentía mediante la caracterización del número de curva de cada sub-microcuenca hizo deficiente la predicción.
- Se demostró la necesidad del ajuste del NC en la aplicación del modelo, previa instrumentación de las sub-microcuencas o de los sistemas que se requiere evaluar.

Recomendaciones

Además, se debe hacer una réplica de este estudio para ampliar la gama de condiciones físicas y climáticas a considerar en la aplicabilidad de la modificación del método.

Dejar de usar el método de NC de manera general, e instrumentar al menos en una temporada aquellos sistemas de los que se requiere obtener un resultado confiable de comportamiento.

Establecer si la humedad antecedente en los sistemas a evaluar perjudica o beneficia el comportamiento de las estimaciones.

4.6. BIBLIOGRAFÍA

Ajmal, M., Moon, G. woo, Ahn, J. hyun, & Kim, T. woong. (2015). Investigation of SCS-CN and its inspired modified models for runoff estimation in South Korean watersheds. *Journal of Hydro-Environment Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.jher.2014.11.003>

Ajmal, M., Waseem, M., Ahn, J. H., & Kim, T. W. (2015). Improved Runoff Estimation Using Event-Based Rainfall-Runoff Models. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0924-z>

Ajmal, M., Waseem, M., Wi, S., & Kim, T. W. (2015). Evolution of a parsimonious

- rainfall-runoff model using soil moisture proxies. *Journal of Hydrology*.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.019>
- Aparicio, J. Francisco. (1989). *Fundamentos de la Hidrología de superficie*. (limusa, Ed.) (primera).
- Baltas, E. A., Dervos, N. A., & Mimikou, M. A. (2007). Technical note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(6), 1825–1829.
<https://doi.org/10.5194/hess-11-1825-2007>
- Caviedes-Voullième, D., García-Navarro, P., & Murillo, J. (2012). Influence of mesh structure on 2D full shallow water equations and SCS Curve Number simulation of rainfall/runoff events. *Journal of Hydrology*.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.006>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. *Water Resources and Environmental Engineering*.
<https://doi.org/10.1016/j.soncn.2011.11.001>
- Doffo, N., & Bonorino, G. G. (2005). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del arroyo Las Lajas, Córdoba: Un análisis estadístico. *Revista de La Asociación Geologica Argentina*, 60(1), 16–22.
- Efstratiadis, A., Koussis, A. D., Koutsoyiannis, D., & Mamassis, N. (2014). Flood design recipes vs. reality: Can predictions for ungauged basins be trusted? *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1417-2014>
- Epps, T. H., Hitchcock, D. R., Jayakaran, A. D., Loflin, D. R., Williams, T. M., & Amatya, D. M. (2013). Curve number derivation for watersheds draining two headwater streams in lower coastal plain south carolina, USA. *Journal of the American Water Resources Association*. <https://doi.org/10.1111/jawr.12084>
- Gaspari, F. J., Senisterra, G. E., & Marlats, R. M. (2007). Relación precipitación-escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo.

- Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana,. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, XXXIX (1), 21-28., 39(1900), 21–28. Retrieved from http://t.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/1521/gaspariagrarias39-1.pdf
- Grimaldi, S., Petroselli, A., & Nardi, F. (2012). A parsimonious geomorphological unit hydrograph for rainfall-runoff modelling in small ungauged basins. *Hydrological Sciences Journal*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.636045>
- Grimaldi, S., Petroselli, A., & Serinaldi, F. (2012). Design hydrograph estimation in small and ungauged watersheds: Continuous simulation method versus event-based approach. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.8384>
- Hawkins, R. H. (1979). Runoff curve numbers for partial area watersheds. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0018315528&partnerID=tZOtx3y1>
- Hawkins, R. H. (1993). Asymptotic Determination of Runoff Curve Numbers from Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:2\(334\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:2(334))
- Hawkins, R. H., Hjelmfelt, A. T., & Zevenbergen, A. W. (1985). Runoff Probability, Storm Depth, and Curve Numbers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1985\)111:4\(330\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1985)111:4(330))
- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, E., & Van Mullem, J. a. (2010). Continuing evolution of rainfall-runoff and the curve number precedent. In *2nd Joint Federal Interagency Conference* (pp. 2–12).
- Kayet, N., Pathak, K., Chakrabarty, A., & Sahoo, S. (2018). Evaluation of soil loss estimation using the RUSLE model and SCS-CN method in hillslope mining areas. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(1), 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.11.002>
- Kim, N. W., Lee, J. W., Lee, J., & Lee, J. E. (2010). SWAT application to estimate design runoff curve number for South Korean conditions. *Hydrological*

Processes. <https://doi.org/10.1002/hyp.7638>

- Lal, M., Mishra, S. K., & Pandey, A. (2017). Empirical evaluation of Soil Conservation Service Curve Number inspired sediment yield model Empirical evaluation of Soil Conservation Service Curve Number inspired sediment yield model, (August). <https://doi.org/10.5958/2455-7145.2017.00020.0>
- Lin, K., Lv, F., Chen, L., Singh, V. P., Zhang, Q., & Chen, X. (2014). Xinanjiang model combined with Curve Number to simulate the effect of land use change on environmental flow. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.049>
- Manson, R. H. (2004). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques*, 10(1), 3–20. <https://doi.org/10.21829/myb.2004.1011276>
- Martínez-Yrizar, A., Álvarez-Sánchez, J., & Maass, M. (2017). Análisis y perspectivas del estudio de los ecosistemas terrestres de México: dinámica hidrológica y flujos de nitrógeno y fósforo. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.008>
- Mayer, A., Winkler, R., & Fry, L. (2014). Classification of watersheds into integrated social and biophysical indicators with clustering analysis. *Ecological Indicators*, 45, 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.04.030>
- Michel, C., Andréassian, V., & Perrin, C. (2005). Soil Conservation Service Curve Number method: How to mend a wrong soil moisture accounting procedure? *Water Resources Research*, 41(2), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2004WR003191>
- Mishra, S. K., Singh, V. P., Sansalone, J. J., & Aravamuthan, V. (2003). A modified SCS-CN method: Characterization and testing. *Water Resources Management*, 17(1), 37–68. <https://doi.org/10.1023/A:1023099005944>
- Mishra, S. K., Tyagi, J. V., Singh, V. P., & Singh, R. (2006). SCS-CN-based modeling of sediment yield. *Journal of Hydrology*, 324(1–4), 301–322.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.006>

Ponce, V. M., & Hawkins, R. H. (1996). Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11))

SAGARPA. (2000). Hidrología aplicada a las grandes obras hidráulicas. *Colegio De Postgraduados*, 1, 20.

Sahu, R. K., Mishra, S. K., & Eldho, T. I. (2012). Performance evaluation of modified versions of scs curve number method for two watersheds of maharashtra, India. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*.

<https://doi.org/10.1080/09715010.2012.662425>

Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 18–39. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>

Soil Conservation Service Engineering Division. (1972). Section 4: Hydrology. In *National Engineering Handbook* (pp. 10-1-10–22).

Soulis, K. X., Valiantzas, J. D., Dercas, N., & Londra, P. A. (2009). Investigation of the direct runoff generation mechanism for the analysis of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(5), 605–615. <https://doi.org/10.5194/hess-13-605-2009>

Steenhuis, T. S. (1995). Scs Runoff Equation Revisited for Variable Source Runoff Areas. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1995\)121:3\(234\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1995)121:3(234))

Torres-Bejarano, F., Padilla Coba, J., Rodríguez Cuevas, C., Ramírez León, H., & Cantero Rodelo, R. (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, 32(3), 163–172.

<https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>

- USDA-NRCS. (2004). Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. *National Engineering Handbook*. <https://doi.org/10.1128/AAC.02285-15>
- Váòová, V., & Langhammer, J. (2011). Modelling the impact of land cover changes on flood mitigation in the upper lužnice basin. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. <https://doi.org/10.2478/v10098-011-0022-8>
- Velásquez-Valle, M. A., Muñoz-Villalobos, J. A., Sánchez-Cohen, I., Macías-Rodríguez, H., & Flores-López, H. E. (2013). Simulación Del Impacto Del Manejo Sobre La Respuesta Hidrológica En Una Cuenca De Pastizal Parcialmente Instrumentada. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, XII(1)*, 7–12. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2012.06.033>
- Xu, J., Zhao, Y., Zhong, K., Ruan, H., & Liu, X. (2016). Coupling modified linear spectral mixture analysis and soil conservation service curve number (SCS-CN) models to simulate surface runoff: Application to the main Urban Area of Guangzhou, China. *Water (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/w8120550>

5. CONCLUSIONES GENERALES

- Los coeficientes de escurrimiento obtenidos por el método directo fueron menores en comparación con los obtenidos con el método de curva numérica.
- El coeficiente de escurrimiento de ambos métodos fue más preciso cuando la conductividad hidráulica no fue factor de modificación en la pérdida de la esorrentía.
- Para todas las sub-microcuencas se presentó una relación adecuada entre la precipitación y la esorrentía pues en todas ellas a medida que se incrementó la precipitación también los hizo la esorrentía.
- El método de predicción de curva numérica se comportó de manera diferente en cada una de las sub-microcuencas siendo mejor en algunas y peor en otras, por lo que la predicción fue diferencial.

- El comportamiento de la escorrentía en función de la precipitación fue heterogéneo en las sub-microcuencas, debido a las condiciones físicas estructurales diferentes de cada una de ellas.
- Los valores de NC derivados del modelo de curva numérica tuvieron una mejor correlación cuando se dejó fuera la consideración de humedad antecedente en la obtención del número de curva que caracteriza la condición estructural de las sub-microcuencas.
- La caracterización de los valores de número de curva es indispensable para una mejor satisfacción en la predicción de la escorrentía, debido a que, los valores de tablas que se usan comúnmente son demasiado generales y solo pueden tomarse en cuenta cuando las condiciones del sistema son similares a las que se desarrolló el modelo.
- El uso de condición de humedad antecedente debe de tomarse en cuenta mediante el análisis de eventos de larga trascendencia, ya que en algunos de los casos la humedad antecedente limita por el tipo de suelo y como este responda a la precipitación.
- El número de curva que se obtiene de forma tradicional, provoca que algunas condiciones representativas de los sistemas no se tomen en cuenta o que queden fuera de la consideración para una mejor predicción de la escorrentía, con la comparación de formas de obtención de escorrentía (predicción y real.
- La incorporación del contenido de humedad antecedente en la determinación de la escorrentía mediante la caracterización del número de curva de cada sub-microcuenca hace deficiente el rendimiento de la predicción.

- Se encontró evidencia de que el método bajo condiciones de adaptación y ajuste a los sistemas, puede ser utilizado en cualquier tamaño de sistema.
- La impermeabilidad de los sistemas en zonas no detectadas establece consecuencias en las predicciones, ya que es muy complicado establecer ese tipo de variables dentro del sistema.

6. ANEXOS

comandos del programa de macros de visual Basic para Excel.

```
Sub Botón1_Haga_clic_en ()
For n = 1 To Cells (3, 10)
Cells (4, 10) = n
If Cells (5 + n, 3) > 0 Then
If Cells (5 + n, 4) = 0 Then
NC = 50
Cells (5 + n, 7) = NC
po = Cells (3, 8) * (25400 / NC - 254)
Do While po > Cells (5 + n, 3)
NC = NC + 0.01
Cells (5 + n, 7) = NC
po = Cells (3, 8) * (25400 / NC - 254)
Loop
Do While po < Cells (5 + n, 3)
NC = NC - 0.001
Cells (5 + n, 7) = NC
po = Cells (3, 8) * (25400 / NC - 254)
Loop
Cells (5 + n, 7) = NC
End If
If Cells (5 + n, 4) > 0 Then
NC = 100
Cells (5 + n, 7) = NC
po = Cells (3, 8) * (25400 / NC - 254)
escorrentía = (Cells (5 + n, 3) - po) ^ 2 / (Cells (5 + n, 3) + 4 * po)
Do While escorrentía > Cells (5 + n, 4)
NC = NC - 0.01
Cells (5 + n, 7) = NC
po = Cells (3, 8) * (25400 / NC - 254)
escorrentía = (Cells (5 + n, 3) - po) ^ 2 / (Cells (5 + n, 3) + 4 * po)
Loop
Do While escorrentía < Cells (5 + n, 4)
NC = NC + 0.001
Cells (5 + n, 7) = NC
po = Cells (3, 8) * (25400 / NC - 254)
escorrentía = (Cells (5 + n, 3) - po) ^ 2 / (Cells (5 + n, 3) + 4 * po)
Loop
Cells (5 + n, 7) = NC
End If
End If
Next n
```