



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Número de curva. Estimación  
sistematizada y aplicaciones**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Licenciatura en Ingeniería Civil**

**P R E S E N T A**

Karen García Calva

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. José Luis Aragón Hernández



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



# Resumen

El ciclo hidrológico de una cuenca incluye distintos procesos físicos, los cuales permiten conocer la disponibilidad de agua de ésta. Así, en el cálculo de la infiltración y del escurrimiento con el método del *Soil Conservation Service (SCS)* a partir de lluvia, interviene el número de curva (número de escurrimiento), ambos de suma importancia en la práctica de la hidrología. El número de curva depende de distintos factores, entre ellos, la cobertura vegetal, tipo de suelo y precipitación antecedente.

El número de curva cambia con el tiempo y el espacio, debido a la variabilidad temporal y espacial de los factores de los que depende, por lo que es necesario calcularlo cada vez que se realiza un estudio hidrológico; para ello, hoy en día se utilizan Sistemas de Información Geográfica y la información digital con la que dispone el país.

Por ello, en este trabajo se presenta un algoritmo para calcularlo de manera automática a partir de un modelo digital del terreno, mapas de cobertura vegetal y tipo de suelo; dichos desarrollos forman parte de un modelo hidrológico, pero se puede utilizar de forma independiente, ya que cuenta con una interfaz de usuario para ello.

El código numérico, primero discretiza la zona de estudio en celdas, posteriormente se clasifica el tipo de suelo y cobertura vegetal de cada celda y finalmente con el método del SCS se asigna el número de curva a cada celda; además se puede realizar una corrección debida a la lluvia antecedente.

Los resultados que se pueden obtener son el número de curva ponderado para toda la zona de estudio o número de curva para cada celda en que se discretiza la zona de estudio; dichos valores son útiles en el empleo de modelos lluvia-escurrimiento de parámetros concentrados y distribuidos.

Dicho procedimiento se aplicó en la cuenca del río Coyuquilla ubicada en el estado de Guerrero discretizándola en diferentes tamaños de celda. En los resultados se puede observar que en el 2010 el número de curva cambia drásticamente en comparación con los años anteriores, al igual que su evolución con respecto al tamaño de celda.



# ***Agradecimientos***

Gracias a mis padres por siempre motivarme a cumplir cada uno de mis sueños, confiar y creer en mí y en mis expectativas, gracias a mi madre por estar dispuesta a acompañarme cada larga y agotadora noche de estudio, por cada palabra de aliento que me diste cuando estaba decaída; a mi padre por llevarme a la Facultad cuando tenía exámenes muy temprano o me desvelaba haciendo tareas o avances de proyectos para que pudiera tener unos minutos extra de descanso, gracias por cada consejo y por cada una de sus palabras que me guiaron durante mi vida.

A mi hermana por desvelarse conmigo, escuchar cuando necesitaba lanzar ideas para encontrar la solución al problema que tenía y apoyarme en todo momento.

A los amigos que hice durante la carrera por compartir tantas cosas y apoyarme en cada aspecto de mi vida.

Al Dr. José Luis Aragón por guiarme para desarrollar y mejorar este trabajo, y darme la oportunidad de descubrir otras facetas de mí en el ámbito académico.

A mis sinodales M.I. Óscar Vega Roldán, M.I. Alba Beatriz Vázquez González, M.I. Alejandro Maya Franco por aceptar ser jurado de titulación y dedicar parte de su tiempo a la revisión de mi trabajo.



# Contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>iii</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Justificación.....</b>	<b>2</b>
<b>Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>Descripción del trabajo .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Conceptos hidrológicos. ....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Ciclo hidrológico.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Infiltración .....</b>	<b>7</b>
1.2.1 Métodos para calcular la infiltración. ....	10
<b>1.3 Número de curva. Metodología del TR-55.....</b>	<b>11</b>
1.3.1 Grupos hidrológicos del suelo .....	15
1.3.2 Uso de suelo .....	16
1.3.2.1 Tratamiento .....	18
1.3.2.2 Condición hidrológica .....	18
<b>1.4 Características del suelo.....</b>	<b>19</b>
1.4.1 Edafología .....	20
1.4.1.1 Edafología en México.....	22
1.4.2 Uso de suelo y cobertura vegetal en México.....	25
<b>1.5 Sistemas de Información Geográfica .....</b>	<b>30</b>
1.5.1 Sistemas de coordenadas .....	33
1.5.2 SIG disponibles .....	35
<b>2. Caso de estudio: cuenca del río Coyuquilla.....</b>	<b>39</b>
<b>2.1 Climatología .....</b>	<b>40</b>

<b>2.2</b>	<b>Orografía.....</b>	<b>40</b>
<b>2.3</b>	<b>Hidrografía.....</b>	<b>41</b>
<b>2.4</b>	<b>Edafología .....</b>	<b>42</b>
<b>2.5</b>	<b>Uso y cobertura vegetal del suelo .....</b>	<b>44</b>
<b>2.6</b>	<b>Datos hidrológicos .....</b>	<b>47</b>
2.6.1	Estaciones climatológicas .....	48
2.6.2	Estación hidrométrica.....	50
<b>3.</b>	<b><i>Metodología.....</i></b>	<b>53</b>
<b>3.1</b>	<b>Metodología tradicional.....</b>	<b>53</b>
<b>3.2</b>	<b>Metodología propuesta.....</b>	<b>54</b>
<b>3.3</b>	<b>Base de datos .....</b>	<b>56</b>
3.3.1	Criterios para la asignación del grupo de suelo.....	57
3.3.2	Criterios para la asignación de uso de suelo y condición hidrológica.....	62
3.3.3	Asignación del valor de número de curva.....	64
<b>4.</b>	<b><i>Resultados.....</i></b>	<b>71</b>
<b>4.1</b>	<b>Precipitación efectiva .....</b>	<b>74</b>
<b>4.2</b>	<b>Hidrogramas de diseño .....</b>	<b>78</b>
<b>5.</b>	<b><i>Conclusiones.....</i></b>	<b>83</b>
<b>6.</b>	<b><i>Referencias.....</i></b>	<b>85</b>
	<b><i>Apéndice 1. TR-55.....</i></b>	<b>87</b>
	<b><i>Apéndice 2. Suelos.....</i></b>	<b>95</b>
	<b><i>Apéndice 3. Uso y cobertura vegetal de los suelos en México .....</i></b>	<b>101</b>
	<b><i>Apéndice 4. Mapas del número de curva .....</i></b>	<b>115</b>

# Índice de figuras

Figura 1 Ciclo hidrológico.....	6
Figura 2 Capacidad de infiltración.....	7
Figura 3 Perfil de humedad en el proceso de infiltración.....	8
Figura 4 Proceso de infiltración.....	9
Figura 5 Diagrama de flujo para seleccionar la figura o tabla adecuada para determinar el número de curva. ....	14
Figura 6 Perfil de suelo. ....	20
Figura 7 Ciclo de un SIG.....	31
Figura 8 Modelo de información en formato vectorial y formato ráster, partiendo de un modelo real.....	32
Figura 9 Proyección Universal Transversal Mercator (UTM). ....	34
Figura 10 Representación de proyecciones cartográficas.....	35
Figura 11 Ubicación de la zona de estudio. ....	39
Figura 12 Ríos importantes del estado de Guerrero.....	42
Figura 13 Edafología, serie I de 1998. ....	43
Figura 14 Edafología, serie II de 2007. ....	44
Figura 15 Uso y cobertura vegetal del suelo, 1986. ....	45
Figura 16 Uso y cobertura vegetal del suelo, serie II, 1997.....	45
Figura 17 Uso y cobertura vegetal del suelo, serie III, 2003.....	46
Figura 18 Uso y cobertura vegetal del suelo, serie IV, 2010. ....	46

Figura 19 Uso y cobertura vegetal del suelo, serie V, 2013. ....	47
Figura 20 Estaciones climatológicas. ....	49
Figura 21 Relación entre la precipitación y los gastos. ....	51
Figura 22 Esquema del proceso para calcular el número de curva. ....	56
Figura 23 Selección del número de curva en función de la pendiente del terreno (Aparicio, 1992). ....	69
Figura 24 Mapa de número de curva empleando la carta edafológica de 1998 y de uso y cobertura vegetal del suelo de 1997 con un tamaño de celda de 25 m. ....	71
Figura 25 Número de curva para diferentes tamaños de celda empleando la carta edafológica de 1998 y de uso y cobertura vegetal del suelo de 1997. ....	72
Figura 26 evolución del número de curva. ....	74
Figura 27 Pruebas de calidad. ....	75
Figura 28 Funciones de distribución de probabilidad. ....	76
Figura 29 Precipitación efectiva. ....	77
Figura 30 Hidrogramas asociados a cada precipitación efectiva. ....	81
Figura 31 Número de curva ( $\Delta x=25$ m, TP=1998, US=1986). ....	115
Figura 32 Número de curva ( $\Delta x=50$ m, TP=1998, US=1986). ....	116
Figura 33 Número de curva ( $\Delta x=100$ m, TP=1998, US=1986). ....	116
Figura 34 Número de curva ( $\Delta x=250$ m, TP=1998, US=1986). ....	117
Figura 35 Número de curva ( $\Delta x=500$ m, TP=1998, US=1986). ....	117
Figura 36 Número de curva ( $\Delta x=1,000$ m, TP=1998, US=1986). ....	118
Figura 37 Número de curva ( $\Delta x=2,500$ m, TP=1998, US=1986). ....	118
Figura 38 Número de curva ( $\Delta x=25$ m, TP=1998, US=1997). ....	119

Figura 39 Número de curva ( $\Delta x=50$ m, TP=1998, US=1997).	119
Figura 40 Número de curva ( $\Delta x=100$ m, TP=1998, US=1997).	120
Figura 41 Número de curva ( $\Delta x=250$ m, TP=1998, US=1997).	120
Figura 42 Número de curva ( $\Delta x=500$ m, TP=1998, US=1997).	121
Figura 43 Número de curva ( $\Delta x=1,000$ m, TP=1998, US=1997).	121
Figura 44 Número de curva ( $\Delta x=2,500$ m, TP=1998, US=1997).	122
Figura 45 Número de curva ( $\Delta x=25$ m, TP=1998, US=2003).	122
Figura 46 Número de curva ( $\Delta x=50$ m, TP=1998, US=2003).	123
Figura 47 Número de curva ( $\Delta x=100$ m, TP=1998, US=2003).	123
Figura 48 Número de curva ( $\Delta x=250$ m, TP=1998, US=2003).	124
Figura 49 Número de curva ( $\Delta x=500$ m, TP=1998, US=2003).	124
Figura 50 Número de curva ( $\Delta x=1,000$ m, TP=1998, US=2003).	125
Figura 51 Número de curva ( $\Delta x=2,500$ m, TP=1998, US=2003).	125
Figura 52 Número de curva ( $\Delta x=25$ m, TP=2007, US=2010).	126
Figura 53 Número de curva ( $\Delta x=50$ m, TP=2007, US=2010).	126
Figura 54 Número de curva ( $\Delta x=100$ m, TP=2007, US=2010).	127
Figura 55 Número de curva ( $\Delta x=250$ m, TP=2007, US=2010).	127
Figura 56 Número de curva ( $\Delta x=500$ m, TP=2007, US=2010).	128
Figura 57 Número de curva ( $\Delta x=1,000$ m, TP=2007, US=2010).	128
Figura 58 Número de curva ( $\Delta x=2,500$ m, TP=2007, US=2010).	129
Figura 59 Número de curva ( $\Delta x=25$ m, TP=2007, US=2013).	129
Figura 60 Número de curva ( $\Delta x=50$ m, TP=2007, US=2013).	130
Figura 61 Número de curva ( $\Delta x=100$ m, TP=2007, US=2013).	130

Figura 62 Número de curva ( $\Delta x=250$ m, TP=2007, US=2013).....	131
Figura 63 Número de curva ( $\Delta x=500$ m, TP=2007, US=2013).....	131
Figura 64 Número de curva ( $\Delta x=1,000$ m, TP=2007, US=2013).....	132
Figura 65 Número de curva ( $\Delta x=2,500$ m, TP=2007, US=2013).....	132

# Índice de tablas

Tabla 1 Usos de suelo o tipos de cobertura, establecidos en las tablas del TR-55 para determinar el número de curva. ....	17
Tabla 2 Clave y tipo de suelo, presentes en la edafología según la FAO.....	21
Tabla 3 Atributos carta edafológica. ....	23
Tabla 4 Clave y tipos de suelo, presentes en la edafología de México. ....	24
Tabla 5 Atributos de la carta de uso y cobertura vegetal.....	26
Tabla 6 Grupos y tipos de vegetación .....	27
Tabla 7 Información adicional. ....	29
Tabla 8 Clasificación del uso agrícola. ....	30
Tabla 9 Estaciones climatológicas para la zona de estudio.....	48
Tabla 10 Precipitaciones medias anuales de la zona de estudio.....	50
Tabla 11 Gastos máximos anuales. ....	51
Tabla 12 Clasificación de los suelos con base en su textura.....	58
Tabla 13 Clasificación de los suelos con base en su tipo de drenaje. ....	59
Tabla 14 Clasificación de los suelos en función de las partículas que los conforman. .	60
Tabla 15 Tabla de decisión para determinar el grupo hidrológico de suelo que corresponde a la edafología de México.....	61
Tabla 16 Agrupación de los usos de suelo en México dentro de los usos de suelo establecidos en el TR-55. ....	62

Tabla 17 Asignación del número de curva para los usos de suelo que se presenta en la República Mexicana y su correspondencia con el uso de suelo establecido en las tablas del TR-55. ....	65
Tabla 18 Número de curva para diferentes tamaños de celda empleando la carta edafológica de 1998 y de uso y cobertura vegetal del suelo de 1997. ....	72
Tabla 19 Precipitación efectiva. ....	78
Tabla 20 Hidrograma unitario.....	80

# Introducción

La unidad fundamental para un estudio hidrológico es la cuenca, la cual está definida como una superficie terrestre donde se acumulan y drenan mediante un sistema de corrientes hacia un punto de salida las gotas de lluvia (Aparicio, 1992). Dicho fenómeno ocurriría de la manera antes mencionada bajo la condición de que la cuenca fuera impermeable, pero en la naturaleza esto no sucede.

A nivel de cuenca se puede esquematizar el ciclo hidrológico como un sistema de estímulo-respuesta ante una precipitación dada, es decir, el estímulo es la lluvia que cae y la respuesta es el escurrimiento en su salida. Este sistema depende de varios factores relacionados entre sí y que están controlados por las características geomorfológicas de la cuenca y su urbanización (Aparicio, 1992). Por lo tanto, existen dos condicionantes para el comportamiento de estos factores, el primero de ellos es el volumen de escurrimiento, relacionado directamente con las características del suelo y el área de la cuenca; el segundo, la velocidad de respuesta, asociado con la pendiente de la cuenca, orden de corrientes, etc.

Como el comportamiento de estos factores está condicionado por las características del suelo, existe un fenómeno llamado infiltración, que es el causante de la mayoría de las pérdidas de precipitación. Este movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia dentro del mismo juega un papel fundamental en la relación lluvia-escurrimiento y una práctica constante en la ingeniería hidrológica, por lo que es esencial considerarla en los problemas de diseño. Muchos factores influyen en la tasa de infiltración, incluyendo la condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, las propiedades del suelo, tales como la porosidad y la conductividad hidráulica, y el contenido de humedad presente en el mismo (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Para determinar la infiltración existen diferentes metodologías en función de la disponibilidad de información, entre ellos, el método del coeficiente de escurrimiento y el método del número de curva; el primero aplicable cuando se dispone de información medida de al menos un evento tanto de precipitación como de escurrimiento y el segundo

cuando se carece de ésta última, por lo tanto, dadas las condiciones de nuestro país el más utilizado.

El método del número de curva fue propuesto por el *Soil Conservation Service* (SCS) el cual consiste en que, para cierta tormenta, la precipitación efectiva  $P_e$  es menor o igual a la precipitación total  $P$  (Aragón Hernández, Camacho Moreno, & García Calva, 2018).

Por otra parte, nuestro país cuenta con información digital en formato vectorial y ráster de topografía, uso de suelo y vegetación, edafología y bases de datos de variables hidrológicas que permiten calcular la infiltración, con cualquiera de los métodos mencionados, manipulando dicha información manualmente o con algún Sistema de Información Geográfica (SIG).

## Justificación

Actualmente, el número de curva se calcula manualmente con el apoyo de cartas edafológicas, uso y cobertura vegetal del suelo, dicho proceso resulta impráctico, o de forma semiautomática con un SIG.

Por tal motivo, en este trabajo se propone una metodología para realizar dicho cálculo de forma eficiente y más precisa.

## Objetivos

El objetivo principal es calcular el número de curva de forma automática mediante el desarrollo, implementación y aplicación de un código numérico.

Los objetivos secundarios que permitirán llegar al objetivo principal son:

- Desarrollar una base de datos que permita relacionar los grupos de suelo, uso y cobertura vegetal del TR-55 con la información disponible en el INEGI.

- Observar y evaluar la capacidad de infiltración y otras variables de forma espacial y temporal.

## Descripción del trabajo

En el capítulo uno se presentan los conceptos involucrados con la infiltración, así como el método del TR-55 y los parámetros necesarios para aplicar dicho método; la clasificación de uso y cobertura vegetal del suelo y el procedimiento que se sigue para la elaboración de las cartas edafológicas, finalmente se realiza una introducción a los SIG's, en qué consisten los sistemas de coordenadas que se pueden emplear y los SIG's más utilizados.

En el capítulo dos se describe la zona de estudio desde su ubicación geográfica e hidrológica, características climatológicas, orográficas, hidrológicas, edafología, uso y cobertura vegetal del suelo y los datos de las estaciones climatológicas e hidrométricas.

En el capítulo tres se explica en que consiste el código desarrollado, los criterios de las bases de datos y una breve explicación de la metodología tradicional para el cálculo del número de curva.

En el capítulo cuatro se presentan los resultados obtenidos mediante el código desarrollado y algunas aplicaciones de estos resultados para determinar la precipitación efectiva, hidrogramas de diseño y el cambio espacial y temporal del número de curva y otras variables hidrológicas.

Por último, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones respecto a las ventajas que proporciona la metodología implementada.



# 1. Conceptos hidrológicos.

En este capítulo se abordarán los conceptos fundamentales para la estimación del número de curva, desde la infiltración y su lugar dentro del ciclo hidrológico, hasta los diferentes métodos para calcularla. Además, dado que es importante el empleo de SIG para la automatización del proceso de cálculo del número de curva, por lo cual se explicará su funcionamiento y las ventajas al aplicarlo en un estudio hidrológico.

## 1.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es parte fundamental de la hidrología. Consiste en el movimiento del agua, en sus tres estados (líquido, gas y sólido), en la atmósfera y en la Tierra de forma continua.

El ciclo no tiene principio ni fin y su descripción puede iniciar en cualquier punto. En la *Figura 1* se muestra de forma esquemática cómo el agua se evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para formar parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita sobre la superficie terrestre a los océanos; el agua precipitada puede ser interceptada por la vegetación, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escurrimiento superficial (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

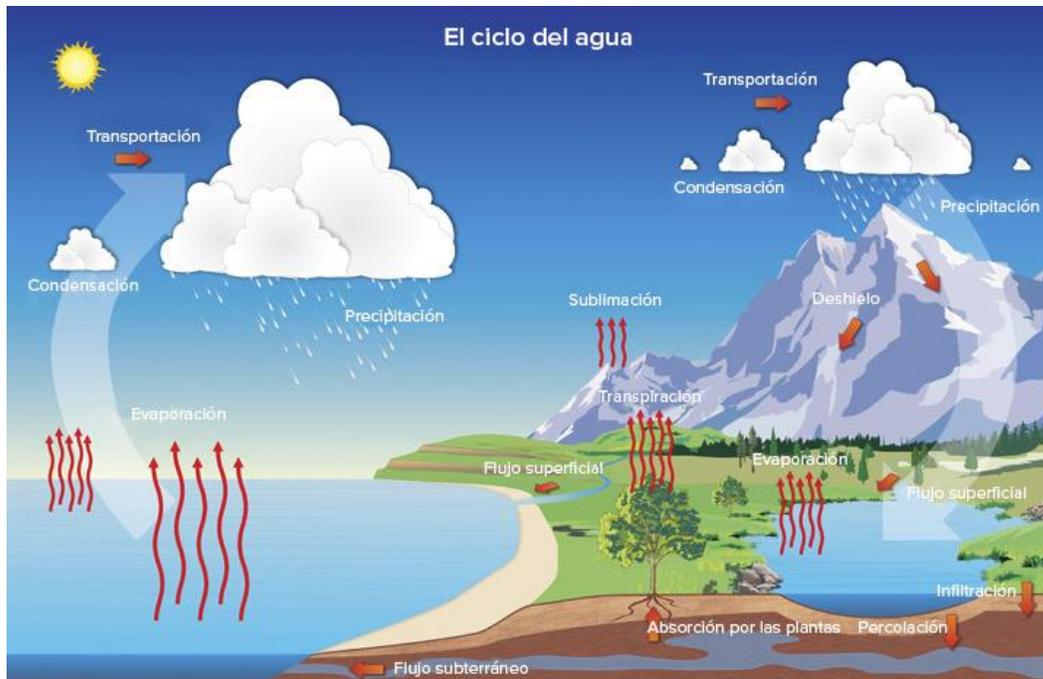


Figura 1 Ciclo hidrológico.

Las fases del ciclo hidrológico son y consisten en:

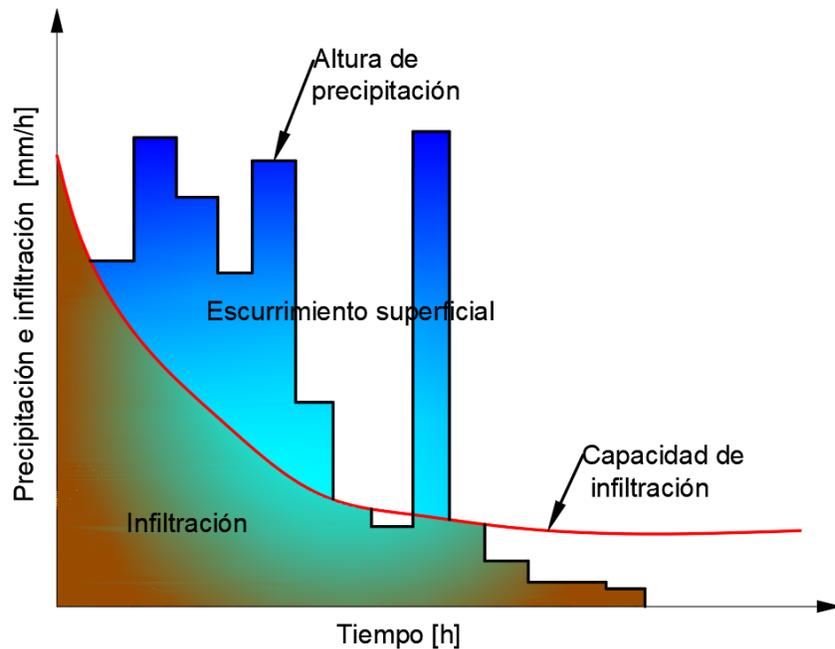
- **Evaporación:** Es el proceso por el cual el agua pasa del estado líquido al gaseoso y se transfiere a la atmósfera.
- **Condensación:** Es la transformación del agua del estado gaseoso al líquido, debido a cambios de presión y temperatura.
- **Precipitación:** Es la caída del agua como efecto de la gravedad, principalmente en forma de lluvia, aunque puede caer como nieve y granizo.
- **Infiltración:** Es la penetración del agua en el suelo.
- **Escurrimiento:** Es el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. Para llegar a la salida de la cuenca el escurrimiento puede ser: superficial, subterráneo y subsuperficial.

En este trabajo se profundizará en la fase de infiltración.

## 1.2 Infiltración

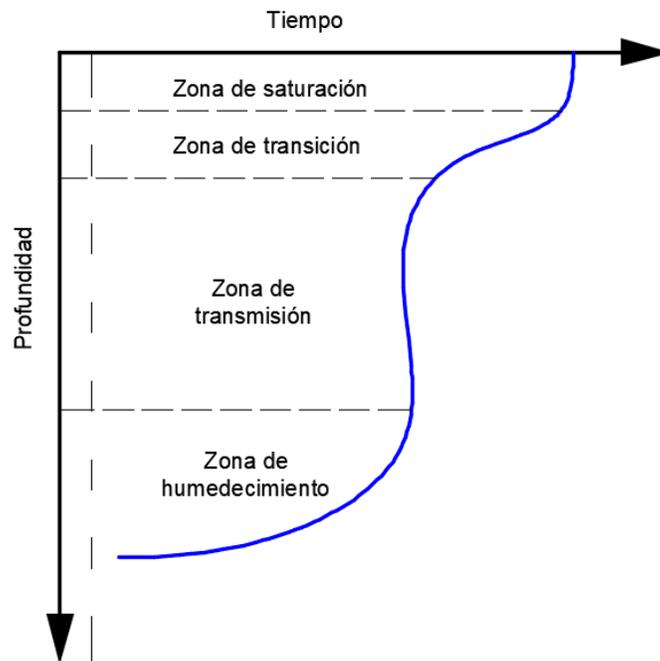
La infiltración es el proceso por medio del cual el agua pasa a través de los poros del suelo; primero satisface la deficiencia de humedad del suelo y puede formar parte del agua subterránea.

Para explicar el proceso de infiltración (*Figura 4*) considérese un área de suelo pequeña, de tal forma que sus características y la intensidad de lluvia en el espacio puedan considerarse uniformes. Además, se suponen que al inicio de una tormenta el suelo se encuentra seco y que la capacidad de agua que puede absorber en la unidad de tiempo (infiltración) es mayor que la intensidad de la lluvia en los primeros instantes (*Figura 2*). En esta parte del proceso las fuerzas producidas por la capilaridad predominan sobre las gravitatorias.



*Figura 2 Capacidad de infiltración.*

Conforme avanza el tiempo y si la lluvia es suficientemente intensa, el contenido de humedad del suelo aumenta hasta que su superficie alcanza la saturación (*Figura 3*). En ese momento comienzan a llenarse las depresiones del terreno, es decir, se originan los charcos y se inicia el flujo sobre la superficie. A este instante se le conoce como tiempo de encharcamiento.



*Figura 3 Perfil de humedad en el proceso de infiltración.*

Después del tiempo de encharcamiento, si la lluvia continúa siendo intensa, las fuerzas capilares pierden importancia frente a las gravitatorias, debido a que el contenido de humedad del suelo aumenta y la capacidad de infiltración disminuye con el tiempo.

Si después del tiempo de encharcamiento la tormenta disminuye su intensidad hasta hacerse menor que la capacidad de infiltración, el tirante de agua existente sobre la superficie del suelo (charco), disminuye hasta desaparecer, éste se infiltra y en menor grado se evapora.



*Figura 4 Proceso de infiltración.*

Según lo anterior, a nivel cuenca la diferencia entre el volumen de agua precipitado en una cuenca y el que escurre por su salida recibe el nombre de pérdidas de precipitación, las cuales se deben a:

- Intercepción en plantas y techos.
- Retención en depresiones
- Evaporación.
- Infiltración.

Debido a que cuantificar individualmente cada una de las pérdidas es complicado y dado que la infiltración es la porción más representativa de éstas, se puede suponer que las pérdidas de infiltración son similares a la infiltración.

Además, como fue descrito, los diferentes factores que pueden afectar el proceso de infiltración son:

- Textura del suelo.

- Contenido de humedad inicial.
- Contenido de humedad de saturación.
- Cobertura vegetal.
- Uso de suelo.
- Compactación.
- Aire atrapado.
- Temperatura, sus cambios y diferencias.

### 1.2.1 Métodos para calcular la infiltración.

La literatura reporta una serie de métodos para calcular la infiltración que podemos agrupar en dos grupos, en función de la disponibilidad de información:

- Cuencas aforadas:
  - Capacidad de infiltración media.
  - Coeficiente de escurrimiento.
  - Criterio del *United States Soil Conservation Service* (USSCS).
  - Índice de precipitación antecedente.
- Cuencas no aforadas:
  - Número de curva o escurrimiento.
  - Lineal.
  - Ecuación de Horton.
  - Green y Amp.
  - Ecuación de Richards.

Cuando se cuenta con datos simultáneos de precipitación y escurrimiento de una tormenta, se puede estimar el agua infiltrada como:

$$V_i = V_p - V_{ed}$$

Dividiendo entre  $A_c$ :

$$\frac{V_i}{A_c} = \frac{V_p}{A_c} - \frac{V_{ed}}{A_c}$$

$$F = P - P_e$$

Donde:  $V_i$  es el volumen de infiltración;  $V_p$  es el volumen de precipitación;  $V_{ed}$  es el volumen de escurrimiento directo.

Dado que, en nuestro país lo más frecuente es tener cuencas no aforadas, en este trabajo nos enfocaremos en el método del número de curva o escurrimiento, dado que es el más empleado en la práctica.

### 1.3 Número de curva. Metodología del TR-55.

En el año de 1986, el USDA (*United States Department of Agriculture*) emitió la publicación TR-55 en la cual se expone la importancia del número de curva, como calcularlo y las limitaciones del método desarrollado por *Soil Conservation Service* (SCS).

El método propuesto por el SCS consiste en que, para cierta tormenta, la precipitación efectiva ( $P_e$ ) es menor o igual a la precipitación total ( $P$ ). Además, establece la misma relación para el agua retenida en la cuenca ( $F_a$ ) y la retención potencial máxima ( $S$ ), siendo la primera menor o igual que la segunda (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Cierta cantidad de precipitación es considerada antes del inicio del escurrimiento (abstracción inicial), representada por  $I_a$ , entonces el escurrimiento potencial se establece como  $P - I_a$ .

La hipótesis consiste en que las dos relaciones, tanto de las cantidades reales como de las cantidades potenciales, son iguales, esto es:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (1)$$

Del principio de continuidad se establece:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (2)$$

Combinando (1) y (2), se obtiene:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (3)$$

Por otra parte, de forma empírica se determinó que:

$$I_a = 0.2S \quad (4)$$

Sustituyendo (4) en (3), se tiene:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (5)$$

Cuando se representan gráficamente la precipitación total y la precipitación en exceso de diferentes cuencas, se encuentran una serie de curvas (*Apéndice 1. TR-55*), las cuales se han estandarizado y se conocen como número de curva, dichas curvas son adimensionales y se manejan en un intervalo de 1 a 100, donde 100 es para superficies impermeables o de agua y cualquier número menor a 100 es para las superficies naturales (Chow, Maidment, & Mays, 1994). El número de curva y S se relacionan como:

$$S = \frac{1,000}{N} - 10 \quad (6)$$

Donde N conocido como número de curva (número de escurrimiento); depende de la cobertura del suelo y vegetación, edafología, precipitación antecedente y tratamiento. El método proporciona un diagrama de flujo (*Figura 5*), a partir de la figura o tabla apropiada para determinar el número de curva (*Apéndice 1. TR-55*).

Sustituyendo (6) en (5) se obtiene:

$$P_e = \frac{\left[ P - \frac{5,080}{N} + 50.8 \right]^2}{P + \frac{20,320}{N} - 203.2} \quad (7)$$

La aplicación de dicha formulación aborda los aspectos antes mencionados para determinar la precipitación efectiva e infiltración.

Como se puede observar, para determinar el número de curva, primero es necesario determinar el grupo hidrológico del suelo y también el tipo de cobertura (uso de suelo), tratamiento de éste y su condición hidrológica.

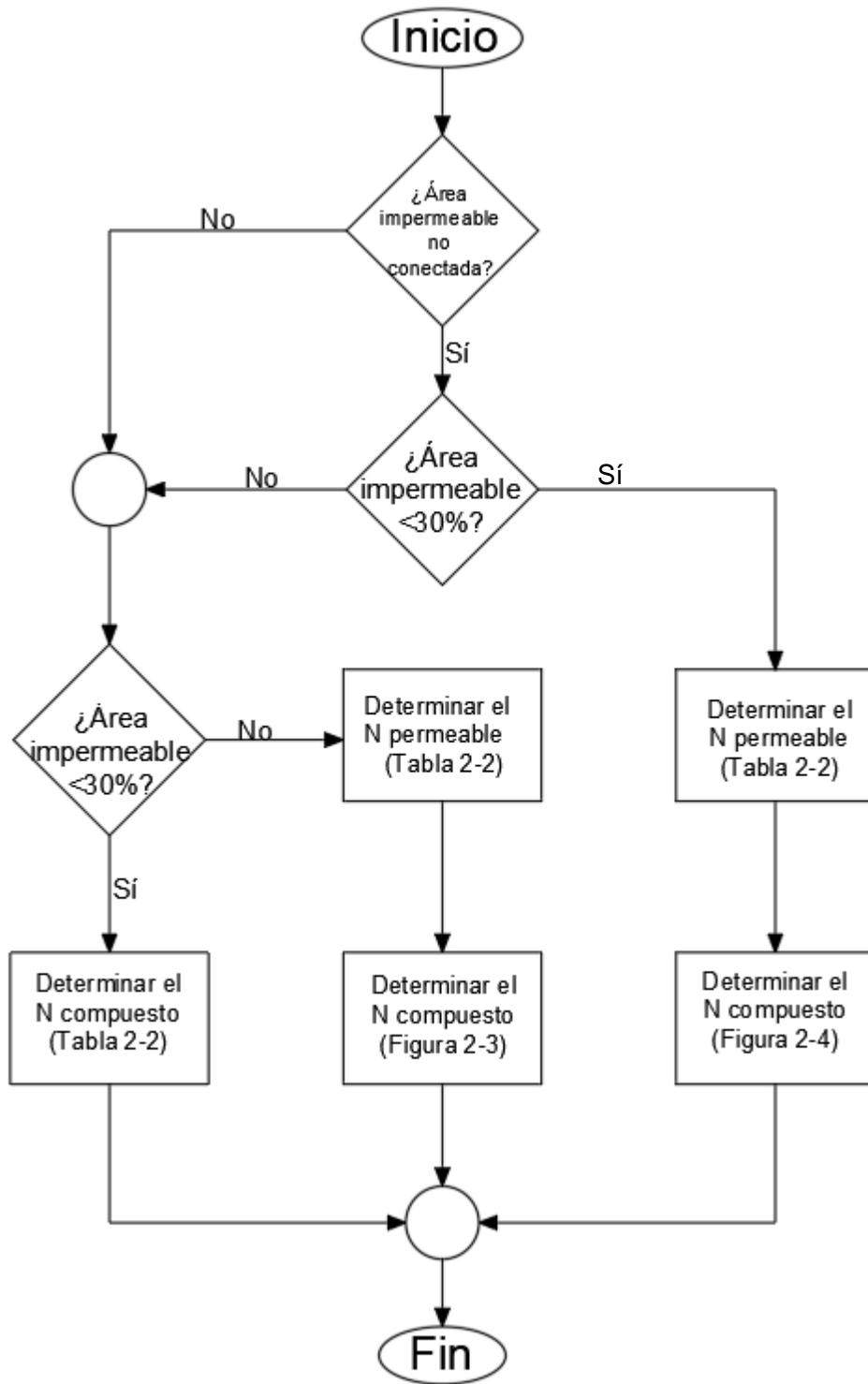


Figura 5 Diagrama de flujo para seleccionar la figura o tabla adecuada para determinar el número de curva.

### 1.3.1 Grupos hidrológicos del suelo

Según el TR-55, los suelos se clasifican en cuatro grupos hidrológicos (A, B, C y D) en función de su tasa mínima de infiltración, que se obtiene para el suelo desnudo después de la humectación prolongada.

La urbanización es uno de los factores que más efecto tiene sobre el escurrimiento en cuencas con suelos con altas tasas de infiltración (arenas y gravas) en comparación con las cuencas con sedimentos y arcillas, donde generalmente se tienen tasas bajas de infiltración. Cualquier alteración de un perfil de suelo puede cambiar significativamente sus características de infiltración. La infiltración es controlada por las condiciones de la superficie.

A continuación, se describen las características de cada grupo hidrológico:

- **Grupo A:** Suelos que tienen altas velocidades de infiltración cuando están mojados, consisten principalmente en arenas y gravas profundas, con drenaje bueno a excesivo y bajo potencial de escurrimiento. Estos suelos tienen altas velocidades de transmisión del agua. (>7.6 mm/h).
- **Grupo B:** Suelos con moderadas velocidades de infiltración cuando están mojados, consisten principalmente de suelos con cantidades moderadas de texturas finas a gruesas, con drenaje medio y algo profundos. Son básicamente suelos franco-limosos o limosos. Estos suelos tienen moderadas velocidades de transmisión del agua. (3.8 a 7.6 mm/h).
- **Grupo C:** Suelos que tienen bajas velocidades de infiltración cuando están mojados, consisten principalmente de suelos que tienen un estrato que impide el flujo del agua, son suelos con texturas finas. Estos suelos tienen bajas velocidades de transmisión del agua. (1.3 a 3.8 mm/h).
- **Grupo D:** Suelos que tienen muy bajas velocidades de infiltración cuando están mojados, consisten principalmente de suelos arcillosos con alto potencial de hinchamiento, suelos con nivel freático alto y permanente, suelos con estratos arcillosos cerca de su superficie, o bien, suelos someros sobre horizontes

impermeables y alto potencial de escurrimiento. Estos suelos tienen muy bajas velocidades de transmisión del agua. (0 a 1.3 mm/h).

### 1.3.2 Uso de suelo

El uso de suelo es la cobertura de la cuenca o área de estudio, incluye cualquier tipo de vegetación y el suelo desnudo, así como las superficies impermeables como caminos, techos, etcétera (Campos Aranda, 2007).

Los distintos usos de suelo para los que la metodología del TR-55 ha desarrollado los valores de número de curva se presentan en las tablas 2-2a, 2-2b, 2-2c y 2-2d, contenidas en el *Apéndice 1.TR-55* y se resumen en la *Tabla 1*.

*Tabla 1 Usos de suelo o tipos de cobertura, establecidos en las tablas del TR-55 para determinar el número de curva.*

<b>Tablas contenidas en el Apéndice 1. TR-55</b>	<b>Uso de suelo</b>
Tabla 2-2a número de curva de escurrimiento para áreas urbanas.	Áreas urbanas desarrolladas completamente
	Áreas urbanas en desarrollo
Tabla 2-2b número de curva de escurrimiento para tierras agrícolas cultivadas	Barbecho
	Cultivos en fila
	Grano pequeño
	Cerca de semilla de leguminosa o legumbres por difusión
Tabla 2-2c número de curva de escurrimiento para tierras agrícolas	Pasturas, praderas o semejantes
	Prado
	Matorral
	Bosques
	Granjas-edificios, calles, caminos y predios circundantes
Tabla 2-2d número de curva de escurrimiento para tierras áridas y semiáridas	Vegetación herbácea
	Roble-álamo temblón
	Piñón-enebro
	Artemisa con hierba de sotobosque
	Arbustos o matorral de desierto

Además, es necesario conocer el tratamiento y la condición hidrológica del mismo.

### *1.3.2.1 Tratamiento*

El tratamiento es un modificador del tipo de cobertura para describir la gestión de las tierras agrícolas cultivadas, incluye:

- Prácticas mecánicas:
  - Contorno
  - Terrazas
- Prácticas de manejo:
  - Rotación de cultivos
  - Reducción
  - Ninguna labranza

### *1.3.2.2 Condición hidrológica*

Indica los efectos del tipo de cobertura y tratamiento en la infiltración y el escurrimiento y se estima generalmente a partir de la densidad de la cubierta y el residuo en áreas de la muestra. Si existe una buena condición hidrológica, indica que el suelo tiene un potencial bajo de escurrimiento para ese grupo hidrológico específico, tipo de cobertura y tratamiento. Algunos factores para considerar el efecto de la cobertura en la infiltración y escurrimiento son:

- Dosel o densidad de céspedes, cultivos u otras áreas.
- Cantidad de cobertura a lo largo del año.
- Cantidad de pasto o leguminosas de semillas cercanas en rotación.
- Porcentaje de la cobertura de residuos.
- Grado de rugosidad superficial.

## 1.4 Características del suelo

De esta forma, para determinar el número de curva, simplemente hay que caracterizar el tipo y uso de suelo. Aplicar dicha metodología en nuestro país, tiene un inconveniente, la información relativa al tipo y uso de suelo utiliza otra clasificación. De ahí la importancia de disponer de una metodología confiable que permita relacionar la metodología del TR-55 y la información que dispone el INEGI.

En la *World Reference Base* (WRB) de 1998, el suelo está definido como:

*“...un cuerpo natural continuo el cual tiene tres dimensiones espaciales y una temporal. Las tres características principales que rigen al suelo son:*

- *Está formado por constituyentes minerales y orgánicos e incluye fases sólida líquida y gaseosa.*
- *Los constituyentes están organizados en estructuras específicas para el medio edafológico. Estas estructuras constituyen el aspecto morfológico de la cubierta del suelo, equivalente a la anatomía de un ser vivo. Son el resultado de la historia de la cobertura del suelo y de sus dinámicas y propiedades actuales. El estudio de las estructuras de la cubierta del suelo facilita la percepción de sus propiedades físicas, químicas y biológicas; esto permite comprender el pasado y el presente del suelo y predecir su futuro.*
- *El suelo está en constante evolución, dando así al suelo su cuarta dimensión, el tiempo.”*

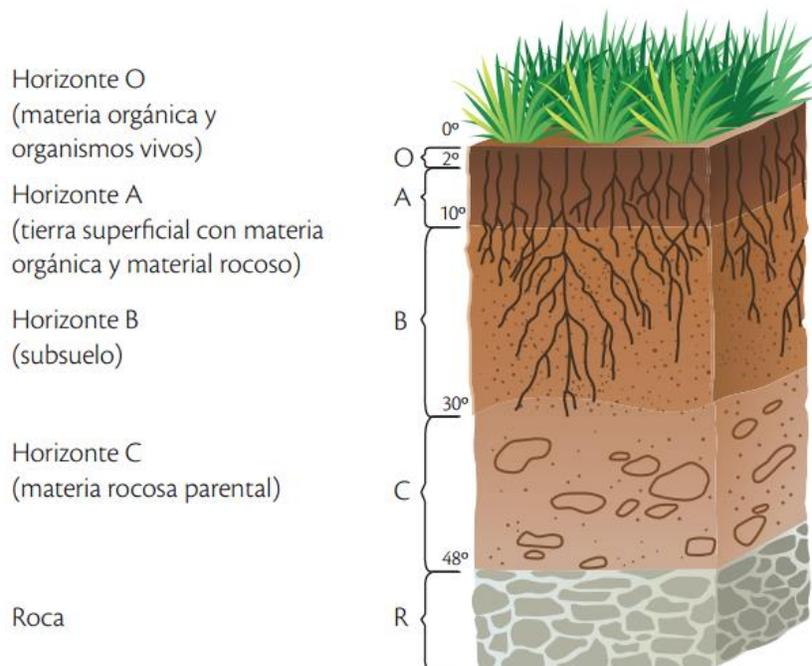
### 1.4.1 Edafología

La Edafología (del griego *edafos*, "suelo", *logía*, "estudio", "tratado") es la ciencia que estudia la composición y naturaleza del suelo en su relación con las plantas y el entorno que le rodea. Dentro de la edafología aparecen varias ramas teóricas y aplicadas que se relacionan en especial con la física, la química y la bioquímica.

La *Food and Agriculture Organization* (FAO) clasifica los suelos en función de las propiedades definidas por:

- Horizontes.
- Propiedades.
- Materiales de diagnóstico.

En la *Figura 6*, se muestra un perfil de suelo donde se puede apreciar los horizontes que componen al suelo. Dichas propiedades deben ser medidas y observadas en campo en la medida posible.



*Figura 6 Perfil de suelo.*

Para la selección de las características diagnósticas se toma en cuenta el proceso de formación de suelos para tener una mejor caracterización, sin embargo, es importante resaltar que este parámetro no debe usarse como un criterio de diferenciación entre los suelos, al igual que los parámetros climáticos no deben influenciar en la clasificación. La WRB abarca dos niveles de detalle categórico que son:

- Primer nivel: Donde se encuentran 32 *Reference Soils Groups* (RSG), también llamados clases, que se clasifican con base en las características del suelo de acuerdo con procesos edafogenéticos primarios.
- Segundo nivel: Consiste en el nombre del *Reference Soils Groups* (RSG) más un conjunto de calificadores principales y suplementarios que dan características al suelo en función de los procesos formadores de suelo secundarios que afectan las características primarias de éstos. Las características del suelo sufren un efecto significativo debido al cambio de uso de la tierra.

Así, en la *Tabla 2* se enlistan los diferentes tipos de suelo de acuerdo con la FAO. En el *Apéndice 2. Suelos* se incluye una breve descripción de estos.

*Tabla 2 Clave y tipo de suelo, presentes en la edafología según la FAO.*

Clave	Nombre	Clave	Nombre
AC	Acrisol	LP	Leptosol
AL	Alisol	LX	Lixisol
AN	Andosol	LV	Luvisol
AT	Anthrosol	NT	Nitisol
AR	Arenosol	PH	Phaeozem
CL	Calcisol	PL	Planosol
CM	Cambrisol	PT	Plinthosol
CH	Chernozem	PZ	Podzol
CR	Crysol	RG	Regosol
DU	Durisol	RT	Retisol
FR	Ferrasol	SC	Solanchak
FL	Fluvisol	SN	Solonetz
GL	Gleysol	ST	Stagnosol
GY	Gypsisol	TC	Technosol
HS	Histosol	UM	Umbrisol
KS	Kastanozem	VR	Vertisol

#### 1.4.1.1 Edafología en México

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a través de las cartas edafológicas proporciona información georeferenciada sobre el recurso del suelo, información referente al tipo de suelo y sus características morfológicas, propiedades físicas y químicas, y a las limitantes más severas para su uso y manejo, tales como: profundidad, pedregosidad, salinidad, textura de los primeros 30 cm, entre otras. La información edafológica se presenta en un formato digital compatible (*shapefile*) con los SIG, lo cual que facilita su manejo y consulta.

El *shape* es un formato de archivo de tipo vectorial muy usado en los SIG en donde se guarda la localización de los elementos geográficos y sus atributos, compuesto, principalmente, de tres archivos:

- .shp: archivo en el que se almacenan las entidades geométricas de los objetos.
- .shx: archivo en el que se almacena el índice de las entidades geométricas.
- .dbf: conocido como base de datos y es el archivo donde se almacena la información de los atributos de los objetos (tabla de datos que permite acceso a la información del *shape* mediante una hoja de cálculo).

La información de tipo de suelo contenida en un archivo tipo .dbf (tabla de atributos) se ejemplifica en la *Tabla 3*.

Tabla 3 Atributos carta edafológica.

CLAVE	FC	NOM_SUE1	NOM_SUB1	NOM_SUE2	NOM_SUB2	NOM_SUE3	NOM_SUB3	CLA_TEX	FAS_FISCA	FAS_QUIMI	ENTIDAD
Ao+I+Rd/...	18984	Acrisol	órtico	Litosol	N/A	Regosol	dístrico	Fina	Lítica	NINGUNO	UNIDAD EDAFOLOGICA
Ao+I/3/L	18992	Acrisol	órtico	Litosol	N/A	NINGUNO	NINGUNO	Fina	Lítica	NINGUNO	UNIDAD EDAFOLOGICA
I+Ah+Ap/3	21702	Litosol	N/A	Acrisol	húmico	Acrisol	plíntico	Fina	NINGUNO	NINGUNO	UNIDAD EDAFOLOGICA
I+Ao+Rd/3	21705	Litosol	N/A	Acrisol	órtico	Regosol	dístrico	Fina	NINGUNO	NINGUNO	UNIDAD EDAFOLOGICA
I+Hh+Re/2	21807	Litosol	N/A	Feozem	háplico	Regosol	éutrico	Media	NINGUNO	NINGUNO	UNIDAD EDAFOLOGICA
I+Rd+Hh/2	21916	Litosol	N/A	Regosol	dístrico	Feozem	háplico	Media	NINGUNO	NINGUNO	UNIDAD EDAFOLOGICA
I+Re+Hh/2	21935	Litosol	N/A	Regosol	éutrico	Feozem	háplico	Media	NINGUNO	NINGUNO	UNIDAD EDAFOLOGICA
Je/1/P	22285	Fluvisol	éutrico	NINGUNO	NINGUNO	NINGUNO	NINGUNO	Gruesa	Pedregosa	NINGUNO	UNIDAD EDAFOLOGICA
Lc+Lo/3	23002	Luvisol	crómico	Luvisol	órtico	NINGUNO	NINGUNO	Fina	NINGUNO	NINGUNO	UNIDAD EDAFOLOGICA
Re+Hh/2	24513	Regosol	éutrico	Feozem	háplico	NINGUNO	NINGUNO	Media	NINGUNO	NINGUNO	UNIDAD EDAFOLOGICA
Re+I+Hh/...	24558	Regosol	éutrico	Litosol	N/A	Feozem	háplico	Media	Lítica	NINGUNO	UNIDAD EDAFOLOGICA
Re+Je/1/P	24656	Regosol	éutrico	Fluvisol	éutrico	NINGUNO	NINGUNO	Gruesa	Pedregosa	NINGUNO	UNIDAD EDAFOLOGICA

A continuación, se hace una breve descripción general de la información contenida en un corte edafológico en formato *shape*:

- La base de datos espacial es representada por polígonos, por lo tanto, la asignación del grupo de suelo se realizará por polígono.
- El *shape* agrupa los tipos de suelo en tres grupos por polígono: grupo uno que corresponde al suelo dominante (NOM\_SUE1), grupo dos o suelo secundario (NOM\_SUE2) y el grupo tres o suelo terciario (NOM\_SUE3); es decir, cada polígono puede contener uno, dos o hasta tres tipos de suelo.
- Cada tipo de suelo presenta hasta dos unidades calificadoras (calificador primario “NOM\_SUB1”, calificador secundario “NOM\_SUB2” y un calificador terciario “NOM\_SUB3”).
- Información complementaria que refiere a la textura, fase física, fase química.

De acuerdo con el INEGI en México se tienen 26 tipos de suelo (*Tabla 4*).

Tabla 4 Clave y tipos de suelo, presentes en la edafología de México.

Clave	Nombre	Clave	Nombre
AC	Acrisol	LP	Leptosol
AL	Alisol		Litosol
NA	Andosol	LX	Lixisol
AR	Arenosol	LV	Luvisol
CL	Calcisol	NT	Nitisol
CM	Cambisol	PH	Phaeozem
CH	Chernozem	PL	Planosol
DU	Durisol	PT	Plintosol
FL	Fluvisol	RG	Regosol
GY	Gipsisol	SC	Solonchak
GL	Gleysol	SN	Solonetz
HS	Histosol	UM	Umbrisol
KS	Kastanozem	VR	Vertisol

Para elaborar la carta edafológica se efectúan los procedimientos siguientes:

- a) **Inspección preliminar:** Inspección general de la zona de trabajo, visitando todas las condiciones ecológicas, con el fin de establecer los criterios de trabajo de las actividades a realizar durante la verificación de campo.
- b) **Fotointerpretación:** Se elabora un mapa de suelos a nivel de hipótesis de trabajo con base en los criterios previamente establecidos y donde se trazan sobre las fotografías aéreas o imágenes de satélite las separaciones correspondientes a condiciones de suelo diferentes.
- c) **Verificación de campo:** Se acude a la zona en estudio a comprobar el mapa provisional y mediante la cual se obtiene información para realizar modificaciones y adiciones al mismo.
- d) **Análisis de muestras:** Actividad de laboratorio en la que se obtienen datos sobre las propiedades físicas y químicas de los horizontes o capas de suelo que fueron muestreados en la verificación de campo.
- e) **Elaboración del mapa final:** Interpretación y correlación de datos de campo y laboratorio para la clasificación definitiva de los perfiles de suelo, con los cuales se denominan las unidades edafológicas definitivas, que generalmente

representan suelos en asociación hasta de tres tipos, donde el primero representa el suelo más dominante.

- f) **Revisión final:** Se valida la clasificación definitiva de los perfiles de suelo, unidades edafológicas y mapa final, a través de una correlación con toda la cartografía temática.
- g) **Información de la parte posterior:** Este procedimiento consiste en revisar los cuestionarios de campo y datos de laboratorio para escoger los puntos más representativos que deberán aparecer en los resúmenes de la parte posterior de la carta. Dentro de los puntos citados anteriormente hay una serie de especificaciones que deben ser cumplidas para una mayor calidad y homogeneidad de la carta edafológica.

#### 1.4.2 Uso de suelo y cobertura vegetal en México

Las cartas de uso de suelo y vegetación en formato vectorial que dispone INEGI contienen información de los tipos de vegetación, agricultura, pecuaria y forestal en México. Así el archivo *.dbf* de forma general contiene la información que se muestran en la *Tabla 5*.

Tabla 5 Atributos de la carta de uso y cobertura vegetal.

entidad	tipo	fisonomia ▲	veg_sec	erosion	cult_pri	cult_sec	cult_ter
PASTIZAL	Pastizal inducido	no aplicable	no aplicable	sin erosion apreciable	no aplicable	no aplicable	no aplicable
PASTIZAL	Pastizal cultivado	no aplicable	no aplicable	sin erosion apreciable	no aplicable	no aplicable	no aplicable
PASTIZAL	Pastizal cultivado	no aplicable	no aplicable	sin erosion apreciable	no aplicable	no aplicable	no aplicable
PASTIZAL	Pastizal inducido	no aplicable	no aplicable	sin erosion apreciable	no aplicable	no aplicable	no aplicable
BOSQUE	Bosque de pino	no aplicable	ninguno	sin erosion apreciable	no aplicable	no aplicable	no aplicable
BOSQUE	Bosque de encino	no aplicable	ninguno	sin erosion apreciable	no aplicable	no aplicable	no aplicable
BOSQUE	Bosque de encino	no aplicable	ninguno	sin erosion apreciable	no aplicable	no aplicable	no aplicable
BOSQUE	Bosque de pino	no aplicable	Vegetacion sec...	sin erosion apreciable	no aplicable	no aplicable	no aplicable
BOSQUE	Bosque de encino	no aplicable	Vegetacion sec...	sin erosion apreciable	no aplicable	no aplicable	no aplicable
AREA AGRICOLA	Agricultura de temporal	no aplicable	no aplicable	sin erosion apreciable	permanente	ninguno	ninguno
SELVA	Selva baja caducifolia	no aplicable	Vegetacion sec...	sin erosion apreciable	no aplicable	no aplicable	no aplicable
PASTIZAL	Pastizal cultivado	no aplicable	no aplicable	sin erosion apreciable	no aplicable	no aplicable	no aplicable

Dicha información se agrupa de la siguiente forma:

- a) **Cobertura vegetal:** su agrupación se basa en afinidades ecológicas, florísticas y fisonómicas, considerando que éstas se agrupan en primera instancia por cuestiones climáticas, aunque en ocasiones los aspectos geológicos y topográficos toman una especial relevancia.

La cobertura vegetal se puede clasificar en clases que están organizada con base en las características de los diferentes tipos de vegetación, de tal forma que se definen en primer orden los grandes grupos de vegetación, que a su vez comprenden los tipos de vegetación con afinidad ecológica y fisonómica, en las *Tablas 6* se muestran los grupos de vegetación y los diferentes tipos de vegetación de cada grupo.

Tabla 6 Grupos y tipos de vegetación

Bosque de coníferas	Bosque de encino	Bosque mesófilo de montaña	Selva perennifolia	Selva subcaducifolia	Selva caducifolia
Bosque de ayarín	Bosque de encino	Bosque mesófilo de montaña	Selva alta perennifolia	Selva baja subcaducifolia	Matorral subtropical
Bosque de cedro	Bosque de encino-pino		Selva alta subperennifolia	Selva mediana subcaducifolia	Selva baja caducifolia
Bosque de oyamel			Selva baja perennifolia		Selva mediana caducifolia
Bosque de pino			Selva baja subperennifolia		
Bosque de pino-encino			Selva mediana perennifolia		
Bosque de táscate			Selva mediana subperennifolia		
Matorral de coníferas					

(Continuación)

Selva espinosa	Pastizal	Matorral xerófilo	Vegetación hidrófila	Otros tipos de vegetación	Vegetación inducida
Mezquital tropical	Pastizal gipsófilo	Chaparral	Bosque de galería	Bosque de mezquite	Bosque inducido
Selva baja espinosa caducifolia	Pastizal halófilo	Matorral crasicauale	Manglar	Palmar natural	Palmar inducido
Selva baja espinosa subperennifolia	Pastizal natural	Matorral desértico micrófilo	Popal	Vegetación de dunas costeras	Pastizal inducido
	Pradera de Alta Montaña	Matorral desértico rosetófilo	Selva de galería	Vegetación halófila	Sabanoide
	Sabana	Matorral espinoso tamaulipeco	Tular		
		Matorral rosetófilo costero	Vegetación de galería		
		Matorral sarcocauale	Vegetación de petén		
		Matorral sarcocrasicauale	Vegetación halófila hidrófila		
		Matorral sarcocrasicauale de neblina			
		Matorral submontano			
		Mezquital xerófilo			
		Vegetación de desiertos arenosos			
		Vegetación gipsófila			

También se tiene información sobre el desarrollo de la vegetación, fase de la vegetación e información complementaria, en la *Tabla 7* se muestra la clasificación de cada una de ellas.

Tabla 7 Información adicional.

Desarrollo de la vegetación	Fase de la vegetación	Información complementaria
Vegetación primaria	Arbórea	Zonas urbanas
Vegetación secundaria	Arbustiva	Cuerpos de agua
	Herbácea	

b) **Cobertura arbórea:** distancia entre los elementos superiores dominantes de la comunidad vegetal, en la cual se consideran los siguientes aspectos:

- Sin cobertura aparente: se visualizan grandes espacios sin follaje o las copas de los árboles y arbustos mayores están muy espaciados. Con un porcentaje de cobertura menor al 30%.
- Cerrado: se visualizan pocos espacios sin follaje o las copas de los árboles y arbustos mayores están muy cercanos, se le considera un porcentaje de cobertura mayor al 40%.
- Abierto: se visualizan muchos espacios sin follaje o las copas de los árboles y arbustos mayores están relativamente espaciados, presenta un porcentaje de cobertura entre el 10% y 40%.
- Ninguno: el área cubierta por el follaje de árboles y arbustos es muy pequeña o está muy espaciada o no existe.

c) **Uso agrícola:** Superficies rurales dedicadas a actividades agrícolas las cuales son agrupadas por el tipo de suministro de agua con el que cuentan y la duración del ciclo agrícola de los principales cultivos utilizados en el área. (Tabla 8).

Tabla 8 Clasificación del uso agrícola.

Tipo de agricultura	Tipo de cultivo 1	Tipo de cultivo 2
Acuícola	Anual	Semipermanente
Agricultura de humedad	Semipermanente	Permanente
Agricultura de riego	Permanente	
Agricultura de temporal		
Bosque cultivado		
Pastizal cultivado		

En el *Apéndice 3. Uso y cobertura vegetal de los suelos en México* se hace una breve descripción del uso y cobertura vegetal de los suelos en México.

## 1.5 Sistemas de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica es una herramienta que permite capturar, almacenar, organizar, presentar y realizar análisis sobre información geográficamente referenciada. Integra operaciones sobre bases de datos, tales como búsquedas o análisis estadísticos apoyados con la ayuda y beneficios del desplegado gráfico. (*Figura 7*).

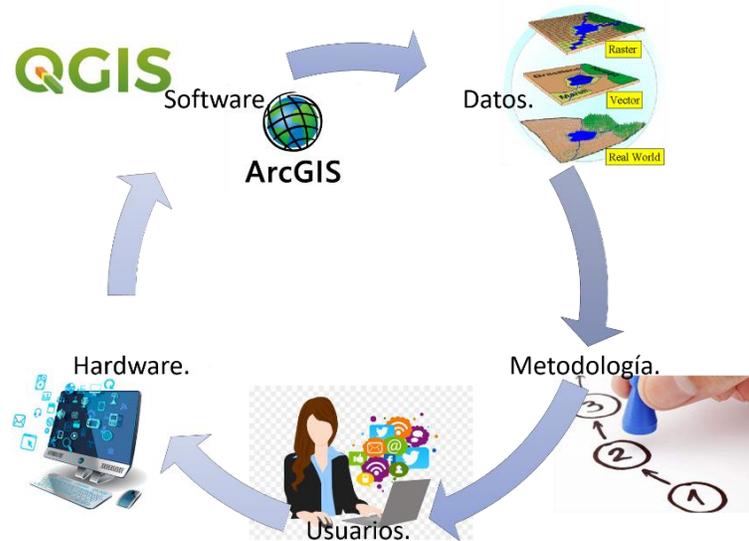
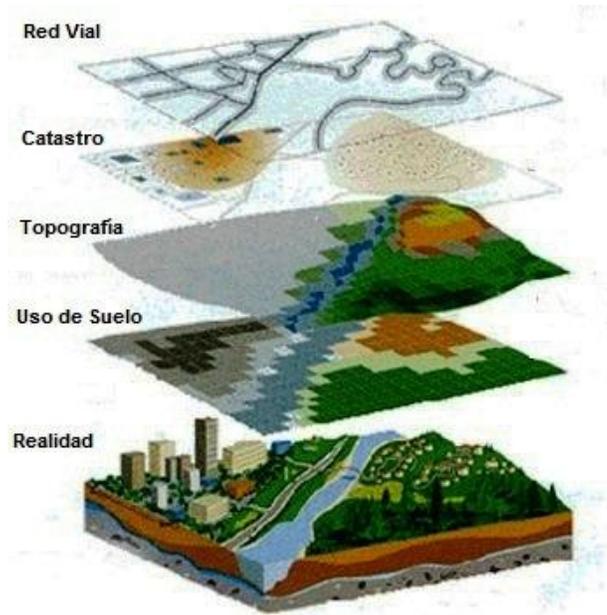


Figura 7 Ciclo de un SIG.

Se puede decir que el uso de los SIG se basa en la representación de objetos o mapas reales mediante formatos digitales que almacenan y representan la información real, permitiendo la superposición de mapas de información real, mediante capas (cada capa con temática diferente), para dar origen a nueva información; en general, funcionan con la representación de los datos o información real mediante dos tipos de formato: el formato vectorial (*shape*) y el formato ráster.

- Formato vectorial. Utiliza coordenadas cartesianas y se utiliza para representar elementos que tienen un límite o frontera definida, los archivos se conforman por capas de puntos, líneas y polígonos principalmente.
- Formato ráster. Es una representación en forma de malla que se integra por celdas denominadas píxeles, donde cada elemento tiene un valor único por cada atributo. En este formato se divide el espacio geográfico en elementos discretos, de forma regular, contigua y mutuamente exclusiva e indivisible.

En la *Figura 8*, se ejemplifican los dos tipos de formatos que integran un modelo, donde el formato vectorial está integrado por la red vial y catastro, y el formato ráster por topografía y uso de suelo.



*Figura 8 Modelo de información en formato vectorial y formato ráster, partiendo de un modelo real.*

Para realizar el análisis de la información en un SIG es necesario conocer la información geográfica contenida en ellos y así poder distinguir y relacionar dos tipos de base de datos.

En el caso de una representación vectorial se tiene:

- Base de datos espacial: corresponde a datos existentes en el espacio que son representados mediante puntos, líneas y polígonos, los cuales deben estar referenciados con un sistema geográfico que permita identificar y relacionar los objetos sobre la superficie de la Tierra.
- Base de datos descriptiva: está compuesta por información alfanumérica que se almacena en una tabla de atributos, es decir, es el elemento que da nombre a las características geográficas.

Para un formato ráster los datos se encuentran organizados en filas y columnas de celdas (como unidad más pequeña se tiene al píxel), cada celda almacena un valor único que puede ampliarse mediante el uso de las bandas del ráster para representar los colores

RGB (*Red, Green and Blue*), o una tabla extendida de atributos con una fila para cada valor único de celda.

### 1.5.1 Sistemas de coordenadas

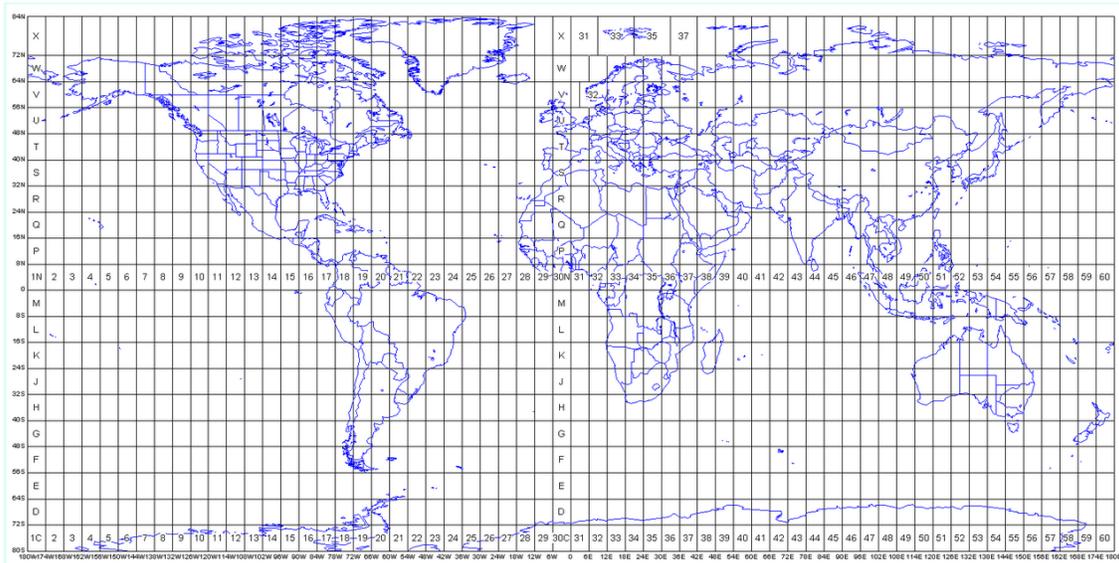
El sistema de coordenadas geográficas, basado en paralelos y meridianos, se utiliza para determinar la posición de cualquier punto en el planeta. Para ello se miden dos distancias: entre el punto deseado y el Ecuador, y entre ese punto y el meridiano cero. Estas distancias reciben el nombre de latitud y longitud, respectivamente, y se miden en grados ( $^{\circ}$ ) debido a la forma esférica del globo terráqueo.

- Latitud se mide desde el Ecuador hasta los polos. Las líneas de latitud son los paralelos, y sus valores van desde el  $0^{\circ}$  (Ecuador) al  $90^{\circ}$  (polos). El Ecuador es la latitud más baja, cero grados. La latitud puede ser norte (Hemisferio Norte) o sur (Hemisferio Sur).
- Longitud se mide según los meridianos. Las líneas de longitud son los meridianos, y sus valores van desde el  $0^{\circ}$  (meridiano de Greenwich) hasta su complementario, el  $180^{\circ}$ , el meridiano de cambio de fecha. El meridiano de Greenwich es la longitud más baja, cero grados. La longitud puede ser oeste o este.

Un punto cualquiera de la superficie terrestre puede ser situado exactamente por la intersección de un paralelo y un meridiano, es decir por dos números o coordenadas que representan a la latitud y la longitud. Para señalar en el mar una posición exacta se indica la latitud y la longitud. Para dar las coordenadas geográficas, primero se escribe la latitud y luego la longitud.

Un aspecto importante es la utilización de sistemas coordenados que permiten referenciar los elementos geográficos por medio de una latitud y longitud. Esta representación gráfica de los puntos sobre la superficie terrestre se lleva a cabo mediante dos tipos de proyecciones:

- *Universal Transversal Mercator (UTM)*: es un sistema que emplea un cilindro situado de forma tangente al elipsoide en el ecuador. El globo se divide en 60 zonas septentrionales y meridionales, cada una de las cuales abarca 6° de longitud. Cada zona tiene su propio meridiano central. Las zonas 1N y 1S comienzan en los 180° W. Los límites de cada zona se sitúan en los 84° N y 80° S, apareciendo la división entre las zonas norte y sur en el ecuador (*Figura 9*).



*Figura 9 Proyección Universal Transversal Mercator (UTM).*

- *Proyecciones cartográficas*: proyecta de manera sistemática ubicaciones situadas en la superficie de un esferoide sobre posiciones representativas situadas sobre una superficie plana, utilizando para ello algoritmos matemáticos. Básicamente utiliza tres tipos de proyecciones: cónica, cilíndrica y polar (*Figura 10*).

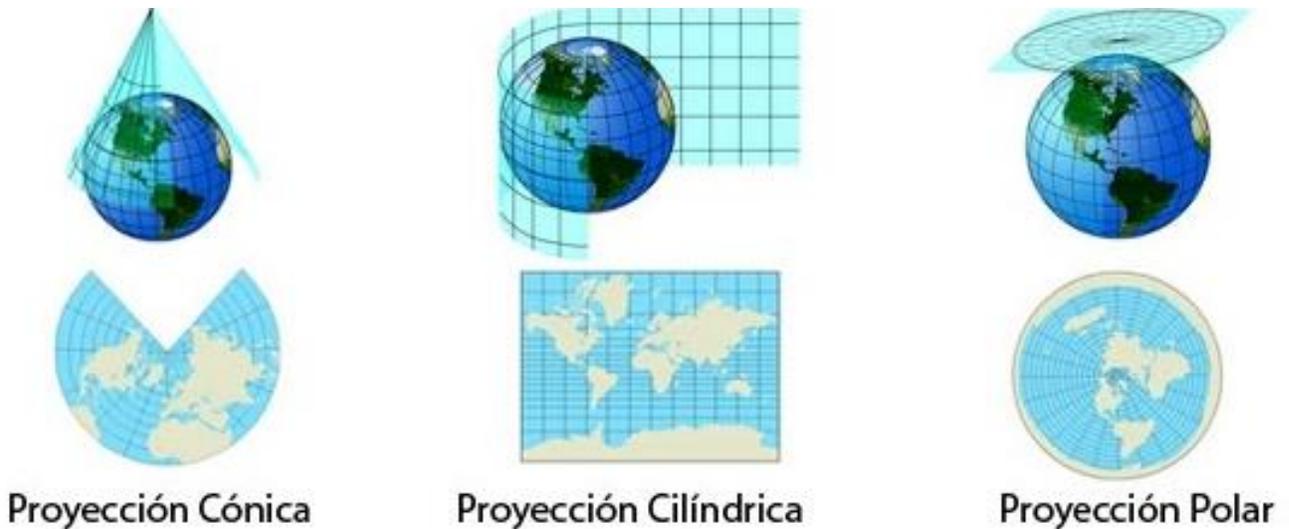


Figura 10 Representación de proyecciones cartográficas.

### 1.5.2 SIG disponibles

Hay una gran variedad de programas SIG, la diferencia entre unos y otros es que es más accesible obtener los de código libre que los que requieren una licencia, a continuación, se dará una breve descripción de los programas de código libre más empleados.

1. **QGIS:** es un Sistema de Información Geográfica de código libre para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows y Android. Permite manejar formatos ráster y vectoriales a través de las bibliotecas GDAL y OGR, así como bases de datos. Algunas de sus características son:
  - Soporte para la extensión espacial de PostgreSQL, PostGIS.
  - Manejo de archivos vectoriales *Shapefile*, ArcInfo coverages, Mapinfo, GRASS GIS, DXF, DWG, etc.
  - Soporte para un importante número de tipos de archivos raster (GRASS GIS, GeoTIFF, TIFF, JPG, etc.).
2. **GRASS:** (acrónimo inglés de *Geographic Resources Analysis Support System*) es un software SIG bajo licencia GPL (software libre). Puede soportar información

tanto ráster como vectorial y posee herramientas de procesado digital de imágenes.

3. **uDig:** está basado en los parámetros del OGC (*Open Geospatial Consortium*) que regula los estándares abiertos e interoperables de los Sistemas de Información Geográfica. Está programado en JAVA mediante un entorno de desarrollo llamado Eclipse. Entre sus ventajas cabe destacar que permite la conexión a servidores WFS (*Web Feature Service*) o acceso a través de Internet a objetos geográficos no sólo a efectos de su visualización en un mapa (WMS) sino además para consulta y descarga, es decir, en modo lectura y escritura.
4. **gvSIG Desktop:** es un programa informático para el manejo de información geográfica con precisión cartográfica que se distribuye bajo licencia GNU GPL v3. Permite acceder a información vectorial y rasterizada, así como a servidores de mapas que cumplan las especificaciones del OGC. La implementación de servicios OGC: WMS (*Web Map Service*), WFS (*Web Feature Service*), WCS (*Web Coverage Service*), WMTS (*Web Map Tiled Service*), Servicio de Catálogo y Servicio de Nomenclátor, es una de las principales características de gvSIG respecto a otros Sistema de Información Geográfica.
5. **Saga-gis:** es un software híbrido de información geográfica. El primer objetivo de SAGA es dar una plataforma eficaz y fácil para la puesta en práctica de métodos geocientíficos mediante su interfaz de programación (API). El segundo es hacer estos métodos accesibles de una manera fácil. Esto se consigue principalmente mediante su interfaz gráfica de usuario (GUI). Juntos, API Y GUI son el verdadero potencial de SAGA: un sistema cada vez mayor y rápido de métodos geocientíficos.
6. **KOSMO:** es un programa de Sistemas de Información Geográfica distribuido bajo licencia GNU/GPL con funcionalidades avanzadas. Se trata de una herramienta capaz de visualizar y procesar datos espaciales, que se caracteriza por poseer una interfaz de usuario amigable, tener la capacidad de acceder a múltiples formatos de datos, tanto vectoriales (en fichero, como *Shapefile* o DXF, o en base de datos, como PostgreSQL, MySQL u Oracle), como ráster (TIFF, GeoTIFF, ECW, MrSID u otros formatos de imagen georreferenciados, como BMP, GIF,

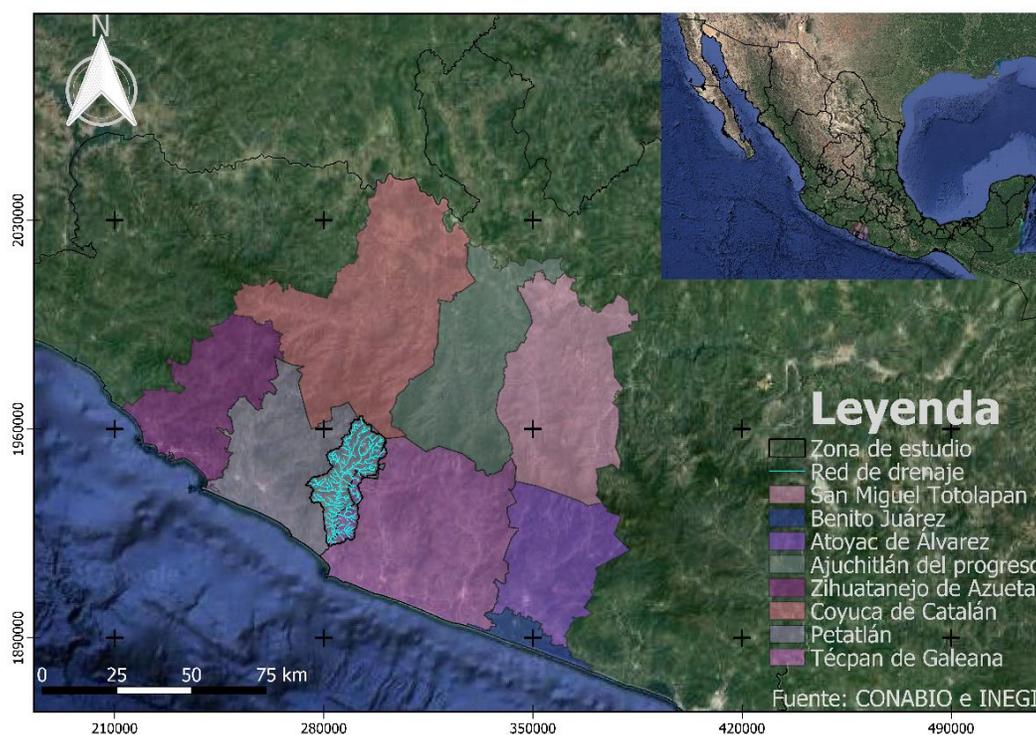
JPG, PNG), con capacidad de edición y, en general, ofreciendo numerosas utilidades al usuario SIG.



## 2. Caso de estudio: cuenca del río Coyuquilla

### Coyuquilla

La cuenca del río Coyuquilla se encuentra en el estado de Guerrero, en los límites de los municipios de Petatlán y Técpan de Galeana ubicados dentro de la región hidrológica 19 Costa Grande, en la subcuenca Bc Río Coyuquilla y otros (RH19Bc). La salida de la cuenca coincide con la estación hidrométrica que lleva por nombre “Coyuquilla II”, tiene coordenadas UTM 281,564.89 N, 1'921,801.44 O y está ubicada sobre la corriente a la altura del puente de la carretera Acapulco-Zihuatanejo. La población inmediata es Coyuquilla Norte (*Figura 11*).



*Figura 11 Ubicación de la zona de estudio.*

Dicha cuenca colinda al norte con los municipios de Coyuca de Catalán, San Miguel Totolapan y Ajuchitlán del Progreso; al este con Atoyac de Álvarez y Benito Juárez; al

sur con el Océano Pacífico y al oeste con Zihuatanejo de Azueta. Tiene un área de 551.36 km<sup>2</sup>, perímetro de 169.57 km, pendiente media de 0.06589, la longitud el cauce principal es de 56.39 km y la pendiente del cauce principal de 0.0003.

## 2.1 Climatología

En la parte alta de la cuenca el tipo de clima es semicálido-subhúmedo, mientras que en la parte baja es cálido-subhúmedo; la temperatura anual está registrada en 26.6°C.

Los meses más calurosos tanto en la parte baja como en la parte alta son abril y mayo, registrando temperaturas máximas de 40°C. En época de frío, diciembre y enero alcanzan los 17°C.

El régimen de lluvias comprende los meses de junio a octubre en la parte baja, con precipitación pluvial promedio de 950 milímetros. En la parte media y alta las lluvias abarcan los meses de mayo a noviembre con una precipitación media anual de 1,250 milímetros.

## 2.2 Orografía

El relieve está conformado por tres tipos:

- Zonas accidentadas: Componen el 74 % en el municipio de Técpan de Galeana y el 70 % en el municipio de Petatlán, localizadas en la sierra Madre del Sur, las cuales están cubiertas por bosques forestales, alcanzando altura sobre el nivel del mar de 2,500 metros.
- Zonas semiplanas: Abarcan el 11 % en el municipio de Técpan de Galeana y el 20 % en el municipio de Petatlán, localizadas en la parte donde se inicia la montaña, formadas por lomeríos donde se ubican pequeñas áreas cultivables y al

norte de la carretera federal Acapulco-Zihuatanejo, formadas por lomas pequeñas y planicies.

- Zonas planas: Abarcan el 15 % del municipio de Técpan de Galeana es conocida como faja costera la cual tiene una longitud de 75 kilómetros aproximadamente y una superficie de 12 kilómetros cuadrados, y el 10 % del municipio de Petatlán localizadas en la parte oeste, sureste y el litoral.

## 2.3 Hidrografía

Los recursos hidrográficos del municipio de Técpan de Galeana se basan principalmente en los tres siguientes ríos:

- Río Técpan
- Río Nuxco
- Río Zihuatlán, Grande o San Luis

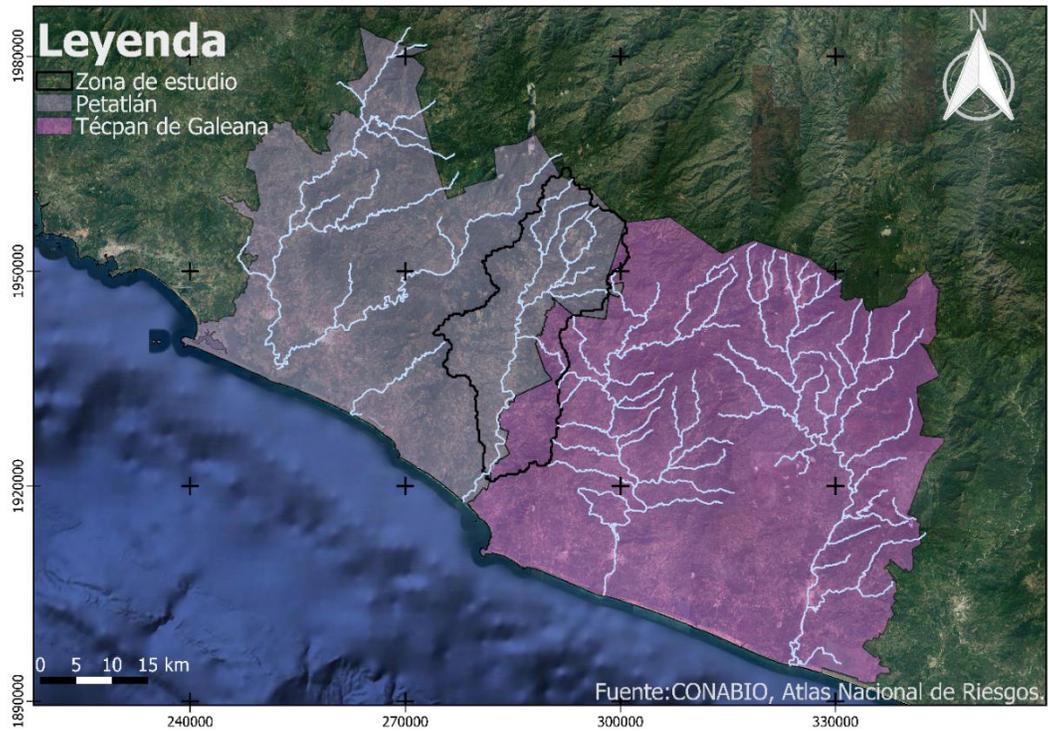
Además, se encuentran las lagunas de Nuxco y El Plan que son perennes y varias intermitentes de poca importancia, los arroyos de Santa Lucía, el Chiquito, Vergel y el Tigre.

Mientras que los principales ríos del municipio de Petatlán son:

- Río Coyuquilla
- Río Petatlán
- Río San Jeronimito

Además de la presencia de arroyos como el Camotal, la Morena, el Comalate y Coyuca; existen también lagunas entre las que se encuentran Santiago y Estero Valentín, Salina el Cuajo y la del Tular.

En la *Figura 12* se muestran los ríos que pasan por los municipios de Técpan de Galeana y Petatlán.



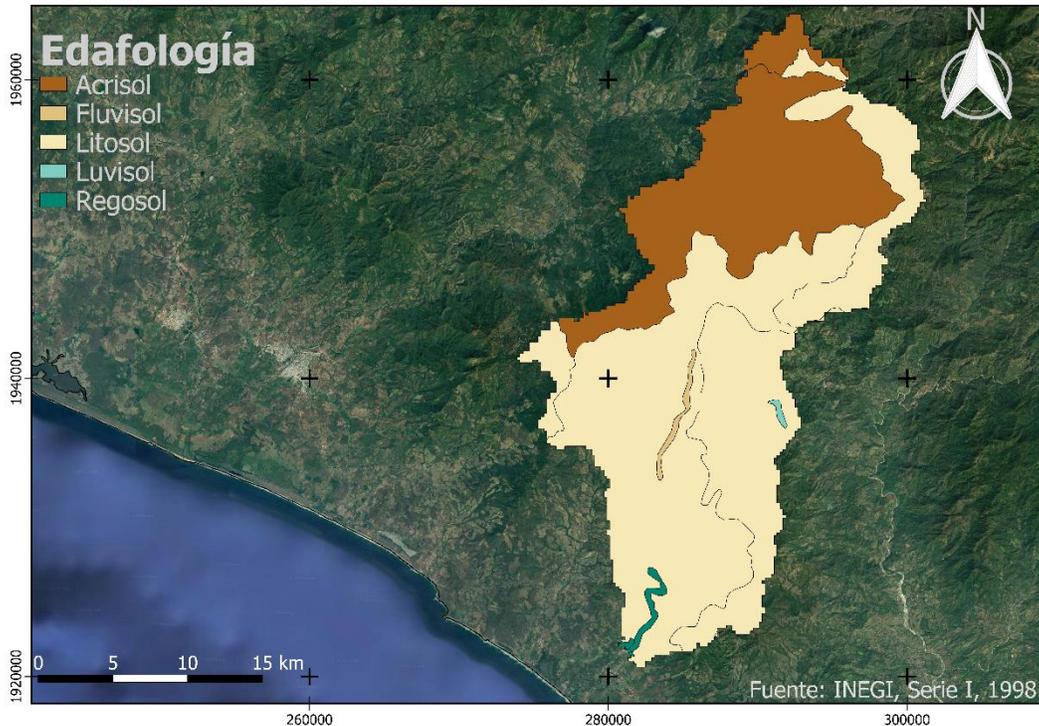
*Figura 12 Ríos importantes del estado de Guerrero.*

## 2.4 Edafología

Los suelos que conforman la zona de estudio son:

- Acrisol
- Cambisol
- Fluvisol
- Leptosol
- Litosol
- Luvisol
- Regosol

El tipo de suelo de la zona de estudio a partir de las series uno (1998) y dos (2007) de INEGI se muestran en la *Figura 13 y 14* respectivamente. En dichas figuras se observa que en el año 2007 no hay presencia de Litosol en la parte baja y media de la cuenca en su lugar se tiene Cambisol, Fluvisol y Leptosol. Mientras que, en la parte alta de la cuenca, la superficie correspondiente al Acrisol pasó a ser Luvisol, mientras que el Regosol se extendió en superficies donde anteriormente había Litosol.



*Figura 13 Edafología, serie I de 1998.*

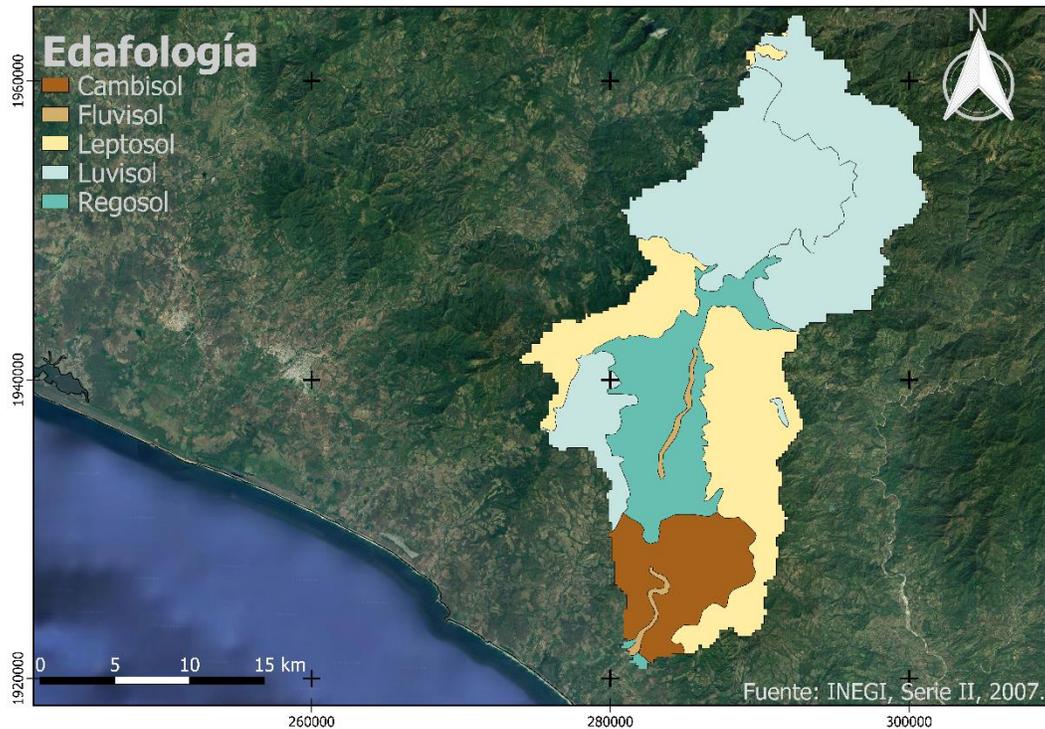


Figura 14 Edafología, serie II de 2007.

## 2.5 Uso y cobertura vegetal del suelo

El uso y cobertura vegetal del suelo correspondiente al año 1986 se observa en la *Figura 15*, el año de 1997 en la *Figura 16*, mientras que en la *Figuras 17 y 18* se presenta la correspondiente a los años de 2003 y 2010, respectivamente, finalmente en la *Figura 19* se observa el año de 2013. A lo largo de los años se puede observar que predomina el pastizal cultivado y el bosque de pino-encino, mientras que la agricultura de temporal es la que tiene menor presencia. Para el año de 2003 la selva mediana subcaducifolia ya no está presente y se tiene selva mediana subperennifolia. En el año 2010 ya no hay agricultura de temporal y en el 2013 se observan asentamientos urbanos.

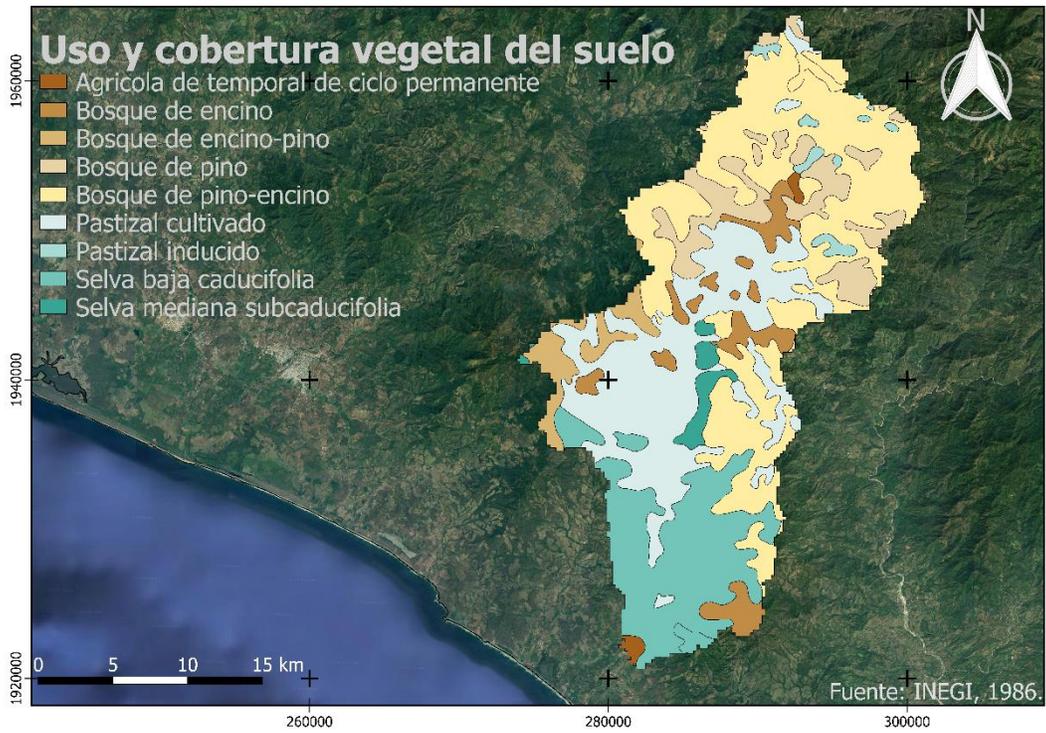


Figura 15 Uso y cobertura vegetal del suelo, 1986.

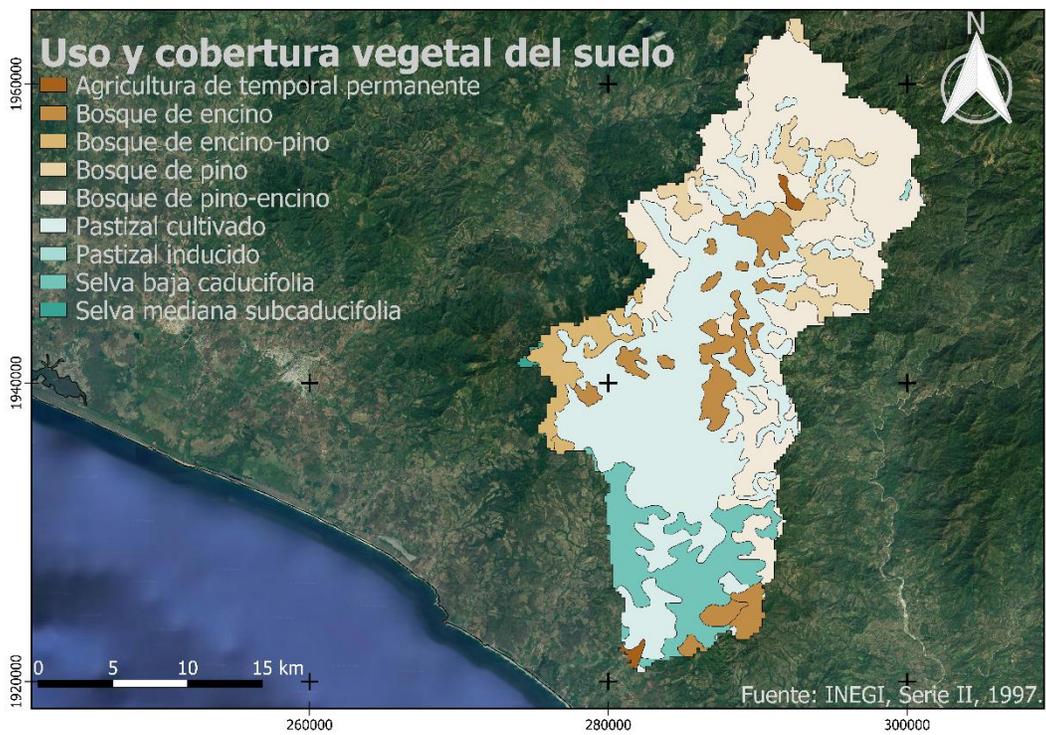


Figura 16 Uso y cobertura vegetal del suelo, serie II, 1997.

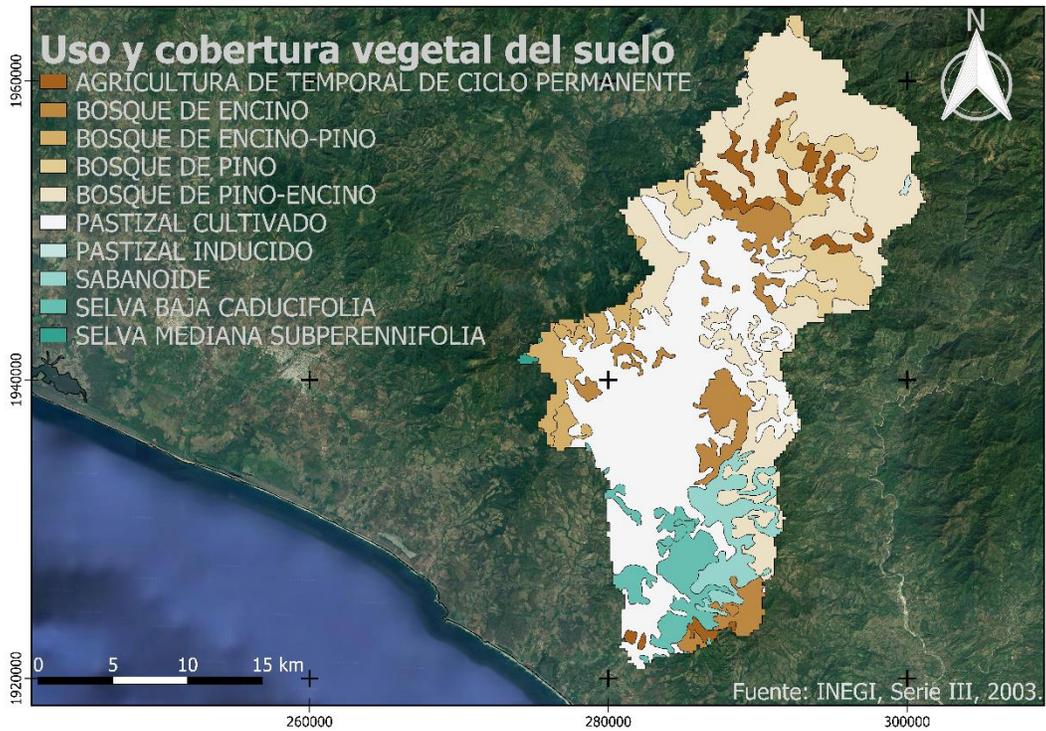


Figura 17 Uso y cobertura vegetal del suelo, serie III, 2003.

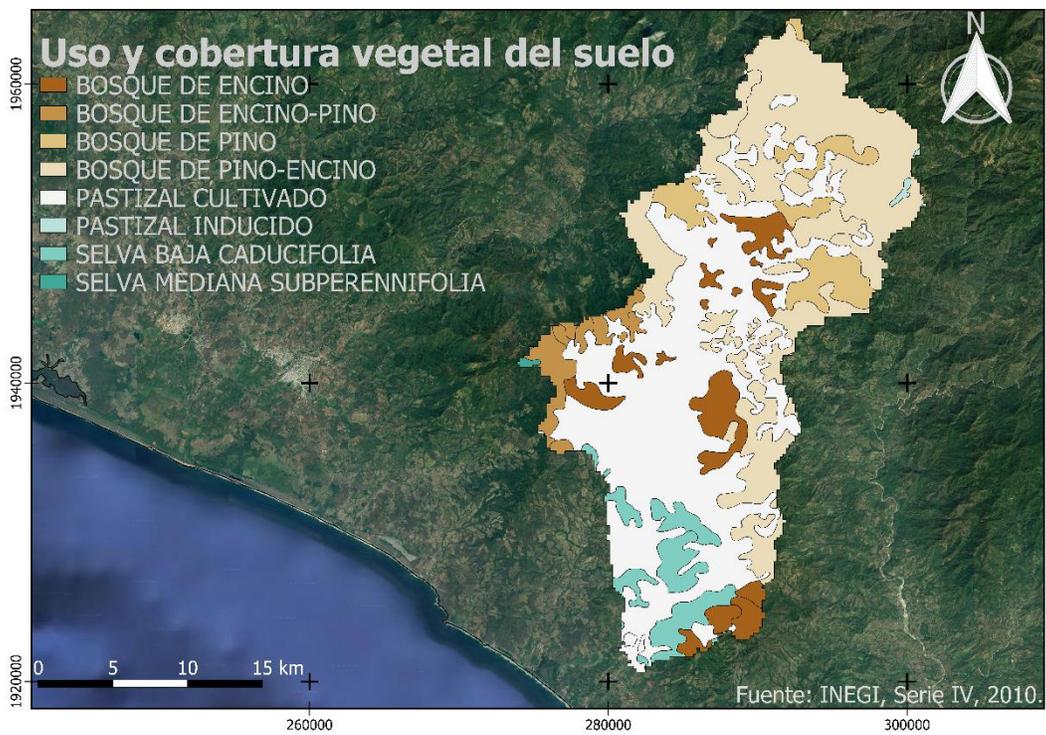


Figura 18 Uso y cobertura vegetal del suelo, serie IV, 2010.

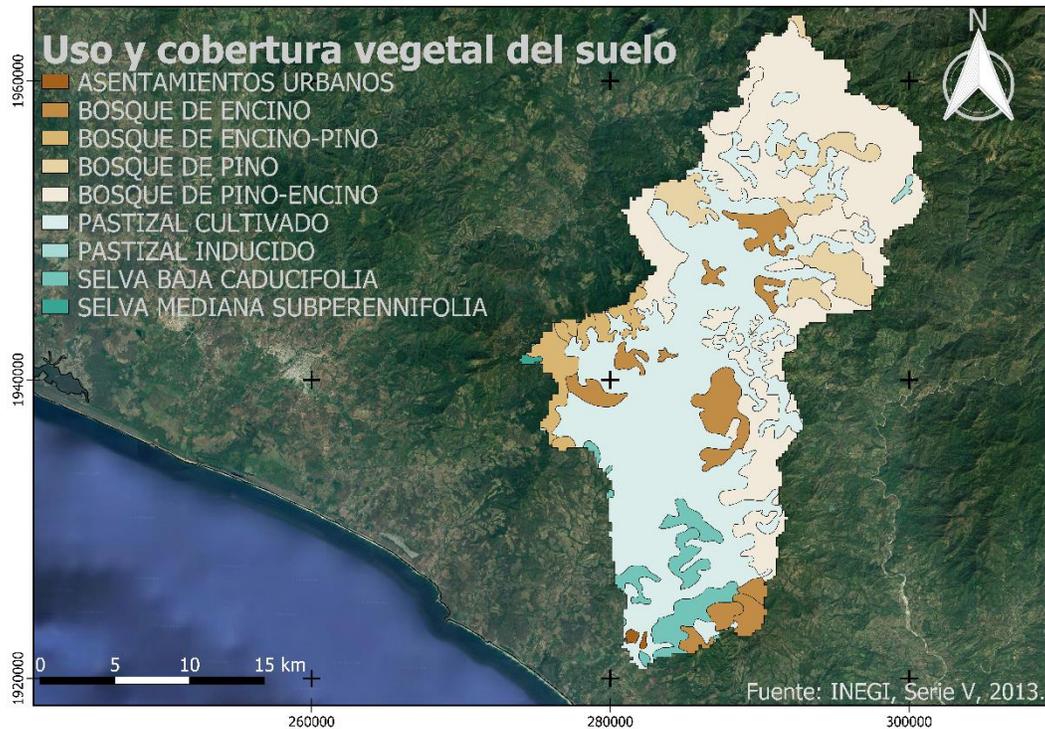


Figura 19 Uso y cobertura vegetal del suelo, serie V, 2013.

## 2.6 Datos hidrológicos

Existen dos tipos de estaciones por medio de las cuales podemos obtener información (Comisión Nacional del Agua, 2016):

- Climatológicas: miden la temperatura, precipitación, evaporación y dirección viento. Estas variables climatológicas varían geográfica y temporalmente, por lo que su medición resulta relevante para la planeación de los recursos hídricos y los estudios hidrológicos. Al 31 de diciembre de 2015, México contaba con 3,160 estaciones climatológicas en operación por la CONAGUA.
- Hidrométricas: miden la cantidad de agua y sedimento que fluye en ríos, canales, tuberías y a la salida de las presas, por lo que sirven para conocer la cantidad disponible del recurso. Al 31 de diciembre de 2015, México contaba con 861 estaciones hidrométricas en operación.

## 2.6.1 Estaciones climatológicas

Se tienen 6 estaciones climatológicas con influencia en la zona de estudio con un periodo de datos entre enero de 1977 y diciembre de 2015. En la *Tabla 9*, se muestra el área de influencia que tiene cada estación y en la *Figura 20*, la ubicación de las estaciones y los polígonos de Thiessen asociados a ellas.

*Tabla 9 Estaciones climatológicas para la zona de estudio.*

<b>Clave</b>	<b>Nombre</b>	<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>
12017	Casas Viejas	234.1
12025	Coyuquilla	104.5
12038	El Porvenir	85.29
12042	Gloria Escondida	3.46
12174	Rancho Nuevo	4.06
12140	San Antonio Tejas	119.89



Figura 20 Estaciones climatológicas.

A partir de los datos diarios de cada estación se determinó el valor máximo anual y posteriormente se calculó la precipitación media (Tabla 10) con el método de los polígonos de Thiessen (Ecuación 8); en algunos casos, fue necesario completar datos, para lo cual se empleó el método de inverso de la distancia (Ecuación 9).

$$P_m = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n P_i A_i \quad (8)$$

Donde:  $A$  área de la cuenca;  $P_i$  precipitación promedio en la estación  $i$ ;  $A_i$  área de influencia de la estación  $i$ ;  $n$  número de estaciones.

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{d^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d^2}} \quad (9)$$

Donde:  $P_i$  precipitación registrada el día en cuestión en la estación auxiliar  $i$ ;  $d$  la distancia entre estaciones.

*Tabla 10 Precipitaciones medias anuales de la zona de estudio.*

<b>Año</b>	<b>P<sub>m</sub> [mm]</b>	<b>Año</b>	<b>P<sub>m</sub> [mm]</b>
1977	68.94	1997	62.86
1978	101.50	1998	105.98
1979	73.16	1999	149.33
1980	77.08	2000	104.56
1981	92.29	2001	116.37
1982	73.94	2002	80.23
1983	106.45	2003	41.07
1984	209.17	2004	69.10
1985	88.09	2005	63.04
1986	127.24	2006	52.45
1987	72.40	2007	69.27
1988	124.93	2008	94.85
1989	157.45	2009	54.13
1990	72.21	2010	70.12
1991	86.73	2011	83.07
1992	132.42	2012	65.27
1993	194.81	2013	102.04
1994	50.20	2014	72.86
1995	82.18	2015	41.16
1996	104.28		

## 2.6.2 Estación hidrométrica

La estación hidrométrica Coyuquilla II, cuenta con un periodo de datos enero de 1954 a diciembre de 1977, enero de 1979 a diciembre de 2005 y de enero de 2007 a diciembre de 2009 de gastos diarios instantáneos, a partir de los cuales se determinaron los gastos máximos anuales (*Tabla 11*).

Tabla 11 Gastos máximos anuales.

Año	Gasto [m³/s]						
1954	39.20	1968	50.09	1983	102.28	1997	221.45
1955	100.00	1969	111.84	1984	677.05	1998	257.62
1956	100.00	1970	107.00	1985	196.34	1999	530.74
1957	94.00	1971	16.94	1986	204.93	2000	195.20
1958	205.60	1972	39.62	1987	78.61	2001	45.04
1959	205.60	1973	152.94	1988	699.41	2002	239.76
1960	167.50	1974	167.23	1989	478.01	2003	94.44
1961	247.77	1975	195.50	1990	156.51	2004	63.99
1962	241.00	1976	326.64	1991	171.10	2005	384.41
1963	157.43	1977	106.30	1992	137.55	2007	707.50
1964	230.40	1979	203.80	1993	375.70	2008	707.50
1965	230.40	1980	342.50	1994	87.09	2009	707.50
1966	105.51	1981	442.00	1995	370.01		
1967	144.17	1982	89.31	1996	446.64		

En la *Figura 21* con la finalidad de conocer la evolución temporal de la  $P_m$  y el  $Q$ , se puede observar que el comportamiento de ambas variables es similar.

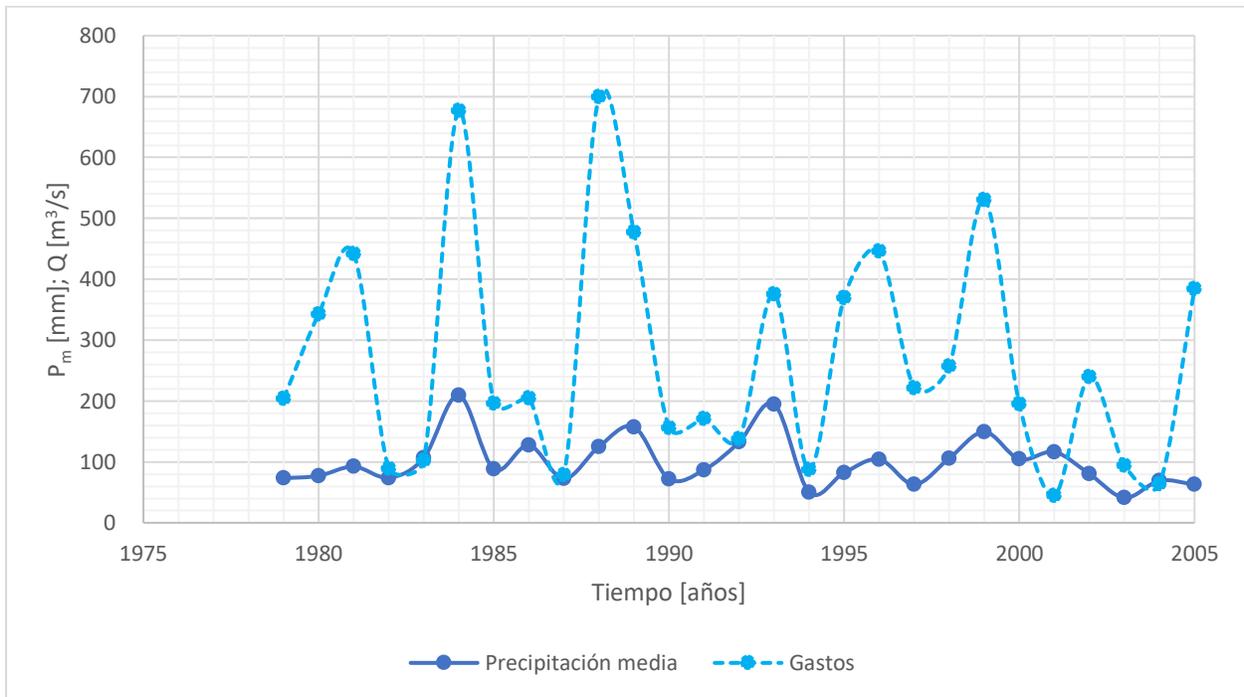


Figura 21 Relación entre la precipitación y los gastos.



## 3. Metodología.

En este capítulo se describe brevemente el proceso manual para calcular el número de curva, el procedimiento y la información necesaria para ejecutar el código numérico y se externan los criterios seguidos para la creación de la base de datos del programa.

### 3.1 Metodología tradicional

La metodología tradicional consiste en un procedimiento manual que generalmente se utiliza para obtener el número de curva medio de la cuenca; a continuación, se enuncia el proceso:

- Paso 1. Se determina el grupo hidrológico (A, B, C o D) a partir de la edafología.
- Paso 2. Se identifica el uso del suelo y su condición a partir del uso de suelo y vegetación.
- Paso 3. Se calcula el área de influencia de cada grupo hidrológico, uso y condición del suelo.
- Paso 4. Con esta información se estima el número de curva medio de la cuenca ponderado con el área, haciendo uso de la *Ecuación 10*.
- 

$$N_p = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_i N_i \quad (10)$$

Donde A es el área total de la cuenca;  $A_i$  es el área del uso y condiciones de suelo y  $N_i$  el número de curva correspondiente al uso y condiciones de suelo de esa zona.

## 3.2 Metodología propuesta

La metodología propuesta consiste en el desarrollo de un código de cálculo en lenguaje de programación fortran basado en información en formato ASCII de ArclInfo; para ello la información requerida es el Modelo Digital del Terreno (MDT.asc), uso y cobertura vegetal del suelo (US.asc) y la edafología de la zona de estudio (TS.asc).

El procedimiento que se realiza para calcular el número de curva consiste primero en disponer de una base de datos que relacione la información de INEGI con el método TR-55 (ver apartado 3.3), de la edafología (TS.dat), textura del suelo (TT.dat) y uso y cobertura del suelo (US.dat)

Posteriormente y una vez definido el tamaño de celda, con el MDT se calcula la pendiente geométrica de cada celda con algún método; en este trabajo por diferencias finitas (Olaya, 2004):

$$S_0 = \sqrt{S_{0x}^2 + S_{0y}^2} \quad (11)$$

Donde:

$$S_{0x} = \frac{z_3 + 2z_4 + z_5 - z_7 - 2z_8 - z_1}{8dxdy} \quad (12)$$

$$S_{0y} = \frac{z_5 + 2z_6 + z_7 - z_1 - 2z_2 - z_3}{8dxdy} \quad (13)$$

Donde  $z_i$  es la elevación de la celda  $i$ .

Enseguida, en función de la pendiente, edafología y uso de suelo de la zona de estudio y las bases de datos previamente definidas, se asigna el número de curva a cada celda;

finalmente se calcula el número de curva ponderado con el área de la cuenca. Si es el caso y si se dispone de la información necesaria, dichos valores se corrigen debido a la lluvia acumulada en los 5 días anteriores al día del evento analizado.

De esta forma, para ejecutar el código numérico se debe tener en una carpeta las bases de datos (TS.dat y US.dat), archivos de apoyo (precipitación.dat y datos.dat), además de los archivos en formato ASCII de la zona de estudio, estos son:

- 1) MDT.asc (Modelo Digital del Terreno).
- 2) TS.asc (Grupo hidrológico).
- 3) US.asc (Uso de suelo y cobertura vegetal).
- 4) TT.asc (Textura de los suelos).

Los archivos deben tener el mismo tamaño de celda para poder ejecutar el código numérico; el desarrollo para utilizar archivos en cualquier tamaño se encuentra en proceso. Una vez ejecutado el código numérico, como resultado se generarán tres archivos:

- NC.res: Contiene el número de curva ponderado de la cuenca.
- NC.asc: Contiene el número de curva de cada celda de la cuenca.
- Proceso.res: Muestra un resumen del proceso que se siguió para asignar el número de curva.

En la *Figura 22* se muestra un esquema del proceso seguido.



Figura 22 Esquema del proceso para calcular el número de curva.

### 3.3 Base de datos

Debido a que la clasificación edafológica y de uso y cobertura vegetal de los suelos de INEGI no concuerda con la establecida en el método del TR-55, es necesario establecer una serie de criterios que permitan relacionar los diferentes tipos de suelos con el régimen hidrológico correspondiente (TS.dat y TT.dat) y de igual forma el uso y cobertura vegetal (US.dat).

### 3.3.1 Criterios para la asignación del grupo de suelo

Para la asignación del grupo de suelo es importante tener en consideración las siguientes características que tienen en común:

- Textura
- Tipo de drenaje.
- Partículas que lo conforman (gravas, arenas, limos y arcillas).
- Velocidad de transmisión del agua.
- Velocidad de infiltración.

Debido a que la infiltración es controlada, principalmente, por las condiciones de la superficie, en la obtención del número de curva será considerando el suelo dominante (NOM\_SUE1).

El proceso de asignación del tipo de suelo se realizó con base en los siguientes puntos y bajo los criterios que se exponen a continuación:

1. **Textura:** La textura presenta una clasificación de tres tipos (gruesa, media y fina). Los suelos pueden tener una textura característica la cual se empleó para agruparlos (*Tabla 12*). En algunos suelos se pueden presentar varias texturas.

Tabla 12 Clasificación de los suelos con base en su textura.

Gruesa	Media	Fina
Andosol	Calcisol	Acrisol
Arenosol	Cambisol	Alisol
Durisol	Chernozem	Cambisol
Fluvisol	Durisol	Chernozem
Histosol	Gipsisol	Durisol
Leptosol	Kastañozem	Gleysol
Umbrisol	Leptosol	Kastañozem
	Litosol	Lixisol
	Phaeozem	Nitisol
	Regosol	Phaeozem
	Solonchak	Planosol
		Plintosol
		Solonetz
		Vertisol

2. **Tipo de drenaje:** El drenaje interno de un suelo es la cualidad determinada por el movimiento del agua a través de él, esto es, representa la capacidad del suelo para desalojar agua y, al mismo tiempo, para conservar un cierto grado de humedad denominado “capacidad de almacenamiento de humedad”. La clasificación de los suelos en función del drenaje interno se presenta a continuación (Instituto Mexicano del Transporte, 1998):

- **Sin drenaje interno:** el agua no circula a través de la masa del suelo. En regiones húmedas, el nivel freático está en la superficie o muy cercano a ella durante la mayor parte del año.
- **Muy lento:** generalmente son suelos básicos ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) debido a su escasa lixiviación, presentan una capa freática alta o un horizonte impermeable, o ambos.
- **Lento:** implica que la saturación de agua se presenta por periodos de una a dos semanas, esto ocurre, particularmente, en regiones templadas húmedas.
- **Medio:** la saturación de agua dura pocos días, el suficiente para no dañar cultivos.

- **Rápido:** limitan la saturación de agua a unas pocas horas, hecho que genera una intensa lixiviación y la tendencia a la acidificación del suelo.
- **Muy rápido:** el suelo nunca llega a saturarse con agua, son suelos ácidos, pobres en bases y ricos en aluminio y hierro. Su nivel freático se encuentra, por lo general, unos metros bajo la superficie. Drenajes de este tipo son características de suelos con textura gruesa, pobres en arcilla, bases y materia orgánica.

En la *Tabla 13* se clasifican los tipos de suelo con base a su tipo de drenaje.

*Tabla 13 Clasificación de los suelos con base en su tipo de drenaje.*

Sin drenaje interno	Muy lento	Lento	Medio	Rápido	Muy rápido
Gleysol	Gleysol Plintosol Solonchak Solonetz	Alisol Calcisol Cambisol Gipsisol Lixisol Luvisol Nitisol Vertisol	Acrisol Arenosol Cambisol Durisol Kastañozem Luvisol Phaeozem Regosol	Arenosol Durisol Regosol	Fluvisol Regosol

### 3. Partículas que lo conforman (gravas, arenas, limos y arcillas).

De acuerdo con la descripción de los tipos de suelo se agruparon los suelos en (*Tabla 14*):

- Arcilla
- Arcilla abundante, arenas muy finas y limos
- Arenas con poco limo y arcilla
- Limos y arenas finas

Hay casos, como los suelos alcalinos o de origen volcánico, en los que es necesario realizar una investigación más detallada sobre sus componentes para agruparlos en los criterios ya mencionados.

Tabla 14 Clasificación de los suelos en función de las partículas que los conforman.

Arcilla	Arcilla abundante, arenas muy finas y limos	Arenas con poco limo y arcilla	Limos y arenas finas
Acrisol	Chernozem	Andosol	Calcisol
Alisol	Kastañozem	Arenosol	Gipsisol
Cambisol	Nitosol	Fluvisol	Leptosol
Gleysol	Phaeozem	Histosol	Litosol
Lixisol	Umbrisol		Regosol
Luvisol			Solonchak
Planosol			
Plintosol			
Vertisol			

Con los puntos anteriores se elaboró una tabla de decisión (*Tabla 15*) que permite la asignación del grupo hidrológico de acuerdo con la USDA, a partir de los tipos de suelo presentes en la edafología de la República Mexicana.

Tabla 15 Tabla de decisión para determinar el grupo hidrológico de suelo que corresponde a la edafología de México.

Tipo de suelo (INEGI)	Grupos hidrológicos de suelo		
	Textura gruesa	Textura media	Textura fina
Gleysol Planosol Plintosol Solonchak Solonetz Acrisol Alisol Cambrisol Gipsisol Lixisol Luvisol Nitosol Vertisol	B	C	D
Andosol Arenosol Calcisol Chernozem Durisol Fluvisol Histosol Kastanozem Leptosol Litosol Phaeozems Regosol Umbrisol	A	B	C

### 3.3.2 Criterios para la asignación de uso de suelo y condición hidrológica

Con base en la información de INEGI, características de cada uso y cobertura vegetal (*Apéndice 3. Uso y cobertura vegetal de los suelos en México*), y la clasificación del TR-55, se propone la siguiente relación entre ambos usos y cobertura vegetal del suelo, *Tabla 16* (Hernández Jimenez, 2014).

*Tabla 16 Agrupación de los usos de suelo en México dentro de los usos de suelo establecidos en el TR-55.*

<b>Clasificación INEGI</b>	<b>Tipo de vegetación INEGI</b>	<b>Uso y cobertura vegetal del suelo TR-55</b>
Áreas forestales	Bosque de encino Bosque de encino-pino Bosque de mezquite Bosque de oyamel Bosque de pino Bosque de pino-encino Bosque de táscate Bosque mesófilo de montaña Matorral subtropical Mezquital tropical Palmar natural Selva alta perennifolia Selva alta subperennifolia Selva baja caducifolia Selva baja espinosa caducifolia Selva baja espinosa subperennifolia Selva baja perennifolia Selva baja subcaducifolia Selva mediana caducifolia Selva mediana perennifolia Selva mediana subcaducifolia Selva mediana subperennifolia	Tierras agrícolas: "Bosques" (Tabla 2-2c)

(Continuación)

Clasificación INEGI	Tipo de vegetación INEGI	Uso y cobertura vegetal del suelo TR-55
Matorral y desiertos	Chaparral Matorral crasicaule Matorral desértico micrófilo Matorral desértico rosetófilo Matorral espinoso tamaulipeco Matorral rosetófilo costero Matorral sarcocaulo Matorral sarcocrasicaule Matorral sarcocrasicaule de neblina Matorral submontano	Vegetación árida y semiárida: "Arbusto o matorral de desierto" (Tabla 2-2d)
	Vegetación de desiertos arenosos Vegetación de dunas costeras Vegetación gipsófila Vegetación halófila Vegetación halófila hidrófila	Vegetación árida y semiárida: "Vegetación herbácea" (Tabla 2-2d)
Pastizales	Pastizal gipsófilo Pastizal halófilo Pastizal natural Pradera de alta montaña Sabana	Tierras agrícolas: "Pastos y praderas" (Tabla 2-2c)
Vegetación inducida	Bosque inducido Palmar inducido	Tierras agrícolas: "Bosques" (Tabla 1c)
	Pastizal inducido Sabanoide	Tierras agrícolas: "Pastos y praderas" (Tabla 2-2c)

(Continuación)

Clasificación INEGI	Tipo de vegetación INEGI	Uso y cobertura vegetal del suelo TR-55
Vegetación hidrófila y cuerpos de agua	Bosque de galería Cuerpo de agua Manglar Popal Selva de galería Tular Vegetación de galería Vegetación de petén Vegetación halófila hidrófila	Área impermeable o cuerpo de agua (Tabla 2-2a)
Cultivos	Agricultura de riego anual Agricultura de riego anual permanente Agricultura de riego anual y semipermanente Agricultura de riego permanente Agricultura de riego semipermanente y permanente	Tierras agrícolas: "Pastos y praderas" (Tabla 2-2c)
	Agricultura de temporal anual Agricultura de temporal anual y permanente Agricultura de temporal anual y semipermanente	Tierras agrícolas cultivadas: "Cultivo en fila" (Tabla 2-2b)
	Agricultura de humedad anual Agricultura de humedad anual y permanente Agricultura de humedad anual y semipermanente Agricultura de humedad permanente Agricultura de humedad semipermanente	Área impermeable o cuerpo de agua (Tabla 2-2a)

### 3.3.3 Asignación del valor de número de curva

Con la asignación correspondiente de los grupos de suelo que se ajustan a la edafología de México y establecidos los usos de suelo y condición hidrológica que más se adapta a las condiciones del país, fue posible asignar un valor de número de curva, valores

establecidos en las tablas del TR-55 (*Apéndice 1. TR-55*). De esta forma, los valores de número de curva que corresponden a las características del país se presentan en la *Tabla 17*, que al igual que las tablas del TR-55 dependen del tipo de vegetación o uso, la condición hidrológica y el grupo de suelo (Hernández Jimenez, 2014).

*Tabla 17 Asignación del número de curva para los usos de suelo que se presenta en la República Mexicana y su correspondencia con el uso de suelo establecido en las tablas del TR-55.*

Clasificación INEGI	Uso y cobertura vegetal del suelo TR-55	Tipo de vegetación INEGI	Condición hidrológica	Número de Curva (NC) por grupo de suelo			
				A	B	C	D
Áreas forestales	Tierras agrícolas: "Bosques"	Bosque de ayarín	Pobre	45	66	77	83
		Bosque de cedro					
		Bosque de encino					
		Bosque de encino-pino					
		Bosque de mezquite					
		Bosque de oyamel					
		Bosque de pino					
		Bosque de pino-encino					
		Bosque de táscate					
		Bosque mesófilo de montaña	Media	36	60	73	79
		Matorral de coníferas					
		Matorral subtropical					
		Mezquital tropical					
		Palmar natural					
		Selva alta perennifolia					
		Selva alta subperennifolia					
		Selva baja caducifolia					
		Selva baja subperennifolia					
		Selva baja espinosa caducifolia	Buena	30	55	70	77
		Selva baja espinosa subperennifolia					
		Selva baja perennifolia					
Selva baja subcaducifolia							
Selva mediana caducifolia							
Selva mediana perennifolia							
Selva mediana subcaducifolia							
Selva mediana subperennifolia							

(Continuación)

Clasificación INEGI	Uso y cobertura vegetal del suelo TR-55	Tipo de vegetación INEGI	Condición hidrológica	Número de Curva (NC) por grupo de suelo			
				A	B	C	D
Matorral y desiertos	Vegetación árida y semiárida: "Arbusto o matorral de desierto"	Chaparral	Pobre	63	77	85	88
		Matorral crasicale					
		Matorral desértico micrófilo					
		Matorral desértico rosetófilo	Media	55	72	81	86
		Matorral espinoso tamaulipeco					
		Matorral rosetófilo costero					
		Matorral sarcocale					
		Matorral sarcocrasicale	Buena	49	68	79	84
		Matorral sarcocrasicale de neblina					
	Matorral submontano						
Mezquital xerófilo	Vegetación árida y semiárida: "Vegetación herbácea"	Vegetación de desiertos arenosos	Pobre	63 <sup>1</sup>	80	87	93
Vegetación de dunas costeras							
Vegetación gipsófila							
Vegetación halófila		Media	55 <sup>1</sup>	71	81	89	
Vegetación halófila hidrófila							
Buena	49 <sup>1</sup>	62	74	85			
Pastizales	Tierras agrícolas: "Pastos y praderas"	Pastizal gipsófilo	Pobre	68	79	86	89
		Pastizal halófilo	Media	49	69	79	84
		Pastizal natural	Buena	39	61	71	78
		Pradera de alta montaña	Protegidos del pastoreo <sup>2</sup>	30	58	71	78
		Sabana					
Vegetación inducida	Tierras agrícolas: "Bosques"	Bosque inducido	Pobre	45	66	77	83
			Media	36	60	73	79
		Palmar inducido	Buena	30	55	70	77
	Tierras agrícolas: "Pastos y praderas"	Pastizal inducido	Pobre	68	79	86	89
			Media	49	69	79	84
			Buena	39	61	74	80
	Sabanoide						

<sup>1</sup>La tabla del TR-55 no considera un NC para un suelo del grupo A, en este caso se asignará los NC de arbustos y matorral de desiertos

<sup>2</sup>Los pastizales con desarrollo de la vegetación PRIMARIO no requieren condición hidrológica y se asignan con los valores de NC correspondientes pastizal protegido, como se marca en la metodología.

(Continuación)

Clasificación INEGI	Uso y cobertura vegetal del suelo TR-55	Tipo de vegetación INEGI	Condición hidrológica	Número de Curva (NC) por grupo de suelo			
				A	B	C	D
Vegetación hidrófila y cuerpos de agua	Área impermeable o cuerpo de agua	Bosque de galería Cuerpo de agua Manglar Popal Selva de galería Tular Vegetación de galería Vegetación de petén Vegetación halófila hidrófila	N/A	98			
Cultivos	Tierras agrícolas: "Pastos y praderas"	Agricultura de riego anual Agricultura de riego anual permanente	Pobre	69	78	84	87
		Agricultura de riego anual y semipermanente Agricultura de riego permanente Agricultura de riego semipermanente y permanente	Buena	64	74	81	84
	Tierras agrícolas cultivadas: "Cultivo en fila"	Agricultura de temporal anual Agricultura de temporal anual y permanente Agricultura de temporal anual y semipermanente	Pobre	63	74	81	84
		Pastizal cultivado	Buena	60	72	80	83
	Área impermeable o cuerpo de agua	Agricultura de humedad anual Agricultura de humedad anual y permanente Agricultura de humedad anual y semipermanente Agricultura de humedad permanente Agricultura de humedad semipermanente	N/A	98			

(Continuación)

Clasificación INEGI	Uso y cobertura vegetal del suelo TR-55	Tipo de vegetación INEGI	Condición hidrológica	Número de Curva (NC) por grupo de suelo			
				A	B	C	D
Zonas Urbanas	Áreas urbanas "Espacios abiertos"	Zona urbana Localidad Asentamientos humanos	N/A	52	70	80	84
Desprovisto de vegetación	Tierras agrícolas: "Brush"	Desprovisto de vegetación	Pobre	48	67	77	83
Sin vegetación aparente	Áreas Urbanas del desierto occidental: "Desierto natural"	Sin vegetación aparente (incluye vegetación efímera de desierto)	N/A	63	77	85	88

N/A: No Aplica

El método del TR-55 al igual que Aparicio, (1992), consideran la pendiente del terreno para la asignación del número de curva. Así, en la *Figura 23* la influencia de la pendiente en la selección del número de curva.

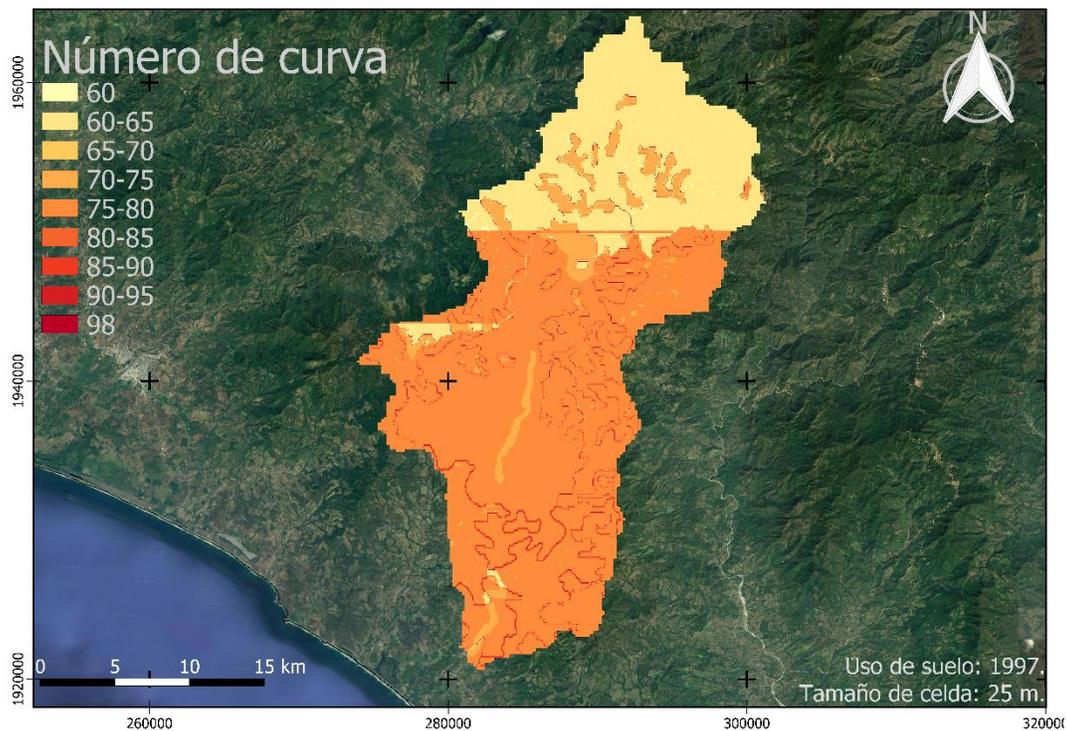
Uso de la tierra y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno, en %	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Sin cultivo	Surcos rectos	—	77	86	91	94
Cultivos en surco	Surcos rectos	> 1	72	81	88	91
	Surcos rectos	< 1	67	78	85	89
	Contorneo	> 1	70	79	84	88
	Contorneo	< 1	65	75	82	86
	Terrazas	> 1	66	74	80	82
	Terrazas	< 1	62	71	78	81
Cereales	Surcos rectos	> 1	65	76	84	88
	Surcos rectos	< 1	63	75	83	87
	Contorneo	> 1	63	74	82	85
	Contorneo	< 1	61	73	81	84
	Terrazas	> 1	61	72	79	82
	Terrazas	> 1	59	70	78	81
Leguminosas o praderas con rotación	Surcos rectos	> 1	66	77	85	89
	Surcos rectos	< 1	58	72	81	85
	Contorneo	> 1	64	75	83	85
	Contorneo	< 1	55	69	78	83
	Terrazas	> 1	63	73	80	83
	Terrazas	< 1	51	67	76	80
Pastizales	-----	> 1	68	79	86	89
	-----	< 1	39	61	74	80
	Contorneo	> 1	47	67	81	88
	Contorneo	< 1	6	35	70	79
Pradera permanente	-----	< 1	30	58	71	78
Bosques naturales	Muy ralo	-----	56	75	86	91
	Ralo	-----	46	68	78	84
	Normal	-----	36	60	70	77
	Espeso	-----	26	52	62	69
	Muy espeso	-----	15	44	54	61
Caminos	De terracería	-----	72	82	87	89
	Con superficie dura	-----	74	84	90	92

Figura 23 Selección del número de curva en función de la pendiente del terreno (Aparicio, 1992).



## 4. Resultados

Para la aplicación de la metodología descrita anteriormente, se empleó el MDT, la edafología y uso de suelo en formato ASCII de la zona de estudio, la cuenca del río Coyuquilla. Considerando el tamaño de celdas con resolución de 25 m, dio lugar al mapa del número de curva (*Figura 24*); resultado de ello se tiene un área de 551.36 km<sup>2</sup>, pendiente media de 0.06589 y el número de curva medio de 75.32.



*Figura 24 Mapa de número de curva empleando la carta edafológica de 1998 y de uso y cobertura vegetal del suelo de 1997 con un tamaño de celda de 25 m.*

Para conocer la influencia del tamaño de celda, la zona de estudio se discretizó en celdas con tamaños de 25 m, 50 m, 100 m, 250 m, 500 m, 1,000 m y 2,500 m (*Tabla 18 y Figura*

25). La discretización de la cuenca con distintos tamaños de celda se puede notar que conforme aumenta tamaño de celda también lo hace el número de curva.

Tabla 18 Número de curva para diferentes tamaños de celda empleando la carta edafológica de 1998 y de uso y cobertura vegetal del suelo de 1997.

$\Delta x$	N
25	75.32
50	75.34
100	75.40
250	75.56
500	75.66
1,000	75.80
2,500	75.82

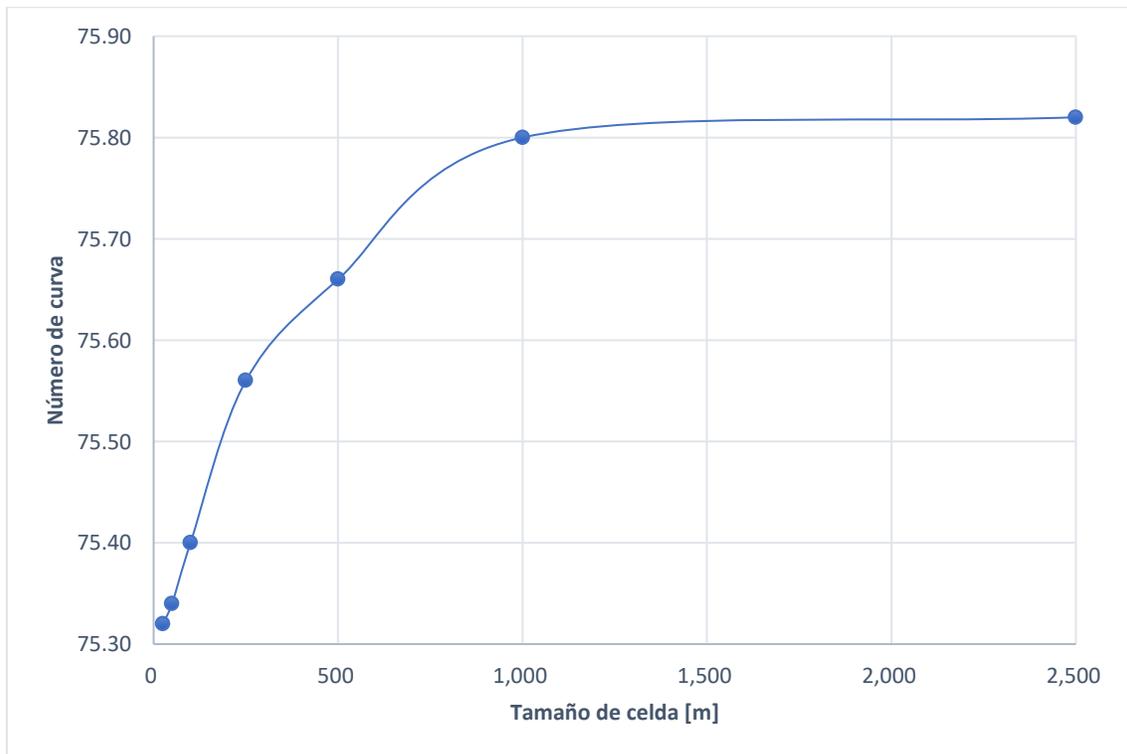


Figura 25 Número de curva para diferentes tamaños de celda empleando la carta edafológica de 1998 y de uso y cobertura vegetal del suelo de 1997.

En el *Apéndice 4. Mapas del número de curva* se encuentran los mapas para los diferentes tamaños de celda y cartas de uso y cobertura vegetal del suelo.

Además, en la *Figura 26* se muestra la evolución temporal del número de curva para diferentes tamaños de celda a través de los años; entre los años de 1986 a 2003 el número de curva fue en aumento y en el 2010 presenta una baja de 2 unidades, esto quiere decir que en 2010 se tiene mayor infiltración que para el resto de los años. Se observa que para todos los tamaños de celda el número de curva va aumentando de forma similar, por lo tanto, el escurrimiento superficial aumente y dado que el área del uso y cobertura vegetal del suelo son muy similares por lo tanto la infiltración será muy parecida independientemente del tamaño de celda. Mientras que en los años de 2010 a 2013 se tiene un decremento de casi dos unidades en el número de curva, comparando con los obtenidos en el periodo de 1986 a 2003. Para los años 2010 y 2013 hay un cambio en el uso y cobertura vegetal del suelo que conforman la cuenca, así como en las áreas, para estos años se tiene un aumento en la presencia del pastizal cultivado y bosque de pino encino, disminución en las selvas, no hay presencia de la agricultura y se inicia a tener áreas pequeñas de asentamientos urbanos. Donde se observa las implicaciones de el decaimiento del número de curva es la cantidad de infiltración, ya que entre más pequeño sea el valor del número de curva mayor infiltración se tendrá.

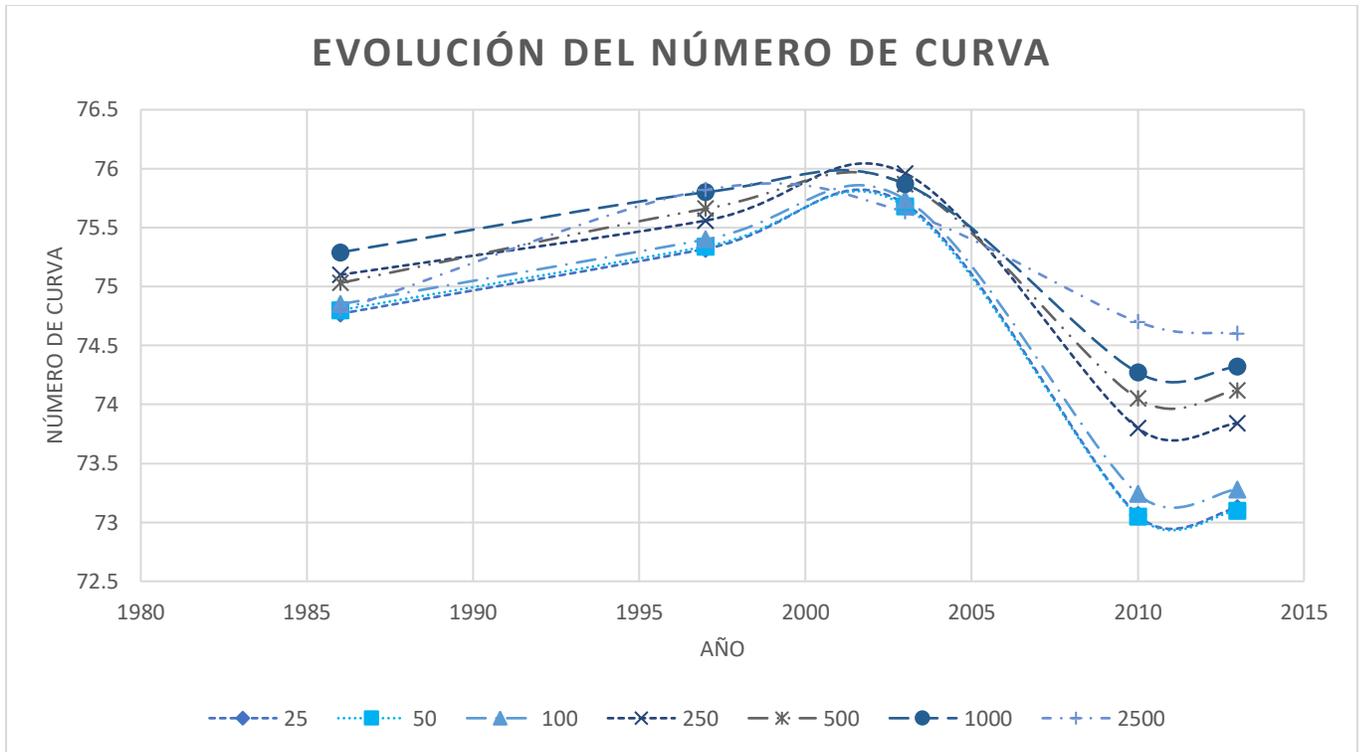


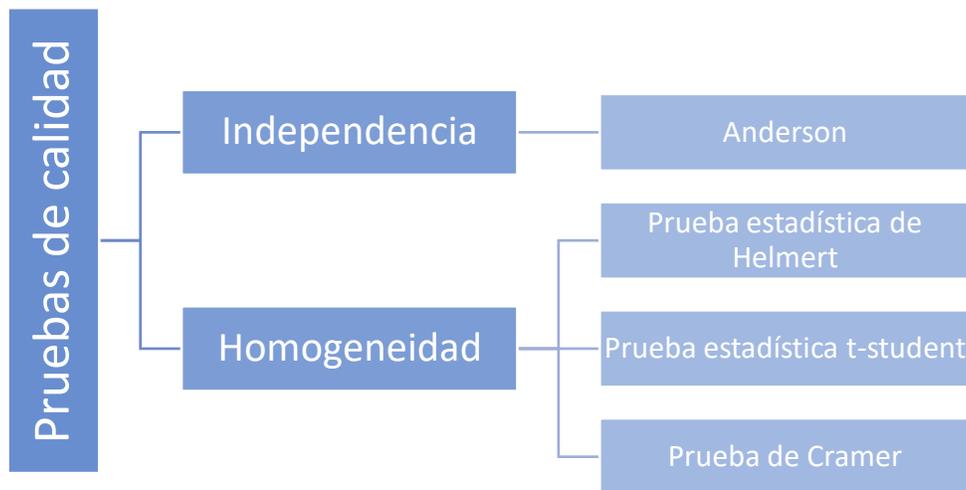
Figura 26 evolución del número de curva.

En las Figuras 45 y 52 mostradas en el Apéndice 4. Mapas del número de curva, para un tamaño de celda de 25 m en los años 2003 y 2010 en la parte media de la cuenca se puede observar que hay un cambio en el número de curva, ya que para el primero se tiene un rango entre 80-85 y para el segundo de 70-75.

## 4.1 Precipitación efectiva

Es la precipitación que no se retiene en la superficie terrestre y tampoco se infiltra en el suelo. Después de fluir a través de la superficie de la cuenca, el exceso de precipitación se convierte en escurrimiento directo a la salida de la cuenca bajo la suposición de flujo superficial hortoniano (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Para analizar la evolución temporal de la precipitación efectiva y de la infiltración, se realizó el ejercicio con una lluvia sintética asociada a un periodo de retorno de 10 años. Para ello, se realizó un análisis de frecuencias para eventos extraordinarios por medio de un código numérico (Aragón Hernández, Análisis Hidrológico de Frecuencias (AHF) V 0.1 (Beta)) donde se realizan pruebas de calidad, como son de homogeneidad e independencia (*Figura 27*) y un análisis estadístico donde se elige la función de distribución de probabilidad (*Figura 28*) con el menor error estándar de ajuste.



*Figura 27 Pruebas de calidad.*

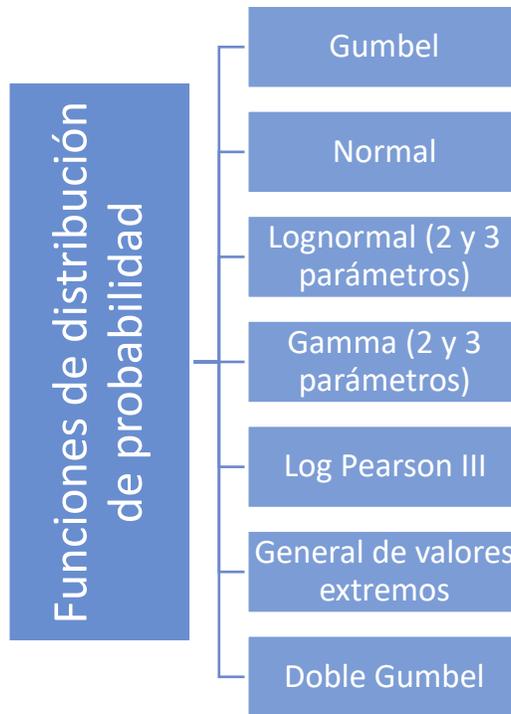
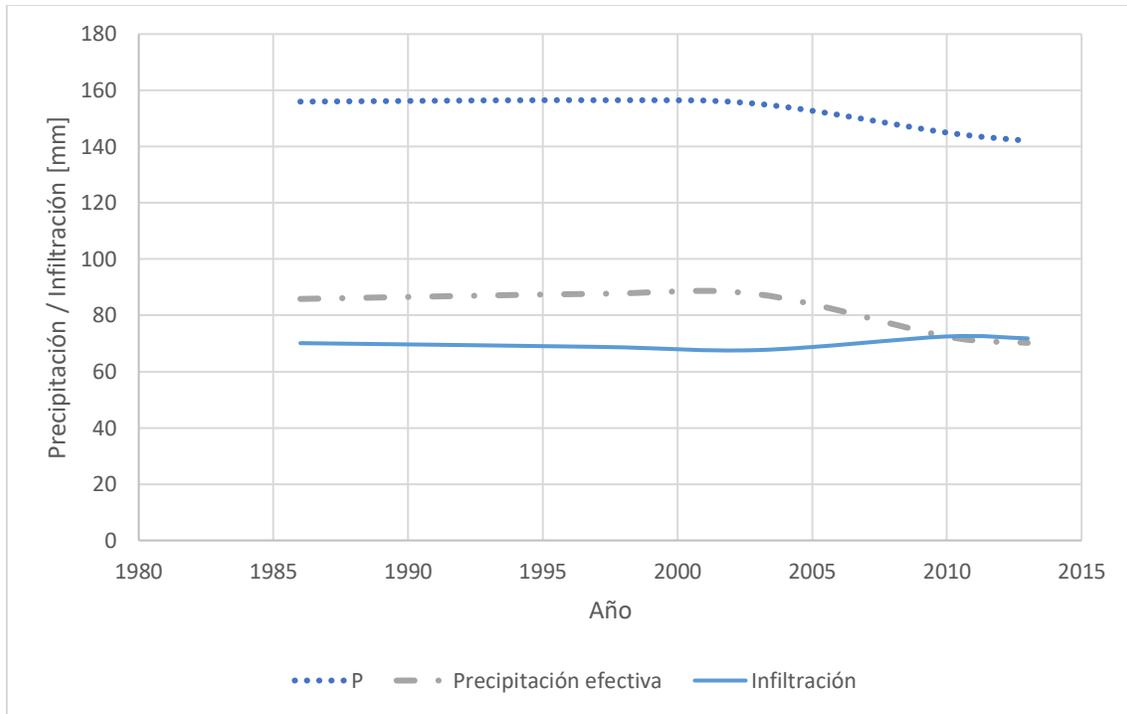


Figura 28 Funciones de distribución de probabilidad.

De esta forma, la precipitación media asociada a un periodo de retorno de 10 años de la cuenca, para distintos años se muestra en la *tabla 19*. Posteriormente, se determinó la precipitación efectiva con la *Ecuación 7* y la infiltración como el resultado de restar a la precipitación asociada a un periodo de retorno de 10 años menos la precipitación efectiva, los resultados se muestran en la *Figura 29* y *Tabla 19*.



*Figura 29 Precipitación efectiva.*

De la figura 29 se observa que la precipitación efectiva aumenta al pasar los años, en función del aumento del número de curva; en el año 2010 dado que el número de curva disminuye, por lo tanto la precipitación efectiva también disminuye. La infiltración tiene un comportamiento inverso a la precipitación efectiva.

Tabla 19 Precipitación efectiva.

Año	P <sub>10</sub> [mm]	N	P <sub>e</sub> [mm]	F [mm]	Función de distribución de probabilidad
1986	155.98	74.77	85.85	70.14	Gamma 3 parámetros por momentos
1997	156.49	75.32	87.67	68.82	Log Pearson III 2 parámetros por momentos
2003	155.17	75.7	87.49	67.68	Log Pearson III 2 parámetros por momentos
2010	144.96	73.06	72.46	72.50	Log Pearson III 2 parámetros por momentos
2013	142.04	73.12	70.22	71.82	Log Pearson III 2 parámetros por momentos

## 4.2 Hidrogramas de diseño

El hidrograma es una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y el escurrimiento de una cuenca de drenaje particular (Chow, 1959). Un tipo de hidrograma particularmente importante:

- **Hidrograma anual:** Es una gráfica de caudal contra el tiempo en un año, muestra el balance de largo plazo de la precipitación, la evaporación y el caudal en una cuenca.

Para realizar el proceso de análisis lluvia-escurrimiento, existen diferentes métodos; en este trabajo se empleará el hidrograma unitario sintético adimensional, el cual obedece a la ecuación siguiente:

$$\frac{q}{q_p} = \left(\frac{t}{t_p}\right)^{3.5} \exp\left[-3.5\left(\frac{t}{t_p} - 1\right)\right] \quad (14)$$

Donde  $q_p$  y  $t_p$  son es el gasto y tiempo pico, según las ecuaciones siguientes:

$$q_p = \frac{0.208A_c}{t_p} \quad (15)$$

Donde:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad (16)$$

$$t_r = 0.6t_c \quad (17)$$

$$d_e = t_c \quad (18)$$

Donde  $q_p$  es el gasto pico, en  $m^3/s/mm$ ;  $A_c$  es el área de la cuenca, en  $km^2$ ,  $t_p$  es el tiempo pico,  $t_r$  el tiempo de retraso y  $t_c$  el tiempo de concentración. Para calcular este último existen diferentes fórmulas, para este trabajo se utilizó la ecuación de Kirpich.

$$t_c = 0.0663 \left[ \frac{L}{\sqrt{S_c}} \right]^{0.77} \quad t_c < 40 \text{ horas} \quad (19)$$

Donde  $t_c$  es el tiempo de concentración, en h; L es la longitud del cauce principal, en km;  $S_c$  es la pendiente del cauce principal.

Sustituyendo en las ecuaciones anteriores la información con la que se cuenta, se tiene:

$$t_c = d_e = 32.29 [h]$$

$$t_r = 19.37 [h]$$

$$t_p = 35.51 [h]$$

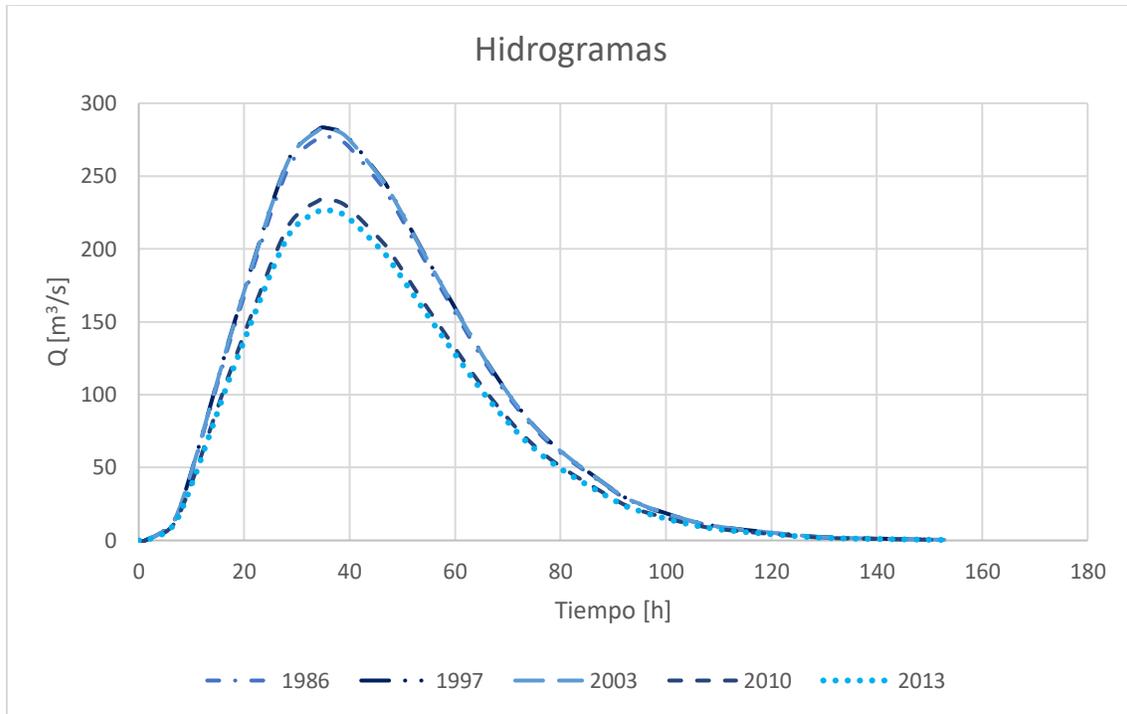
$$q_p = 3.23 \left[ \frac{m^3}{s/mm} \right]$$

Para obtener el hidrograma unitario sintético adimensional se aplica la *Ecuación 14*. Así, en la *Tabla 20* se muestran los resultados.

*Tabla 20 Hidrograma unitario.*

$t/t_p$	$q/q_p$	$t(h)$	$q$ [m <sup>3</sup> /s/mm]
0.00	0.00	0	0
0.04	0.00	1.25	0.000773
0.20	0.06	7.25	0.201176
0.51	0.53	18.25	1.721918
0.80	0.92	28.25	2.965899
0.96	1.00	34.25	3.221835
1.00	1.00	35.51	3.229168
1.11	0.98	39.25	3.171245
1.30	0.87	46.25	2.825411
1.36	0.83	48.25	2.690488
1.58	0.65	56.25	2.092275
1.89	0.41	67.25	1.322246
2.18	0.25	77.25	0.80174
2.57	0.11	91.25	0.361412
2.67	0.09	94.82	0.290765
2.73	0.08	96.82	0.256844
2.92	0.05	103.82	0.164503
3.12	0.03	110.82	0.103694
3.57	0.01	126.82	0.034352
3.82	0.01	135.82	0.017987
4.30	0.00	152.82	0.005089

Una vez que se tiene el hidrograma unitario se obtiene el hidrograma de diseño asociado a un periodo de retorno de 10 años para cada año mediante la multiplicación de la precipitación efectiva por el gasto del hidrograma unitario, teniéndose así los hidrogramas mostrados en la *Figura 30*.



*Figura 30 Hidrogramas asociados a cada precipitación efectiva.*

De la figura anterior se observa, los gastos pico son muy similares para el periodo de 1986 a 2003 y 2010 a 2013, comparando con los valores del número de curva y precipitación efectiva en esos mismos periodos se nota que los valores más altos para estas variables se presentan en el primer periodo y para el segundo se tiene un decremento.



## 5. Conclusiones

La realización de estudios hidrológicos requiere el análisis de diferentes variables, esto lleva al uso de programas computacionales que ayudan a realizar de manera más eficiente los procesos en comparación con procedimientos manuales. Además, de que es más sencillo hacer un análisis histórico de dichas variables y así poder tener resultados más certeros.

En este trabajo se presenta y aplica de forma exitosa el desarrollo de una herramienta que permite el cálculo del área de la cuenca y número de curva, tanto a nivel de celda como a nivel de cuenca, lo cual la hace de gran utilidad en aplicaciones hidrológicas, tanto con modelos de parámetros agregados y distribuidos.

Al automatizar algunos de los procesos involucrados, la convierten en una herramienta cómoda y eficaz a diferencia del procedimiento manual que generalmente se realiza con el apoyo de Sistemas de Información Geográfica.

Los cambios en el uso y cobertura vegetal de los suelos resultan un factor importante en la infiltración, ya que el avance de la urbanización provoca que se tengan menos espacios con terrenos naturales y por lo tanto exista una disminución en la infiltración y aumento del escurrimiento.

Los resultados que se obtienen son de gran utilidad, ya que son insumos en los modelos lluvia-escurrimiento, ya sea de parámetros agregados o distribuidos; ello se demostró con las aplicaciones mostradas. De aquí la importancia de impulsar los temas de programación en la práctica de cualquier ingeniería, para poder automatizar procesos causantes de tiempos de elaboración largos, logrando eficiencia y tiempos cortos en el cálculo de éstos.

La aplicación realizada a la cuenca del río Coyuquilla muestra que el comportamiento del número de curva, precipitación efectiva y el gasto pico es bastante similar, los valores máximos y mínimos se encuentran en los mismos periodos de años.

En la determinación del número de curva, una limitación es la obtención de las cartas edafológicas y de uso y cobertura vegetal del suelo debido a que el lapso entre los años disponibles llega a ser muy amplio, ausente o con datos faltantes. Para solventar dicha limitante los estudios futuros se deben centrar en el uso y análisis de imágenes de satélite.

## 6. Referencias

- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa.
- Aragón Hernández, J. L. (s.f.). *Análisis Hidrológico de Frecuencias (AHF) V 0.1 (Beta)*. Departamento de Hidráulica, DICyG, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Aragón Hernández, J. L., Camacho Moreno, M. F., & García Calva, K. (Noviembre de 2018). Número de curva. Estimación sistematizada y aplicaciones. *XXV Congreso Nacional de Hidráulica*.
- Bouzas, V. (29 de Octubre de 2014). *TYS Magazine*. Recuperado el 25 de Agosto de 2019, de <http://www.tysmagazine.com/los-mejores-software-libre-gis/>
- Campos Aranda, D. F. (2007). *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*. San Luis Potosí: UNAM, Instituto de Ingeniería.
- Chow, V., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGrawHill.
- Comisión Nacional del Agua. (2016). Atlas Nacional del Agua en México. Ciudad de México.
- EcuRed*. (s.f.). Recuperado el 9 de Enero de 2020, de [https://www.ecured.cu/Sistema\\_de\\_coordenadas\\_geogr%C3%A1ficas](https://www.ecured.cu/Sistema_de_coordenadas_geogr%C3%A1ficas)
- Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires*. (s.f.). Recuperado el 12 de Noviembre de 2019, de <https://www.agro.uba.ar/catedras/edafologia>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2014). *Base referencial mundial del recurso del suelo*. Roma.
- H. Ayuntamiento de Petatlán. (s.f.). *Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2019, de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM12guerrero/municipios/12048a.html>

- H. Ayuntamiento de Tecpan de Galeana. (s.f.). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. Recuperado el 15 de Mayo de 2019, de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM12guerrero/municipios/12057a.html>
- Hernández Jimenez, F. (2014). *Obtención del número de curva (NC) para la República Mexicana mediante el uso de sistemas de información geográfica, aplicando la metodología del TR-55*. Ciudad de México.
- Instituto Mexicano del Transporte. (1998). Génesis, identificación y uso de los suelos de México. En *Doc. Técnico N° 19*. Oro.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Diccionario de datos edafológicos Escala 1:250 000 (Versión 4)*. Ciudad de México.
- Olaya, V. (2004). Hidrología computacional y modelos digitales del terreno. Creative commons attribution share alike.
- United States Department of Agriculture (USDA). (1986). *Urban Hydrology for small watersheds Technical Release 55*.

# Apéndice 1. TR-55

Figura 2.3 Número de curva compuesto con área impermeable conectada.

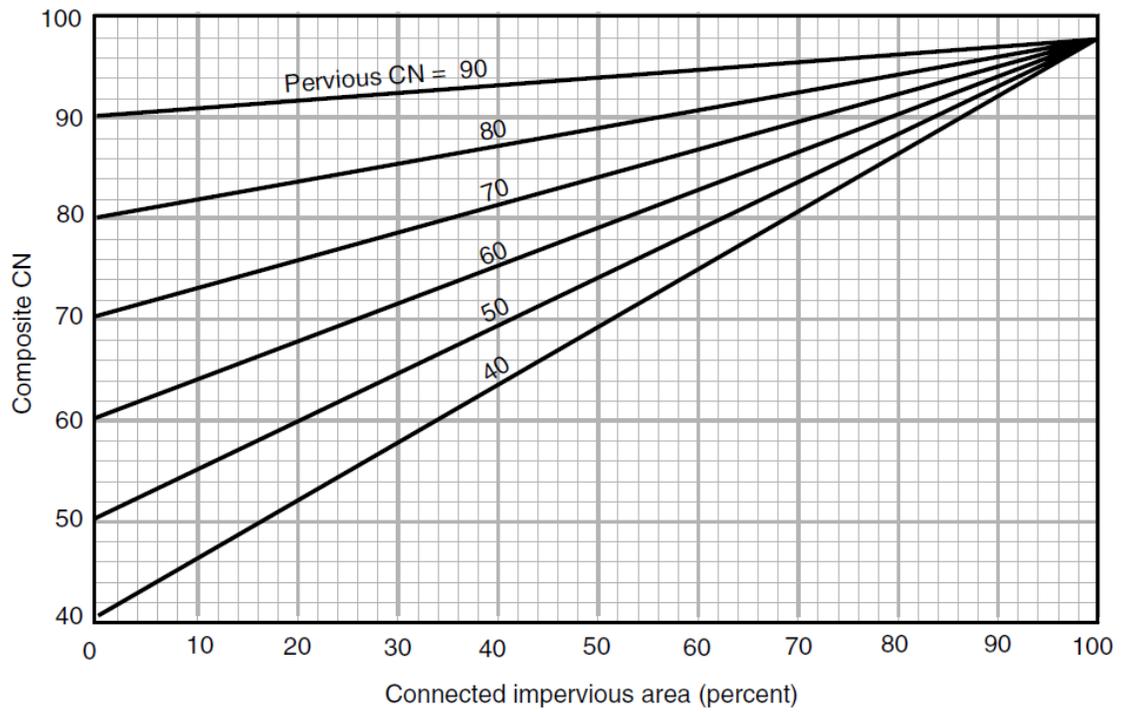


Figura 2.4 Número de curva compuesto con áreas impermeables no conectadas y área impermeable total inferior al 30%.

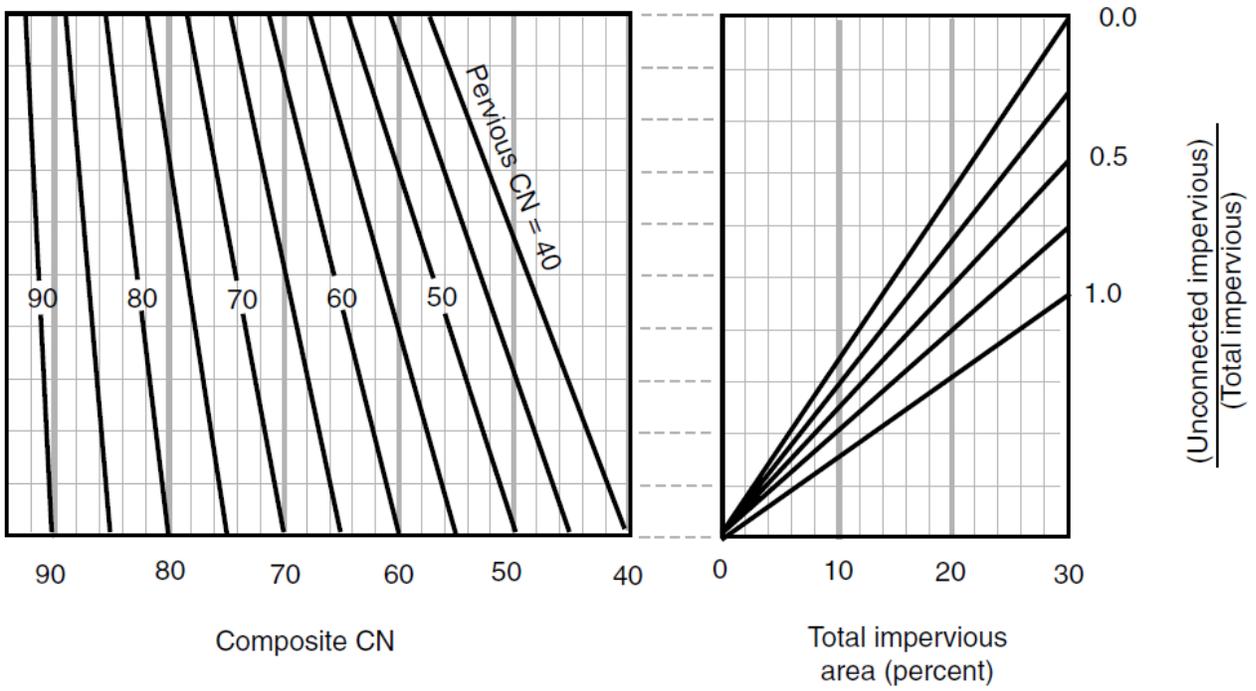


Tabla 2-2a. Número de curva para áreas urbanas.<sup>1</sup>

Descripción de la cobertura	Número de curva			
	A	B	C	D
<b>Tipo de cobertura y condición hidrológica</b>				
<b>Áreas urbanas desarrolladas completamente (vegetación establecida):</b>				
Espacios abiertos (césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.) <sup>3</sup> :				
Condición mala (cobertura vegetal <50%)	68	79	86	89
Condición regular (cobertura vegetal del 50% al 75%)	49	69	79	84
Condición buena (cobertura vegetal >75%)	39	61	74	80
<b>Áreas impermeables:</b>				
Estacionamientos pavimentados, tejados, calzadas (excluyendo derecho de vía)	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentadas con cunetas y alcantarillado (excluyendo derecho de vía)	98	98	98	98
Pavimentadas con zanjas abiertas (incluyendo derecho de vía)	83	89	92	93
Caminos de grava (incluyendo derecho de vía)	76	85	89	91
Caminos de terracería	72	82	87	89
<b>Áreas urbanas del desierto occidental:</b>				
Desierto natural (sólo áreas permeables) <sup>4</sup>	63	77	85	88
Desierto artificial (con barreras de maleza impermeable, matorral desértico con 2.5 a 5 cm de arenas o gravas y bordes de cuenca).	96	96	96	96
<b>Distritos urbanos:</b>				
Promedio porcentual de área impermeable. <sup>2</sup>				
Áreas comerciales y de negocios (85% impermeable)	89	92	94	95
Áreas industriales (72% impermeable)	81	88	91	93
<b>Distritos residenciales por tamaño promedio de lote:</b>				
Promedio porcentual de área impermeable. <sup>2</sup>				
506 m <sup>2</sup> 65%	77	85	90	92
1,012 m <sup>2</sup> 38%	62	75	83	87
1,349 m <sup>2</sup> 30%	57	72	81	86
2,024 m <sup>2</sup> 25%	54	70	80	85
4,047 m <sup>2</sup> 20%	51	68	79	84
8,094 m <sup>2</sup> 12%	46	65	77	82
<b>Áreas urbanas en desarrollo:</b>				
Áreas recién clasificadas (sólo áreas permeables, sin vegetación) <sup>5</sup>	77	86	91	94

<sup>1</sup>Condición de escurrimiento medio, e I<sub>a</sub>=0.2S

<sup>2</sup>Muestra el promedio porcentual de área impermeable que fue utilizado para desarrollar un número de curva. Otros supuestos son los siguientes:

- Áreas impermeables directamente conectados con el sistema de drenaje,
- Áreas impermeables tienen un NC de 98, y
- Las áreas permeables son consideradas equivalentes a espacios abiertos en condición hidrológica buena.

<sup>3</sup>Muestra el número de curva que es equivalente para aquellos pastos. Un número de curva compuesto puede ser calculado por otras combinaciones de espacio abierto-tipo de cobertura.

<sup>4</sup>Un número de curva compuesto para paisaje de desierto natural debería ser calculado utilizando las figuras 2.3 o 2.4 basadas en el porcentaje de área impermeable (N=98) y el número de curva para el porcentaje área permeable. El número de curva para área permeable se asume al equivalente para desierto en condición hidrológica pobre.

<sup>5</sup>Un número de curva compuesto usado para designar medidas temporales durante la clasificación y construcción puede ser usando la figura 2.3 o 2.4 basados en el grado de desarrollo (porcentaje de área impermeable) y el número de curva para las nuevas áreas permeables clasificadas.

Tabla 2-2b. Número de curva para tierras agrícolas cultivadas<sup>1</sup>

Descripción de la cobertura			Número de curva			
Tipo de cobertura	Tratamiento <sup>2</sup>	Condición hidrológica <sup>3</sup>	A	B	C	D
Barbecho	Suelo desnudo	----	77	86	91	94
	Residuos de cultivo de cobertura (CR)	Pobre	76	85	90	93
		Buena	74	83	88	90
Cultivos en fila	Fila recta (SR)	Pobre	72	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	SR+CR	Pobre	71	80	87	90
		Buena	64	75	82	85
	Contorneados (C)	Pobre	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	C+CR	Pobre	69	78	83	87
		Buena	64	74	81	85
	Contorneados y Terrazas (C&T)	Pobre	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
	C&T +CR	Pobre	65	73	79	81
		Buena	61	70	77	80
Grano pequeño	Fila recta (SR)	Pobre	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	SR+CR	Pobre	64	75	83	86
		Buena	60	72	80	84
	Contorneados (C)	Pobre	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	C+CR	Pobre	62	73	81	84
		Buena	60	72	80	83
	Contorneados y Terrazas (C&T)	Pobre	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
	C&T +CR	Pobre	60	71	78	81
		Buena	58	69	77	80
Cerca de semillas de leguminosa o legumbres por difusión	Fila recta (SR)	Pobre	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	Contorneados (C)	Pobre	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
	Contorneados y Terrazas (C&T)	Pobre	63	73	80	83
		Buena	51	67	79	80

<sup>1</sup>Condición de escurrimiento medio, y  $I_a=0.2S$

<sup>2</sup>Residuos de cultivo de cobertura aplica sólo si el residuo es al menos el 5% de la superficie a lo largo del año.

<sup>3</sup>La condición hidráulica está basada en la combinación de factores que afectan el escurrimiento y la infiltración, incluyendo:

- a) Densidad y cubierta de áreas vegetativas,
- b) Cantidad cubierta en todo el año,
- c) Cantidad de hierba o cerca de semilla de leguminosa,
- d) Porcentaje del residuo que cubre la superficie de la tierra (buena  $\geq 20\%$ ), y
- e) Grado de rugosidad de la superficie.

Pobre: factores que perjudican la infiltración y tienden a incrementar el escurrimiento.

Buena: factores que mejoran los promedios de infiltración y tienden a decrecer el escurrimiento.

Tabla 2-2c. Número de curva (NC) para tierras agrícolas.<sup>1</sup>

Descripción de la cobertura		Número de curva			
Tipo de cobertura	Condición hidrológica	A	B	C	D
Pasturas, praderas o semejantes (áreas continuas de forraje para pastoreo). <sup>2</sup>	Pobre	68	79	86	89
	Media	49	69	79	84
	Buena	39	61	74	80
Prados (pastos continuos, protegida del pastoreo y generalmente cortado para heno).	---	30	58	71	78
Brush (maleza-mala hierba-hierba mezclada con brush como elemento principal): maleza con vegetación de característica arbustiva y leñosa. <sup>3</sup>	Pobre	48	67	77	83
	Media	35	56	70	77
	Buena	30 <sup>4</sup>	48	65	73
Bosques combinados con pasto (huerto o árboles cultivados). <sup>5</sup>	Pobre	57	73	82	86
	Media	43	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Bosques. <sup>6</sup>	Pobre	45	66	77	83
	Media	36	60	73	79
	Buena	30 <sup>4</sup>	55	70	77
Granjas-edificios, calles, caminos y predios circundantes.	---	59	74	82	86

<sup>1</sup>Condición de escurrimiento medio, y  $la=0.2S$

<sup>2</sup> Pobre: <50% de cobertura del terreno o fuertemente pastoreado con poco mantillo.

Media: 50 a 75% de cobertura del terreno o no tan pastoreado.

Buena: >75% de cobertura del terreno y ligeramente o sólo ocasionalmente pastoreado.

<sup>3</sup> Pobre: <50% de cobertura del terreno.

Media: 50 a 75% de cobertura del terreno.

Buena: >75% de cobertura del terreno.

<sup>4</sup>El número de curva actual es menor que 30; usar  $N=30$  para cálculos de escurrimiento.

<sup>5</sup>Los números de curva mostrados fueron calculados para áreas cubiertas con 50% bosque y 50% hierba (pasto). Otra combinación de condiciones puede ser calculada de los números de curva para bosques y pasturas.

<sup>6</sup> Pobre: áreas con hojarasca (basura forestal), pequeños árboles, y vegetación de brush que son destruidos por un intenso pastoreo o la quema regular.

Media: bosques que son pastoreados pero no quemados, y algunas hojarasca cubriendo el suelo.

Buena: bosques protegidos del pastoreo, y la hojarasca y vegetación de brush cubren adecuadamente el suelo.

Tabla 2-2d. Número de curva para tierras áridas y semiáridas.<sup>1</sup>

Descripción de la cobertura		Número de curva			
Tipo de cobertura	Condición hidrológica. <sup>2</sup>	A <sup>3</sup>	B	C	D
Vegetación herbácea (mezcla de hierba, mala hierba y arbustos leñosos (brush) de bajo crecimiento, siendo este último el de menor elemento).	Pobre		80	87	93
	Media		71	81	89
	Buena		62	74	85
Roble-álamo temblón (vegetación leñosa de montaña mezcla de roble, caoba de montaña, maple y otros con características leñosas).	Pobre		66	74	79
	Media		48	57	63
	Buena		30	41	48
Piñón-enebro (piñón, enebro o ambos; hierba de sotobosque).	Pobre		75	85	89
	Media		58	73	80
	Buena		41	61	71
Artemisa con hierba de sotobosque.	Pobre		67	80	85
	Media		51	63	70
	Buena		35	47	55
Arbustos o matorral de desierto (plantas principales que incluyen palo verde, mezquite, saltbush, jarrilla, prieto y cactus).	Pobre	63	77	85	88
	Media	55	72	81	86
	Buena	49	68	79	84

<sup>1</sup>Condición de escurrimiento medio, y  $la=0.2S$ .

<sup>2</sup> Pobre: <30% de cobertura (hojarasca, hierba y dosel (copa del árbol) de características leñosas).

Media: 30 a 70% de cobertura.

Buena: >70% de cobertura.

<sup>3</sup>Los números de curva para el grupo A han sido desarrollados solo para arbustos de desierto.

## Apéndice 2. Suelos

De acuerdo con la FAO se tienen 32 tipos de suelo a continuación, se presenta una breve descripción de ellos:

1. **Acrisol:** suelo agrio y muy ácido, se caracterizan por tener acumulación de arcillas en el subsuelo. Son moderadamente susceptibles a la erosión.
2. **Alisol:** son suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que el suelo superficial como resultado de procesos edofogenéticos, tienen baja saturación de bases, con arcillas de alta actividad en todo el horizonte árgico.
3. **Andosol:** suelos de origen volcánico de color negro, alta capacidad para retener humedad. Son muy susceptibles a la erosión eólica.
4. **Anthrosol:** suelos que han sido modificados profundamente por actividades humanas, tales como la adición de materia orgánica o mineral, carbón vegetal o residuos domésticos, o el riego y la labranza.
5. **Arenosol:** suelos arenosos de textura gruesa (diámetro de partícula >2.0 mm) con más del 65% de arenas, poseen alta permeabilidad. Son suelos poco desarrollados tanto residuales como transportados.
6. **Calcisol:** los calcisoles acomodan suelos en los cuales hay una acumulación secundaria sustancial de calcáreo, están muy extendidos en ambientes áridos y semiáridos que presentan vegetación natural escasa y dominada por arbustos y árboles xerófitos y/o pastos efímeros.
7. **Cambisol:** suelo joven, se encuentran en cualquier tipo de vegetación o clima, menos en suelos áridos, con pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso; con espesores mayores a 25 cm y son de material parental de textura media a fina derivados de un amplio rango de rocas.
8. **Chernozem:** literalmente tierra negra, son suelos alcalinos ubicados en zonas semiáridas o de transición hacia climas más lluviosos. Son suelos que sobrepasan comúnmente los 80 cm de profundidad con una capa superior rica en materia orgánica y en nutrientes, con alta acumulación de caliche suelto o ligeramente cementado en el subsuelo.

9. **Crysol:** suelos minerales formados en un ambiente de permafrost. Las capas subsuperficiales (horizonte crítico) se congelan de forma permanente, y si está presente, el agua aparece en forma de hielo.
10. **Durisol:** principalmente asociados con superficies antiguas en ambientes áridos y semiáridos y acomodan suelos muy someros a moderadamente profundos, moderadamente bien a bien drenados.
11. **Ferrasol:** representan los clásicos, profundamente meteorizados, suelos rojos o amarillos de los trópicos húmedos. Estos suelos tienen límites de horizontes difusos, un conjunto de arcillas dominado por arcillas de baja actividad (principalmente caolinita) y un alto contenido de sesquióxidos.
12. **Fluvisol:** suelo de río, poco desarrollados, medianamente profundos, estructura débil o suelta. Presenta capas alternas de arenas con piedras o gravas redondeadas. Son muy permeables. Suelos arenosos, ligeros. Textura gruesa.
13. **Gipsisol:** presenta una acumulación secundaria sustancial de yeso. Estos suelos se encuentran en la parte más seca de la zona de clima árido, lo que explica que los sistemas líderes de clasificación de suelos hayan denominado a muchos de ellos como suelos de desierto.
14. **Gleysol:** suelo pantanoso, en México predominan más los suelos pantanosos con textura arcillosa, se encuentra en zonas donde se acumula y estanca el agua la mayor parte del año, con profundidad dentro de los 50 cm, tienen textura fina, por lo que su drenaje interno es lento. Son de color pardo a gris y su contenido de materia orgánica va de moderado a alto.
15. **Histosol:** literalmente, suelos de tejidos orgánicos, con contenidos muy altos de materia orgánica (más del 20 % en peso), generalmente de color negro, esponjoso, ligero y con alta capacidad de retención de humedad. Se encuentran restringidos a sitios donde se acumulan desechos orgánicos, tales como pantanos y lechos de antiguos lagos. Xochimilco es un ejemplo representativo en el país. Frecuentemente tienen olor a podrido y una importante acumulación de salitre.
16. **Kastañozem:** estos suelos tienen un perfil similar al de Chernozem, pero el horizonte superficial rico en humus es de menor espesor y no tan oscuro como el

de los Chernozems y muestran acumulaciones de carbonatos secundarios más prominentes.

17. **Leptosol:** suelos muy someros sobre roca continua y suelos extremadamente gravillosos y/o pedregosos, de origen parental procedente de varios tipos de roca continua o de materiales no consolidados con menos de 20 por ciento (en volumen) de tierra fina y es particular de zonas fuertemente erosionadas.
18. **Lixisol:** comprenden suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos (especialmente migración de arcilla) llevando a un horizonte árgico en el subsuelo.
19. **Luvisol:** suelo con acumulación de arcilla que se presenta en zonas templadas o tropicales lluviosas. Los luvisoles tienen arcillas de alta actividad en todo el horizonte árgico y alta saturación con bases a ciertas profundidades. Suelos con alta susceptibilidad a la erosión.
20. **Nitosol:** suelos que se presentan en zonas como Yucatán y Campeche, de color rojizo muy brillante, enriquecidos de arcilla en todo su espesor, suelos muy profundos de por lo menos 150 cm de profundidad. Son producto de la meteorización muy fina de rocas y son ricos en hierro (Fe).
21. **Phaeozem:** acomodan suelos de pastizales relativamente húmedos y regiones forestales en clima moderadamente continental. Los Phaeozems son muy parecidos a Chernozems y Kastañozems pero están más intensamente lixiviados.
22. **Planosol:** generalmente, característico de relieves planos que se inundan en alguna parte del año, medianamente profundos, entre 50 y 100 cm. Tiene subsuelo muy arcilloso, o bien roca o tepetate, todos impermeables, lo que disminuye el drenaje considerablemente. Suelo residual de origen aluvial y coluvial arcilloso, lentamente permeables y susceptibles a la erosión.
23. **Plintisol:** suelos con plintita, petroplintita o pisolitos. Tanto la petroplintita como los pisolitos desarrollan a partir de la plintita por endurecimiento. La formación de plintita está asociada con áreas llanas a suavemente inclinadas con agua freática fluctuante o agua superficial estancada.
24. **Podzol:** tienen un horizonte iluvial con acumulación de materia orgánica negra y/o óxidos de hierro (Fe) rojizos. Este horizonte iluvial está normalmente cubierto por

un horizonte eluvial de ceniza gris. Los Podzols aparecen en áreas húmedas en las zonas templadas y boreales y localmente también en los trópicos.

25. **Regosol:** suelos someros poco desarrollados por lo que no presentan capas muy diferenciadas entre sí, son pobres en materia orgánica y, están asociados con litosoles y afloramientos de roca o tepetate. Se incluyen en este grupo los suelos arenosos costeros. Los regosoles forman un grupo remanente taxonómico que contiene todos los suelos que no pudieron acomodarse en alguno de los otros grupos.
26. **Retisol:** tienen un horizonte de iluviación de arcilla con interdigitaciones de material de suelo decolorado y gruesamente texturado dentro del horizonte iluvial formando un diseño en forma de red. El material de interdigitación decolorado y gruesamente texturado está caracterizado por una remoción parcial de arcilla y óxidos de hierro libres. Puede haber también material decolorado de textura más gruesa cayendo del horizonte suprayacente en grietas del horizonte iluvial.
27. **Solonchak:** suelos salinos presentes en lagunas costeras y lechos de lagos, o partes bajas de llanos y valles de las regiones secas del país, son suelos tanto residuales como transportados, ampliamente confinados a zonas climáticas áridas y semiáridas y regiones costeras en todos los climas, notablemente en áreas donde la capa freática ascendente alcanza el suelo o donde hay algo de agua superficial presente.
28. **Solonetz:** Suelos con altas concentraciones de sales, se caracterizan por tener un subsuelo arcilloso con terrones duros en forma de columnas. Presentan un horizonte B con acumulaciones de cloruro de sodio (NaCl) dentro de los primeros 100 cm de profundidad. Son suelos tanto residuales como transportados de textura fina.
29. **Stagnosol:** Son suelos con agua estancada. Muestran periódicamente condiciones reductoras que dan como resultado propiedades stágnicas. Tienen una capa moteada (con óxidos predominantemente dentro de los agregados) con o sin una capa superpuesta de material albico. Los procesos redox también pueden ser causados por la introducción de líquidos distintos del agua.

30. **Technosol:** suelos cuyas propiedades y edafogénesis están dominadas por su origen técnico. Contienen una cantidad significativa de artefactos (algo en el suelo reconociblemente hecho o fuertemente alterado por el hombre o extraído de profundidades mayores), o están sellados por material duro técnico (material duro creado por los seres humanos que tiene propiedades diferentes de la roca natural) o contienen una geomembrana. Incluyen suelos de desechos (vertederos, lodos, escorias, desechos o escombros de minas y cenizas), pavimentos con sus materiales subyacentes no consolidados, suelos con geomembrana y suelos contruidos artificialmente.
31. **Umbrisol:** acomodan suelos en los cuales se ha acumulado materia orgánica dentro del suelo superficial mineral hasta el punto en que afecta significativamente el comportamiento y la utilización del suelo, se presentan en regiones húmedas, frescas, principalmente montañosas, con poco o sin déficit de humedad del suelo y son producto de la meteorización de las rocas silíceas.
32. **Vertisol:** presentan alto contenido de arcilla expandible en húmedo. Suelos de Sinaloa, Sonora, Guanajuato, Jalisco, Tamaulipas y Veracruz. Son fértiles pero muy duros que tienen baja susceptibilidad a la erosión, siempre presentan más del 35% de arcilla.



# Apéndice 3. Uso y cobertura vegetal de los suelos en México

**1. Agricultura de humedad:** Este tipo de agricultura se desarrolla en zonas donde se aprovecha la humedad del suelo, independientemente del ciclo de las lluvias y que aún en época seca conservan humedad. Tiene variaciones en función de la duración del ciclo vegetativo, que son las siguientes:

- Agricultura de humedad anual (HA).
- Agricultura de humedad anual y permanente (HAP).
- Agricultura de humedad anual y semipermanente (HSP).
- Agricultura de humedad permanente (HP).

La clasificación de los cultivos por su duración es:

- Anual: Cultivos cuyo ciclo vegetativo dura solamente un año, por ejemplo, maíz, trigo, sorgo.
- Semipermanente: Su ciclo vegetativo dura entre dos y diez años, como el caso de la papaya, la piña y la caña de azúcar.
- Permanente: La duración del cultivo es superior a diez años, como el caso del agave, el coco y frutales como el aguacate

**2. Agricultura de riego:** cuando el suministro de agua utilizada para su desarrollo es obtenido por fuentes externas, por ejemplo, un pozo, una presa, etcétera.

Tenemos los siguientes tipos:

- Agricultura de riego anual (RA)
- Agricultura de riego anual permanente (RP)
- Agricultura de riego anual y semipermanente (RAS)
- Agricultura de riego permanente (RP)
- Agricultura de riego semipermanente y permanente (RSP)

**3. Agricultura de temporal:** cuando el agua necesaria para su desarrollo vegetativo es suministrada por la lluvia. Se clasifican en:

- Agricultura de temporal anual (TA)
- Agricultura de temporal anual y permanente (TAP)

- Agricultura de temporal anual y semipermanente (TAS)
4. **Bosque de Ayarín (BS):** Los climas en donde se desarrolla son templado y semifrío-subhúmedos con lluvias en verano. Se establece en roca ígnea y sedimentaria, sobre suelos con texturas franco-arenosas, profundas y bien drenadas como cambisoles, leptosoles, luvisoles, entre otros. La fisonomía de estos bosques se caracteriza por especies de gran tamaño, con alturas que van de 15 a 40m. En ellos se desarrollan árboles perennifolios con un periodo de floración de abril a mayo y de fructificación de agosto a octubre. La dominancia de estos árboles se presenta en las alturas de 30 a 35 m.
  5. **Bosque de cedro (BB):** Se desarrolla en climas templados y semifríos, húmedos y semicálidos, en altitudes que van de los 100 a los 3 200 m. El sustrato más representativo es de origen ígneo como basaltos y andesitas, y en menor proporción de sedimentarias como calizas, en el que predominan andosoles leptosoles, luvisoles, cambisoles, entre otros tipos de suelos. Este bosque cuenta con árboles de 15 a 35 m de alto, siempre verdes y de follaje oscuro que exhiben una fisonomía peculiar.
  6. **Bosque de encino (BQ):** En climas cálidos, templados húmedos, subhúmedos a secos. Este bosque se ha observado en diferentes clases de roca ígneas, sedimentarias y metamórficas, en suelos profundos o someros como regosoles, leptosoles, cambisoles, andosoles, luvisoles, entre otros. El tamaño de los árboles varía de los 4 hasta los 30 m de altura y los hay desde bosques abiertos a muy densos.
  7. **Bosque de encino-pino (BQP):** Se desarrolla en climas templados, semifríos, semicálidos, cálidos húmedos y subhúmedos con lluvias en verano. Se establecen en suelos como leptosoles, luvisoles, regosoles, phaeozem y en menor proporción los durisoles y umbrisoles. Estas comunidades están conformadas por encinos (*Quercus* spp.), y en proporción algo menor de pinos (*Pinus* spp.). Se desarrolla principalmente en áreas de mayor importancia forestal, en los límites altitudinales inferiores de los bosques de pino-encino. Estas comunidades muestran menor porte y altura que aquellos donde domina el pino sobre el encino con una altura

de 8 a 35m. Son árboles perennifolios y caducifolios, la floración y fructificación es variable durante todo el año.

8. **Bosque de galería (BG):** Con climas templados a secos, por lo que los valores de altitud, temperatura y precipitación en dichos sitios son muy variables. Se desarrolla en zonas con condiciones favorables de humedad edáfica y sus especies pueden soportar inundaciones temporales e incluso invadir rápidamente áreas expuestas ribereñas. El estrato arbóreo dominante de estos bosques presenta alturas variables, desde los 4 hasta más de 30 metros, con especies perennifolias, subcaducifolias o hasta caducifolias.
9. **Bosque de mezquite (MK):** Comunidad arbórea con especies de prosopis que se desarrolla en suelos aluviales de fondo de valle y depresiones en las planicies, donde el manto freático se mantiene a poca profundidad, es también común a lo largo de los arroyos y ríos intermitentes en las regiones semiáridas. Frecuentemente forman comunidades arbóreas de entre 5 y 20 m de altura. La distribución de este tipo de comunidad es muy amplia en el país, pero muy fragmentada por sus requerimientos ecológicos.
10. **Bosque de oyamel (BA):** Se presenta en forma de manchones aislados, muchas veces restringido a laderas o a cañadas, protegidos de la acción de vientos fuertes y de insolación intensa. Se desarrolla en climas templados y semifríos, húmedos, entre los 2,000 y los 3,600 m de altitud. El sustrato predominante es de rocas ígneas como andesitas y basalto, y los suelos son andosoles, leptosoles, cambisoles y acrisoles.
11. **Bosque de pino (BP):** Los climas en donde se desarrollan son templado y semicálido subhúmedos con lluvias en verano. Se encuentra de los 150 m de altitud hasta los 4 200 m en el límite altitudinal de la vegetación arbórea, en pendientes que van de 10 a 75 %, en diferentes exposiciones, aunque prefieren las que están orientadas hacia el norte. Dominan especies de pino con alturas promedio de 15 a 30 m, su estrato inferior es relativamente pobre en arbustos, pero con abundantes herbáceas, esta condición se relaciona con los frecuentes incendios y la tala inmoderada. Los árboles de pino poseen hojas perennifolias,

con una época de floración y fructificación heterogénea, debido a las diferentes condiciones climáticas en las que se presenta.

- 12. Bosque de pino-encino (BPQ):** En climas templados, semifríos, semicálidos y cálidos húmedos y subhúmedos con lluvias en verano. Alcanzan alturas de 8 a 35 m. Las comunidades están conformadas por diferentes especies de pino (*Pinus* spp.) y encino (*Quercus* spp.), pero con dominancia de las primeras. Lo integran árboles perennifolios y caducifolios, con floración y fructificación variables durante todo el año.
- 13. Bosque de táscate (BJ):** Los climas en que se desarrolla varían, desde el frío de las altas montañas hasta el templado subhúmedo y el semiseco de las zonas áridas. El bosque está conformado por árboles con hojas en forma de escama (escumifolios) del género *Juniperus* conocido como táscate, enebro o cedro. Tienen una altura promedio de 8 a 15 m, y están siempre en contacto con los bosques de encino, pino-encino, selva baja caducifolia y matorrales de zonas áridas.
- 14. Bosque inducido (BI):** Esta agrupación vegetal se conforma por especies arbóreas que son producto de actividades de reforestación o bien de introducción deliberada con fines de ornato, sin que tengan algún manejo relacionado con algún uso forestal comercial, como es el caso de los bosques creados en los estados de México, Michoacán y otros a partir de reforestación con eucalipto, casuarina, cedro o pirul.
- 15. Bosque mesófilo de montaña (BM):** Fisonómicamente es un bosque denso que se desarrolla en regiones de relieve accidentado y laderas de pendiente pronunciada, es frecuente encontrarlo en cañadas protegidas de los vientos y fuerte insolación. Se caracteriza por presentar en su dosel una composición de especies donde predominan árboles de hoja perenne y caducifolios de clima templado con alturas de 10 a 25 m y aún mayores.
- 16. Chaparral (ML):** Es una asociación de arbustos o árboles esclerófilos de 1 a 4 m de alto, generalmente resistentes al fuego. Se encuentra en las llanuras, valles y lomeríos, entremezclados ocasionalmente con otros tipos de vegetación. Se

desarrolla en climas semicálidos y semifríos con baja humedad, así como en los templados subhúmedos.

- 17. Manglar (VM):** Es una comunidad densa, dominada principalmente por un grupo de especies arbóreas conocidas como mangles, en zonas con climas cálidos húmedos y subhúmedos y de muy baja altitud. Se desarrolla en las márgenes de lagunas costeras y esteros y en desembocaduras de ríos y arroyos, pero también en las partes bajas y fangosas de las costas; siempre sobre suelos profundos, en sitios inundados sin fuerte oleaje o con agua estancada. Un rasgo peculiar que presentan los mangles es la presencia de raíces en forma de zancos, o bien de neumatóforos, características de adaptación que les permiten estar en contacto directo con el agua salobre, sin ser necesariamente plantas halófitas.
- 18. Matorral crasicaule (MC):** Se localiza principalmente en las zonas semiáridas del centro y norte del país, su distribución marcaría los límites tropical y templado al interior del desierto Chihuahuense para las especies de portes más altos. Estas comunidades se desarrollan preferentemente sobre suelos someros de laderas de cerros de naturaleza volcánica, aunque también desciende a suelos aluviales contiguos.
- 19. Matorral de coníferas (MJ):** Se localiza en partes altas de las montañas, en clima templados y fríos subhúmedos. En general es un matorral denso y de 1 a 5 m de altura, caracterizado por especies arbustivas.
- 20. Matorral desértico micrófilo (MDM):** La distribución de este matorral se extiende a las zonas más secas de México, y en áreas en que la precipitación es inferior a 100 mm anuales, la vegetación llega a cubrir solo el 3 % de la superficie, mientras que en sitios con climas menos desfavorables la cobertura puede alcanzar 20 %; la altura varía de 0.5 a 1.5 m.
- 21. Matorral desértico rosetófilo (MDR):** Matorral dominado por especies con hojas en roseta, con o sin espinas, sin tallo aparente o bien desarrollado. Se le encuentra generalmente sobre suelos tipo xerosoles de laderas de cerros de origen sedimentario, en las partes altas de los abanicos aluviales o sobre conglomerados en casi todas las zonas áridas y semiáridas del centro, norte y noroeste del país.

- 22. Matorral espinoso tamaulipeco (MET):** Comunidad arbustiva o subarbórea formada por la dominancia de especies espinosas, caducifolias una gran parte del año o áfilas (sin hojas). En climas semisecos cálidos y muy cálidos con lluvias en verano y escasas a lo largo del año y en donde la temperatura máxima es de 40 °C y la mínima de -2 °C.
- 23. Matorral rosetófilo costero (MRC):** Comunidad caracterizada por especies con hojas en roseta, arbustos inermes y espinosos bajo la influencia de vientos marinos y neblina, en climas del tipo muy secos y seco. Cuenta con dos estratos uno arbustivo y el otro herbáceo, el primero de estos con especies con altura de 0.2 -0.4 m, que es el estrato dominante, el herbáceo de 0.1 - 0.2 m.
- 24. Matorral sarcocaula (MSC):** Tipo de vegetación caracterizado por la dominancia de arbustos de tallos carnosos, gruesos frecuentemente retorcidos y algunos con corteza papirácea. Se encuentran sobre terrenos rocosos y suelos someros en climas tipo B (secos) y se caracteriza por la buena capacidad de adaptación a las condiciones de aridez de las especies presentes dentro de esta comunidad. Este tipo de matorral en la costa del pacífico mexicano se encuentra comprendido entre los 0–500 metros de altitud.
- 25. Matorral sarcocrasicaule (MSCC):** Se desarrolla en condiciones de clima árido, el tipo de clima característico de este matorral va de seco a muy seco. Caracterizado por especies sarcocaulas de tallos gruesos y carnosos y crasicaules de tallos suculentos y jugosos.
- 26. Matorral sarcocrasicaule de neblina (MSN):** Comunidad vegetal de composición florística variada, en la que se encuentran asociadas especies comunes del matorral crasicaule y del matorral sarcocaula. Está caracterizado por la abundancia de líquenes (*Ramalina* spp., *Rocella* spp.), sobre las especies arbustivas y cactáceas, como indicadores de alta humedad atmosférica, debido a la constante neblina que se forma por la corriente marina fría que desciende del norte.
- 27. Matorral submontano (MSM):** Es una comunidad arbustiva a veces muy densa, formada por especies inermes o a veces espinosas, caducifolias por un breve periodo del año, se desarrolla principalmente en climas seco estepario, desértico

y templado. Este tipo de vegetación se encuentra en laderas, cañadas y partes altas, sean planas o con pendiente, de las mesetas y lomeríos, el terreno es de superficie pedregoso y textura fina y es común encontrar plantas creciendo sobre rocas.

**28. Matorral subtropical (MST):** Comunidad vegetal formada por arbustos o árboles bajos, inermes o espinosos que se desarrolla en una amplia zona de transición ecológica entre la selva baja caducifolia, los matorrales de zonas áridas y semiáridas y pastizales, ocasionalmente con los bosques templados (de encino o pino - encino). Se caracteriza por presentar dos o tres estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo, el estrato más importante es el arbustivo, que presenta alturas características entre 2 y 4 metros sus copas cubren el 60 % de la superficie.

**29. Mezquital tropical (MKE):** Se desarrolla en condiciones de trópico seco, donde sus elementos, por lo general son árboles medianos (entre 5 y 10 m de altura, a veces más) de Mezquite (*Prosopis* spp.); esta comunidad se encuentra asociada con las selvas bajas espinosas y caducifolias; así como del matorral subtropical.

**30. Mezquital xerófilo (MKX):** Este tipo de comunidad se desarrolla desde los 100 hasta los 2,300 m de altitud. Se presenta principalmente en llanuras, y en menor proporción sobre sierras y lomeríos. Los principales elementos son de porte arbustivo asociados con otros tipos de matorrales xerófilos como el matorral desértico micrófilo.

**31. Palmar inducido (VPI):** Este tipo de comunidad vegetal común en estados del sur del país especialmente Guerrero, Oaxaca, Tabasco y Veracruz, es resultado de procesos que afectan las selvas principalmente, como resultado de la actividad ganadera o bien por la presencia de fuego en el proceso de tumba, roza y quema, más comúnmente favorece la proliferación de *Brahea dulcis* y *Sabal mexicana*, principalmente. La permanencia de estas palmas se ve favorecida por los grupos humanos ya que son aprovechadas para diversos usos.

**32. Palmar natural (VP):** Asociación de plantas monopódicas pertenecientes a la familia *Arecaceae* (*Palmae*). Los palmares pueden formar bosques aislados cuyas alturas varían desde 5 hasta 30 m. Se desarrollan en climas cálidos húmedos y subhúmedos principalmente pero también en climas secos, pero en condiciones

de alguna humedad edáfica. Se les puede encontrar formando parte de las selvas o como comunidades puras.

**33. Pastizal gipsófilo (PY):** Comunidad de gramíneas que se desarrolla en suelos que contienen gran cantidad de yeso, frecuentemente en el fondo de cuencas cerradas de zonas áridas y semiáridas. Los afloramientos de suelos yesosos se encuentran con alguna frecuencia en las partes bajas de las cuencas endorreicas, rodeadas por montañas formadas por rocas sedimentarias marinas en la región oriental árida del altiplano.

**34. Pastizal halófilo (PH):** Comunidad de gramíneas y graminoides que se desarrolla sobre suelos salino-sódicos, por lo que su presencia es independiente del clima; es frecuente en el fondo de las cuencas cerradas de zonas áridas y semiáridas; y en algunas áreas próximas a las costas afectadas por el mar o por lagunas costeras. En general, las gramíneas dominantes son más bien rígidas y solo sus partes tiernas constituyen un forraje atractivo para el ganado. Desde luego que las gramíneas no son las únicas plantas que pueden crecer en tales condiciones, pero con frecuencia son las dominantes y las que definen la fisonomía de las comunidades vegetales que ahí habitan.

**35. Pastizal inducido (PI):** Esta comunidad dominada por gramíneas o graminoides aparece como consecuencia del desmonte de cualquier tipo de vegetación; también puede establecerse en áreas agrícolas abandonadas o bien como producto de áreas que se incendian con frecuencia. Los pastizales inducidos algunas veces corresponden a una fase de la sucesión normal de comunidades vegetales, cuyo clímax es por lo común un bosque o un matorral. A consecuencia del pastoreo intenso o de los fuegos periódicos, o bien de ambos factores juntos, se detiene a menudo el proceso de la sucesión y el pastizal inducido permanece como tal mientras perdura la actividad humana que lo mantiene.

**36. Pastizal natural (PN):** Es una comunidad dominada por especies de gramíneas y graminoides, en ocasiones acompañadas por hierbas y arbustos de diferentes familias. El pastizal natural se desarrolla de preferencia en suelos medianamente profundos de mesetas, fondos de valles y laderas poco inclinadas, casi siempre de naturaleza ígnea, en altitudes entre 1,100 y 2,500 m.

- 37. Popal (VA):** Comunidad vegetal herbácea que se desarrolla en sitios permanentemente inundados, propia de lugares pantanosos o de agua dulce estancada de la Llanura Costera del Golfo Sur, en zonas con clima cálido húmedo, con temperaturas medias anuales superiores a los 25°C y con una precipitación media anual mayor de 1,500 mm. Las especies que la constituyen viven enraizadas en el fondo, pero exponen sus hojas grandes y anchas sobre el agua, cubriendo áreas. Su fisonomía es característica, ya que forman un tapiz denso de vegetación herbácea uniestratificado, sobre la superficie del agua, de 1 a 2 m de altura,
- 38. Pradera de alta montaña (VW):** La forman comunidades de poca altura, con aspecto cespitoso, amacollado o arrosetado, localizado generalmente arriba de los 3,500 m de altitud, después del límite altitudinal de la vegetación arbórea y cerca de las nieves perpetuas. Su distribución está restringida a las montañas y volcanes más altos del país.
- 39. Sabana (VS):** Está dominada principalmente por gramíneas, pero es común encontrar un estrato arbóreo bajo de 3 a 6 m de alto. Se desarrolla sobre terrenos planos o poco inclinados, en suelos profundos y arcillosos que se inundan durante el periodo de lluvias y en la época seca se endurecen al perder el agua. El clima de sabana es tropical húmedo seco. La vegetación de esta comunidad se caracteriza por la dominancia de pastizales.
- 40. Sabanoide (VSI):** Pueden observarse extensas superficies cubiertas por un pastizal con elemento arbóreos de los géneros *Byrsonima* y *Curatella*, semejante en su fisonomía a la sabana, pero que se desarrolla sobre laderas de cerros con inclinación variable, a veces bastante pronunciada y con suelos que no tienen indicios de drenaje lento.
- 41. Selva alta perennifolia (SAP):** Es el tipo de vegetación más exuberante y de mayor desarrollo de México, sus árboles dominantes sobrepasan los 30 m de altura y durante todo el año conservan el follaje.
- 42. Selva alta subperennifolia (SAQ):** Se presenta en regiones con climas cálido-húmedos, con precipitaciones de 1,100 a 1,300 mm anuales, con una época de sequía bien marcada que puede durar de tres a cuatro o incluso cinco meses. Las

temperaturas son muy semejantes a aquellas en las que se desarrolla de la selva alta perennifolia, aunque llegan a presentar oscilaciones de 6 a 8°C, entre el mes más frío y el más cálido. Rango altitudinal: aproximadamente entre 200 y 900 m.

- 43. Selva baja caducifolia (SBC):** Se desarrolla en condiciones climáticas en donde predominan los tipos cálidos subhúmedos, semisecos o subsecos. Los componentes arbóreos de esta selva presentan baja altura, normalmente de 4 a 10 m (eventualmente hasta 15 m). El estrato herbáceo es bastante reducido y sólo se puede apreciar después de que ha empezado claramente la época de lluvias y retoñan o germinan las especies herbáceas.
- 44. Selva baja espinosa caducifolia (SBK):** Se desarrolla en climas similares a los de la selva baja caducifolia o ligeramente más secos, pero en climas más húmedos que los matorrales xerófilos, con marcadas características de aridez. Es una comunidad de porte bajo, dominada por árboles espinosos. La mayoría de las especies de esta selva están desnudas durante periodos prolongados en la temporada seca; sólo *Ebenopsis ébano*, una de las especies dominantes, queda sin hojas durante un lapso muy corto. Los componentes de estas selvas miden de 8 a 10 m de alto y sólo eventualmente llegan a alcanzar 12 m.
- 45. Selva baja espinosa subperennifolia (SBQ):** Los climas en donde se desarrolla son cálido-húmedo y subhúmedo. Esta selva está caracterizada por árboles bajos con alturas entre los 5 y 11 m, generalmente con los troncos muy torcidos; la densidad de los árboles puede ser bastante grande; acusan una fuerte disminución de plantas trepadoras y epífitas; el estrato herbáceo frecuentemente no existe.
- 46. Selva baja perennifolia (SBP):** Se describe la selva baja perennifolia en las cimas de los volcanes San Martín y Santa Martha en el Macizo de Los Tuxtlas, Veracruz, entre los 1,400 y 1,700 msnm.
- 47. Selva baja subcaducifolia (SBS):** Los climas en que se desarrollan son del tipo semicálido subhúmedo y seco semicálido. Fisonómicamente es semejante a la SBC, excepto en que los árboles dominantes conservan por más tiempo el follaje a causa de una mayor humedad edáfica.

- 48. Selva baja subperenifolia (SBQP):** En climas cálidos húmedos y subhúmedos. Los individuos que están presentes en este tipo de vegetación cuentan con una altura no mayor a 5 m.
- 49. Selva de galería (SG):** En zonas de climas cálidos húmedos y subhúmedos. Es la selva que se desarrolla en condiciones de mayor humedad, en lugares con inundación permanente. El estrato dominante en este tipo de vegetación es el arbóreo, constituido por individuos con altura promedio de 7 m o más.
- 50. Selva mediana caducifolia (SMC):** El estrato arbóreo de esta selva se presenta de 15 a 20 metros con estratos arbustivos y herbáceos reducidos. La selva se encuentra en diferentes situaciones topográficas y tipos de suelos, aunque muestra una preferencia por suelos someros pedregosos y sobre laderas de cerros, los suelos presentan características de la roca madre la cual puede ser ígnea, metamórfica o sedimentaria marina.
- 51. Selva mediana perennifolia (SMP):** Los suelos que sustentan este tipo de vegetación son someros, pero contienen grandes cantidades de materia orgánica sin descomponer, la cual forma un grueso colchón vegetal sobre el que resulta difícil caminar. Las especies importantes de estas selvas son perennes. Estructuralmente se trata de una selva muy densa, pero que no excede normalmente los 15 o 25 m de alto. Una de sus características más notables es la abundancia de líquenes, musgos y helechos. Por su localización la distribución de esta selva está restringida a regiones montañosas.
- 52. Selva mediana subcaducifolia (SMS):** Se desarrolla en regiones cálidas subhúmedas con lluvias en verano. Este tipo de selva presenta en las zonas de su máximo desarrollo árboles cuya altura máxima oscila entre 25 y 30 m. La densidad de los árboles es mucho menor que la de las selvas altas perennifolias y subperennifolias; sin embargo, a mitad de la temporada de lluvias, en la época de mayor desarrollo de follaje, la cobertura puede ser lo suficientemente densa para disminuir fuertemente la incidencia de la luz solar en el suelo.
- 53. Selva mediana subperennifolia (SMQ):** Los componentes arbóreos de este tipo de vegetación pierden estacionalmente su follaje en un 25 a 50%; se desarrolla en lugares con climas cálido-húmedos y subhúmedos. En este tipo de selva, se

distinguen tres estratos arbóreos, de 4 a 12 m, de 12 a 22 m y de 22 hasta 30 m. Dentro de los estratos se encuentran variados tipos de palmas.

- 54. Tular (VT):** Comunidad de plantas acuáticas, distribuida principalmente en altiplanicies y llanuras costeras, en sitios con climas desde cálidos hasta templados. Las plantas de esta comunidad viven arraigadas en el fondo y constituyen masas densas con hojas largas y angostas, formando prácticamente un solo estrato herbáceo de 0.8 a 2.5 m de altura.
- 55. Vegetación de desiertos arenosos (VD):** Esta comunidad vegetal está constituida principalmente por arbustos perennes, cuyas raíces perforantes se anclan en la arena no consolidada y forman colonias por reproducción vegetativa. Se agrupan por “manchones” en desiertos sumamente áridos.
- 56. Vegetación de dunas costeras (VU):** Comunidad vegetal que se establece a lo largo de las costas, se caracteriza por plantas pequeñas y suculentas. Las especies que la forman juegan un papel importante como pioneras y fijadoras de arena, evitando con ello que sean arrastradas por el viento y el oleaje.
- 57. Vegetación de galería (VG):** Comunidades arbustivas, ocasionalmente con elementos subarbóreos, que se desarrollan en los márgenes de los ríos y arroyos, siempre bajo condiciones de humedad. En este tipo de vegetación predomina generalmente un solo estrato arbustivo, que fisonómicamente puede presentar el aspecto de matorral denso o espaciado, con altura entre 1 y 2 m y constituido por elementos usualmente perennifolios.
- 58. Vegetación de petén (VPT):** Son islas de vegetación, con asociaciones de especies distribuidas en círculos concéntricos en zonas de manglar bajo. La vegetación de petén se desarrolla en sitios que presentan agua superficial o freática todo el año, aún en los periodos de sequía. En ocasiones este tipo de vegetación está relacionado con la presencia de agua dulce o de cenotes y prospera sobre suelos profundos, con poca pedregosidad y ligeramente salinos, con fuerte acumulación de materia orgánica y mucha hojarasca.
- 59. Vegetación Gipsófila (VY):** Son comunidades vegetales dominadas por pequeños arbustos y gramíneas; los caméfitos son un biotipo que incluye a las plantas leñosas y herbáceas cuyas yemas de reemplazo se encuentran en

vástagos siempre por encima del nivel del suelo; otra característica de esta comunidad vegetal es que se encuentra una costra liquénica en estos suelos, pudiendo así encontrar diferencias en la composición florística de esta vegetación.

**60. Vegetación halófila (VH):** La constituyen comunidades vegetales herbáceas o arbustivas que se caracterizan por desarrollarse sobre suelos con alto contenido de sales en cualquier parte del país, es común en partes bajas de cuencas cerradas de las zonas áridas y semiáridas. Esta comunidad se caracteriza por especies de baja altura, por la dominancia de pastos rizomatosos y tallos rígidos, además de una escasa cobertura de especies arbustivas. Esta vegetación se desarrolla en zonas donde los factores climáticos y geológicos dieron origen a áreas salinas.

**61. Vegetación halófila hidrófila (VHH):** La constituyen comunidades dominadas por especies herbáceas o raramente arbustivas, que se distribuyen en ambientes en litorales (lagunas costeras, marismas salinas y playas) que reciben aportación de agua salina; en sitios de muy baja altitud, con climas cálidos húmedos o subhúmedos, sobre suelos generalmente arenosos con altas concentraciones de sales y que en algún periodo están sujetos a grandes aportaciones de humedad. Generalmente la vegetación halófila-hidrófila está constituida por un solo estrato herbáceo de plantas perennes suculentas, pero puede estar constituida por elementos arbustivos como los del género atriplex.



## Apéndice 4. Mapas del número de curva

Donde:  $\Delta x$  tamaño de celda, en m; TP tipo de suelo y US uso de suelo.

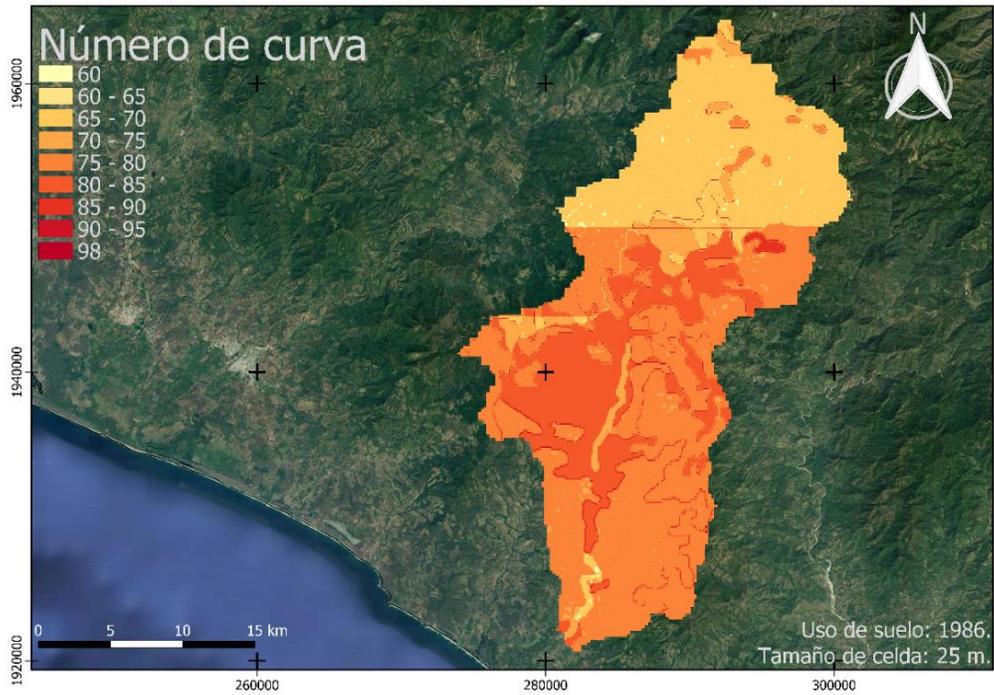


Figura 31 Número de curva ( $\Delta x=25$  m, TP=1998, US=1986).



Figura 32 Número de curva ( $\Delta x=50$  m,  $TP=1998$ ,  $US=1986$ ).

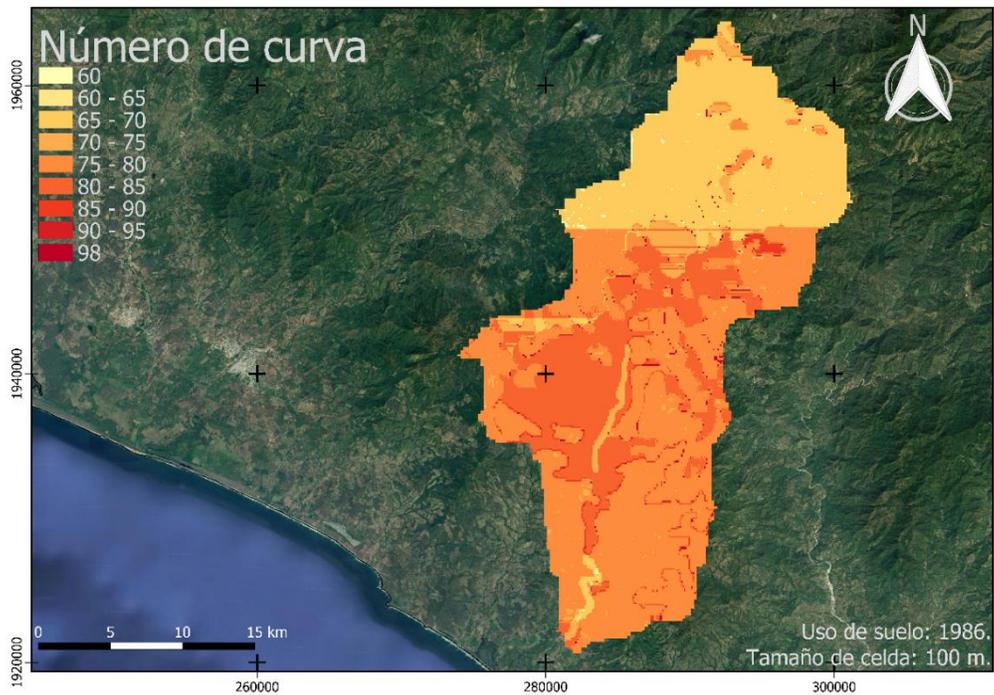


Figura 33 Número de curva ( $\Delta x=100$  m,  $TP=1998$ ,  $US=1986$ ).

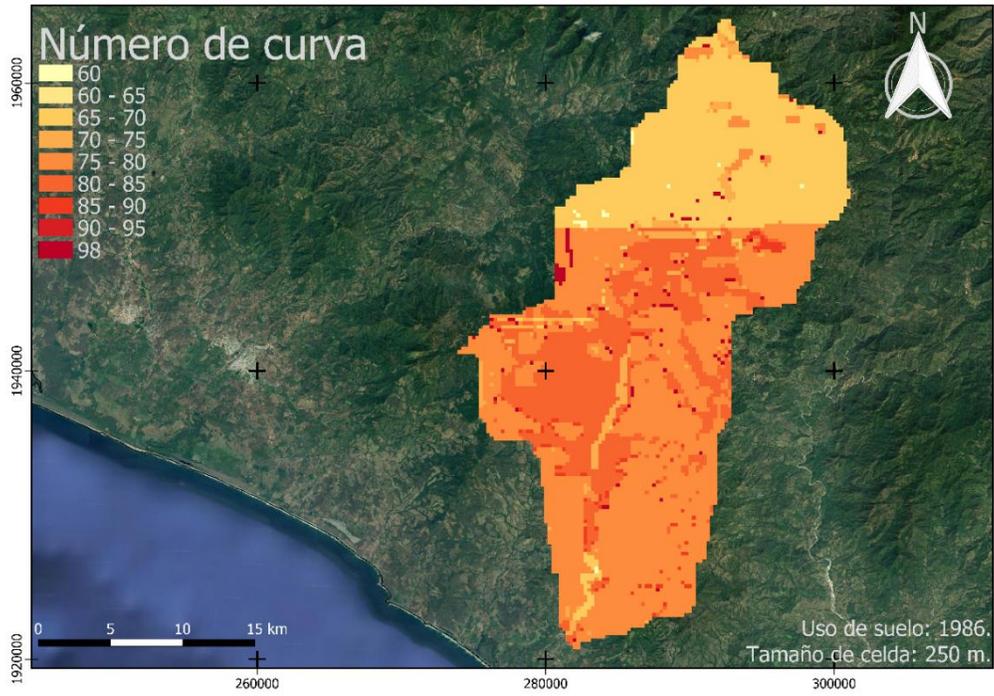


Figura 34 Número de curva ( $\Delta x=250$  m, TP=1998, US=1986).

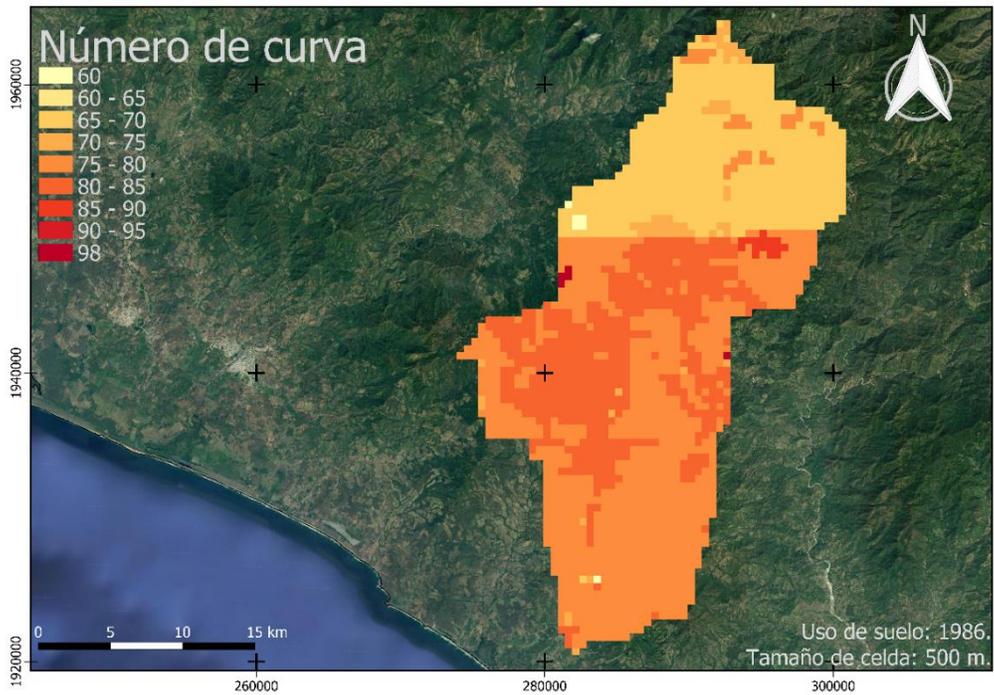


Figura 35 Número de curva ( $\Delta x=500$  m, TP=1998, US=1986).

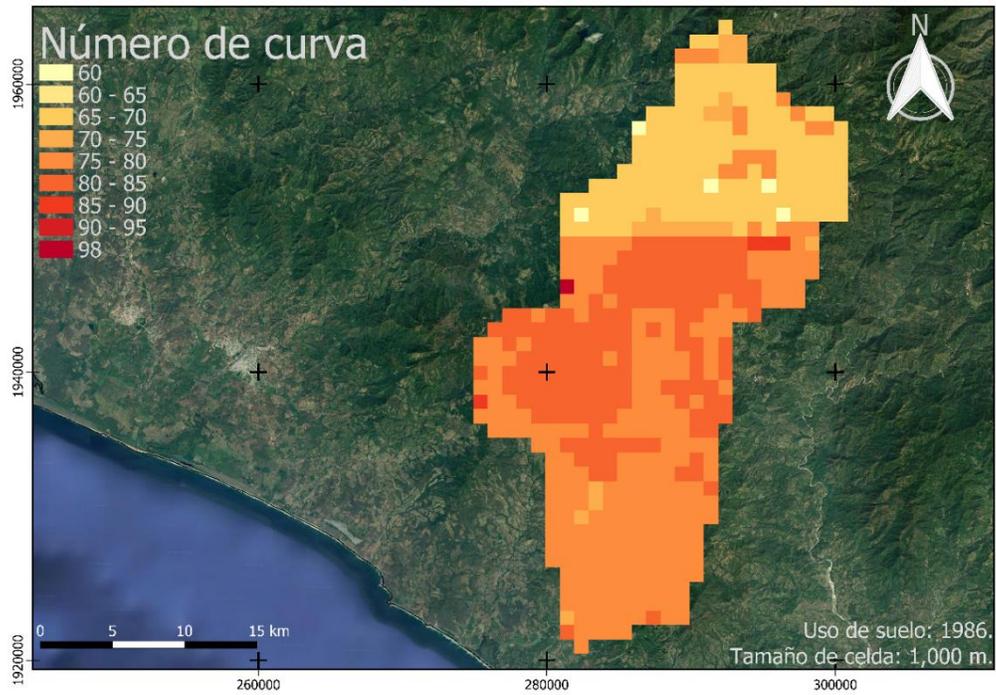


Figura 36 Número de curva ( $\Delta x=1,000$  m, TP=1998, US=1986).

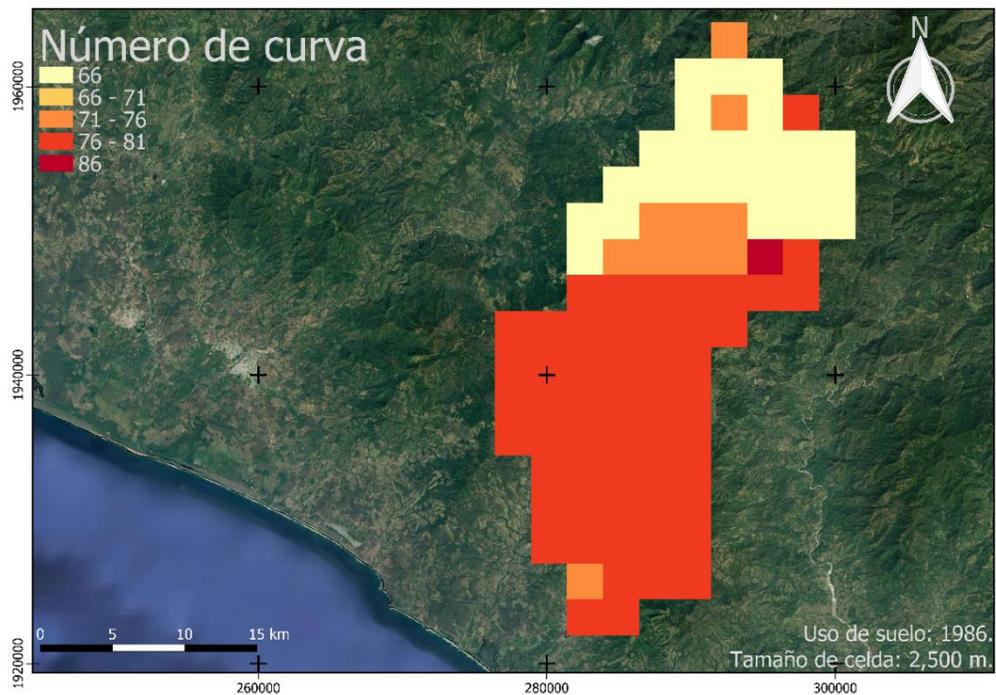


Figura 37 Número de curva ( $\Delta x=2,500$  m, TP=1998, US=1986).

## Uso y cobertura vegetal del suelo, serie II, 1997.

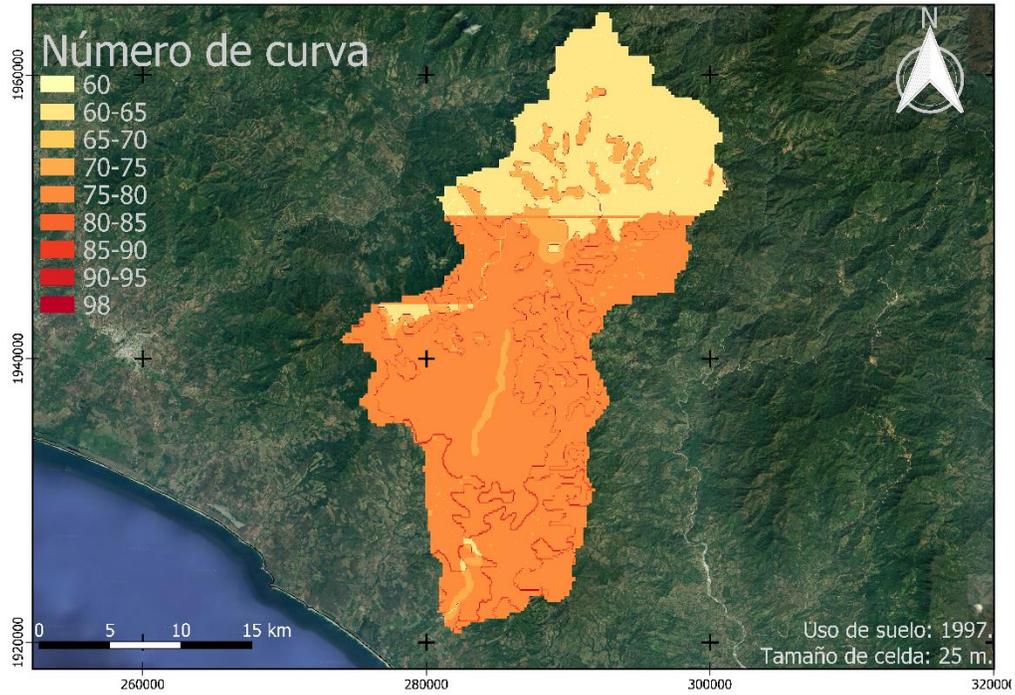


Figura 38 Número de curva ( $\Delta x=25$  m, TP=1998, US=1997).

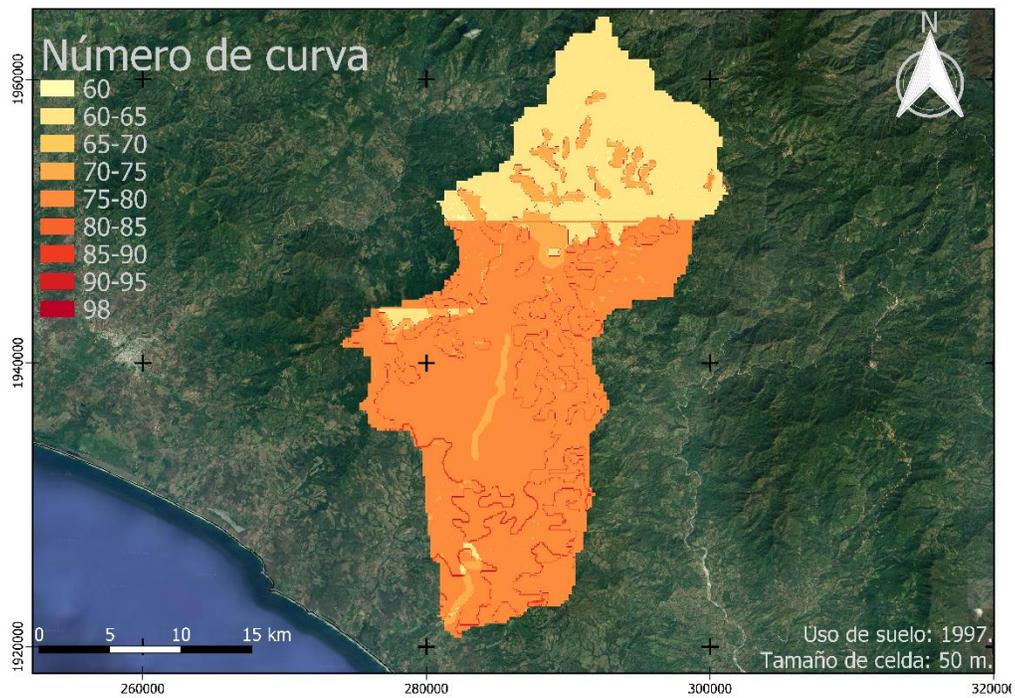


Figura 39 Número de curva ( $\Delta x=50$  m, TP=1998, US=1997).

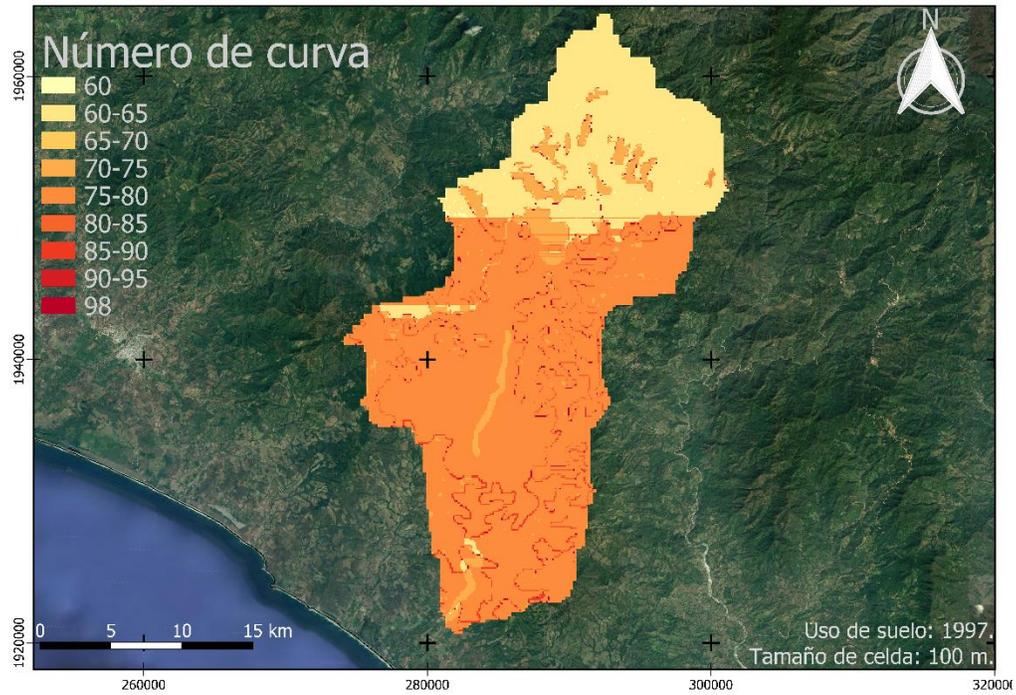


Figura 40 Número de curva ( $\Delta x=100$  m, TP=1998, US=1997).

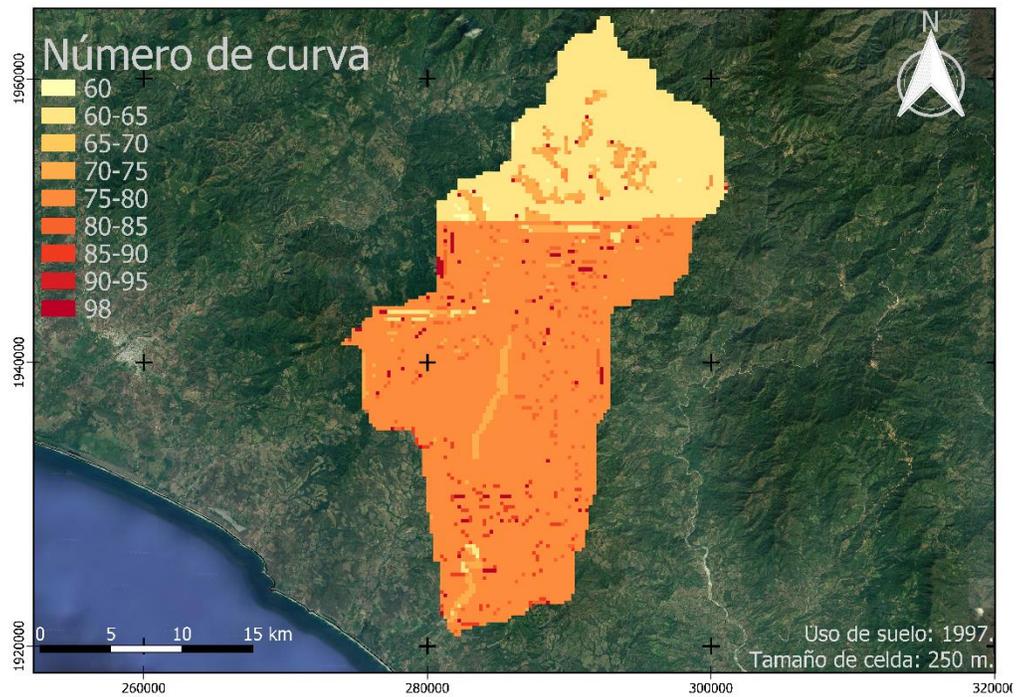


Figura 41 Número de curva ( $\Delta x=250$  m, TP=1998, US=1997).

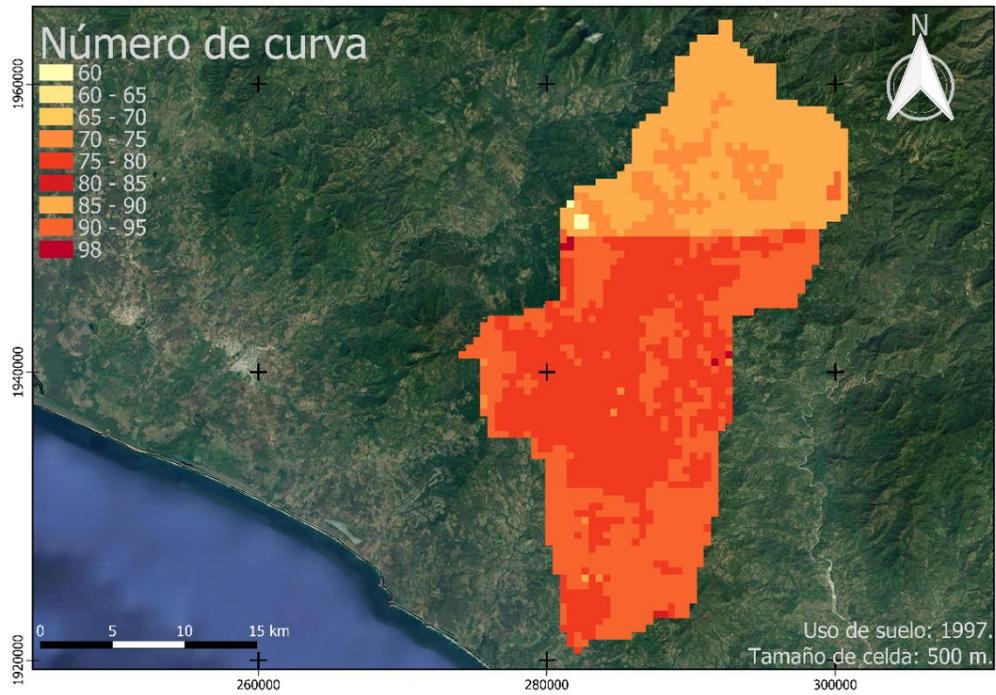


Figura 42 Número de curva ( $\Delta x=500$  m, TP=1998, US=1997).

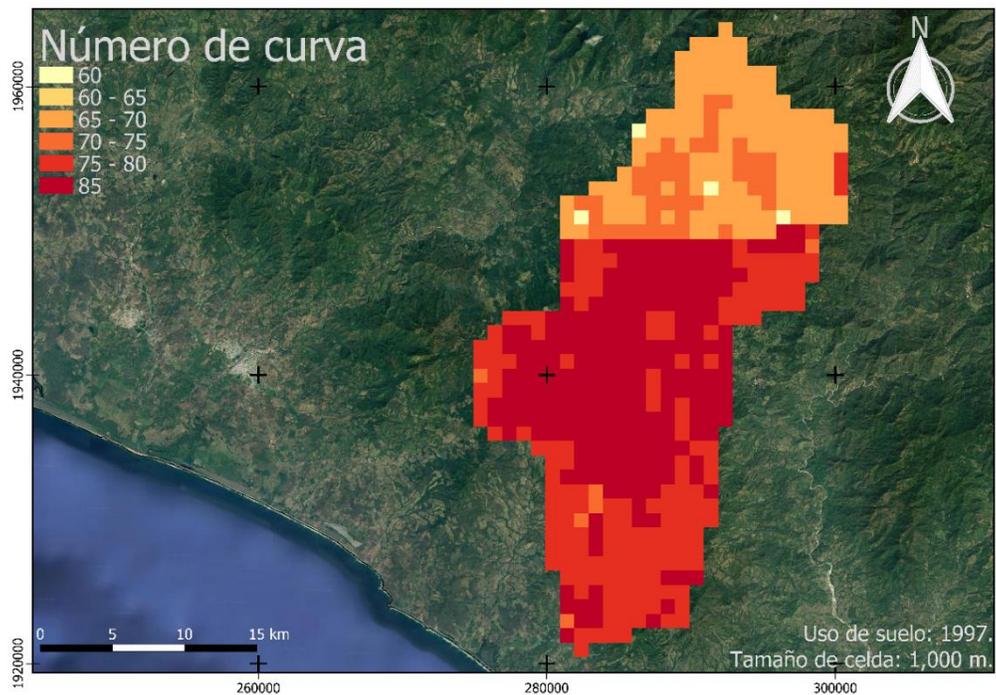


Figura 43 Número de curva ( $\Delta x=1,000$  m, TP=1998, US=1997).

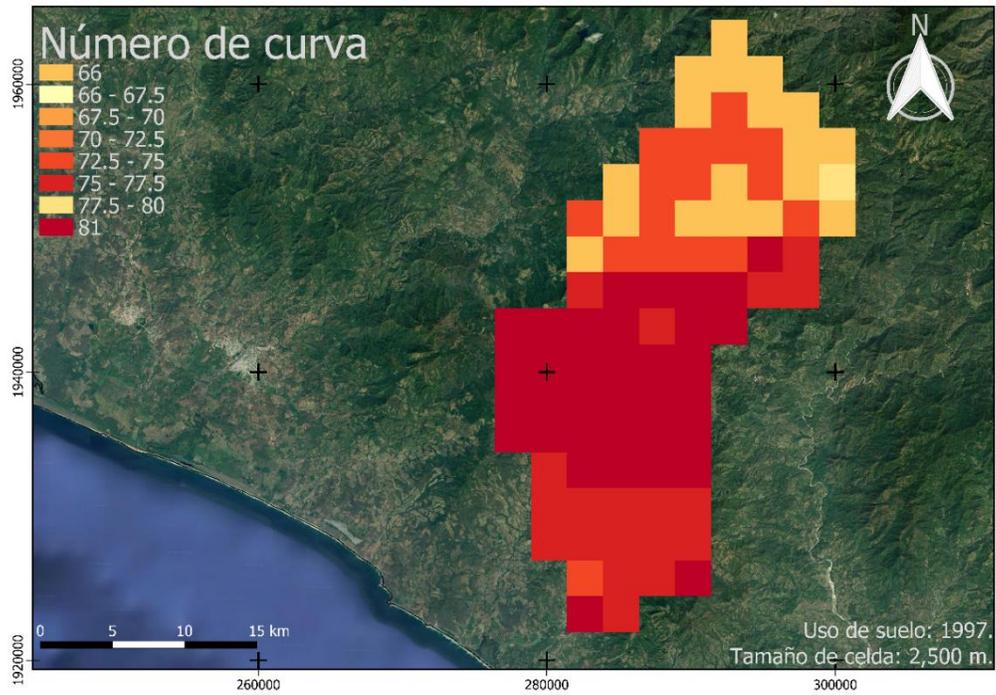


Figura 44 Número de curva ( $\Delta x=2,500$  m, TP=1998, US=1997).

**Uso y cobertura vegetal del suelo, serie III, 2003.**

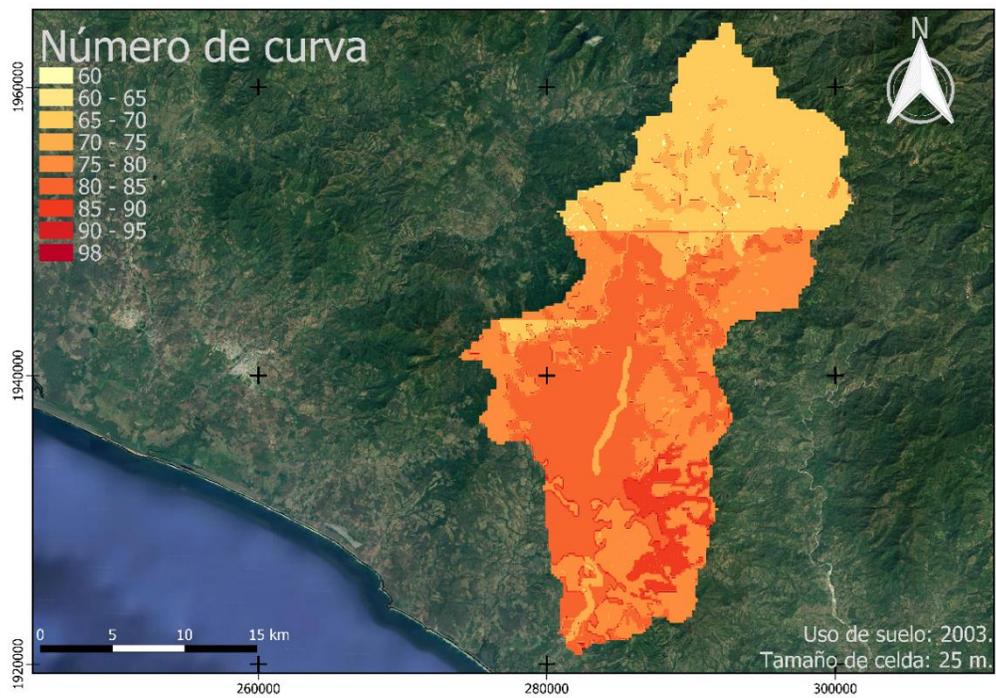


Figura 45 Número de curva ( $\Delta x=25$  m, TP=1998, US=2003).

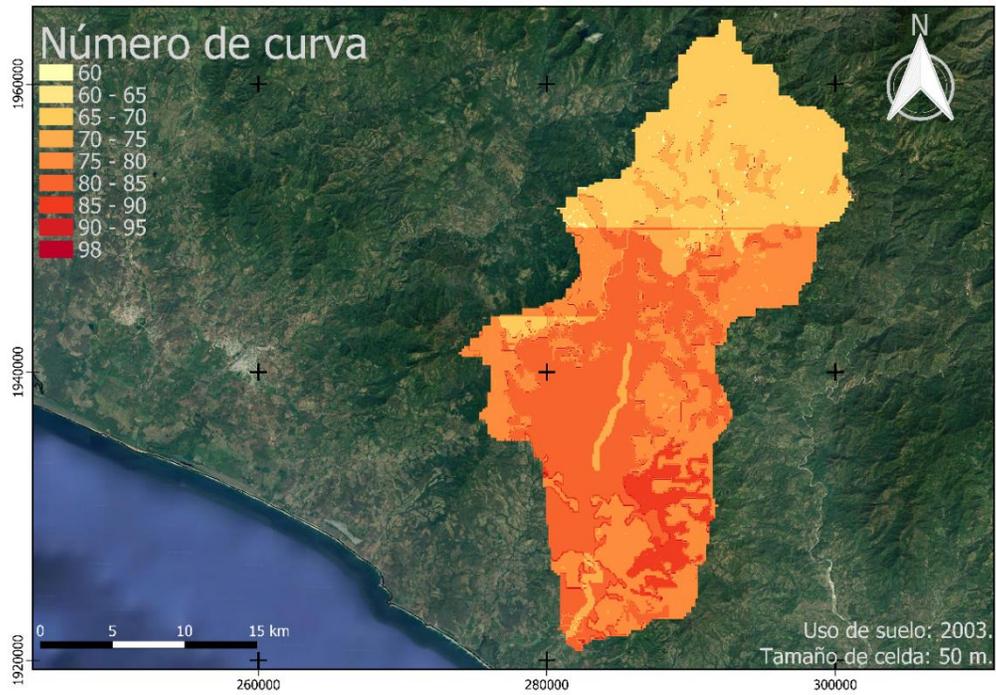


Figura 46 Número de curva ( $\Delta x=50$  m,  $TP=1998$ ,  $US=2003$ ).

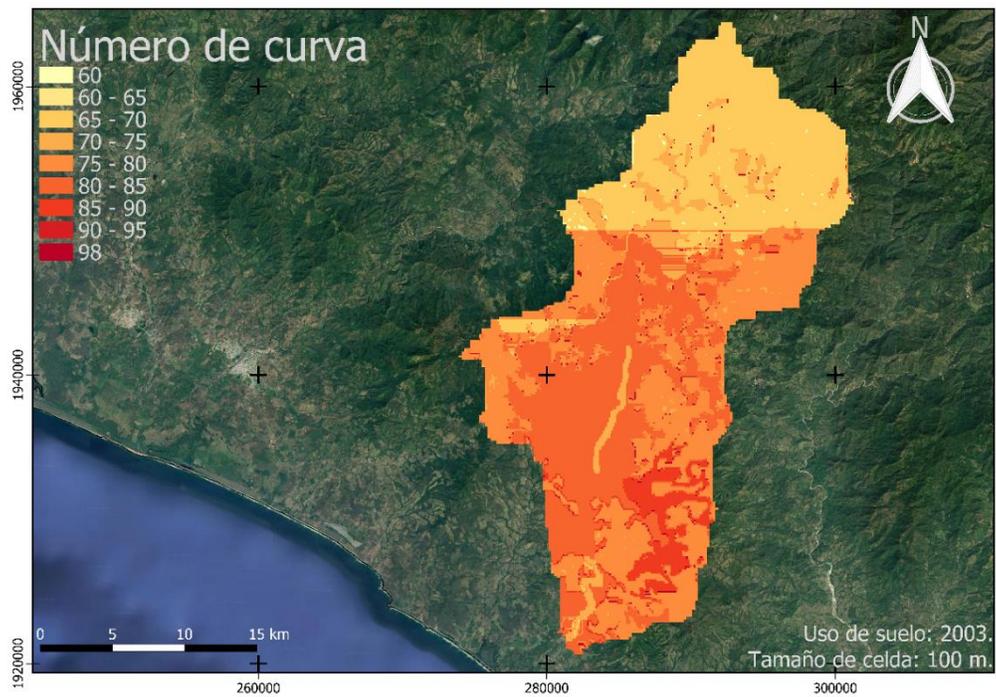


Figura 47 Número de curva ( $\Delta x=100$  m,  $TP=1998$ ,  $US=2003$ ).

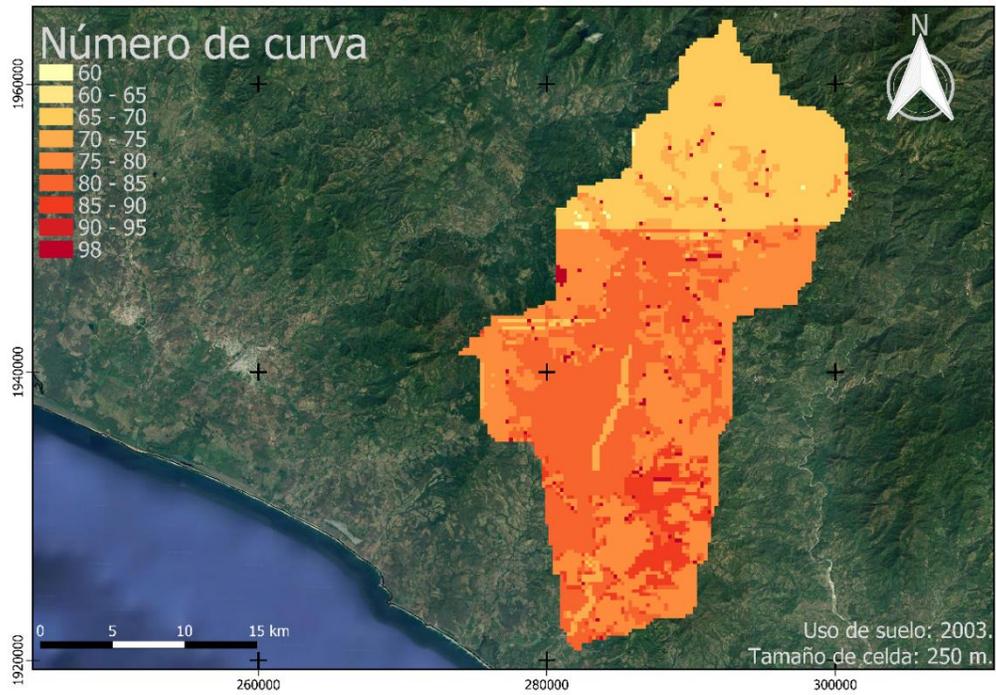


Figura 48 Número de curva ( $\Delta x=250$  m,  $TP=1998$ ,  $US=2003$ ).

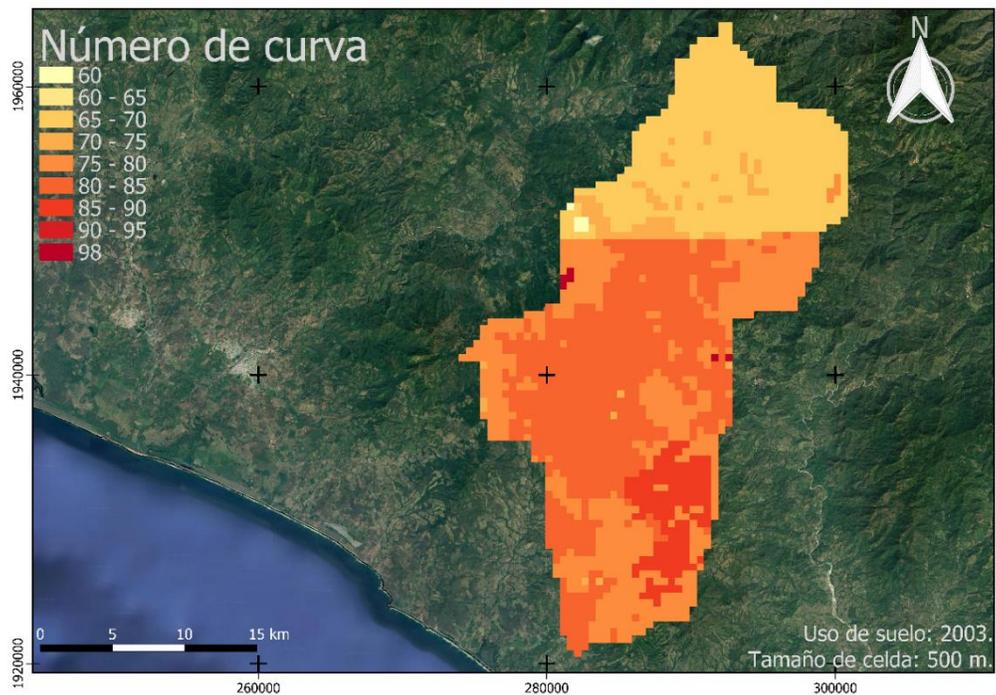


Figura 49 Número de curva ( $\Delta x=500$  m,  $TP=1998$ ,  $US=2003$ ).

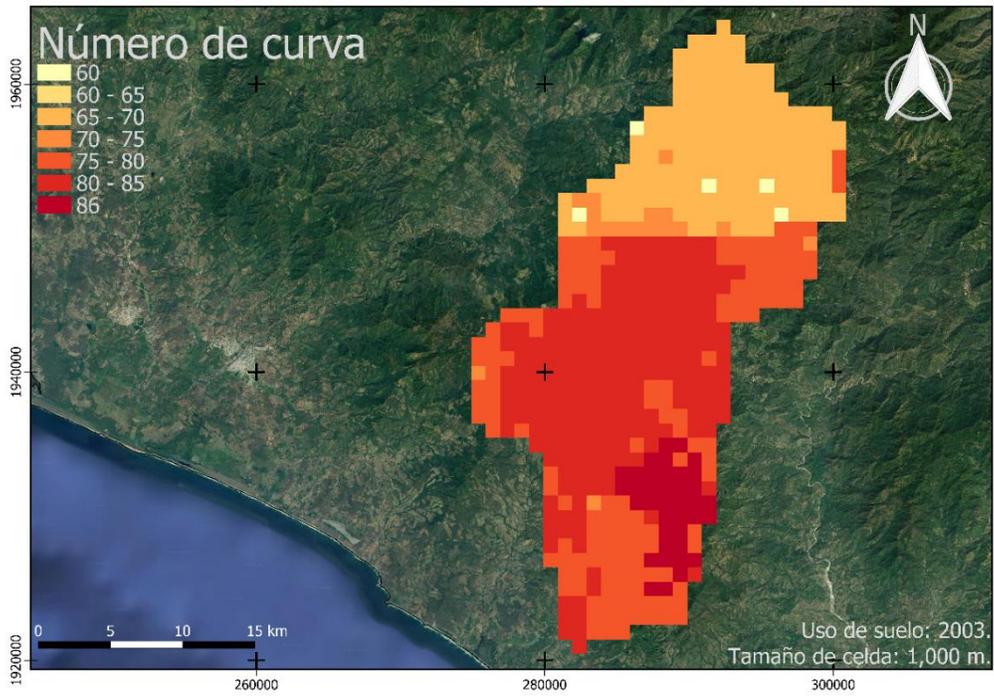


Figura 50 Número de curva ( $\Delta x=1,000\text{ m}$ ,  $TP=1998$ ,  $US=2003$ ).

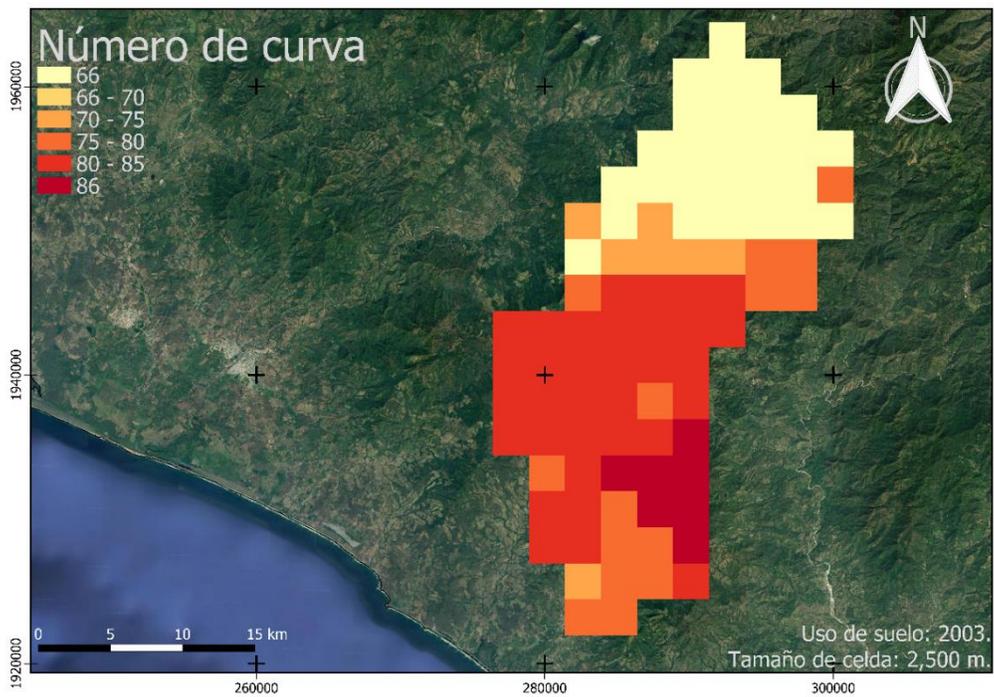


Figura 51 Número de curva ( $\Delta x=2,500\text{ m}$ ,  $TP=1998$ ,  $US=2003$ ).

## Uso y cobertura vegetal del suelo, serie IV, 2010.

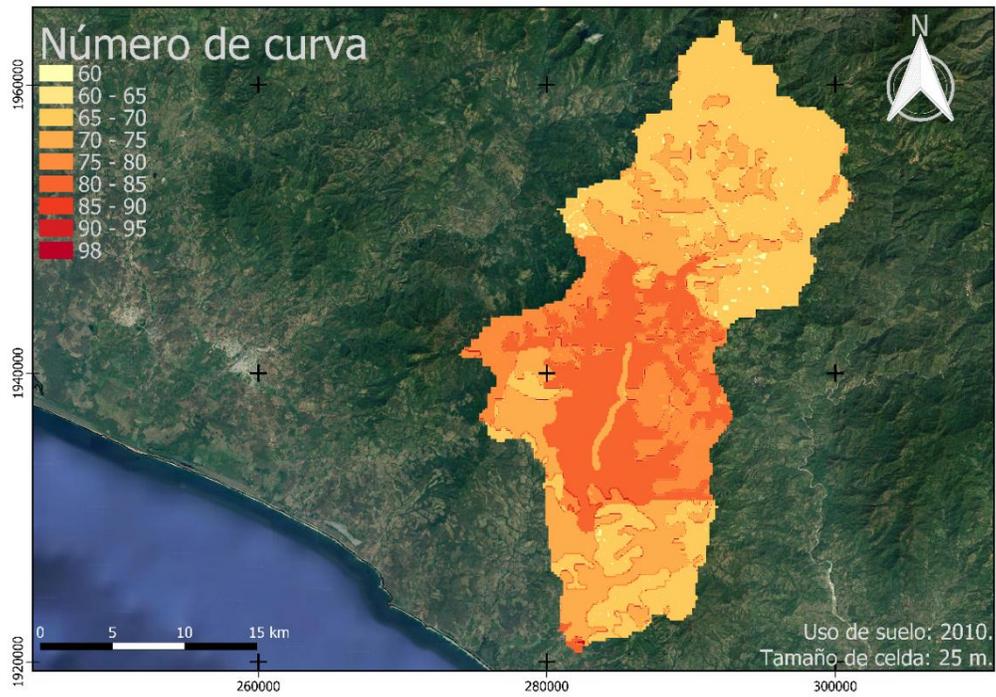


Figura 52 Número de curva ( $\Delta x=25$  m, TP=2007, US=2010).

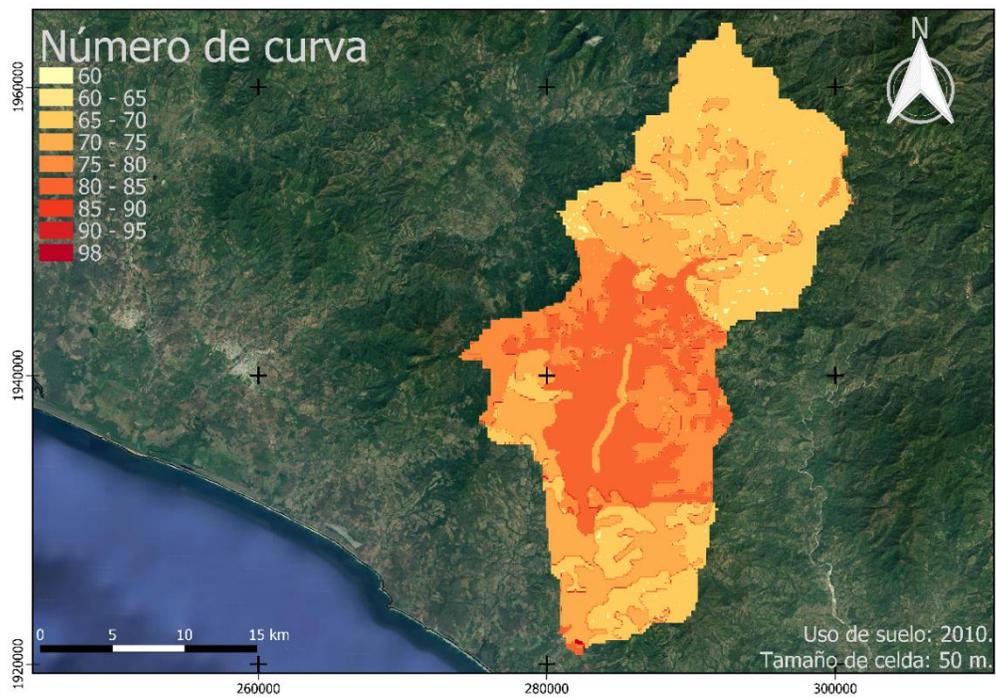


Figura 53 Número de curva ( $\Delta x=50$  m, TP=2007, US=2010).

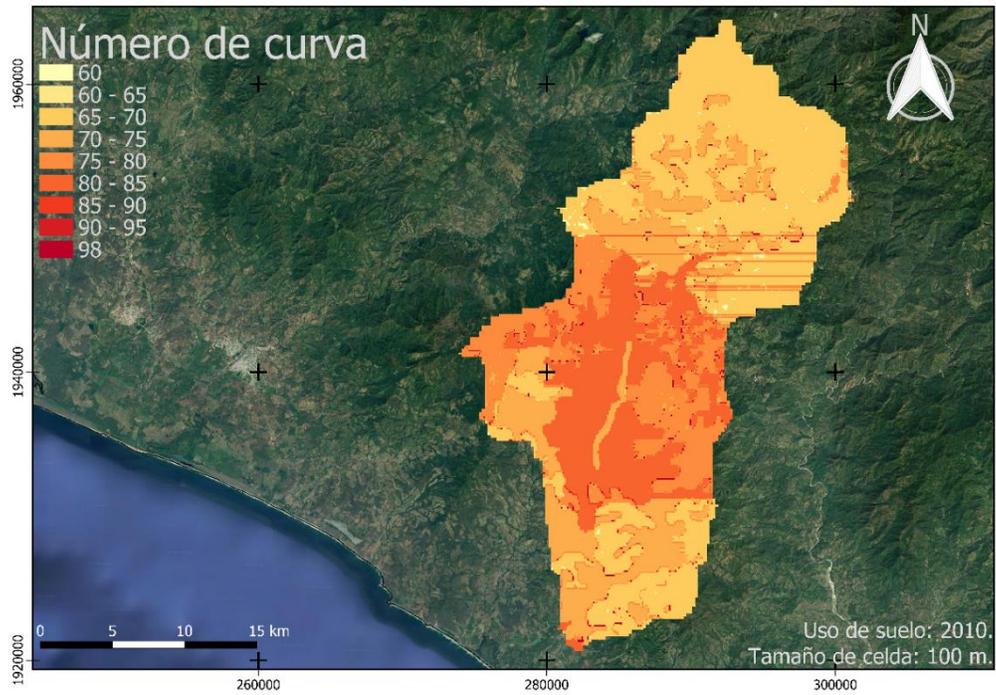


Figura 54 Número de curva ( $\Delta x=100$  m, TP=2007, US=2010).

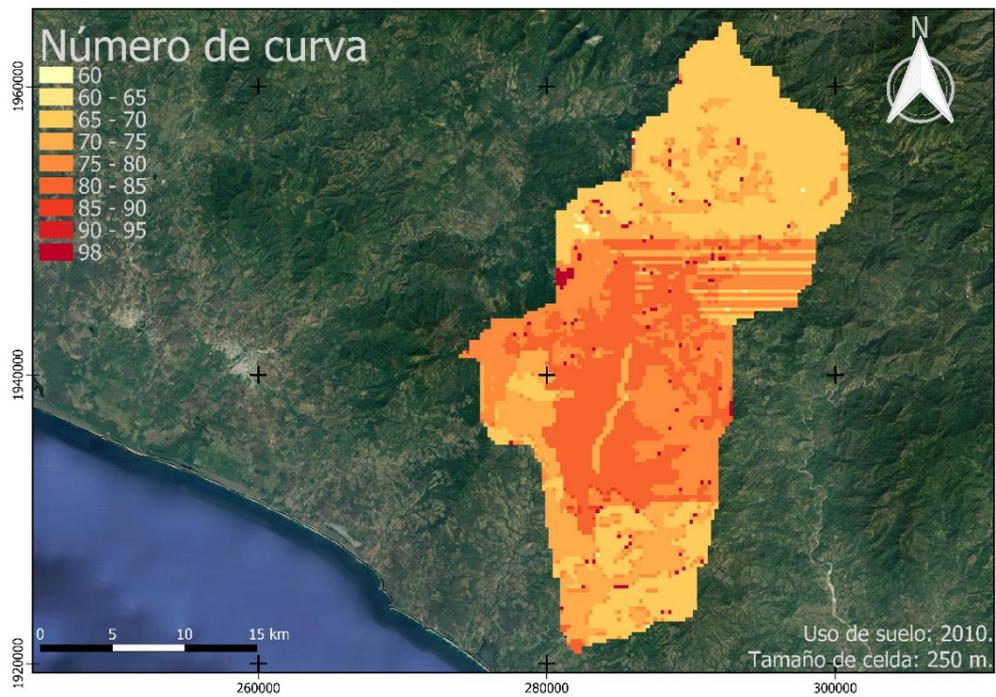


Figura 55 Número de curva ( $\Delta x=250$  m, TP=2007, US=2010).

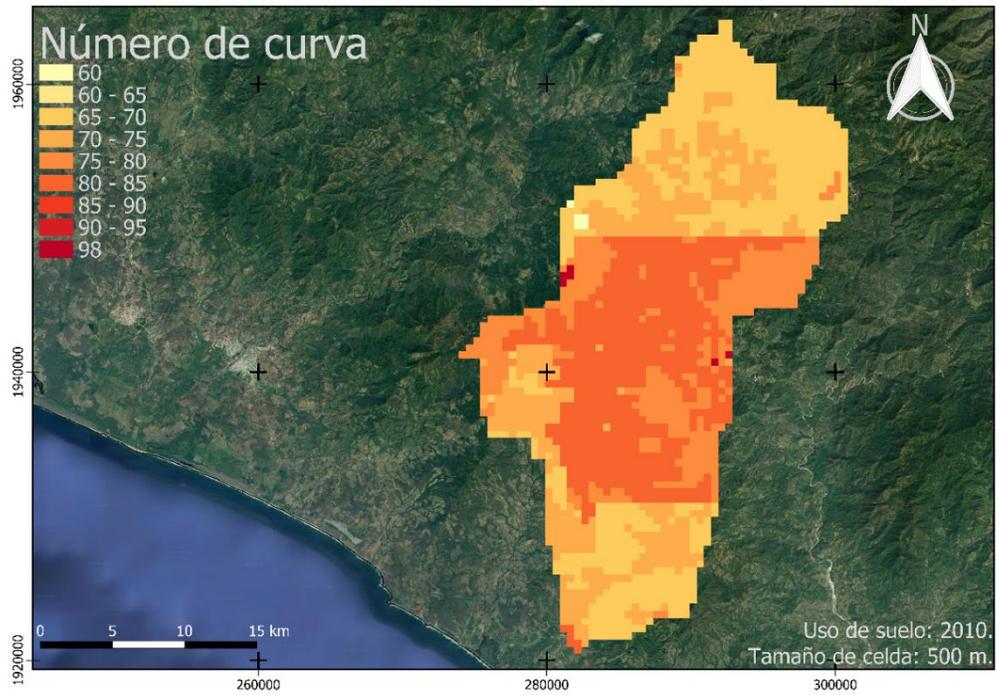


Figura 56 Número de curva ( $\Delta x=500$  m, TP=2007, US=2010).

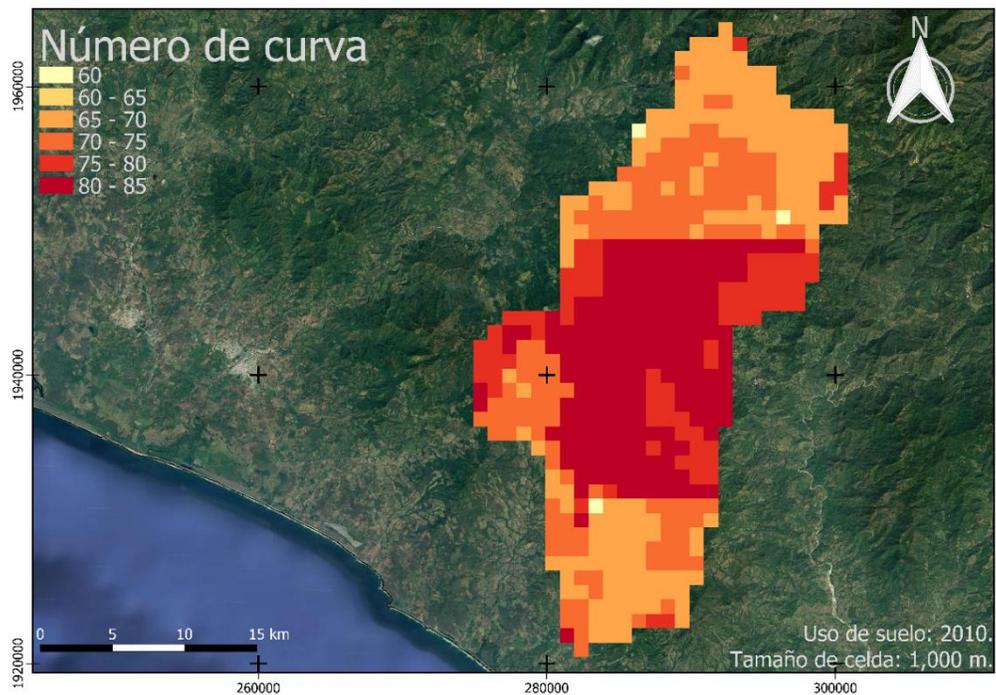


Figura 57 Número de curva ( $\Delta x=1,000$  m, TP=2007, US=2010).

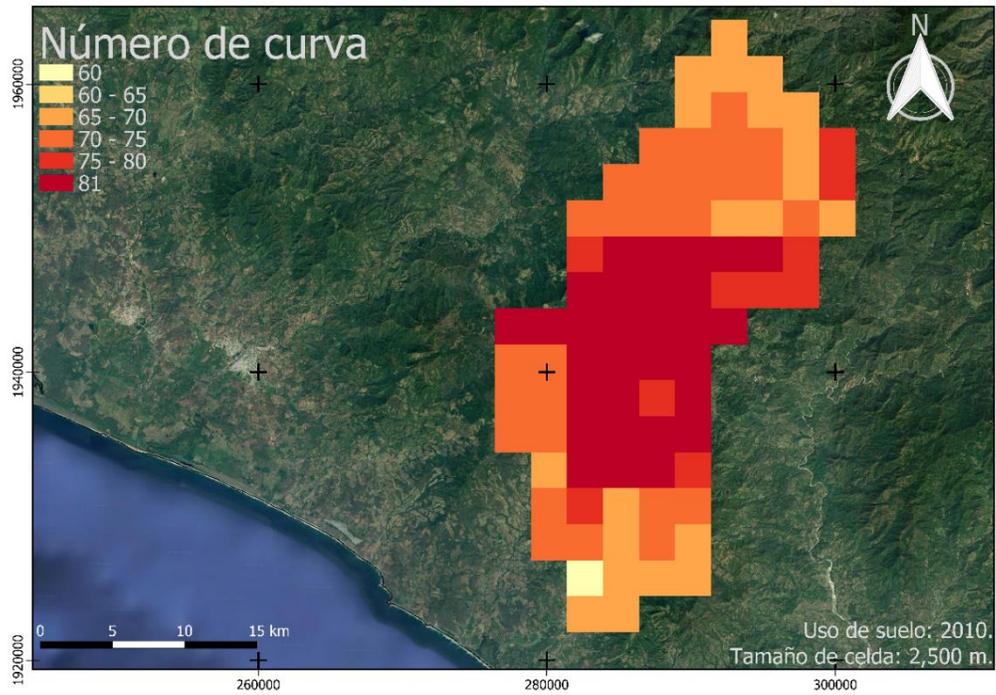


Figura 58 Número de curva ( $\Delta x=2,500$  m, TP=2007, US=2010).

**Uso y cobertura vegetal del suelo, serie V, 2013.**

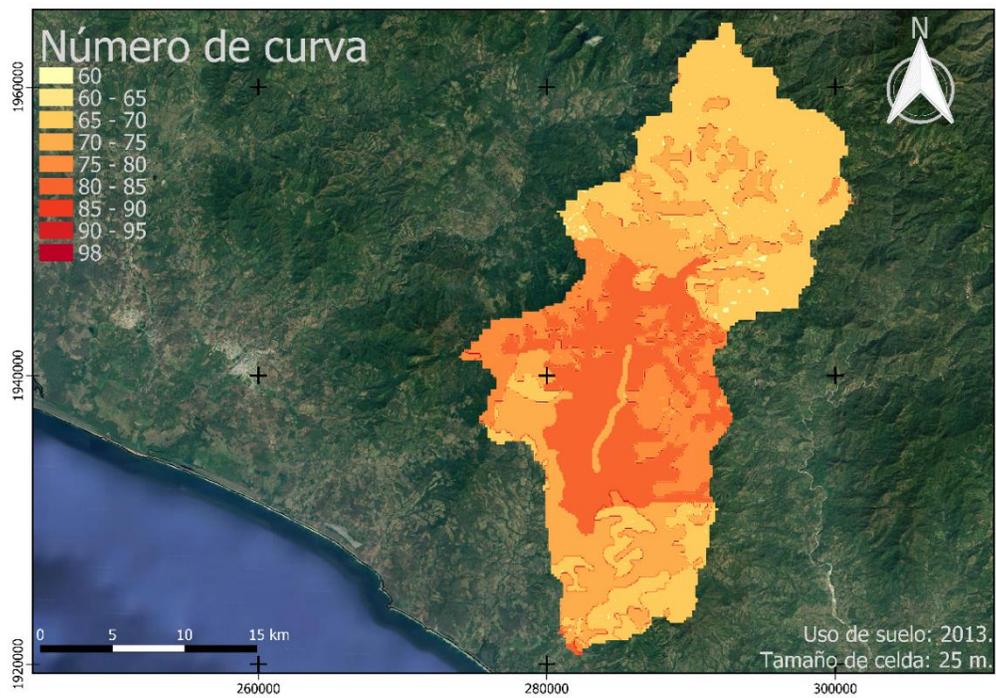


Figura 59 Número de curva ( $\Delta x=25$  m, TP=2007, US=2013).

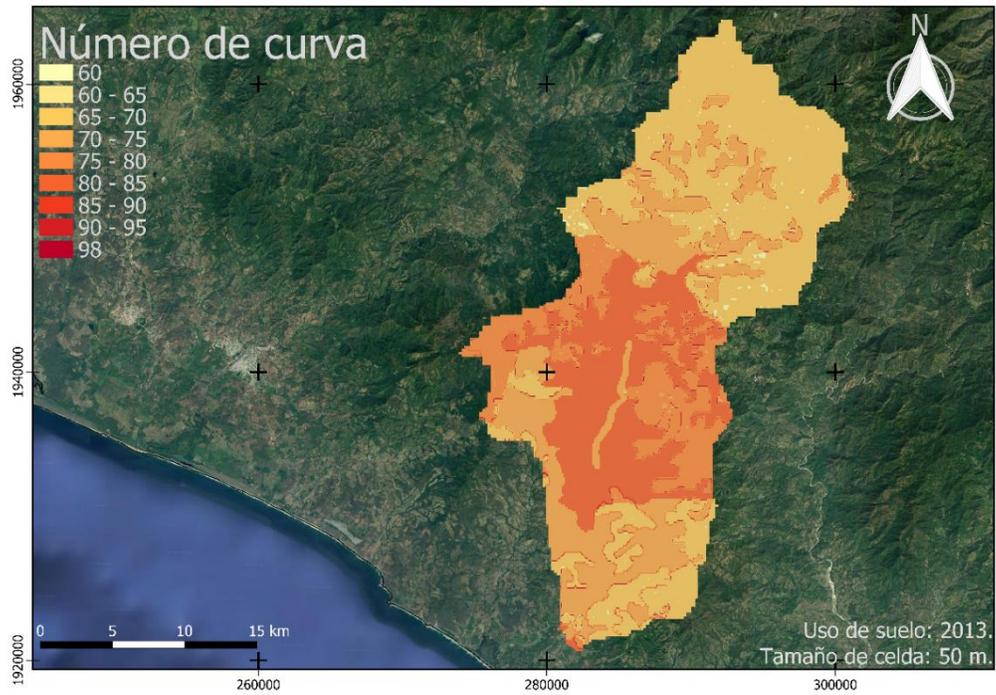


Figura 60 Número de curva ( $\Delta x=50$  m,  $TP=2007$ ,  $US=2013$ ).

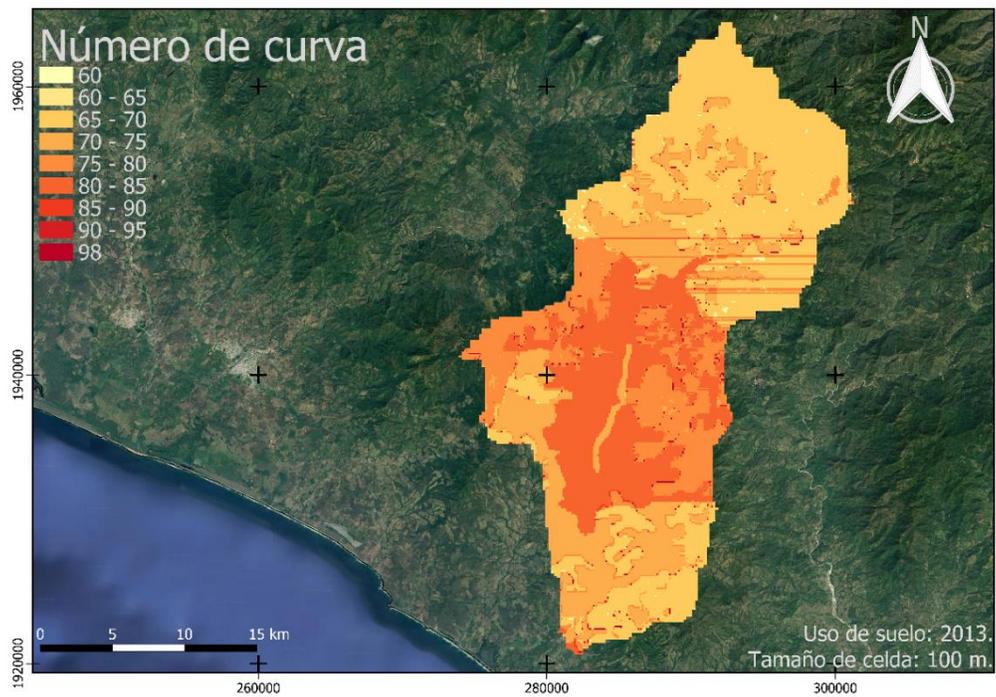


Figura 61 Número de curva ( $\Delta x=100$  m,  $TP=2007$ ,  $US=2013$ ).

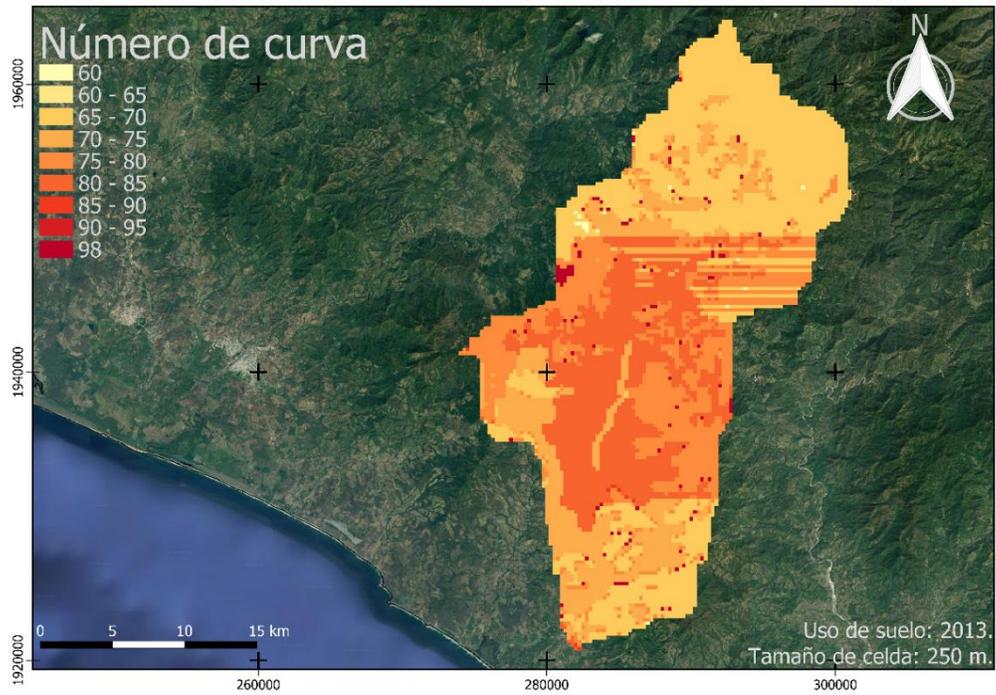


Figura 62 Número de curva ( $\Delta x=250$  m, TP=2007, US=2013).

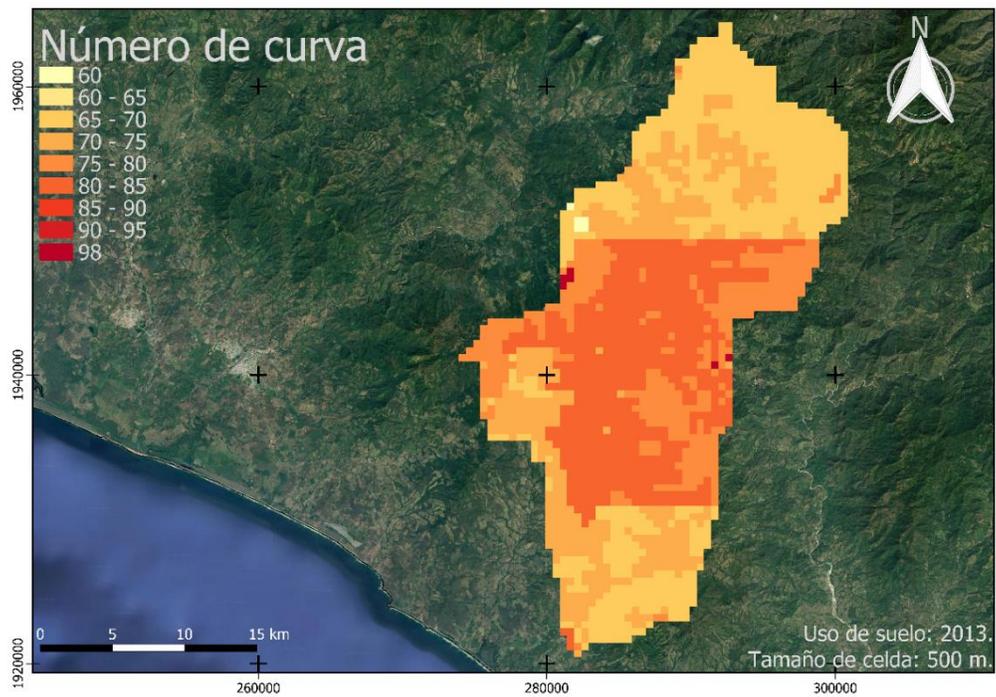


Figura 63 Número de curva ( $\Delta x=500$  m, TP=2007, US=2013).

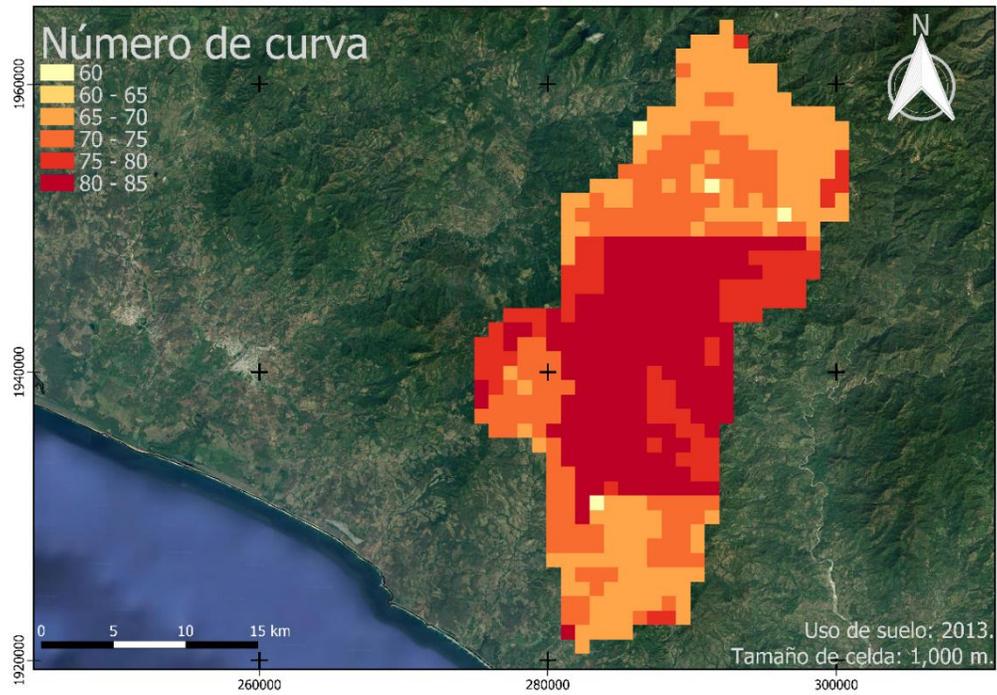


Figura 64 Número de curva ( $\Delta x=1,000\text{ m}$ ,  $TP=2007$ ,  $US=2013$ ).

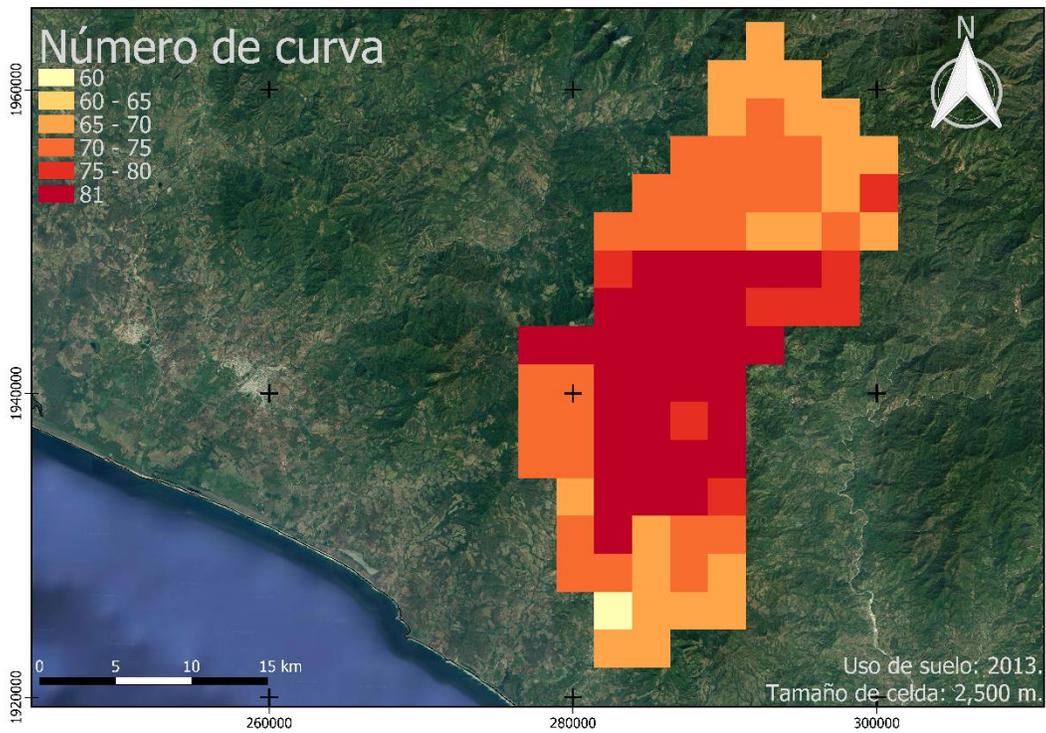


Figura 65 Número de curva ( $\Delta x=2,500\text{ m}$ ,  $TP=2007$ ,  $US=2013$ ).