

Propuesta metodológica para el cálculo del número de curva CN usando sistemas de información geográfica, en cuencas del Valle Geográfico del Alto Cauca, caso de estudio Cuenca del Río Palo

Methodological proposal for the calculation of the CN curve number using geographic information systems for basins of the Geographic Valley of Alto Cauca, case study of the Palo River Basin

Cristian Alejandro Coral Huertas
cristian.coral01@usc.edu.co

Walter Stanley Zapata Echeverri
walter.zapata00@usc.edu.co

Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Especialización en sistemas de Información Geográfica

Resumen

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Hidrología son dos campos de trabajo que comparten muchos intereses, dada la necesidad de representar espacialmente diferentes variables necesarias en la modelación para el estudio de diversos eventos hidrometeorológicos o proyectos de ingeniería. Por tal razón el presente trabajo de investigación plantea bajo el marco de los SIG, la construcción de una metodología para obtener la escorrentía directa en cuencas del Valle Geográfico del Alto Cauca, siendo este un factor clave en la modelación hidrológica donde se conoce como el parámetro Número de Curva “CN”. Su obtención por el método tradicional de superposición análoga de variables es muy tediosa, aumentando los tiempos y complejidad de la modelación. El parámetro CN es un modelo conceptual de pérdidas de precipitación, cuyo objetivo es estimar los volúmenes de escorrentía superficial, en función de la pendiente, el uso, el tipo y la condición del suelo, información que gracias a la evolución de los SIG y otras herramientas geomáticas para la captura y análisis de información geoespacial está cada vez más disponible y actualizada en formatos compatibles para diferentes análisis y geo procesos. Teniendo en cuenta lo anterior el objetivo principal de este trabajo es dar a conocer un método para la obtención del CN empleando el software SIG ArcGIS 10.8 , y la metodología de los números primos propuesta por Ferrer et al(1995), haciendo una reclasificación para los suelos del Valle Geográfico del Alto Cauca y de esta manera obtener la distribuir espacialmente del parámetro CN de forma óptima y precisa para las cuencas de esta región de Colombia.. A manera de prueba piloto, la metodología seleccionada se aplicó a la cuenca del río Palo del Valle Geográfico del Alto Cauca, los valores del CN calculados se ajustaron en función de la pendiente a partir del modelo digital de elevaciones y se ponderaron para obtener un único valor de CN para toda la cuenca.

Palabras Clave: Hidrología, Numero de Curva, SIG, Escorrentía

Abstract

Geographic Information Systems (GIS) and Hydrology are two fields of work that share many interests, given the need to spatially represent different variables, necessary for the modeling and study of various hydrometeorological events or engineering projects. For this reason, the present research work proposes, under the framework of GIS, the construction of a methodology to determine the direct runoff in basins of the Geographic Valley of Alto Cauca, this parameter being a key factor in hydrological modeling, known as the Curve Number “CN”. Obtaining it by the traditional method of analog superposition of variables is very tedious, increasing the time and complexity of the modeling. The CN parameter is a conceptual model of precipitation losses, whose objective is to estimate the volumes of surface runoff, depending on the slope, use, type and condition of the soil, information that thanks to the evolution of GIS and other Geomatic tools for the capture and analysis of geospatial information are increasingly available and updated in compatible formats for different analyzes and geo processes. Taking into account the above, the main objective of this work is to present a method for obtaining CN using the ArcGIS 10.8 GIS software and adjusting the prime number methodology proposed by Ferrer et al (1995) for soils in the United States, making the equivalence for the soils of the Geographic Valley of Alto Cauca and in this way to obtain the spatial distribution of the CN parameter more quickly, economically and accurately in the basins of this region of Colombia. . As a pilot test, the selected methodology was applied to the Palo river basin of the Geographic Valley of Alto Cauca, the calculated CN values were adjusted based on the slope from the digital elevation model and were weighted to obtain a single CN value for the entire basin.

Keywords: Hydrology, Curve Number, GIS, Runoff

1. INTRODUCCIÓN

El problema de las inundaciones producidas por el río Cauca en su Valle Geográfico evidencia la necesidad de emplear la modelación hidrológica como insumo primordial para el proceso de búsqueda de alternativas para el control y/o mitigación del impacto generado por de las inundaciones. Este hecho repercute en la estimación y/o actualización de parámetros hidrológicos determinantes en modelación como lo es el Número de Curva (CN). (Chinh L. et. al 2010)

El Método del CN, es un modelo conceptual de pérdidas de precipitación, cuyo objetivo es estimar los volúmenes de escorrentía superficial y, en combinación con otras metodologías, el cálculo de los caudales máximos de salida en pequeñas y medianas cuencas. El parámetro del número de curva expresa la capacidad relativa de un suelo para producir escorrentía, al recibir una precipitación, bajo unas condiciones determinadas de usos y de labores que se dan sobre el suelo. (Fernández R. 2010). Este método fue desarrollado en el año 1954 por el Soil Conservación Service (SCS) hoy National Resources Conservation Service (NRCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Desde entonces el modelo ha sido ampliamente utilizado en una gran variedad de zonas climáticas, desde áreas templadas o húmedas a desiertos. (Baughton, W. 1989).

El método del CN expresa el volumen de escorrentía superficial como una función de la precipitación y la infiltración potencial máxima:

$$Q = \frac{(P - 2.0s)^2}{P + 0.2s} \quad Ec.1$$

Donde Q= Escorrentía superficial (mm), P= precipitación (mm), S= máxima infiltración potencial (mm). De acuerdo al modelo el NRSD relaciona la infiltración máxima con el parámetro adimensional CN.

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad Ec.2 \quad CN = \frac{25400}{254 + S} \quad Ec.3$$

Donde $0 < CN < 100$. Un valor de CN=100 representa una condición donde toda la lluvia se transforma en escurrimiento, mientras que CN=0 representa una cuenca con capacidad de retención infinita (Ponce y Hawkins, 1996.)

Variables que intervienen en la estimación del número de curva.

La estimación del CN depende de la relación tabular existente entre variables tales como el uso del suelo, grupo hidrológico de suelo, condiciones hidrológicas, pendiente del terreno y condición de humedad antecedente del suelo en la cuenca de estudio.

Dado que los valores de CN presentados por el hoy National Resources Conservation Service (NRCS) se encuentran en función de condiciones de cobertura y suelo de los Estados Unidos de Norte América es necesario realizar una equivalencia entre las condiciones y características del suelo establecidas en el método y las de la cuenca a estudiar. (Fernández De Villarán, 2010)

Teniendo en cuenta que el CN depende de la relación entre diferentes variables de tipo suelo, es necesaria la interpretación y análisis de información temática georreferenciada que nos permita caracterizar la zona de estudio, lo que sería un trabajo muy dispendioso si se tratara de obtener para todas las cuencas del valle geográfico del río Cauca de manera análoga, es aquí donde las herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) desempeñan un papel fundamental, ya que nos permiten automatizar el proceso y obtener de forma más rápida y precisa los valores del CN de acuerdo a los cambios y condiciones de la cuenca (pendiente, uso, cobertura y condición hidrología del suelo). (Guadalupe, et.al. 2012)

El presente documento tiene como objetivo generar propuesta metodológica para calcular el número de curva CN usando sistemas de información geográfica en cuencas del Valle Geográfico del Alto Cauca, lo cual tiene como objetivos específicos: caracterizar la cuenca hidrográfica del río Palo, mediante sistemas de información geográfica., Establecer una equivalencia según la condición del suelo de la cuenca y la clasificación de suelos del Soil Conservation Service y

Descripción de las variables que intervienen en la estimación del número de curva.

La estructura de datos que se empleó en el estudio fue el modelo Ráster, ya que para trabajar en hidrología presenta ventajas frente al modelo vectorial (Jabari S, et. Al. 2012):

- El modelo Raster permite dividir el territorio en unidades espaciales que tienen de un mismo tamaño y forma, facilitando la aplicación de modelos distribuidos.
- Con él es fácil realizar operaciones con las celdas vecinas (análisis estadísticos).
- Permite combinar cualquier tipo de dato con mapas obtenidos de imágenes de satélite.
- El hecho de relacionar únicamente los objetos de forma espacial, permite que se analicen conjuntamente elementos diversos tales como pendiente y usos del suelo de una forma automática

Generación de capas de información

- Mapa de pendientes

El mapa de pendientes, se obtiene a partir de un Modelo de Elevación Digital, el cual se puede definir como una matriz de números ordenados que representa la distribución espacial de las elevaciones sobre algún dato arbitrario del territorio (Moore et al., 1993). Aunque en el software existe la función automática de obtención de pendientes derivada del Modelo de Elevación Digital. Si no es así, es posible generarla a partir de las diferencias de altitud que existen entre las celdas vecinas al analizarlas mediante filtros.

Para el proyecto se generó un Modelo Digital de Elevación MDE de la cuenca de estudio de tipo ráster, a partir de la información vectorial del Mapa Topográfico Regional de 1999 y con una escala 1:25.000 suministrado por el IGAC. Para lograr una mejor precisión del DEM generado, en el proceso de interpolación se combinaron puntos y curvas de nivel. De este modo los puntos actuaran como relleno en zonas llanas, urbanas y las curvas de nivel actuaran como líneas de rotura evitando la interpolación de puntos lejanos. De esta manera se obtendrá una mayor precisión en el DEM resultante; y así garantizar un modelo hidrológicamente correcto (Risso et al, 2008).

La cuenca del río Palo presenta pendientes fuertes superiores al 3%, lo que se traduce en altas velocidades de transporte de agua e influye de manera favorable en la calidad fisicoquímica y biológica del agua. (Moore et al., 1993).

- Mapa de uso de suelo y clasificación hidrológica

Para la generación del mapa de usos del suelo, se utilizan Imágenes de Satélite Multiespectrales, Landsat-TM las más utilizadas para la clasificación de usos del suelo, disponibles en <http://glovis.usgs.gov/> y <http://glcf.umd.edu/>) de la zona de estudio. (Oñate F, 2013) La cual debe ser clasificada por el método supervisado que requiere de cierto conocimiento previo del terreno y de los tipos de coberturas presentes en el área de estudio, para lo que se realiza, en el mejor de los casos, una combinación de trabajo de campo, de análisis de fotografías aéreas, mapas e informes técnicos, así como referencias profesionales y locales. Con base de este conocimiento se definen y se delimitan sobre la imagen las áreas de entrenamiento o áreas piloto. Las características espectrales de tales áreas son utilizadas a fin de “entrenar” un algoritmo

de clasificación, el cual calcula los parámetros estadísticos de cada banda para cada sitio piloto y de esta forma proceder a evaluar cada ND de la imagen, compararlo y asignarlo a una respectiva clase (Ver figura 2) (Risco E. 2011).

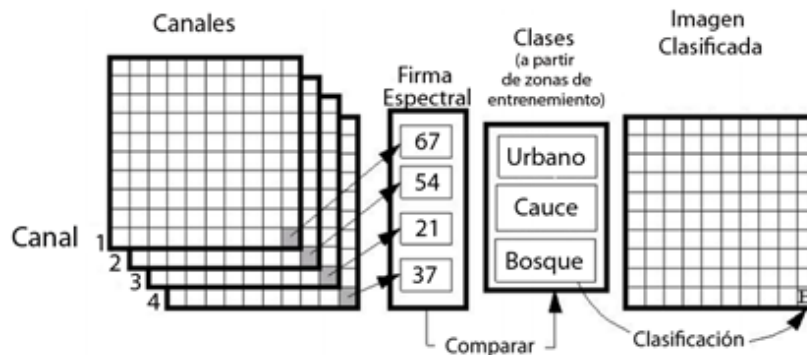


Figura 2. Esquema de Clasificación digital supervisada
Fuente: (Olaya, 2007)

La información proporcionada debe ser clasificada empleando la base de datos de Corine Land Cover Colombia (CLC) que permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de las imágenes de satélite de resolución media (Landsat TM), (IREHISA, 2013).

USO DEL SUELO	CLASIFICACION SCS
Vegetación de páramo y subpáramo	Pradera pobre
Tejido Urbano	Rocas impermeables
Zona Industrial	Rocas impermeables
Centros Poblados	Rocas impermeables
Red Vial	Rocas impermeables
Cuerpos de agua	Zonas impermeables
Caña de azúcar	Rotación de cultivos densos
Mosaico de pastos y cultivos	Rotación de cultivos densos
Otros cultivos permanentes	Rotación de cultivos densos
Arbustos y matorrales	Matorral con vegetación herbácea
Arbustos y matorrales	Matorral con vegetación herbácea
Tierras desnudas o degradadas	Matorral desértico
Pastos limpios zona baja	Pastos o pastizales
Mosaico de cultivos	Rotación de cultivos densos
Otros cultivos anuales o transitorios	Rotación de cultivos densos
Pastos enmalezados o en rastrojados	Pastos o pastizales
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Barbecho
Bosque natural denso	Masa forestal (bosques, monte bajo, ...)
Pastos zona alta	Pastos o pastizales
Mosaico de pastos con espacios naturales	Pequeñas arboledas
Pastos arbolados	Mezcla de árboles con hierba

Figura 3. Equivalencia entre los usos del suelo de la cueca en estudio y los descritos por el NRSC

3 . ANALISIS Y RESULTADOS

Uno de los insumos fundamentales correcta obtención del numero de curva CN es el mapa de uso del suelo reclasificado según los datos de Corine Land Cover Colombia para la cuenca específica en estudio. El resultado obtenido de esas equivalencias se muestra en el mapa de la figura 4.

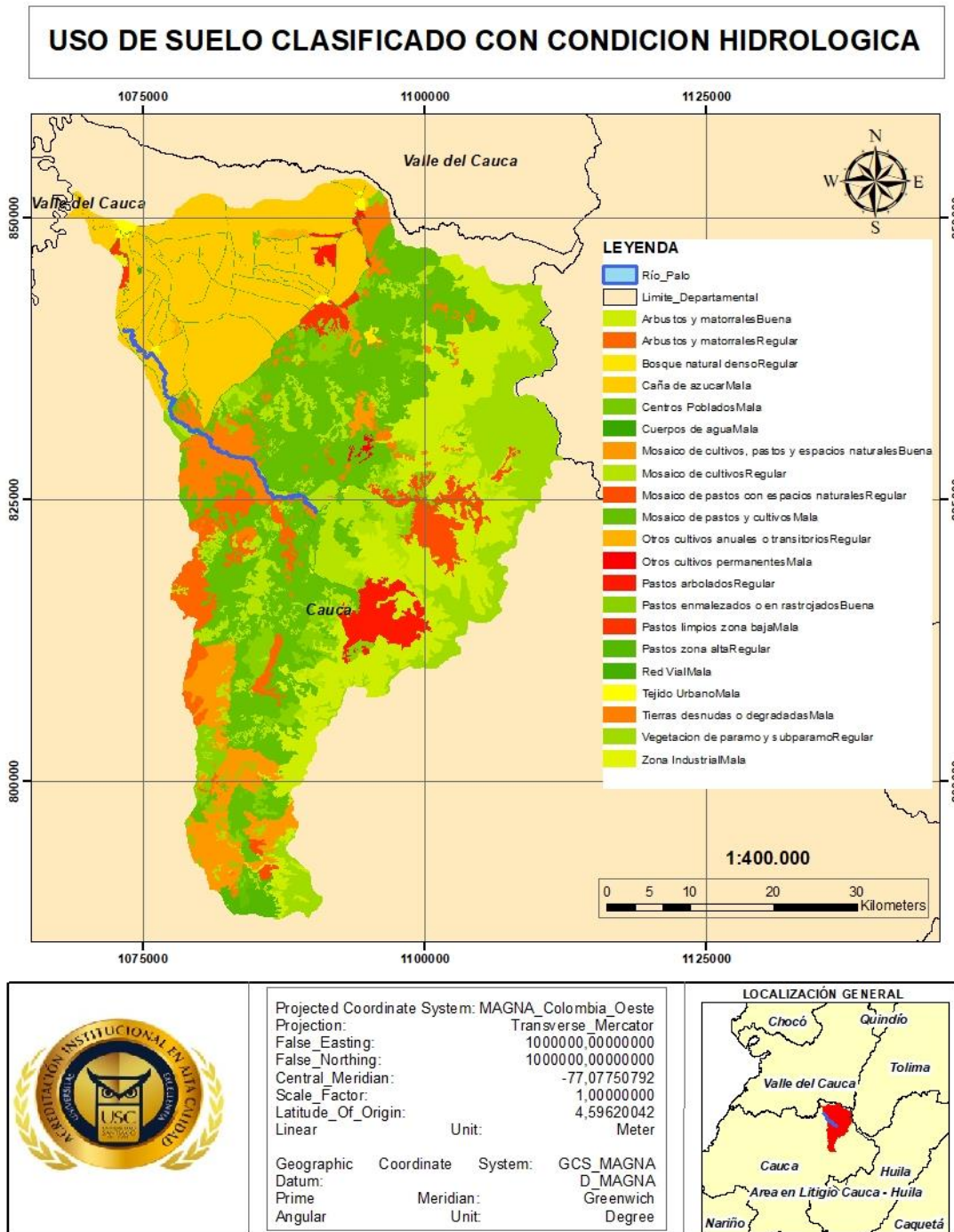


Figura 4. Mapa uso del suelo y condición hidrológica
Fuente: Elaboración propia

La condición hidrológica (*buena , regular o mala*) para cada uso de suelo se asignará y se digitalizará en el SIG teniendo en cuenta los efectos de cada cobertura sobre la infiltración y la escorrentía de acuerdo a las condiciones y a la caracterización establecida por el SCS (1985). La cobertura o uso de del suelo podrá ser clasificada con esta condición empleando la herramienta **Selecc By Attributes** en la tabla de contenido del shapefile de uso del suelo.

• Variable condición hidrológica

Este parámetro indica los efectos del tipo de cubierta y de su tratamiento sobre la infiltración y la escorrentía. Generalmente es estimada a través de la densidad de la planta que cubre el suelo o de los residuos acumulados sobre él, y se clasifica en BUENA, REGULAR o MALA, siendo una condición hidrológica pobre o mala: cuando existan sobre el suelo factores que reducen las tasas de infiltración y aumenten la escorrentía, y por el contrario una condición hidrológica buena se observa cuando sobre el suelo existen factores que tienden a mejorar la infiltración del agua y disminuir la escorrentía. (Havrylenko S. et al, 2009). Algunos factores a considerar en la estimación del efecto de la cubierta en la infiltración y en la escorrentía según (USDA-SCS, 1986) son:

- La fracción de cabida cubierta o densidad de céspedes,
- Cultivos u otras áreas cubiertas por vegetales, la cantidad de suelo cubierto a lo largo del año, las rotaciones de cultivo entre leguminosas y gramíneas,
- El porcentaje de suelo cubierto de residuo y el grado de rugosidad superficial del suelo

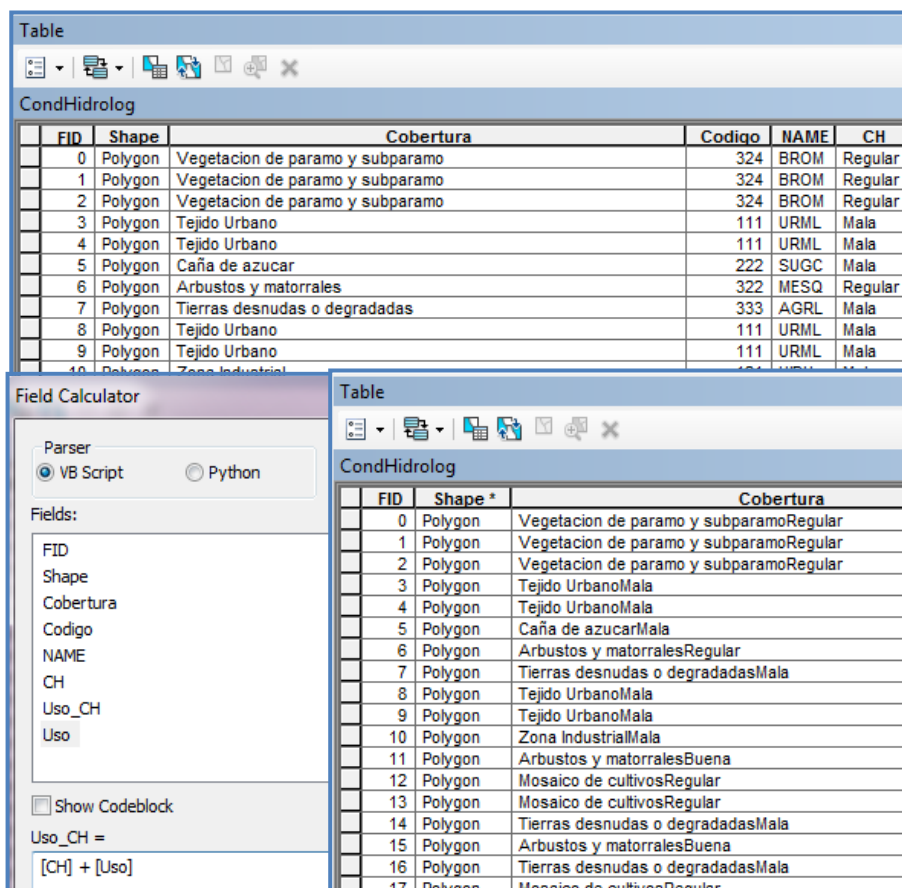


Figura 5. Asignación condición hidrológica mediante el software ArcGIS 10.8

• Mapa de tipo de suelo

Teniendo en cuenta las tablas de clasificación del Soil Taxonomy donde se describen las características del entorno que ayudan a determinar con más exactitud el tipo de suelo en estudio y el tipo de drenaje que tienen, se construye el mapa de tipo de suelo de acuerdo a las características ya descritas (A, B, C, D). Esta capa de información se puede generar, básicamente, de dos formas: digitalizando el mapa de acuerdo a las unidades A, B, C y D, o, si ya se dispone de un mapa general de tipos de suelo en el SIG, solo se reclasifica (Rodriguez et al, 2009).

El método del Número de Curva establece cuatro tipos o grupos de suelo desde el punto de vista de su comportamiento hidrológico (NRCS, 2002)

- *Grupo A.*- Suelos con bajo potencial de escurrimiento por su gran permeabilidad y con elevada capacidad de infiltración, aun cuando estén húmedos. Se trata principalmente de suelos profundos y con texturas gruesas (arenosa o areno-limosa). El nivel freático debe quedar a una profundidad mayor de 150 cm permanentemente.
- *Grupo B.*- Suelos con moderada capacidad de infiltración cuando están saturados. Principalmente consisten en suelos de mediana a alta profundidad, con buen drenaje. Sus texturas van de moderadamente finas a moderadamente gruesas (franca, franco-arenosa o arenosa). El nivel freático debe quedar permanentemente a una profundidad mayor de 60 cm.
- *Grupo C.*- Suelos con escasa capacidad de infiltración una vez saturados. Su textura va de moderadamente fina a fina (franco-arcillosa o arcillosa). También se incluyen aquí suelos que presenten horizontes someros bastante impermeables. El nivel freático se encuentra siempre a una profundidad mayor de 60 cm.
- *Grupo D.*- Suelos muy arcillosos con elevado potencial de escurrimiento y, por lo tanto, con muy baja capacidad de infiltración cuando están saturados. También se incluyen aquí los suelos que presentan una capa de arcilla somera y muy impermeable, así como suelos jóvenes de escaso espesor sobre una roca impermeable, ciertos suelos salinos y suelos con nivel freático alto (a una profundidad menor de 60 cm).

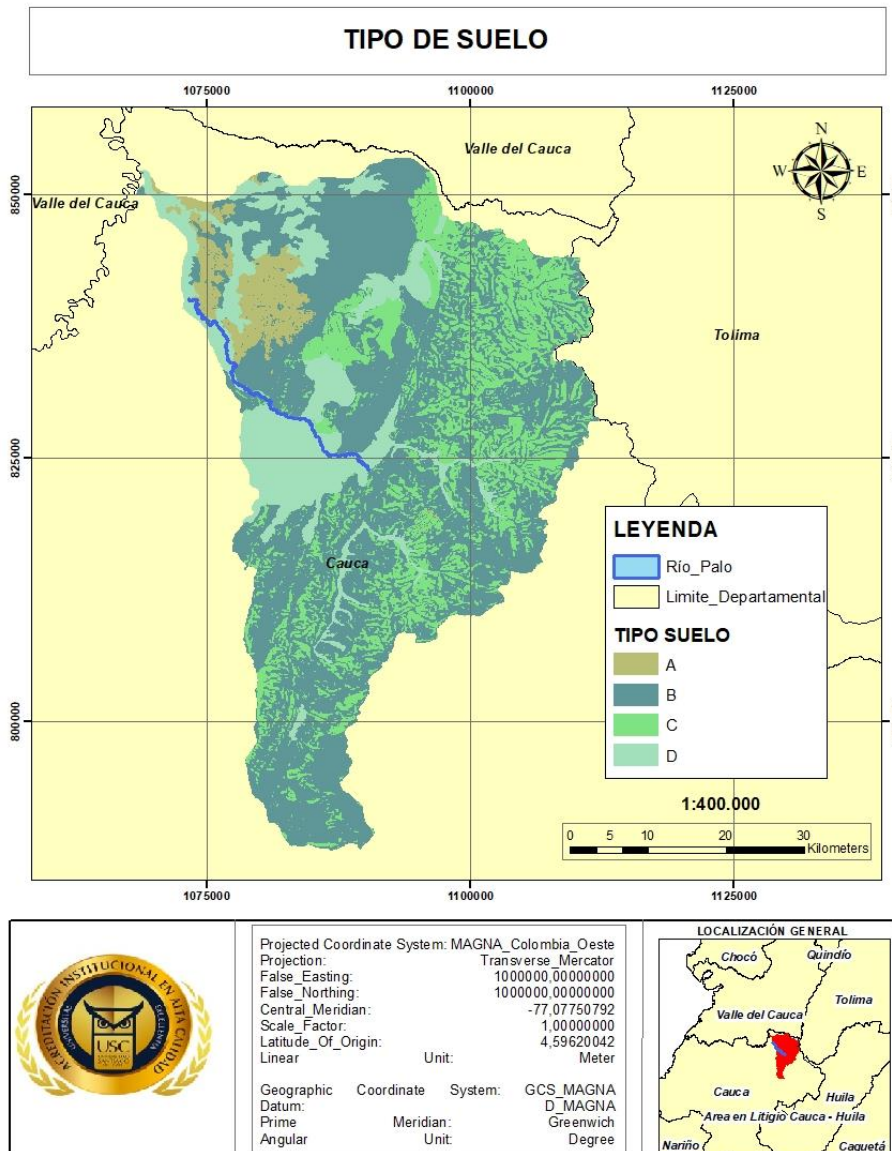


Figura 6. Mapa Tipo suelo Cuenca de Río Palo.
 Fuente: Elaboración propia

- Generación del Mapa de Número de Curva

La forma en que se superponen, combina o relacionan las variables que intervienen en la estimación del número de curva se hace mediante un procesamiento de álgebra de mapas empelando el método de los números primos.

Metodología de los números primos en SIG

Es un método empleado generalmente para combinar capas de información cuando se quiere calcular el número de curva por medio de sistemas de información geográfica. Dada la singularidad de los números primos, el producto de ellos siempre dará un número diferente (Ferrer et al 1995).

Después de tener las coberturas necesarias en el software SIG a cada una de las capas se le asigna o reclasifica con números primos, de esta manera se garantiza que el producto entre estas variables será diferente por cada combinación de números primos o cada combinación de las variables (Porta, J, 2004).

De esta manera, en caso del NC conociendo el resultado del producto de las variables se puede saber de qué características de uso, tipo del suelo y condición hidrológica se tratan y se podrá encontrar su número de curva CN (Fernández, De V, 2010)

Descripción de uso del Suelo				Grupo Hidrológico del Suelo			
Uso del Suelo	Prácticas de Cultivo	Condición Hidrológica	No Primo	A	B	C	D
				2	3	5	7
Cultivo de leguminosas o rotaciones leguminosas-prados en alternancia Mosaico de cultivos con prados o praderas. Caña, Arrozales, papa	+ cubierto de residuos	Buena	127	254	381	635	889
	Según Máxima Pendiente	Pobre	131	282	393	655	917
		Buena	137	274	411	685	959
	Según curva de nivel	Pobre	139	278	417	695	973
		Buena	149	298	447	745	1043
	Según curva de nivel y aterrazado	Pobre	151	302	453	755	1057
		Buena	157	314	471	785	1099

Cobertura	Primo 1	GH	Grupo H
Arbustos y matorralesBuena	193	B	3
Arbustos y matorralesRegular	191	C	5
Bosque natural densoRegular	401	B	3
Caña de azucarMala	181	B	3
Centros PobladosMala	307	A	2
Cuerpos de aguaMala	359		
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturalesB*	137		
Mosaico de cultivosRegular	191		
Mosaico de pastos con espacios naturalesRegular	179		
Mosaico de pastos y cultivosMala	131		

Figura 7. Ejemplo de reclasificación con números primos

Una vez generadas las capas de uso de suelo con condición hidrológica y grupo hidrológico se usa la herramienta Dissolve para simplificar la información y facilitar su uso en el geoproceto. Posteriormente se debe crear un nuevo campo (primo 1 y primo 2) en las dos coberturas generadas para hacer la reclasificación con los números primos teniendo en cuenta la las tablas del NRSC. La tarea se ejecuta de forma manual o usando la herramienta **Select By Attributes**. La distribución espacial de la capa uso(cobertura) y tipo de suelo reclasificada con números primos se observa en las figuras 8.

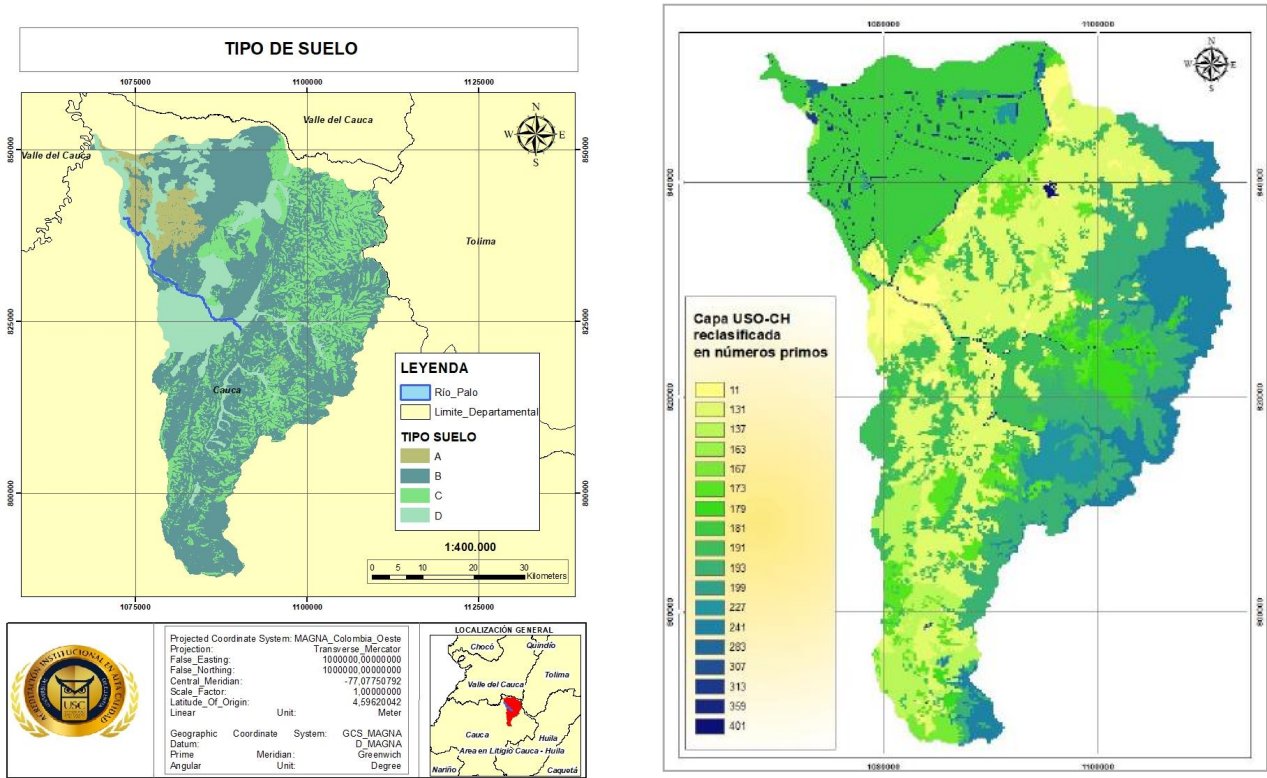


Figura 8. Tipo de suelo y uso de suelo reclasificado con números primos

Estimación del número de curva.

Después de reclasificar las variables con números primos, se unen usando la herramienta **Intersect**. Luego se multiplican los campos usando la herramienta **Field Calculator** para obtener el producto de los números primos. La distribución espacial del producto de los números primos se presenta en la figura 9.

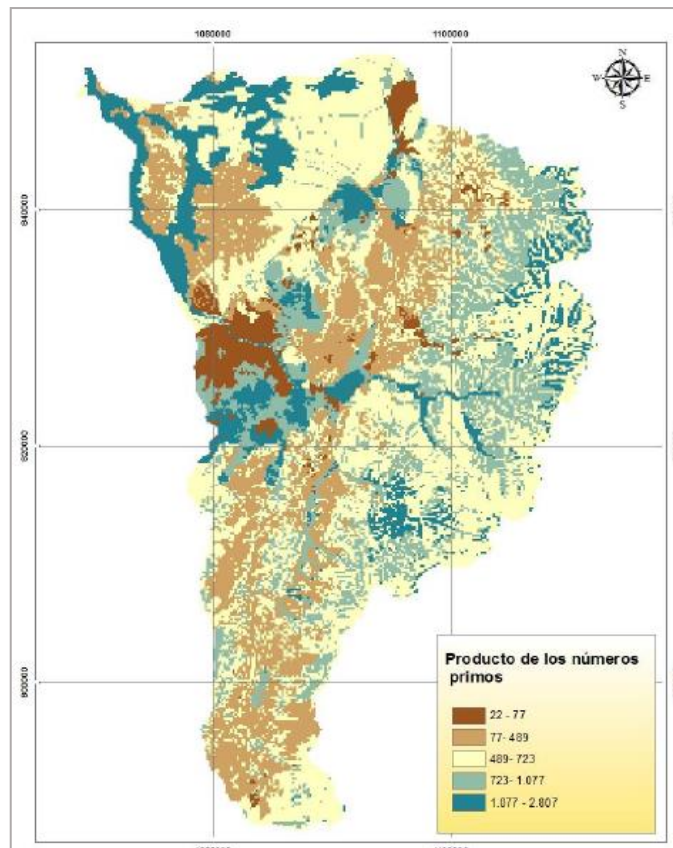


Figura 9. Producto números primos entre tipo suelo y uso del suelo

Todos los valores del producto de números primos con sus Números de Curva correspondientes según la tabla Ferrer et al 1995(anexo1) se organizan en dos columnas y se guardan como archivo tipo .dbf (ver figura 10, anexo2) . Desde ArcGIS 10.8 se importa el nuevo archivo y se realiza la unión de campos en común por medio de la herramienta Joins donde se selecciona la tabla que se quiere unir a la cobertura generada del producto de los números los números primos y por medio del campo en común se trae la información de la tabla con los números de curva correspondientes para cada número primo resultante obteniendo de esta manera el Numero de Curva CN para cada cobertura de la cuenca de manera automática (Ponce, V. M et al, 1996). El resultado del obtenido se puede ver en la figura 11.

Producto entre No. primos	CN	Producto entre No. primos	CN	Producto. entre No primos	CN	Producto entre No. primos	CN
22	77	33	86	55	91	77	94
26	76	39	85	65	90	91	93
34	74	51	83	85	88	119	90
38	72	57	81	95	88	133	91
46	67	69	78	115	85	161	89

Figura 10. Tabla en formato dbf. de la equivalencia entre el producto de los números primos y su CN correspondiente. Tabla completa se presenta como anexo (ANEXO2)

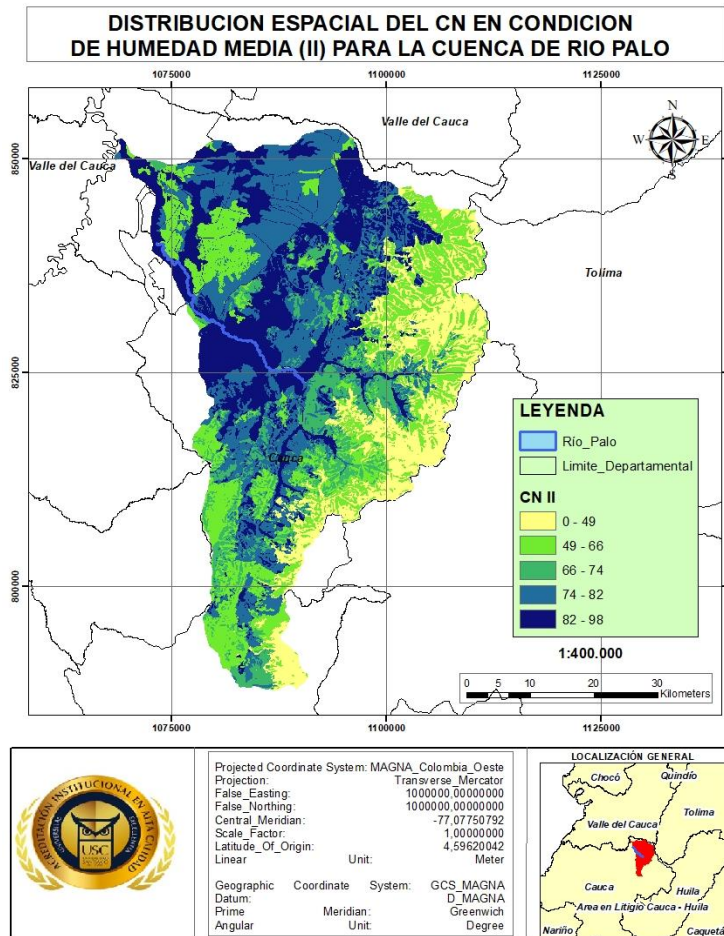
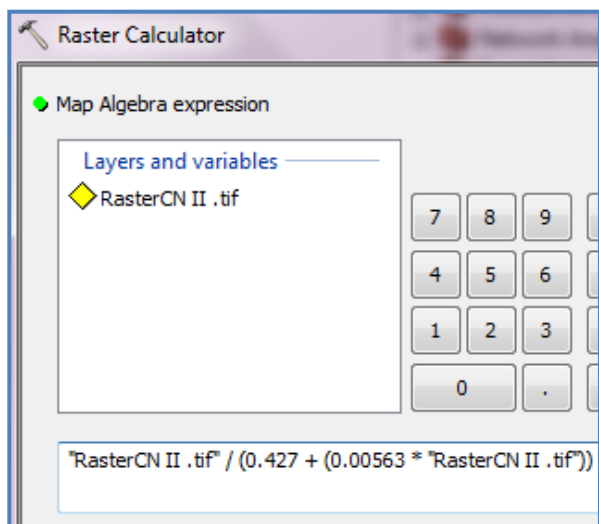


Figura 11. Mapa CN II en condición media de humedad.

- Condición de humedad I y III

El número de curva aplica para diferentes condiciones de humedad antecedente, siendo la condición C_{II} la que corresponde a la humedad media del suelo. Si en el momento de producirse la precipitación el suelo se encuentra saturado de acuerdo con lluvias precedentes en el período de 5 días anteriores, se supone un aumento de la escorrentía (condición C_{III}); por el contrario, si el suelo está seco la infiltración será predominante (condición C_{I}). (Gaspari, F)

Es claro que los valores presentados en la tabla obedecen a una condición media de humedad (C_{II}). Para obtener valores CN en condiciones de humedad diferentes (I y III), considerando si los días anteriores has sido secos o húmedos, Chow et al (1992) proponen las siguientes ecuaciones.

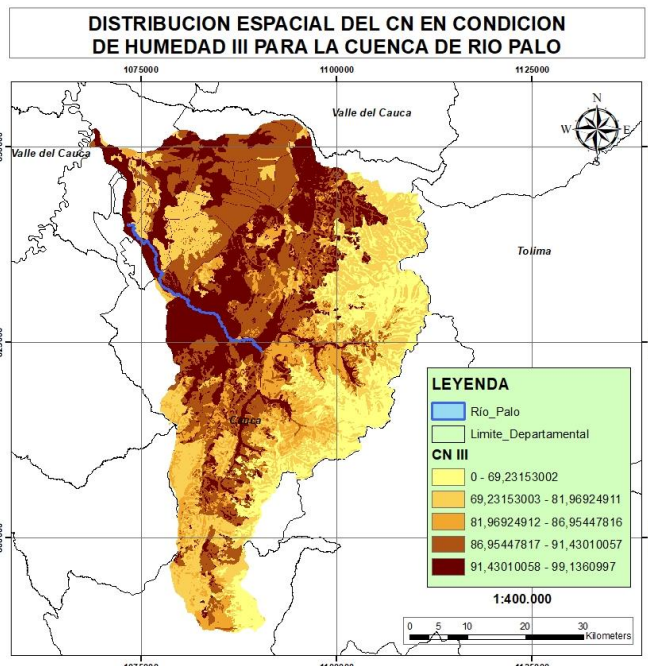
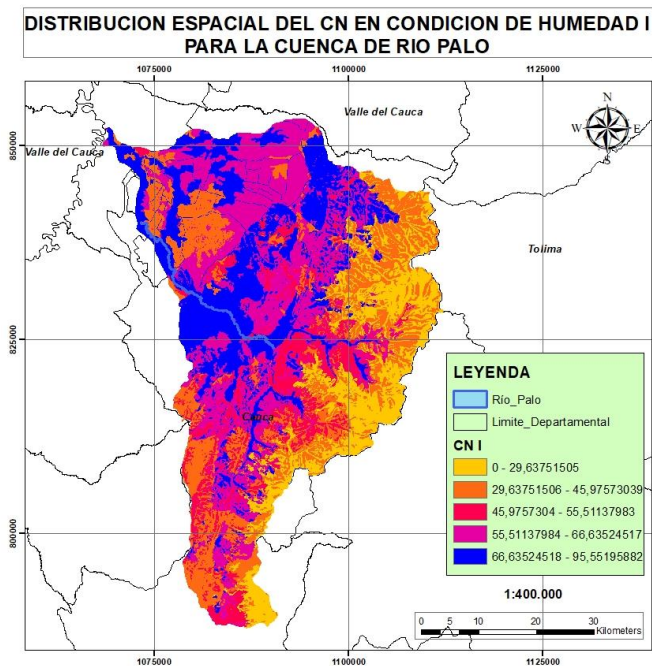


Para el cálculo del CN en condición III con la ayuda del sig Arcgis 10.8 y utilizando la herramienta **Raster Calculator**, se digita la ecuación correspondiente en el espacio de trabajo de la herramienta. (la cual está en función del CNII). Como lo muestra la figura 12

Figura 12. **Raster Calculator**. Cálculo del número de curva en Condición III.

$$C_I = \frac{C_{II}}{0.427 + 0.00563CN_{II}}$$

$$C_{III} = \frac{C_{II}}{2.281 - 0.0281CN_{II}}$$



	Projected Coordinate System: MAGNA_Colombia_Oeste Projection: Transverse_Mercator False_Easting: 1000000.00000000 False_Northing: 1000000.00000000 Central_Meridian: -77.07750792 Scale_Factor: 1.00000000 Latitude_Of_Origin: 4.59620042 Linear Unit: Meter	LOCALIZACIÓN GENERAL
	Geographic Coordinate System: GCS_MAGNA Datum: D_MAGNA Prime Meridian: Greenwich Angular Unit: Degree	

	Projected Coordinate System: MAGNA_Colombia_Oeste Projection: Transverse_Mercator False_Easting: 1000000.00000000 False_Northing: 1000000.00000000 Central_Meridian: -77.07750792 Scale_Factor: 1.00000000 Latitude_Of_Origin: 4.59620042 Linear Unit: Meter	LOCALIZACIÓN GENERAL
	Geographic Coordinate System: GCS_MAGNA Datum: D_MAGNA Prime Meridian: Greenwich Angular Unit: Degree	

Figura 13. Mapas resultantes para el Número de Curva CN en Condición I y III

Los valores de CN en condición de humedad antecedente (CNIII) tienden a aumentar ya que bajo esta condición el suelo se encuentra saturado sin capacidad de infiltración o retención de agua por la cantidad de agua precipitada los 5 días antecedentes.(Swingly, et al. 2012)

- *Ajuste del número de Curva por Pendientes:*

Ya que los valores del número de curva obtenidos de las tablas para la condición II de humedad son apropiados para pendientes de hasta el 3%, es necesario realizar un ajuste, teniendo en cuenta que las pendientes de las cuencas del Valle geográfico del alto Cauca superan el 5%.

Después de calcular el CN en condición de humedad III(CNIII) se procese a estimar el CN ajustado a la pendiente de la cuenca. Este se ajusta empleando la ecuación de corrección del número de curva por la pendiente de la cuenca (Neitsch et al., 2002) la cual ingresamos en la herramienta Raster Calculator que finalmente nos muestra el CN ajustado por pendientes para la cuenca del río Palo.

$$C_{IIs} = \frac{C_{III} - C_{II}}{3} * [1 - 2 * e^{(-13.86slp)}] + CN_{II}$$

Donde: C_{IIs} = es el número de curva modificado por la pendiente en condición II de humedad.

C_{II} = es el número de curva sin modificar en condición II de humedad

C_{III} = es el número de curva sin modificar en condición III de humedad

Slp = es la pendiente media de la cuenca.

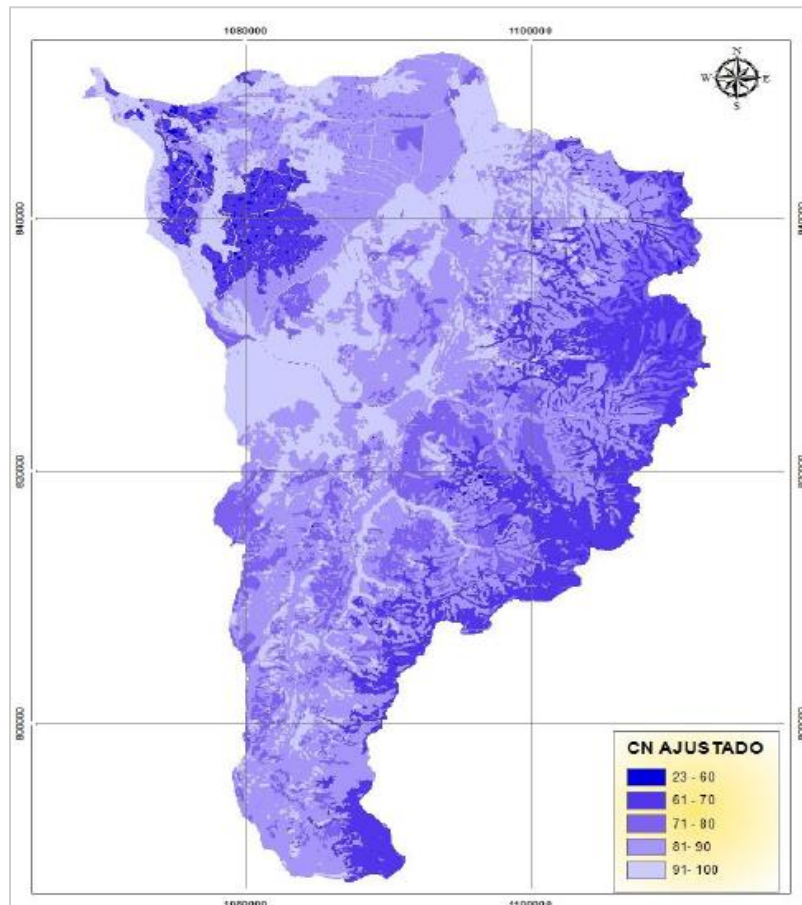


Figura 14. Mapa Número de Curva CN ajustado por pendiente

- *CN conjunto para la cuenca.*

Visualizando los resultados estadísticos del ráster se puede apreciar el CN promedio para toda la cuenca. La figura 15 muestra este resultado.

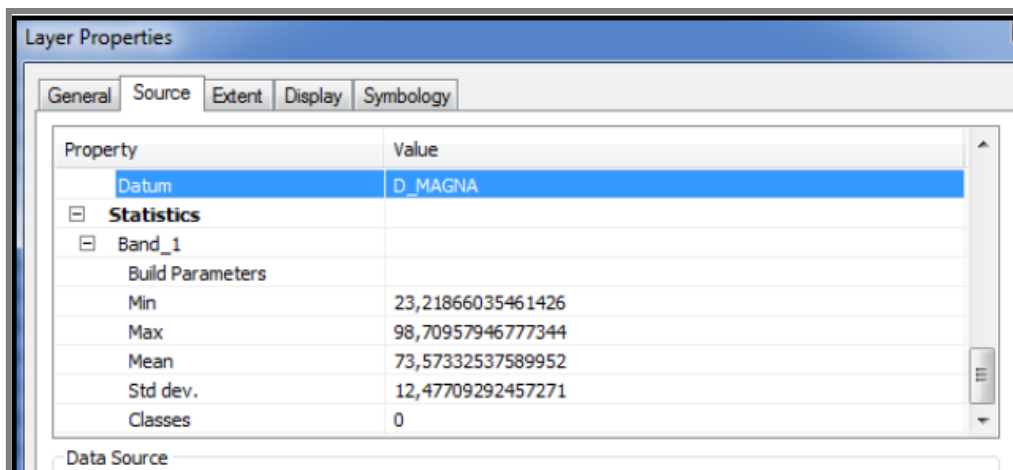


Figura 15. Valor estimado del CN usando la metodología de los números primos.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENTADACIONES

- Se definió una metodología para calcular el número de curva CN usando sistemas de información geográfica para cuencas del Valle Geográfico del Alto Cauca
- La metodología para estimar el parámetro hidrológico CN, la cual depende de la relación existente entre las variables pendiente del terreno, condición de humedad antecedente, uso, tipo y condición hidrológica del suelo nos permitió obtener como resultado un valor de CN para la cuenca del Río Palo de 73,5 lo cual indica que el 73% del agua que precipita en la cuenca es drenada. El método descrito fue implementado satisfactoriamente en la cuenca del Río Palo.
- El mapa de distribución espacial del CN permite identificar las zonas de la cuenca con mayor índice de escorrentía al igual que las zonas con mayor capacidad de infiltración. Se identifican las zonas con paramos, bosques y suelo tipo A como las de mayor capacidad de infiltración o retención de agua en la cuenca y las zonas con suelos arcillosos, coberturas pobres de suelo y con establecimiento de centros urbanos como las que producen mayor escorrentía confirmando la teoría propuesta por Ferrer
- El documento describe un método para estimar el número de curva usando el SIG ArcGIS 10.8 pero se quiere hacer claridad que en cuencas pequeñas con tipos y usos suelos homogéneos donde el número de curva no es muy variable es recomendable emplear el método de asignación manual, el cual permite relacionar de forma directa el valor del CN con los usos y tipos de suelo de la cuenca en estudio. Sin embargo para cuencas más extensas con tipos y suelos muy heterogéneos, para mayor agilidad y precisión en el cálculo de este parámetro es recomendable trabajar con la metodología de los números primos, ya que este método permite obtener de forma automática los valores del CN.
- La tabla base del CN propuesta en este documento es una adaptación de la tabla original creada por el SCS. En ella se establecieron algunas equivalencias entre usos del suelo de Norte América y los usos del suelo de Colombia basadas en el criterio de los autores y la experiencia descrita en trabajos antecedentes. Por tanto para una mayor precisión en el proceso de estimación del CN es importante realizar estudios detallados para

establecer equivalencias más acertadas entre los usos del suelo de estas zonas, dado que las condiciones de las cuencas con las cuales fue diseñado el modelo son muy diferentes a las cuencas del Valle Geográfico del Alto Cauca. Partiendo de dicho estudio se recomienda establecer una tabla única de valores de CN para Colombia con todos los usos del suelo descritos en la leyenda nacional de coberturas del Corine Land Cover.

- Se sugiere que mediante la herramienta ModelBuilder y la metodología propuesta se genere un modelo estandarizado de geoprocesamiento que automatice el cálculo del CN para diferentes cuencas y zonas del territorio nacional.

REFERENCIAS

- Baughton, W. (1989). A review of the USDA SCS curve number method. *Australian Journal of soil research*, 27. 511-523p.
- Chinh L., Iseri H., y Hiramatsu, K., (2010). GIS-based Distributed Parameter Model for Rainfall Runoff Calculation using Arc Hydro Tool and Curve Number Method for Chikugo River Basin in Japan. *Journal Department of Agro-environmental Sciences, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka* pp.313-319.
- Chow, V., Maidment D., y Mays, L.(1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá. Colombia McGraw-Hill.
- Fernández De Villarán Rubén. (2010) Tesis doctoral: mejora de los parámetros de cálculo del modelo del número de curva y su validación mediante un modelo hidrológico distribuido. Universidad de Huelva. Huelva –España.
- Ferrer, M., Rodríguez J., y Estela T (1995). “Generación Automática del Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica”. *Ingeniería del Agua*. Vol. 2. N° 4. p. 43-58. [En línea.
- Gaspari, F., Sinesterra, G., y Marlts R, (2007). Rainfall - runoff and curve number relationship under different conditions of soil's. *Ventania system modal basin, Argentina. Rev. FCA UNCuyo. Tomo XXXIX. N° 1, 21-28pp.*
- Guadalupe, M., Varni, M., Chagas, y Entraigas I., (2012). Calibración del número de curva en una cuenca agropecuaria de 116 km² de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Instituto de Hidrología de Llanuras. Agrociencia 46: 535-541.pp*
- Havrylenko S.; Damiano F., y Pizarro M, (2009). Estimación del número de curva en la cuenca del Río Arrecifes. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Instituto de Clima y Agua.*
- IREHISA. (Grupo de investigación en Ingeniería de los recursos Hídricos y Suelos) & CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca), (2013). *Construcción del modelo conceptual para la restauración del corredor de conservación y uso sostenible del sistema río Cauca en su Valle Alto. Convenio 001 suscrito entre ASOCARS(Asociación de Corporaciones Regional Autónomas-CVC y la Universidad del Valle.*
- Jabari, S., Sharkh M., y Al-Mimi, Z (2012). Estimation of runoff for agricultural watershed using scs curve number and gis. *Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC 13, Hurgada, Eegy.*
- Moore, I., Grayson, R., y Ladson, A, (1993). *Digital Terrain Modelling: A review of Hydrological Geomorphological, and Biological applications. Advances in Hydrological Processes, Wiley, 7-34pp.*
- MOPT. (1992). *Guía para la elaboración de Estudios en el Medio Físico MOPT. Naciones Unidas. Objetivos de Desarrollo del Milenio. Nueva York.*
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., y King, K, (2002). *Soil and Water Assessment Tool. Theoretical documentation (SWAT, 2000 v.). TexasWater Resources Institute, College Station, Texas. 506 pp.*

NRCS (2002). National Engineering Handbook, Section 4. Hydrology. US. Department of Agriculture, Washington.

Olaya, 2007. Clasificación supervisada de imágenes. Disponible en: <
http://geoservice.igac.gov.co/contenidos_telecentro/PDI_Sem4/>

Oñate F, (2013). Aplicación del procesamiento de imágenes satelitales para la determinación del número de curva en la cuenca alta del río Catamayo. Ecuador. Revista electrónica de la Redlach, No 1.

Ponce, V. M., and R. Hawkins. 1996. Runoff Curve Number: has it reached maturity J. Hydrologic Eng. (1): 11-19.

Porta, J, (2004). Edafología para la Agricultura y Medio Ambiente. MundiPrensa. España.

Risco E. 2011. Escurrimiento superficial por el método del número de curva aplicación en la cuenca del río Arahuy. Lima.

Risso A., Sousa. L., y Cavalcanti (2008). El cálculo del escurrimiento superficial en áreas urbanas utilizando geoprocessamiento. Instituto de pesquisas hidráulicas. Universidad Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS.

Rodríguez, A., y Gaspari. F. (2009). "GeoQ: Herramienta para la determinación del número de curva y escorrentía bajo entorno SIG. Idrisi Andes®", GeoFocus (Informes y comentarios). Revista internacional de ciencia y tecnología de información geográfica. n° 10, p.11-26.

Swingly J., Sumarauw F, y Ohgushi., K., (2012). Analysis on Curve Number, Land Use and Land Cover Changes and the Impact to the Peak Flow in the Jobaru River Basin, Japan. Department of Civil Engineering and Architecture. International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS Vol: 12 No: 02. 19-22pp

Temez, J, (1978). Cálculo Hidrometeorológico de Caudales de Avenida en Pequeñas Cuencas Naturales. MOPU.

USDA, Soil Conservation Service (1972). National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. U.S. Department of Agriculture, Washington.

USDA, Soil Conservation Service (1986), "National Engineering Handbook". Hydrology. U.S. Department of Agriculture, Washington.