

CrossRef DOI of original article:

1 Scan to know paper details and author's profile 465U

2

3 *Received: 1 January 1970 Accepted: 1 January 1970 Published: 1 January 1970*

4

5 **Abstract**

6

7 *Index terms—*

8 **1 I. INTRODUCCIÃ?"N**

9 La hidrología y los SIG (Sistemas de información geográfica) se han constituidos como dos áreas que comparten
10 una gran variedad de información (Morad, 2001). Por tal motivo, ha sido de gran interés el estudio de las
11 relaciones y vínculos que existen entre los SIG y el modelamiento hidrológico (Castro López, 2011). El método del
12 número de curva (CN) es uno de los vínculos que presentan estos dos campos de investigación. Esta metodología
13 fue desarrollada por SCS (Soil Conservation Service) de los Estados Unidos con la finalidad de determinar la
14 precipitación efectiva de una cuenca a partir del tipo de cobertura y uso de suelo, la lluvia acumulada y las
15 condiciones de humedad de la zona (Ven Te, 1984); es decir, a partir de estas características físicas del territorio,
16 este parámetro hidrológico permite establecer el potencial de escorrentía de la cuenca (Díaz Carvajal , 2017).

17 De acuerdo con (Romano Castillo, 2007) el CN es el método más adecuado para transformar la precipitación
18 total en precipitación efectiva debido a que tiene en cuenta una de las principales etapas del ciclo del agua, como
19 lo es la infiltración, la cual influye notablemente en la dinámica hidrológica. Este proceso se presenta cuando el
20 agua precipitada se mueve de manera vertical a través de la superficie del suelo generando el incremento en la
21 humedad en esta matriz (Calvache, 2010).

22 A pesar de que la metodología del SCS se ha convertido en una de las principales herramientas para la
23 modelación hidrológica y ambiental (Sánchez Palomino, 2015), el número de curva ha generado gran interés en
24 las diferentes investigaciones debido a que permite establecer y describir las condiciones geográficas generales
25 de una zona de estudio (Sedano Cruz, 2013) al tiempo que indica el potencial de escorrentía de una superficie
26 determinada.

27 Para la estimación del número de curva en una cuenca hidrográfica, se han aplicado los SIG y la teledetección
28 como herramientas de gran utilidad para determinar las condiciones generales de la cobertura vegetal y del uso del
29 suelo(Lao Ramos, 2018). ??Deshmukh et.al., 2013) emplearon y procesaron imágenes satelitales por medio de un
30 software SIG con el fin de identificar la transformación del CN que se ha presentado en tres cuencas hidrográficas
31 ubicadas en India. Por medio de los resultados obtenidos se pudo concluir que este parámetro hidrológico se ha
32 incrementado en la zona a raíz del crecimiento desmesurado de la frontera agrícola.

33 Por su parte, ??Rodríguez et.al., 2012) establecieron mediante la zonificación del CN, el impacto ambiental
34 que se presenta en un escenario determinado, en cuanto a la ocupación del territorio, por medio de uso de las
35 herramientas SIG. En Colombia, se llevó a cabo un estudio en la subcuenca de Betancí, ubicada en el departamento
36 de Córdoba. Debido a los diferentes servicios ecosistémicos que ofrece esta ciénaga en el territorio y a la diversidad
37 que se encuentra en ella, es considerada como uno de los ecosistemas estratégicos del departamento. Sin embargo,
38 a causa de las diferentes actividades antrópicas que se han presentado alrededor de la ciénaga de Betancí se ha
39 presentado una transformación del uso del suelo en la zona como consecuencia de la expansión de la frontera
40 agrícola y ganadera, lo cual ha generado la pérdida casi total del bosque secundario (Díaz Carvajal , 2017).

41 Por otra parte, Colombia es uno de los principales países latinoamericanos que se caracterizan por sus
42 abundantes recursos naturales presentes en los diferentes ecosistemas del territorio. Los servicios ambientales
43 proveídos por estos ecosistemas han contribuido al desarrollo humano y social de la población colombiana. Sin
44 embargo, las diferentes actividades antrópicas que se ha desarrollado dentro de estos ecosistemas estratégicos
45 han generado una transformación en la cobertura vegetal y el uso del suelo en diferentes zonas, debido a un
46 aprovechamiento inadecuado de los recursos. Este esquema de desarrollo insostenible ha producido grandes
47 impactos ambientales que ponen en riesgo la estabilidad y el bienestar de las presentes y futuras generaciones

5 CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURAS Y USO DEL SUELO

48 (Sánchez Pérez, 2018). London Journal of Research in Science: Natural and Formal Los páramos son uno de los
49 ecosistemas estratégicos que presentan un bajo nivel de freático por lo que son considerados muy quebradizos ,
50 esto debido a que aproximadamente un 75% del terreno corresponde a agua (Cuervo Barahona, Cely Reyes, &
51 Moreno Pérez, 2016). En este contexto, las actividades productivas como la ganadería presentan efectos negativos
52 en la estructura del páramo debido a la pérdida de las propiedades retenedoras de agua y carbono en la matriz
53 del suelo y la compactación de este como producto del pisoteo del ganado (Rivera Ospina, 2013). Los suelos
54 del páramo se caracterizan por contener tres veces más reservas de CO en comparación con la biomasa presente
55 sobre la tierra, además, contienen el doble de carbono que el que se registra en la atmósfera; por tal motivo,
56 la materia orgánica del suelo en este tipo de ecosistemas es una fuente peligrosa para la generación de dióxido
57 de carbono lo cual contribuye a una de las principales problemáticas ambientales como el calentamiento global
58 (García Portilla, 2003).

59 A partir de la fragilidad de los ecosistemas de páramo dentro de territorio colombiano se han generado
60 diferentes normativas para su protección y preservación, como lo es el artículo 173 de la Ley 1753 del 2015,
61 en el cual se estipuló que en estas zonas no se pueden desarrollar actividades productivas que involucren el uso
62 de recursos naturales no renovables. Con base en lo anterior, la población que se encuentra asentada en este tipo
63 de ecosistemas no puede continuar con sus actividades económicas tradicionales. Por lo anterior, es indispensable
64 formular alternativas laborales para las comunidades campesinas residentes en estos ecosistemas (Rubiano Galvis,
65 2015).

66 El páramo del Siscunsí, ubicado al sur oriente del municipio de Sogamoso, es uno de los principales ecosistemas
67 estratégico del departamento de Boyacá ya que presenta una extensión de 5.942 ha (Sánchez Pérez, 2018). El
68 principal afluente del páramo es la quebrada La Iglesia, también conocida como quebrada Las Cañas, la cual es
69 uno de los principales drenajes que alimentan al Rio Cusiana dentro del departamento.

70 Considerando lo anteriormente expuesto, es claro que existe la necesidad de conocer el potencial actual de
71 generación de escorrentía en este ecosistema estratégico, y de este modo que las autoridades competentes cuenten
72 con acceso a herramientas e información científica para tener la capacidad de formular acciones de remediación
73 al impacto ambiental provocado sobre este ecosistema de páramo. De esta manera, los objetivos del presente
74 estudio fueron determinar el CN en la microcuenca de la quebrada Las Cañas del páramo de Siscunsí y así
75 reconocer la dinámica hidrológica de este ecosistema en cuanto al potencial de generación de escorrentía, así
76 como identificar las coberturas del suelo a partir de un mosaico multitemporal de imágenes LANDSAT, asignar
77 los grupos hidrológicos del suelo y comparar los resultados de los caudales obtenidos para los diferentes años de
78 estudio a partir del método racional empleando los modelos de Frederich Bell y Dick Peschke para el cálculo de
79 las intensidades, con los resultados entregados por las medias aritméticas analizados a partir del software QGIS
80 de las imágenes ráster de la escorrentía superficial.

81 2 II. MATERIALES Y MÉTODOS

82 3 Identificación del cambio de coberturas vegetales y uso del 83 suelo

84 4 Delimitación de la cuenca de estudio

85 Para obtener las imágenes satelitales se realizó la descarga del Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas
86 en inglés), obtenido del Servicio de Satélites de Alaska (Alaska Satellite Facility), la cual tiene una resolución
87 espacial por píxel de 12.5 metros. Por medio de la red de drenajes obtenida a partir del procesamiento del DEM
88 y de la información suministrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), se realizó la delimitación
89 la microcuenca de la quebrada Las Cañas. Estos datos fueron procesados por medio del software QGIS 2.18,
90 donde se realizó la corrección de píxeles, así como la London Journal of Research in Science: Natural and Formal
91 determinación de la dirección y acumulación de flujo y el respectivo análisis de cuenca. En la figura 1, se observa
92 el mapa de localización y delimitación del área de estudio.

93 Figura 1: Localización y delimitación área de estudio

94 5 Clasificación e identificación del cambio de coberturas y uso 95 del suelo

96 Posteriormente, a partir del software QGIS se realizó la identificación del uso del suelo teniendo en cuenta
97 las coberturas vegetales, empleando modelos de predicción. Para la caracterización de uso del suelo se aplicó la
98 metodología Corine Land Cover escala 1:25000 y la información suministrada por el documento Leyenda Nacional
99 de Coberturas de la Tierra Metodología Corine Land Cover escala 1:100000, adaptadas cada una a Colombia.
100 Los datos fueron validados y rectificados con las visitas realizadas a campo.

101 En la figura 2, se presenta el diagrama metodológico para la clasificación e identificación del cambio de
102 coberturas vegetales y uso del suelo.

103 6 London

104 7 Fuente: Autores

105 Es importante resaltar que se realizó una corrección y normalización de las imágenes satelitales debido a que
106 estas presentaban contrastes diferentes, los cuales pudieron ser producidos por la posición en que se encontraba
107 el sol al momento de su captura y por el relieve de la zona. La corrección topográfica se llevó a cabo por medio
108 de la herramienta "Topographic correction" del software QGIS aplicando los métodos Coseno corrector (Civco,
109 1989) Posteriormente, se ajustó la clasificación de coberturas terrestres de manera supervisada. Esta clasificación
110 es pertinente por la relación de las clases de cobertura existentes en el área de estudio. La reclasificación de
111 las imágenes satelitales se realizó con la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia mencionada
112 anteriormente (Menéndez & Núñez, 2009). En este proceso se tuvieron en cuenta, cuatro tipos de cobertura
113 vegetal que fueron identificados en la microcuenca, presentados en la Tabla 1. Estas coberturas se relacionan con
114 los usos de suelo presentes en la región, por medio del POT del municipio de Sogamoso, el EOT del municipio
115 de Aquitania y el POMCA de la cuenca del río Cusiana.

116 Para verificar y corregir la información obtenida se hizo uso en el procesamiento geográfica en QGIS y de la
117 información teórica descrita anteriormente, se realizó una visita al páramo Fuente: Autores identificó cada una
118 de las clases de cobertura y uso del suelo, permitiendo ajustar los datos a las 4 clases de presentadas en la Tabla
119 1.

120 Tabla 1: Clasificación de cobertura vegetal y uso de suelo

121 8 Fuente: Autores

122 Con la información obtenida se elaboraron los mapas de uso de suelo de los años 1989, 1997, 2002, 2008, 2014 y
123 2017, por medio de los cuales se llevó a cabo el análisis multitemporal. Se empleó el plugin Molusce del software
124 QGIS para realizar las predicciones de los escenarios de uso del suelo, el cual permite analizar, modelar y simular
125 las transformaciones de la cobertura vegetal y uso del suelo en una zona específica (Villalobos Chacón , 2019).

126 Para la aplicación de esta herramienta es necesario contar con las capas reclasificadas de dos años, así como
127 una combinación de variables que están relacionadas a la humedad, erosión y deslizamientos. Estas variables son
128 la distancia a las vías empleando los datos de la red vial (figura 5), drenajes obtenidos del IGAC (figura 6), y
129 también las pendientes dadas en porcentaje que presenta el terreno (figura 7). En la figura 7, se observa el mapa
130 de pendientes en grados obtenido en QGIS, con la herramienta Slope.

131 9 Fuente: Autores

132 Figura 7: Mapa pendiente de la cuenca expresada en grados A partir de modelos matemáticos preestablecidos, la
133 herramienta Molusce genera mapas de predicción de los años presentados en la tabla 2. Los períodos obtenidos
134 por medio de los pares dan como resultado una diferencia temporal, la cual, al ser añadida al último año de los
135 pares indica el año a proyectar.

136 Tabla 2: Predicciones realizadas de uso de suelos

137 10 Fuente: Autores

138 La precisión del modelo se indica en el porcentaje del índice de Kappa. Este es un índice el cual mide la relación
139 entre la clasificación y los píxeles de realidad en el terreno. Los valores de esta constante k indican la concordancia
140 exacta, mientras que un valor de cero no representa ningún tipo de relación (Villalobos Chacón , 2019).

141 11 Análisis del cálculo del número de curva (CN)

142 La estimación de la precipitación efectiva se realizó por medio del método propuesto por el Soil Conservation
143 Service (SCS), el cual emplea variables como la cobertura y uso de suelo, las condiciones de humedad antecedente
144 (AMC) y la lluvia acumulada en el área de estudio con el fin de fijar un número de curva (CN) que representa tal
145 interrelación. Para la formulación del CN, se tiene en cuenta que la escorrentía directa (Pe) siempre es menor o
146 igual al agua que precipita en la cuenca (P); de igual manera, después de que comienza la precipitación efectiva,
147 la profundidad adicional del agua retenida (Fa) es menor o igual a la retención potencial máxima (S) (Ven Te,
148 1984).

149 Con el método de la SCS la escorrentía directa (Q), o precipitación efectiva, es calculada a partir de la siguiente
150 ecuación:

$$151 (1) ? = (?-0.2?) (?+0.8?)$$

152 12 Donde

153 Q es la escorrentía directa o precipitación efectiva, en pulgadas. P es la precipitación considerada, en pulgadas.

154 S es la diferencia potencial máxima entre P y Q en el momento de inicio de la tormenta y representa
155 proporcionalmente la pérdida de escorrentía por infiltración, intercepción y almacenamiento superficial.

156 Para el cálculo de la diferencia potencial máxima en pulgadas, se aplica la siguiente ecuación.

$$157 (2) ? = 100 ?? -10 \text{ Donde CN es el número de curva.}$$

158 13 Parámetros del modelo (AMC y Tipo de Suelo Hidrológico)

159 Las condiciones de humedad antecedente (Antecedent Moisture Conditions, AMC), se agrupan en tres condiciones
 160 básicas, como se observa en la Tabla 3. Por otra parte, el tipo de suelo hidrológico se determinó de acuerdo a las
 161 condiciones de infiltración subsuperficial que influyen en la precipitación efectiva en la cuenca, teniendo en cuenta
 162 el tipo agrológico que se encuentra en la misma. Además, se considera la cobertura vegetal, ya que la vegetación
 163 tiene una fuerte incidencia en el agua que escurre dentro de una zona, no solo por establecer el coeficiente de
 164 escorrentía sino también por la capacidad que presentan las plantas en absorber el agua en escenarios de humedad.

165 Para la clasificación de suelos se tuvo en cuenta las unidades geológicas del área de estudio identificadas a
 166 partir de la información suministrada por la plancha 192 del Servicio Geológico Colombiano, el POT del municipio
 167 de Sogamoso y EOT de Aquitania. En la figura 8 se observan las unidades geológicas de la microcuenca de la
 168 quebrada las Cañas.

169 14 Cálculo de caudales a partir de intensidades obtenidas por 170 los modelos de Dick Peschke y Frederich Bell

171 Se descargaron los datos pluviométricos de estaciones climáticas del IDEAM, de las cuales 5 son de clase
 172 meteorológica (MET) y 6 de clase hidrológica (HID), tal como se observa en la tabla 5. En la figura 10, se
 173 representan los polígonos de Thiessen obtenidos en el programa QGIS, donde se observa que la estación que
 174 presenta mayor aferencia sobre la microcuenca de estudio es la estación Puente Las Cañas. Las curvas de
 175 intensidad, duración y frecuencia (IDF) se construyeron a partir de los valores de precipitación máxima en
 176 24 horas de las estaciones Toquilla y Puente Las Cañas, durante el periodo de 1971 a 2018. Se llevó a cabo
 177 un muestreo estadístico de los datos en intervalos de tiempo de manera discreta y estable, con el objetivo de
 178 seleccionar para cada año los datos extremos de precipitación para diferentes valores de tiempo. Posteriormente
 179 se llevó a cabo un análisis de frecuencia a través de diferentes tipos de distribuciones tales como Gumbel y log-
 180 Gumbel, log-normal de 2 y 3 parámetros, probabilidad normal, gamma de 2 y 3 parámetros, log-Pearson tipo
 181 III, y finalmente para calcular los periodos de retorno de 5, 10, 20 y 50 años se realizó una prueba de ajuste de
 182 probabilidad Smirnov-Kolmogorov empleando los softwares Excel e Hidroesta 2 .

183 Con los datos de Pmax en 24 horas para los distintos periodos de retorno, se procedió a distribuir las
 184 precipitaciones en tiempos inferiores a 60 minutos y de 1 a 24 horas, y de este modo generar las curvas IDF,
 185 empleando los siguientes modelos:

186 15 Modelo de Dick Peschke

187 Este modelo es usado para el caso de duraciones de tormenta inferiores a 60 minutos, con datos pluviográficos
 188 con los que se pueda obtener las intensidades máximas o cuando no se cuente con registros pluviográficos que
 189 permitan obtener estas intensidades (Paredes Pinto, 2015). La ecuación que describe este modelo es la siguiente:
 190 London Journal of Research in Science: Natural and Formal La intensidad es calcula a partir del cociente entre
 191 la precipitación P d y la duración.

192 16 Modelo de Frederich Bell

193 De acuerdo con (Paredes Pinto, 2015), el modelo de Frederich Bell es empleado para calcular la lluvia máxima
 194 teniendo en cuenta la duración de la tormenta (min), la precipitación máxima de 1 hora de duración y el periodo
 195 de retorno de 10 años . La ecuación que describe este modelo es la siguiente: cuenta los valores de precipitación
 196 máxima durante 24 h para un periodo de retorno de 10 años, como se observa en la ecuación de Dick Peschke.

197 Por otra parte, la intensidad fue calculada empleando el modelo 2.3.1.

198 17 Método racional

199 Para la determinación de los caudales aplicando el método racional se empleó el Tc de la cuenca (Tiempo de
 200 concentración) y la intensidad respectiva a los periodos de retorno (TR) establecidos por medio del método de
 201 Dick Peschke y Frederich Bell para estación Puente las Cañas debido a que es la estación que presenta mayor
 202 aferencia en el área de estudio (Figura 10). A partir del tiempo de concentración de la microcuenca se realizó la
 203 interpolación de la intensidad para los TR correspondientes a 5, 10, 20 y 50 años.

204 La Intensidad de la Lluvia de Diseño se calculó por medio de la Ecuación 6. Es importante resaltar que
 205 se consideró la frecuencia como el periodo tiempo de retorno seleccionado y la duración igual al tiempo de
 206 concentración de la cuenca ? = Posteriormente, se estableció el coeficiente promedio de escorrentía para el año
 207 2017 por medio del procesamiento del tipo de suelo (Figuras 8 y 9), las pendientes del terreno, la cobertura vegetal
 208 obtenida de (Lemus & Navarro, 2003), los valores geográficos y el área de cada cobertura en el software QGIS.
 209 Teniendo en cuenta estas variables se determinó el caudal máximo, como se observa en la siguiente ecuación.

210 18 ? =

211 ??? 360 (7) Donde Q Es el caudal máximo, en m³ /s. C Es el coeficiente de escorrentía. I Es la intensidad de
 212 lluvia con duración igual al periodo de retorno (mm/h) A Es el área de la cuenca en hectáreas.

213 19 Comparación de caudales

214 Se llevó a cabo la comparación de los valores de los caudales obtenidos por el método racional con los datos
215 hallados a partir del cálculo de la escorrentía superficial en el software QGIS.

216 Se utilizó el método de estimación inicial del umbral de escorrentía P0 (mm) puesto que no se cuenta con
217 la información suficiente para establecer la lluvia neta; por esta razón, el coeficiente se calculó a partir de las
218 características de la zona de estudio. Por medio del valor inicial de P0 (Tabla 6) se determinó el umbral de
219 escorrentía de acuerdo con el tipo de cobertura vegetal, uso de suelo y los valores de pendientes de la cuenca
220 (Figura 11).

221 El mapa resultante del procesamiento de estas variables mediante el software SIG se reclasificó de acuerdo con
222 los valores de CN para condiciones normales. Luego, se obtuvieron los mapas de la diferencia potencial máxima
223 por medio del uso de la herramienta "Algebra de mapas". No obstante, a pesar de que en esta metodología
224 emplea el valor de precipitaciones de corta duración para poder evaluar escenarios máximos, en esta investigación
225 se empleó la precipitación total mensual promedio de cada año obtenido a partir de la interpolación realizada
226 con los datos de precipitación registrados por diversas estaciones climáticas en la zona.

227 A partir de los rásteres de la precipitación, CN y factor S se determinó la escorrentía mensual de la cuenca
228 para los años estudiados por medio de la aplicación de la Ecuación 1. Además, mediante los valores promedios
229 de la precipitación efectiva se calculó el volumen de agua. Por último, se determinó el caudal de la cuenca para
230 cada periodo analizado teniendo en cuenta los valores de escorrentía directa y el área de la microcuenca.

231 20 III. RESULTADOS

232 21 Cambio de cobertura y uso del suelo

233 Con base a la visita realizada al páramo de Siscunsí, se pudo verificar y correlacionar las 4 categorías de acuerdo
234 con la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, esto se llevó a cabo con la London Journal of
235 Research in Science: Natural and Formal reclasificación de 15 puntos de observación distribuidos espacialmente
236 a lo largo de la microcuenca Las Cañas. En la Figura 12 se puede evidenciar los puntos de control en la imagen
237 satelital junto con la imagen ajustada y reclasificada en las 4 clases de uso de suelo para el año 2017.

238 Figura 12: Puntos de control en campo junto con imagen en falso color y uso del suelo reclasificado, año 201

239 Por otra parte, a partir del procesamiento de las imágenes satelitales en el software QGIS se pudo establecer
240 los cambios de cobertura de los 4 tipos de uso de suelo que se presentan en el área de estudio durante el
241 periodo 1989-2017. Como se observa en la Tabla 7, las actividades agropecuarias y las áreas para la conservación
242 fueron las categorías que tuvieron un aumento en su extensión dentro de la microcuenca de 49,5 ha y 260,01 ha
243 respectivamente. El incremento de cobertura de las actividades agropecuarias es la consecuencia de la expansión
244 de la frontera agrícola y ganadera durante los 28 años analizados, dando como consecuencia la transformación de
245 otros tipos de usos como los sistemas forestales, los cuales registraron una pérdida de 306,45 ha, en este tipo de
246 uso de suelo. Por otra parte, la ganancia de cobertura de las áreas de conservación es el resultado de las diferentes
247 actividades que se han planteado y desarrollado en la zona a lo largo de tiempo con miras a la conservación del
248 páramo de Siscunsí.

249 En la Figura 13 se ilustran los cambios que presentó la microcuenca Las Cañas en los años 1989-2017 con
250 respecto a las 4 categorías identificadas de uso de suelo. Figura 13: Cambios de uso de suelo durante los años
251 1989 (Derecha) y 2017 (Izquierda)

252 Por otro lado, empleando las imágenes reclasificadas se realizó la simulación de uso de suelo para los años
253 2014, 2020, 2026 y 2027 desarrollando la metodología descrita en el apartado anterior.

254 22 Predicción uso de suelo 2014 a partir de imágenes 2002 y 255 2008

256 La proyección de la cobertura de uso de suelo del año 2014 se llevó a cabo con el fin de realizar una comparación
257 de los resultados obtenidos de la simulación (Figura de la izquierda) con la imagen Landsat procesada en el
258 software de este año (Figura de la derecha). Como se observa en la Tabla 8, las actividades agropecuarias y
259 los sistemas forestales son las categorías de uso de suelo que presentaron una diferencia notable teniendo la
260 información obtenida a partir de la simulación y el procesamiento de la imagen satelital. Los valores del área de
261 cobertura dentro de la cuenca de estos dos usos difieren 122 ha y 90 ha respectivamente.

262 Es importante resaltar que la predicción realizada por medio de los resultados del cambio de uso del suelo
263 entre el 2002 y 2008 no tuvo en cuenta la tasa de reforestación que se ha registrado en el páramo, es por esto por
264 lo que los sistemas forestales y las áreas para la conservación son los usos de suelo que presentaron una mayor
265 cobertura en la imagen simulada que en la imagen procesada de la zona de estudio. El índice de exactitud y el
266 índice Kappa entre estas dos imágenes fue del 73.5% y 0.624 indicando un valor de concordancia bueno, lo cual
267 significa que el comportamiento calculado y procesado del uso de suelo dentro de la cuenca presenta semejanza
268 por esta razón los modelos de predicción de otros períodos presentaron resultados con una certeza aceptable.
269 presentan crecimiento de sus áreas. Los porcentajes de cambios ilustrados en la Tabla 9 permiten observar que
270 las diferencias de las coberturas totales entre estos dos modelos no son mayores a 3.2%.

26 COMPARACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA EMPLEANDO LA PRECIPITACIÓN EFECTIVA Y EL MÉTODO RACIONAL PARA EL AÑO 2027

271 Además, al validar estas dos predicciones realizadas para el año 2020 se obtuvo un porcentaje de exactitud de
272 75.9% y un índice Kappa del 0.612 reflejando una correlación apropiada entre los datos. Estos valores ratifican
273 que las simulaciones realizadas para los años posteriores aplicando el modelo de esta investigación generaran
274 resultados confiables respecto al uso de suelo en la cuenca. Los modelos de predicción del uso del suelo para
275 los años 2026 y 2027 difieren significativamente en algunas categorías debido a los distintos períodos empleados
276 para la predicción de estos dos años. Como se observa en la Figura 26, las áreas de conservación en el año 2026
277 presentaron una mayor área London Journal of Research in Science: Natural and Formal (484,11 ha) en relación
278 con el año 2027 (382,88 ha) debido a que durante los años 2002 y 2014 (Años empleados para la predicción del
279 modelo del 2026) se presentó una mayor expansión en este tipo de suelo dentro de la cuenca que entre los años
280 1989 y 2008 (Años empleados para la predicción del modelo del 2027). Por otra parte, los sistemas forestales
281 mostraron una tendencia contraria al registrarse una mayor cobertura en el año 2027 (536,03 ha) en comparación
282 con el año 2026 (426,52). En cuanto a los cuerpos de agua y las actividades agropecuarias las diferencias de
283 coberturas de estos usos de suelo dentro de la cuenca en los dos años simulados tan solo difirieron en 0,63 ha
284 y 8,91 ha respectivamente como se observa en la Tabla 10. Para la verificación, correlación y validación de
285 estos modelos procesados se obtuvo un índice Kappa de 0.46 que representa una concordancia moderada en su
286 desarrollo y una exactitud de 62.8 % de validación lo que indica que existe similitud en los mapas obtenidos, esto
287 quiere decir, que si el proceso natural se mantiene se tendrán sistemas forestales y áreas de conservación como
288 lo muestra cada mapa London Journal of Research in Science: Natural and Formal de predicción para los años
289 (2026-2027). Asimismo, los índices obtenidos de los modelos 2014 y 2020 arrojaron una concordancia buena, lo
290 cual se debe a que la validación de estos datos se realizó con la imagen satelital del año 2002, lo que genera que
291 el modelo de predicción del año 2026 se asemeje a la realidad.

292 23 Oferta hídrica de la cuenca empleando la precipitación 293 efectiva

294 De acuerdo con el procesamiento de los datos en el software QGIS, en la Figura 17 se observan los mapas
295 del número de curva obtenidos durante el periodo de estudio (1989-2017) y las predicciones (2020,2026 y
296 2027). Teniendo en cuenta los valores promedio de cada una de las imágenes ráster de la precipitación efectiva
297 determinados para el periodo analizado, en la Tabla 11 se presenta el volumen de la microcuenca Las Cañas.

298 24 London

299 Tabla 11: Volumen de agua calculado a partir de los valores promedio de la Precipitación Efectiva

300 25 Fuente: Autores

301 La oferta hídrica de la microcuenca se calculó por medio de la conversión de los milímetros de escorrentía
302 superficial a las unidades correspondientes de caudal, esto se obtuvo empleando el área total (1799 ha) y los
303 valores máximos de precipitación efectiva para los distintos años estudiados, los resultados se ilustran en la Tabla
304 12. Mediante el programa Hidroesta2 se estimaron los valores de caudal; al mismo tiempo, por medio del software
305 QGIS se determinó el tipo de uso de suelo, que, junto con los valores de área y precipitaciones de la microcuenca,
306 se estimó el volumen de agua de esta.

307 26 Comparación de la oferta hídrica empleando la precipitación 308 efectiva y el método racional para el año 2027

309 Por medio de la Tabla 12 se puede evidenciar que teniendo en cuenta los cambios de uso del suelo y el cálculo de
310 la precipitación efectiva, los caudales obtenidos para los años estudiados no presentan una tendencia uniforme
311 debido a que se registran períodos en los cuales estos valores aumentan mientras que en otros la oferta hídrica
312 de la cuenca disminuye.

313 Por otro lado, los caudales obtenidos por medio del método racional muestran que los resultados obtenidos
314 aplicando el modelo de Frederich Bell aumentan a medida del transcurso de los períodos de retorno analizados,
315 mientras que los valores obtenidos por medio del modelo de Dick Peschke descienden a medida del tiempo (Tabla
316 16).

317 En cuanto a la comparación de la oferta hídrica para el año 2027, en la Tabla 17 se presentan los resultados
318 obtenidos tanto en la simulación teniendo en cuenta la precipitación efectiva de la microcuenca y los caudales
319 calculados a partir del método racional en el tiempo de retorno de 10 años.

320 Es necesario subrayar que la relación de caudal para el periodo de retorno de 10 años, que para el estudio
321 es el año 2027, con el caudal obtenido por la simulación es de 1:2 por medio del modelo de Frederich Bell y
322 aproximadamente de 1:2.5 empleando el método de Dick Peschke. Para finalizar, teniendo los valores registrados
323 en la Tabla 12, los cuales representan los caudales calculados por medio de la precipitación efectiva, presentan
324 un promedio de 0.46 m³ /s. No obstante, el promedio de los caudales teniendo en cuenta los datos obtenidos
325 con el método racional empleando el modelo Frederich Bell y Dick Peschke son de 0.247 m³ /s y de 0.

326 27 IV. CONCLUSIONES

327 El incremento de áreas en las coberturas vegetales se ha dado significativamente en la microcuenca según los
328 modelos analizados esto en áreas nativas y especies endémicas como lo son los frailejones (*Espeletia grandiflora*)
329 representando un valor positivo agregado a la investigación y a la zona de estudio donde se puede reconocer el
330 esfuerzo por la protección de estos parques naturales.

331 A partir del análisis multitemporal realizado por medio de software SIG, se logran identificar las transforma-
332 ciones del uso del suelo durante un periodo de tiempo determinado, además de proveer información actualizada
333 de las zonas en riesgo o con cierto grado de vulnerabilidad, lo cual permite contar con insumos útiles para la
334 toma de decisiones por parte de las autoridades competentes.

335 La variación de los usos de suelos entre los años de 1989 y 2017 indican que los cuerpos de agua han disminuido
336 en un 30% de su área, así como las actividades agropecuarias que se han visto reducidas en un 11% del total del
337 área de estudio. Los sistemas forestales han aumentado en un 33%, mientras que las áreas para la conservación
338 incrementaron en un 30%, esto gracias a la reforestación y a la población cercana al páramo .

339 Para estimar la oferta hídrica sobre la cobertura y uso de suelo a través del tiempo, se llevó a cabo un análisis
340 multitemporal de estos usos, donde se registran las ganancias y pérdidas de cada uno. El número de curva se
341 evaluó por medio de los caudales máximos empleando los registros históricos de la estación pluviométrica Toquilla
342 y la estación Puente Las Cañas, con un análisis de frecuencia realizado por medio de diferentes distribuciones de
343 probabilidad. La prueba de Kolmogórov-Smirnov reportó que en la estación Puente Las Cañas, la distribución
344 más apropiada fue log-Gumbel (0.1195), mientras que para la estación Toquilla, la distribución normal fue la
345 mejor puesto que presentó un ajuste con un valor de 0.0871.

346 Los resultados de la oferta hídrica empleando la precipitación efectiva y el método racional evidencian que
347 con el método de la SCS el promedio de los valores de caudal fue mayor ($0.46 \text{ m}^3/\text{s}$) en comparación con los
348 resultados obtenidos a partir del método racional empleando los modelos de Frederich Bell y Dick Peschke donde
349 se presentaron valores de caudal de $0.247 \text{ m}^3/\text{s}$ y de $0.162 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente. Además, teniendo en cuenta
350 el caudal simulado para un periodo de retorno de 10 años (2027) se identificó que la relación de la oferta hídrica
351 por el método de escorrentía superficial con el método de Frederich Bell es de 1:2 mientras que con el método de
Dick Peschke es de 1:2.5.

¹ ²



Figure 1:



Figure 2:



3

Figure 4: Figura 3 :

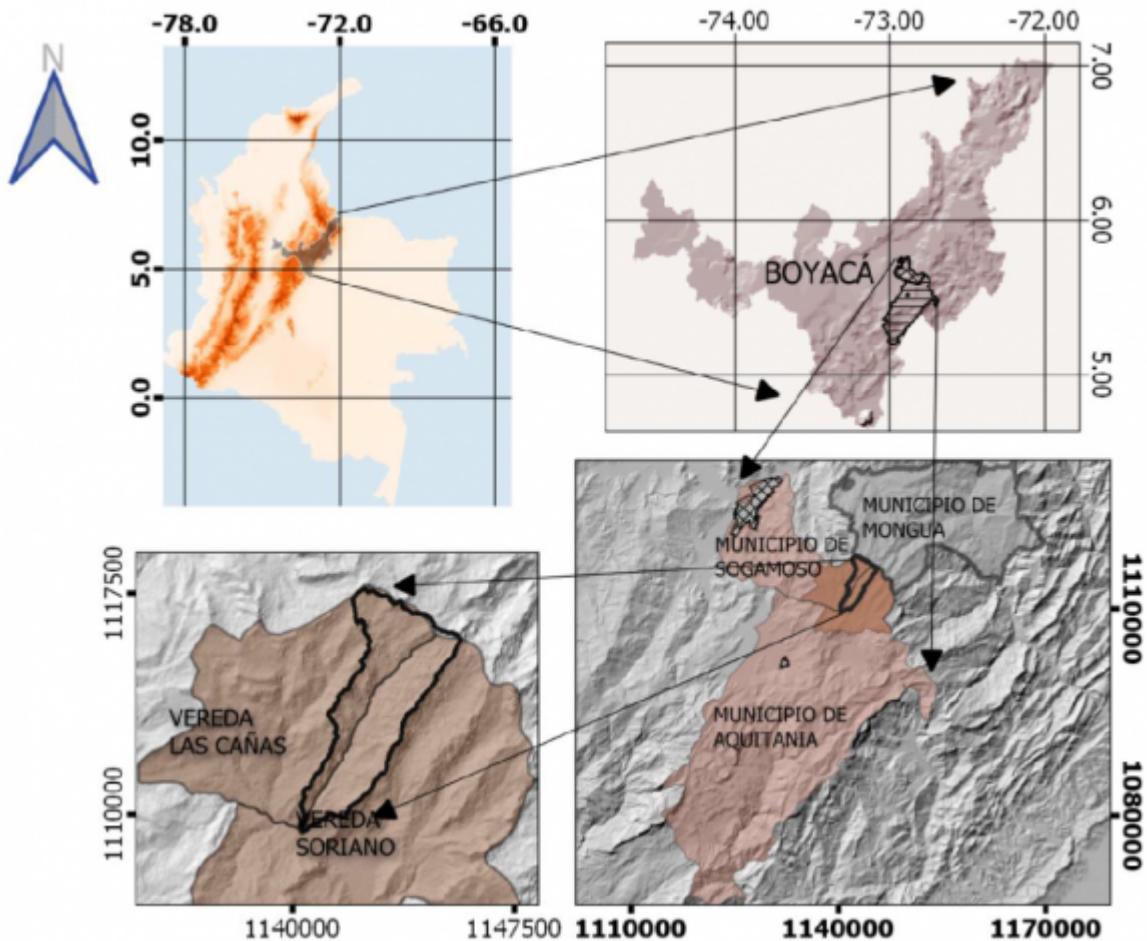


Figure 5:

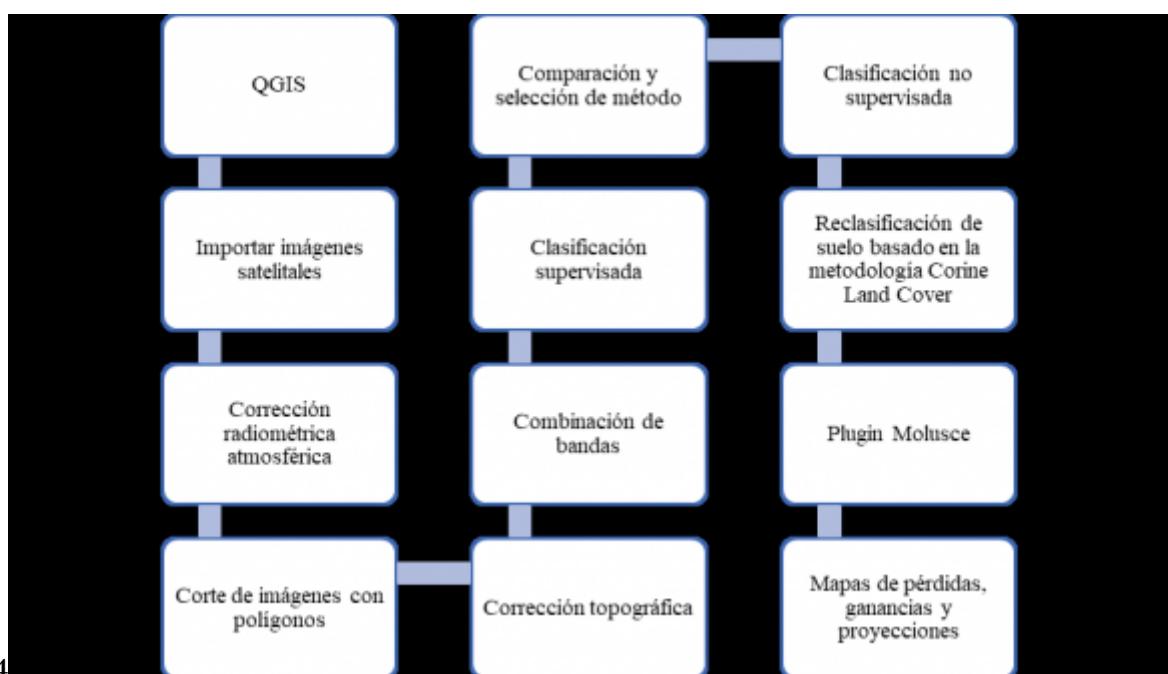


Figure 6: Figura 4 :

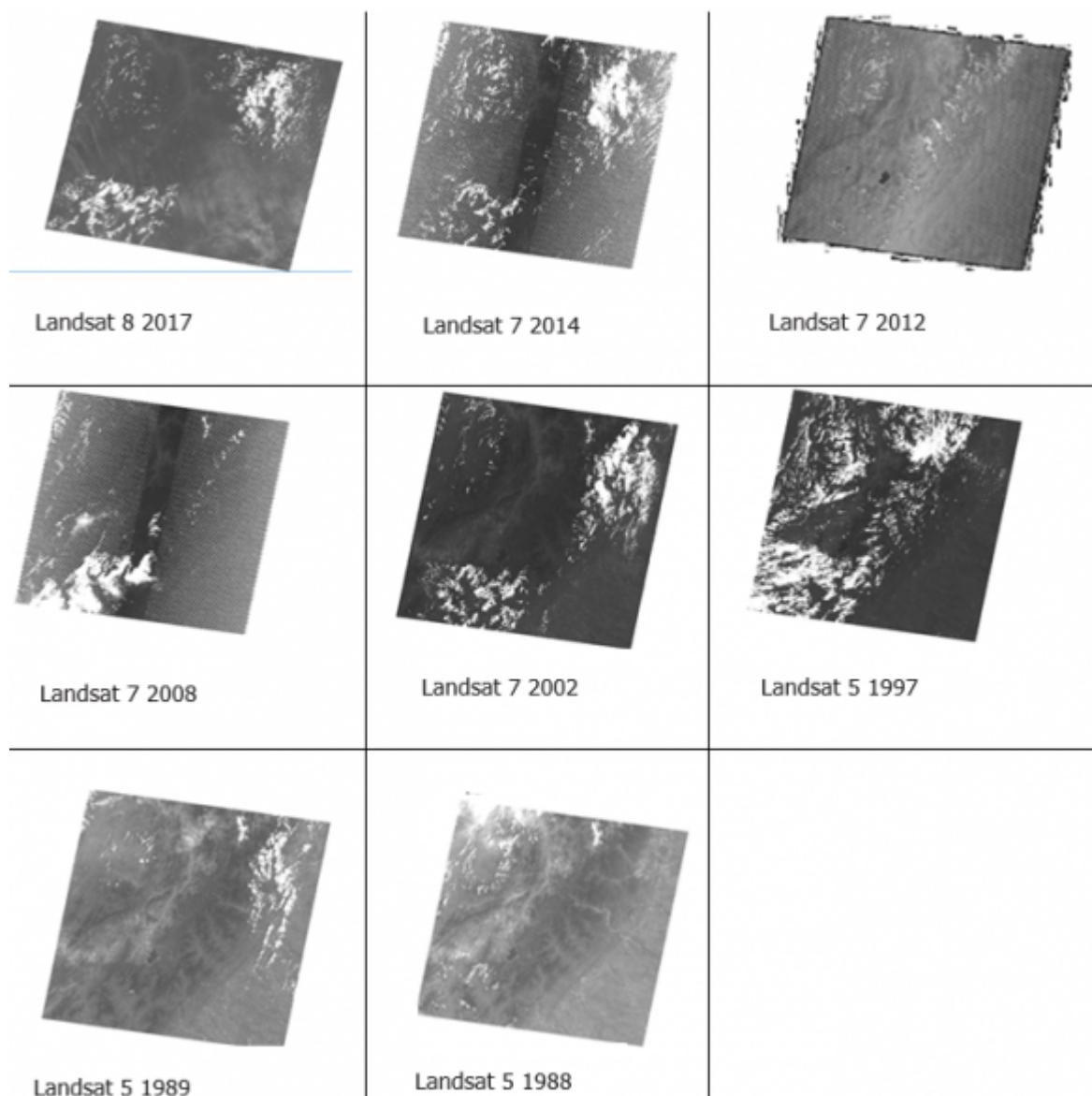
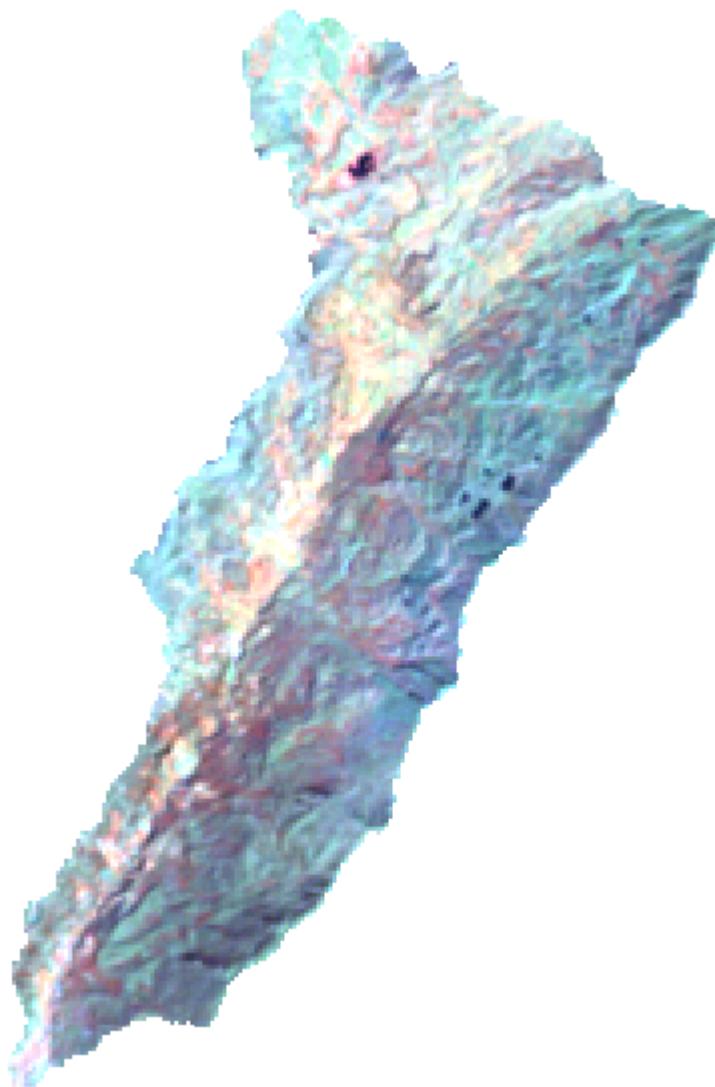
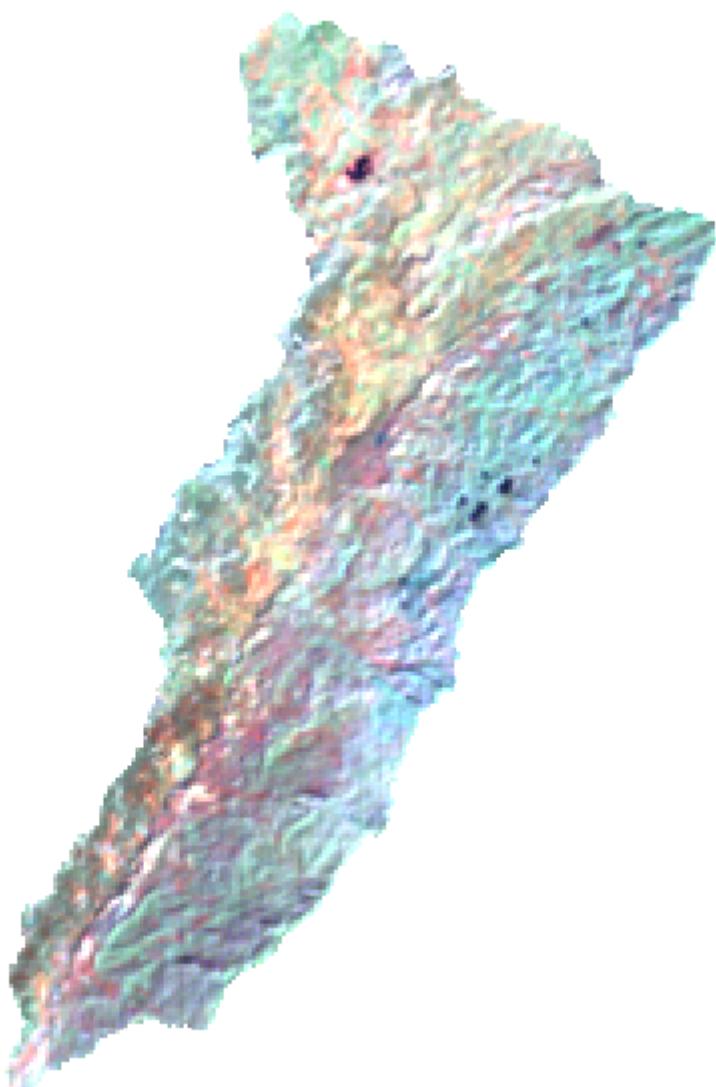


Figure 7:



5

Figure 8: Figura 5 :



6

Figure 9: Figura 6 :

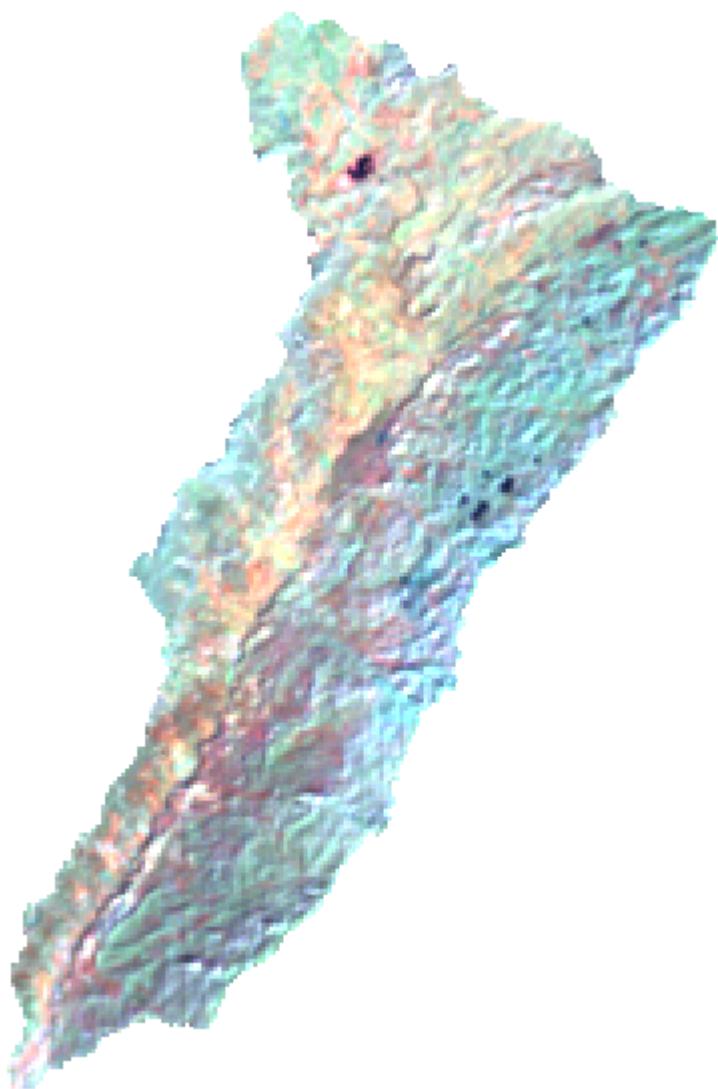
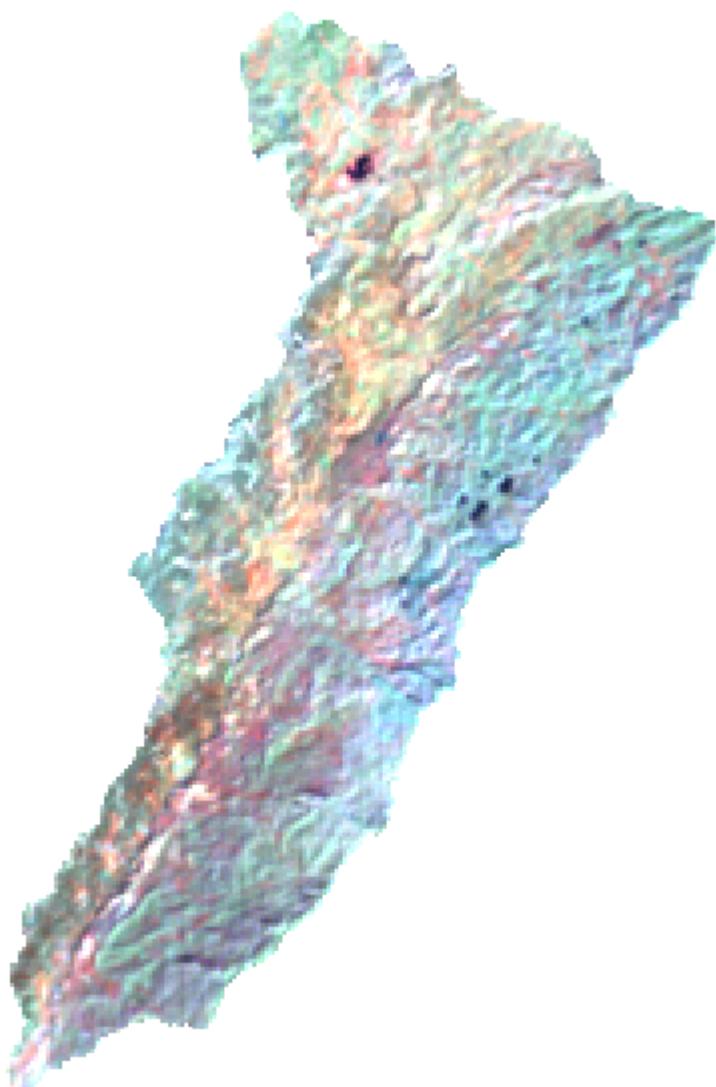


Figure 10:



84

Figure 11: Figura 8 :Tabla 4 :

27 IV. CONCLUSIONES

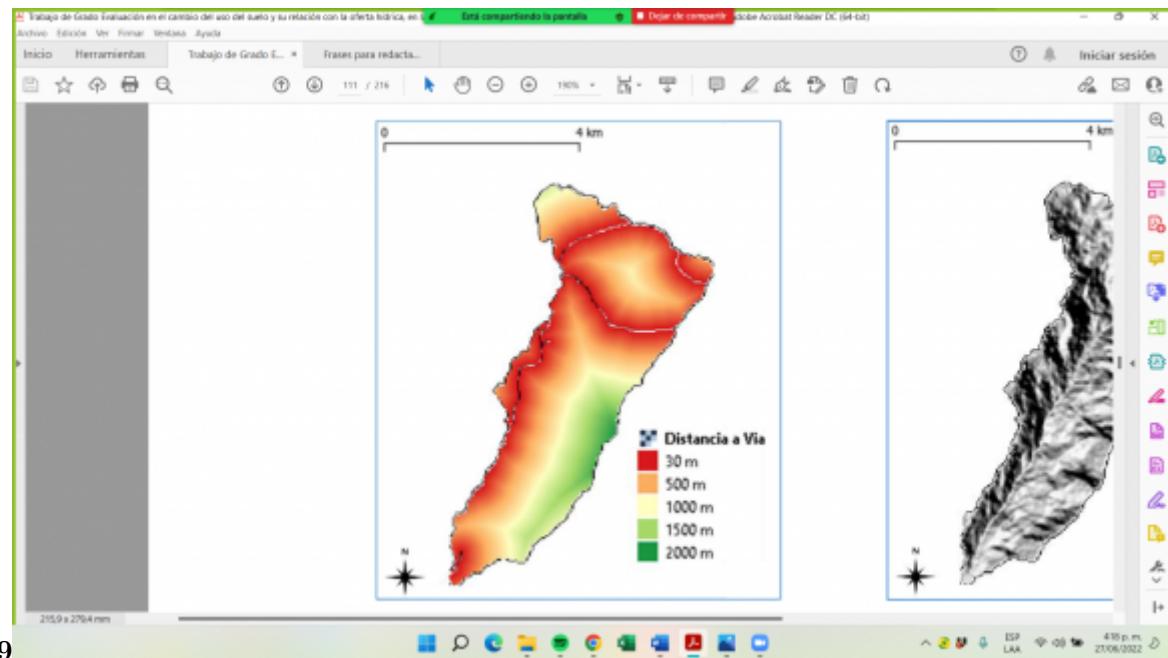


Figure 12: Figura 9 :

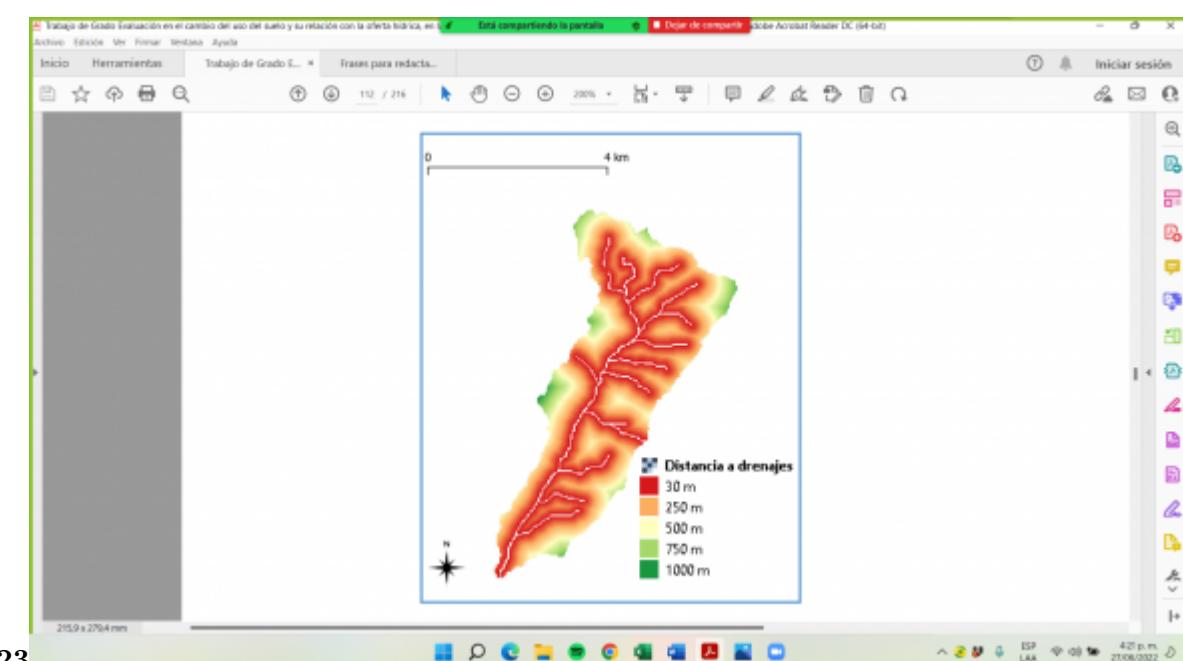
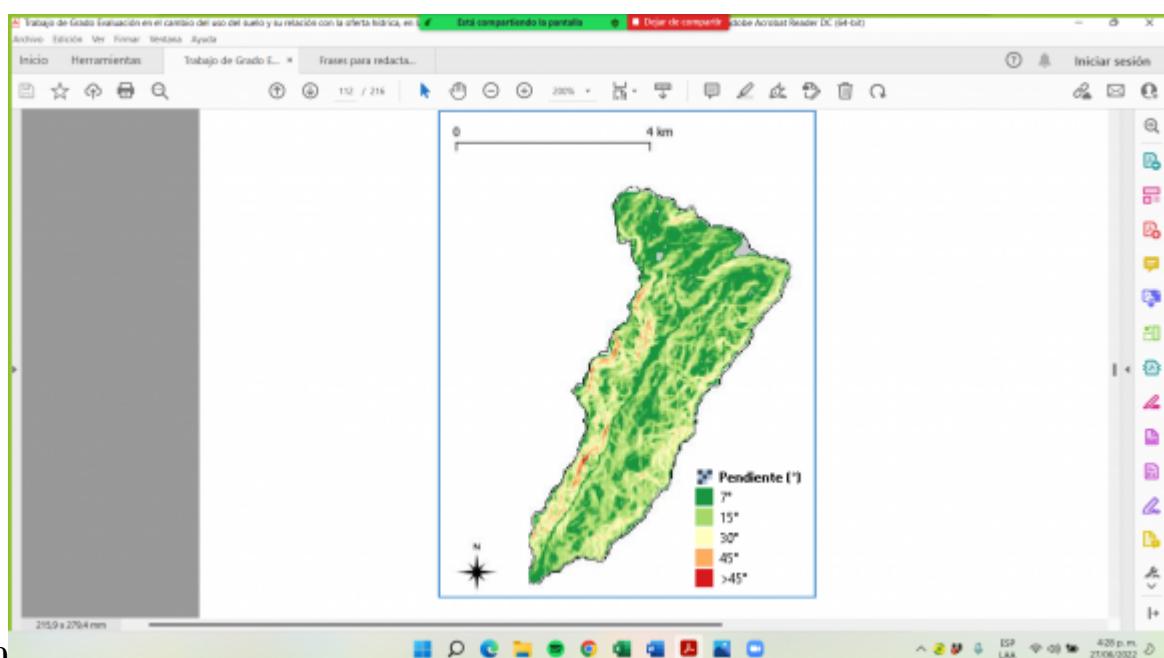


Figure 13: Fuente: Autores © Volume 23 |



10

Figure 14: Figura 10 :

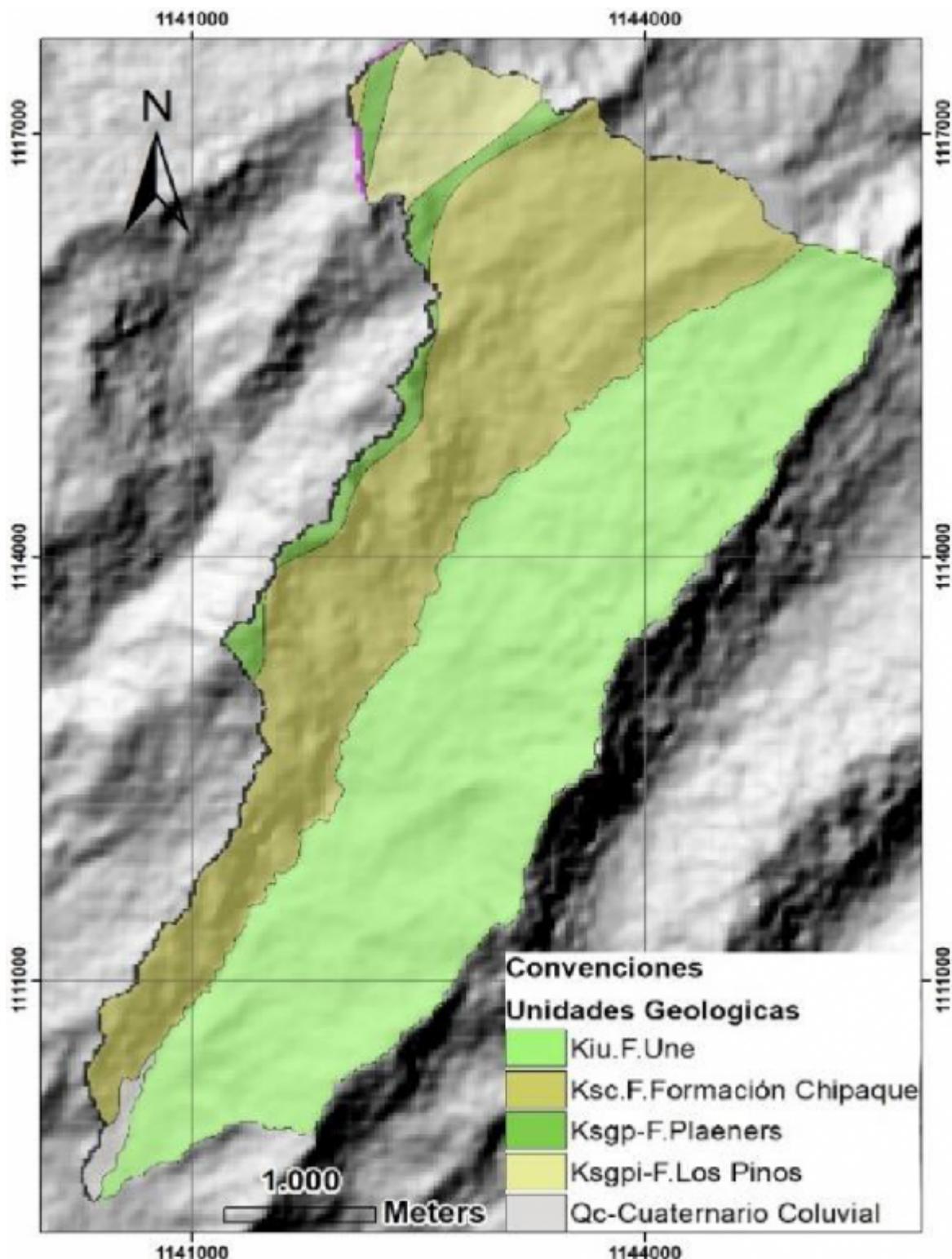


Figure 15:

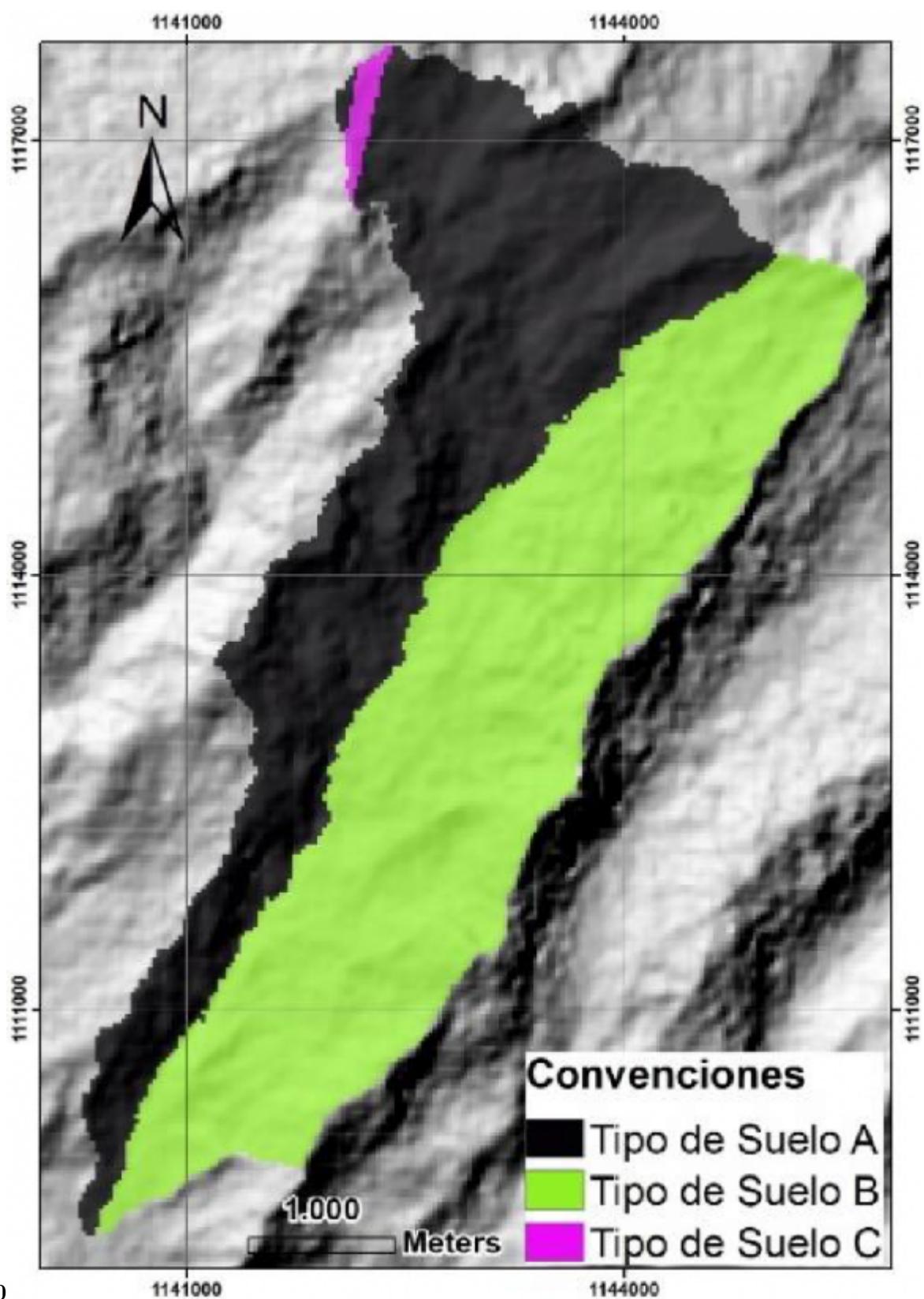


Figure 16: 10 60

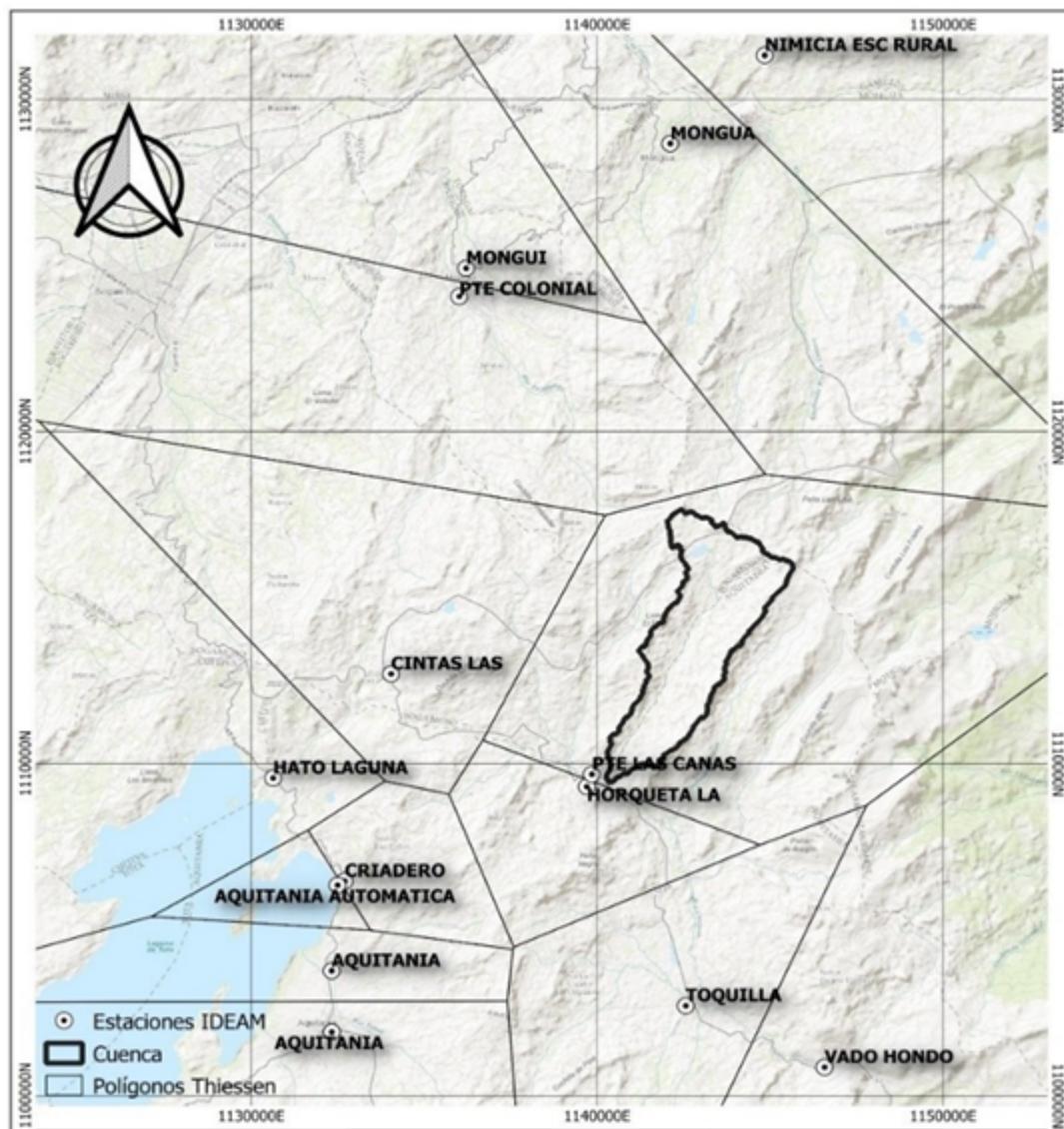


Figure 17: I

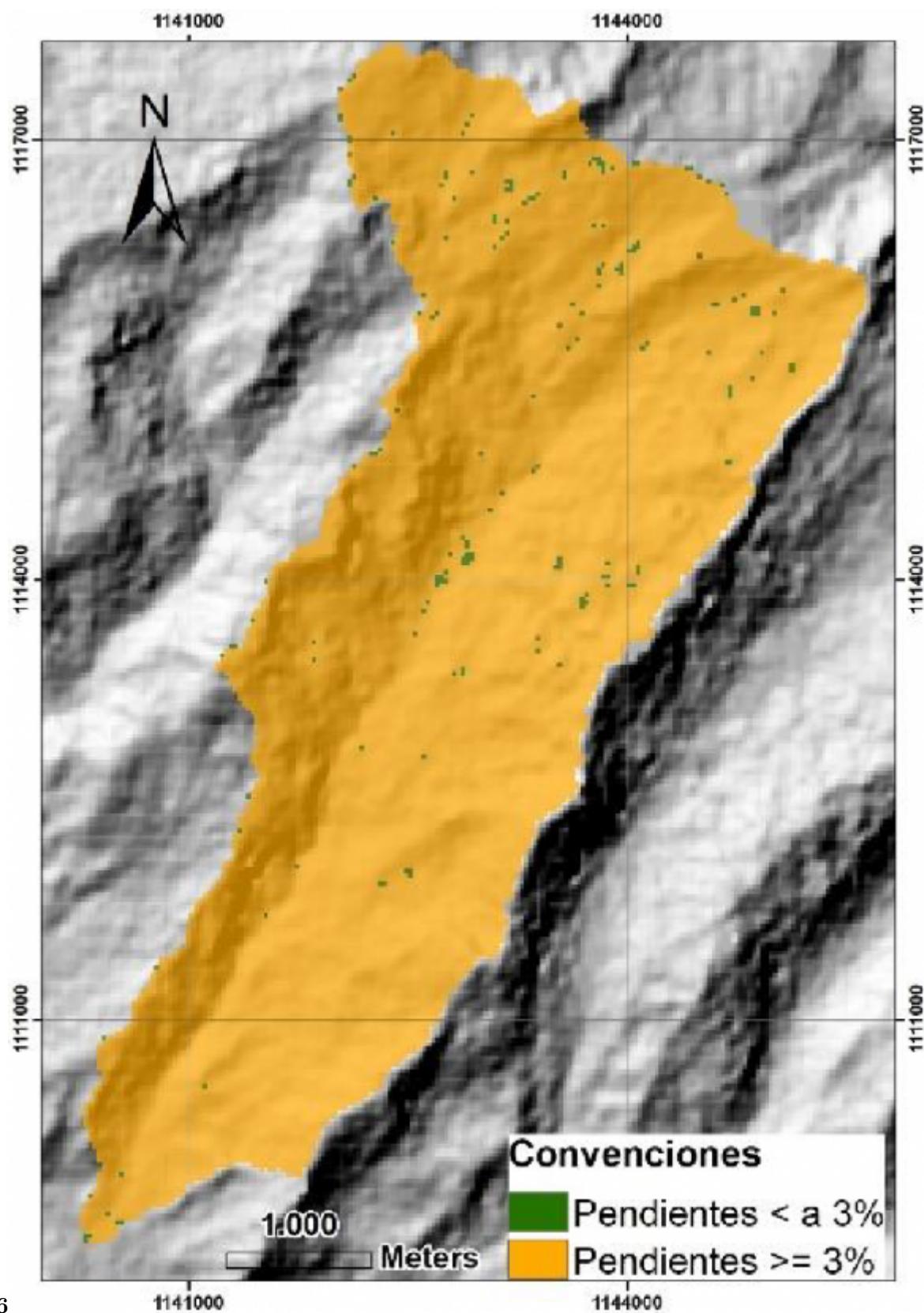


Figure 18: Tabla 6 :

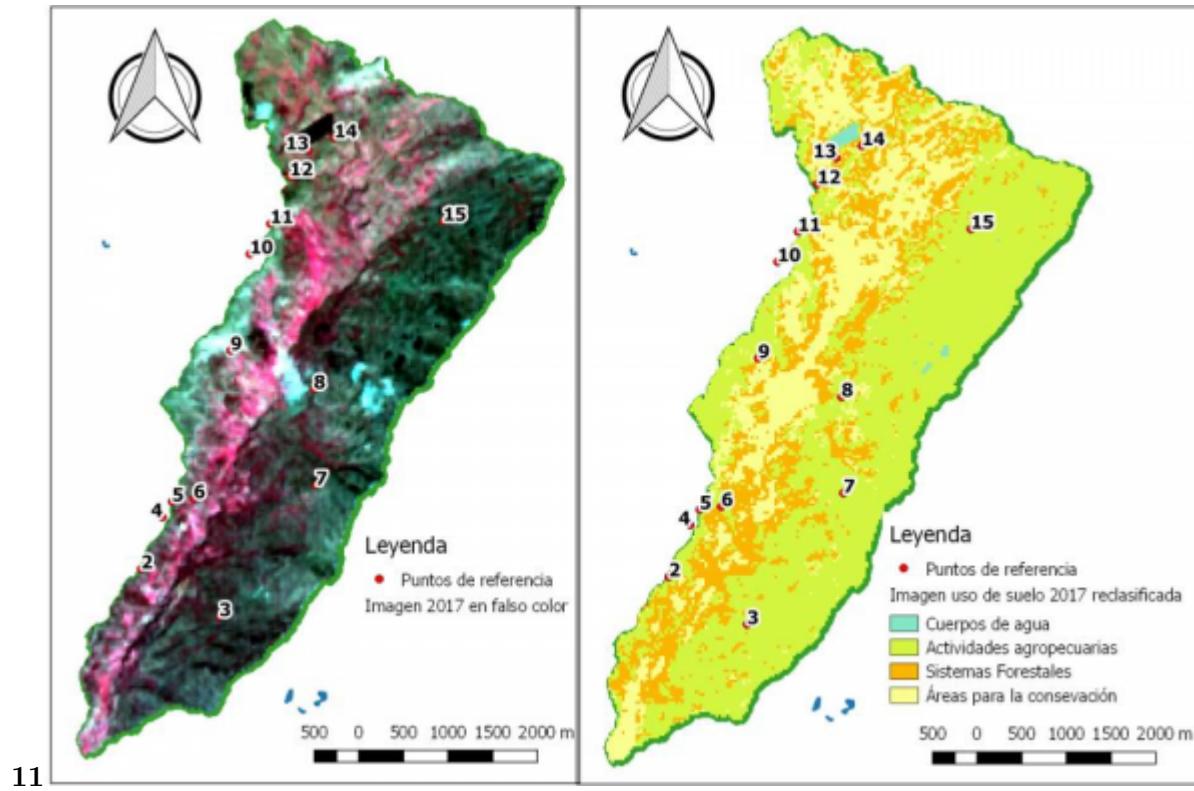


Figure 19: Figura 11 :

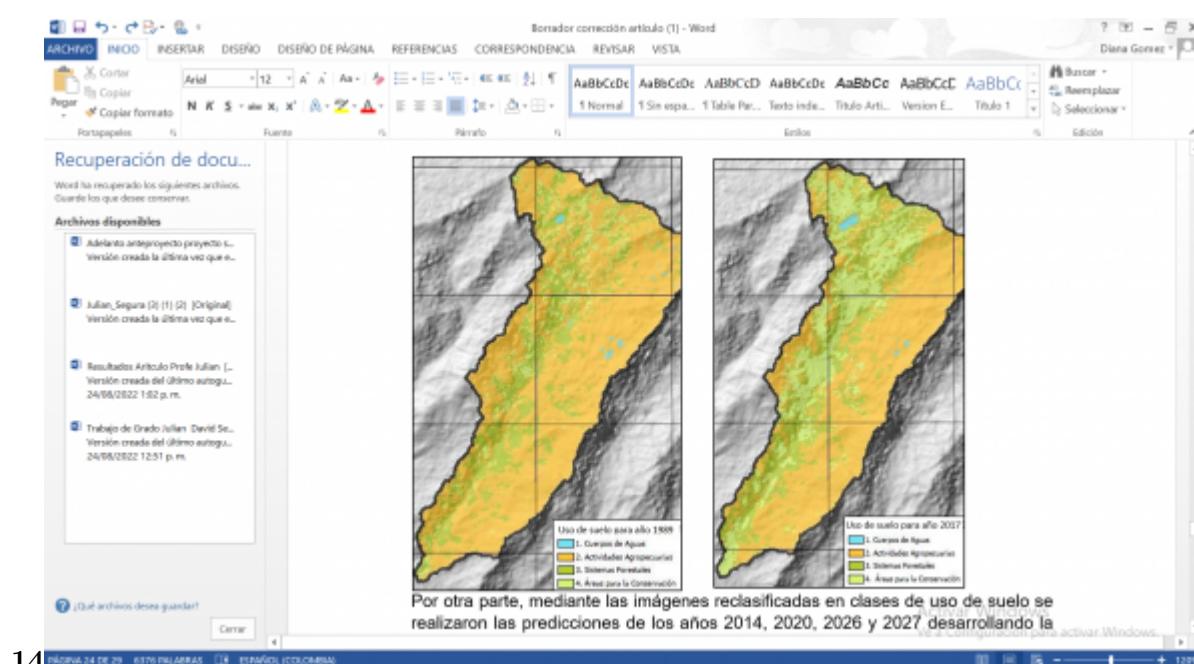


Figure 20: Figura 14 :

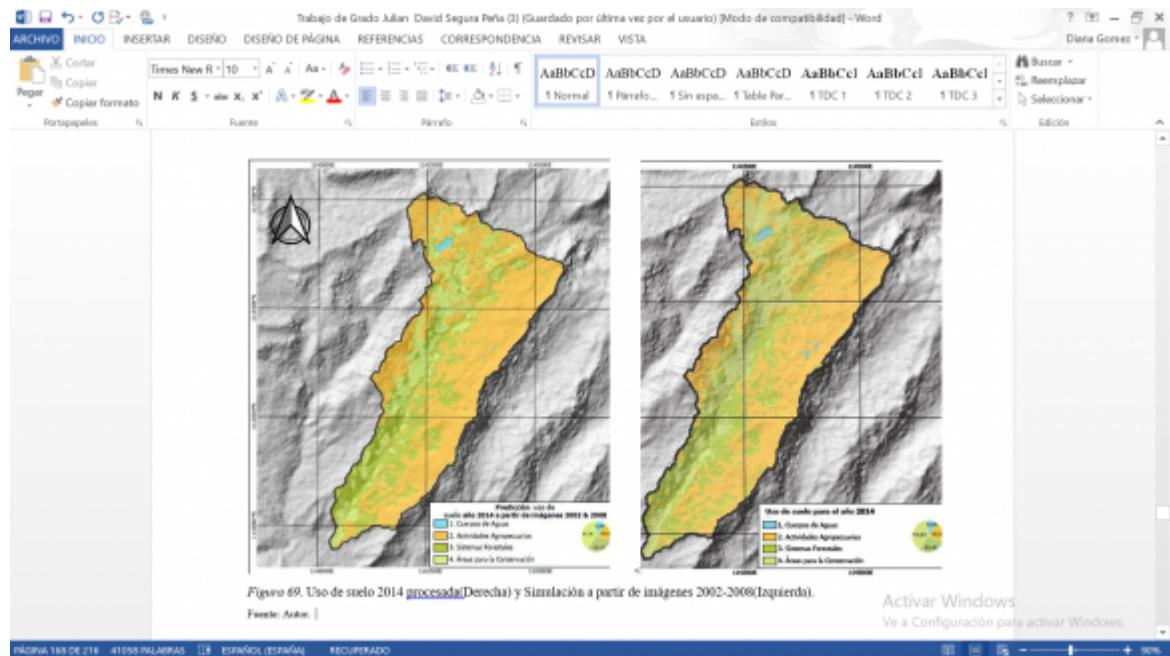
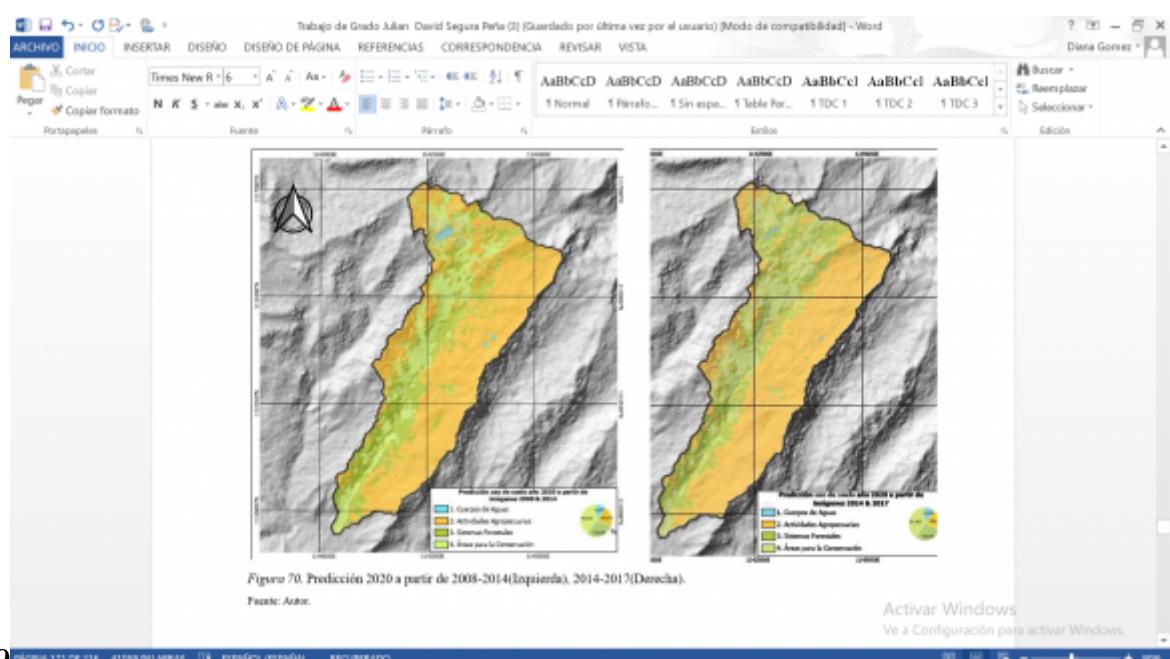


Figure 21:



Activar Windows
Ve a Configuración para activar Windows.

Figure 22: Tabla 9 :

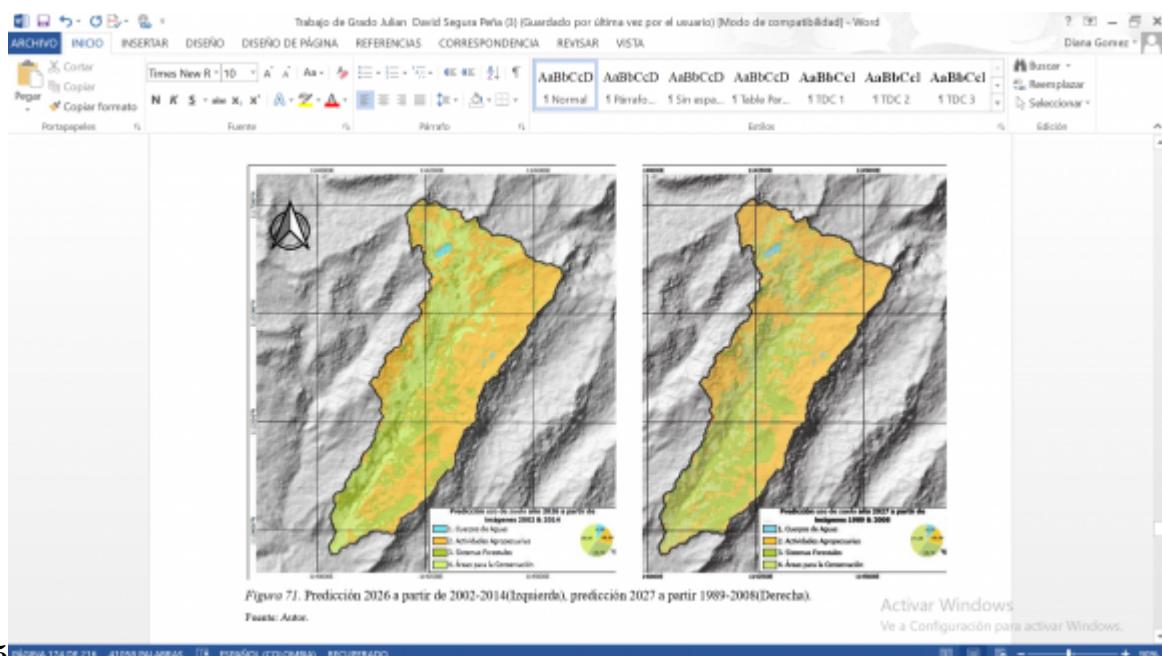
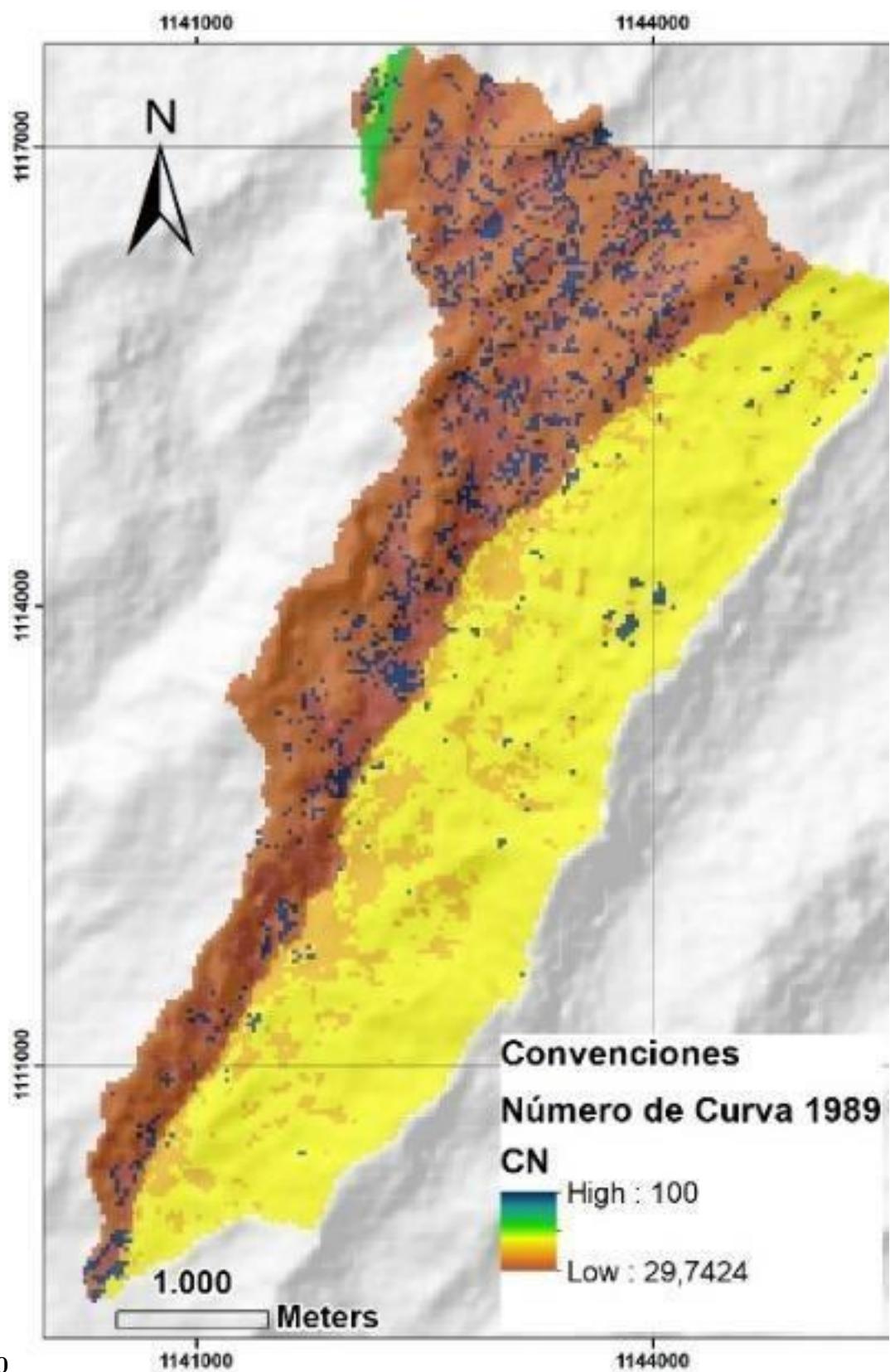
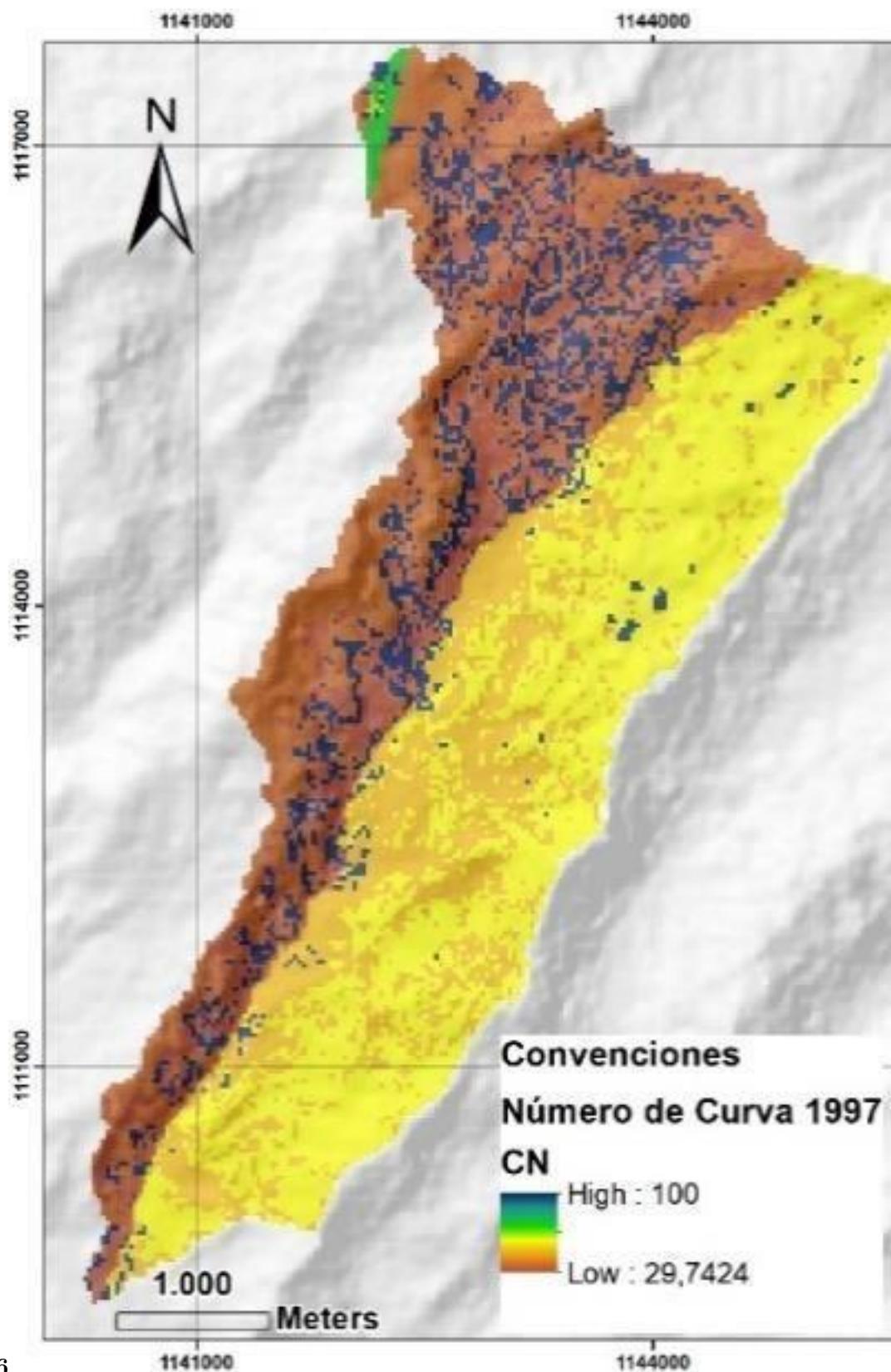


Figure 23: Figura 15 :





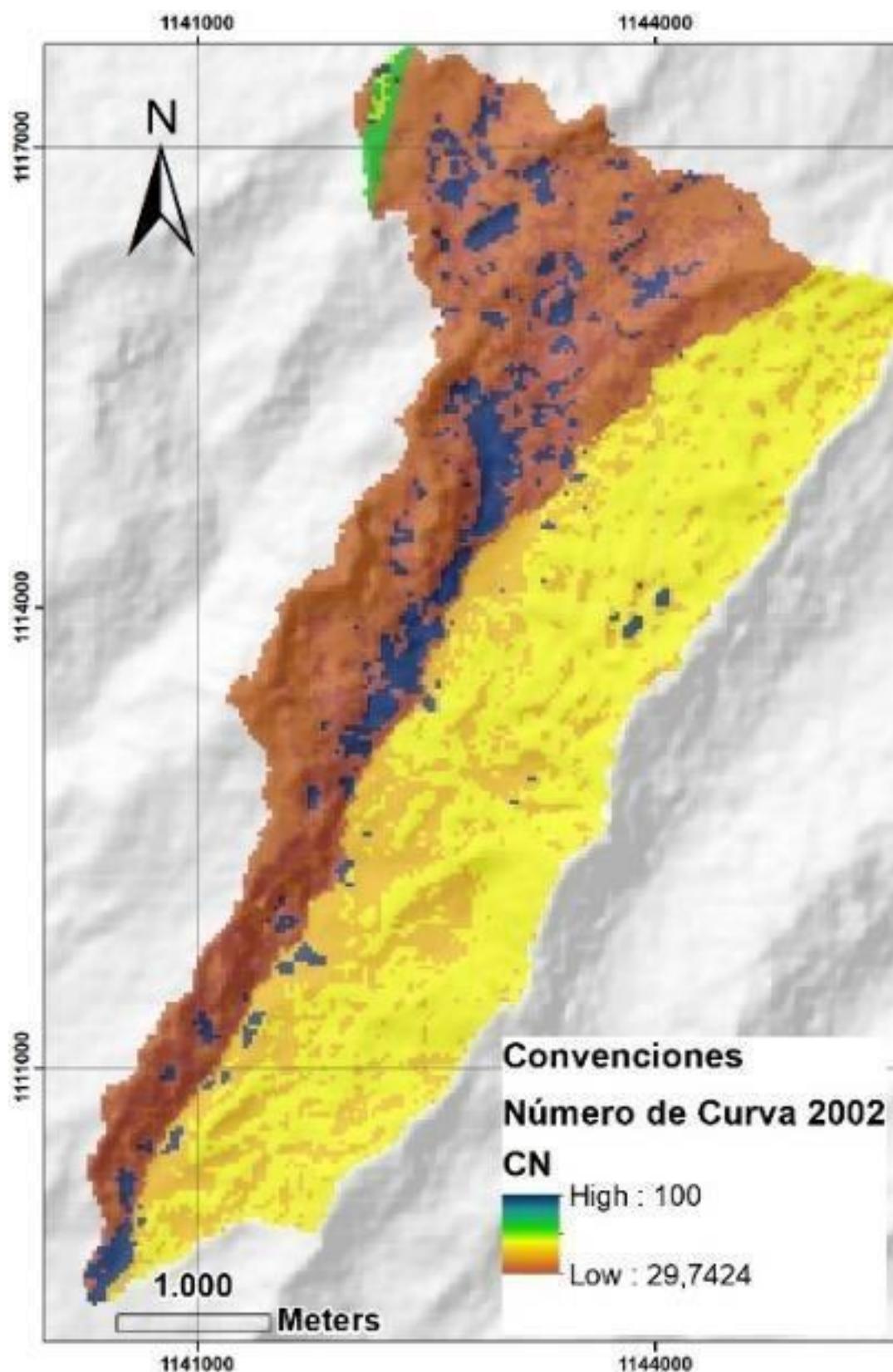
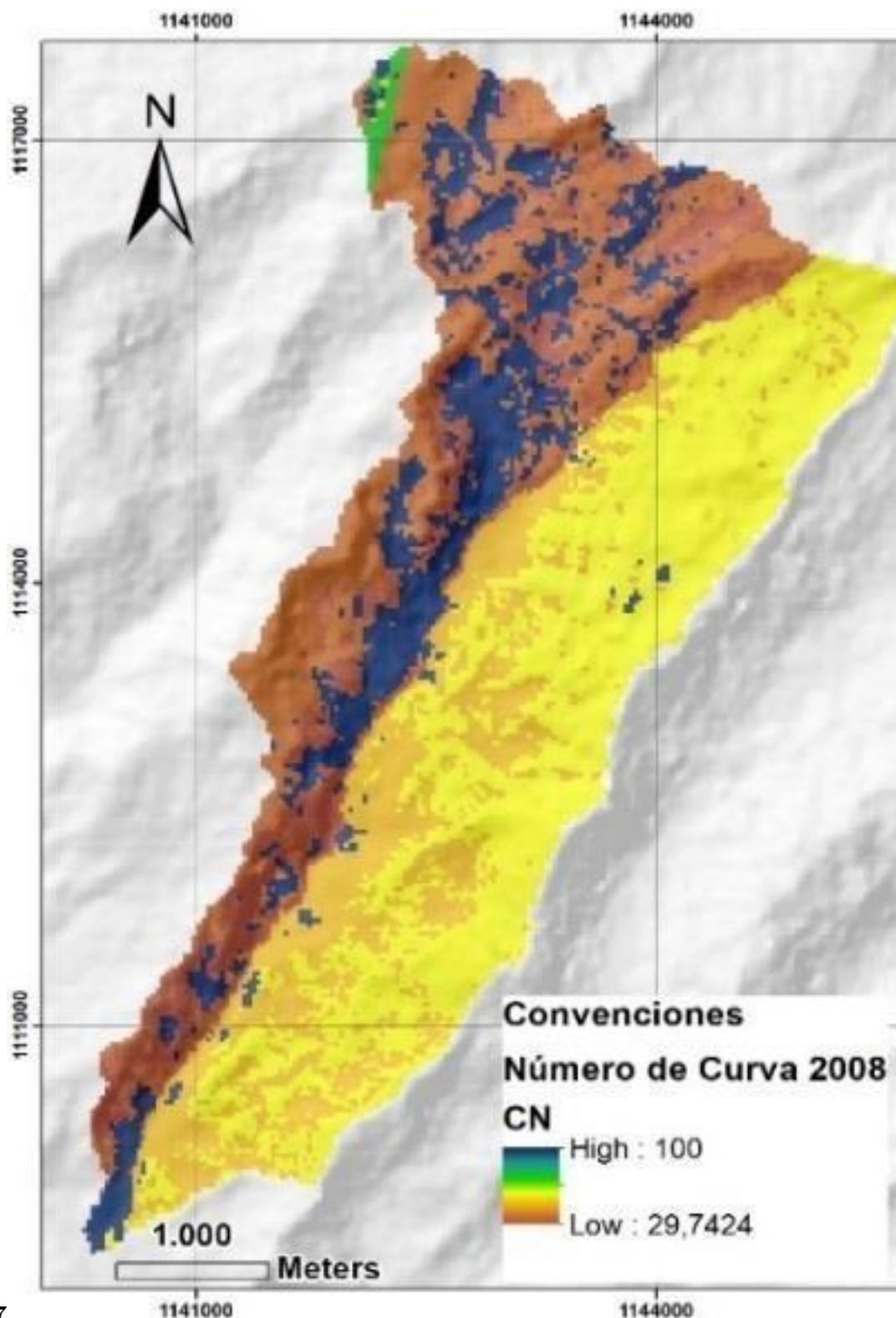
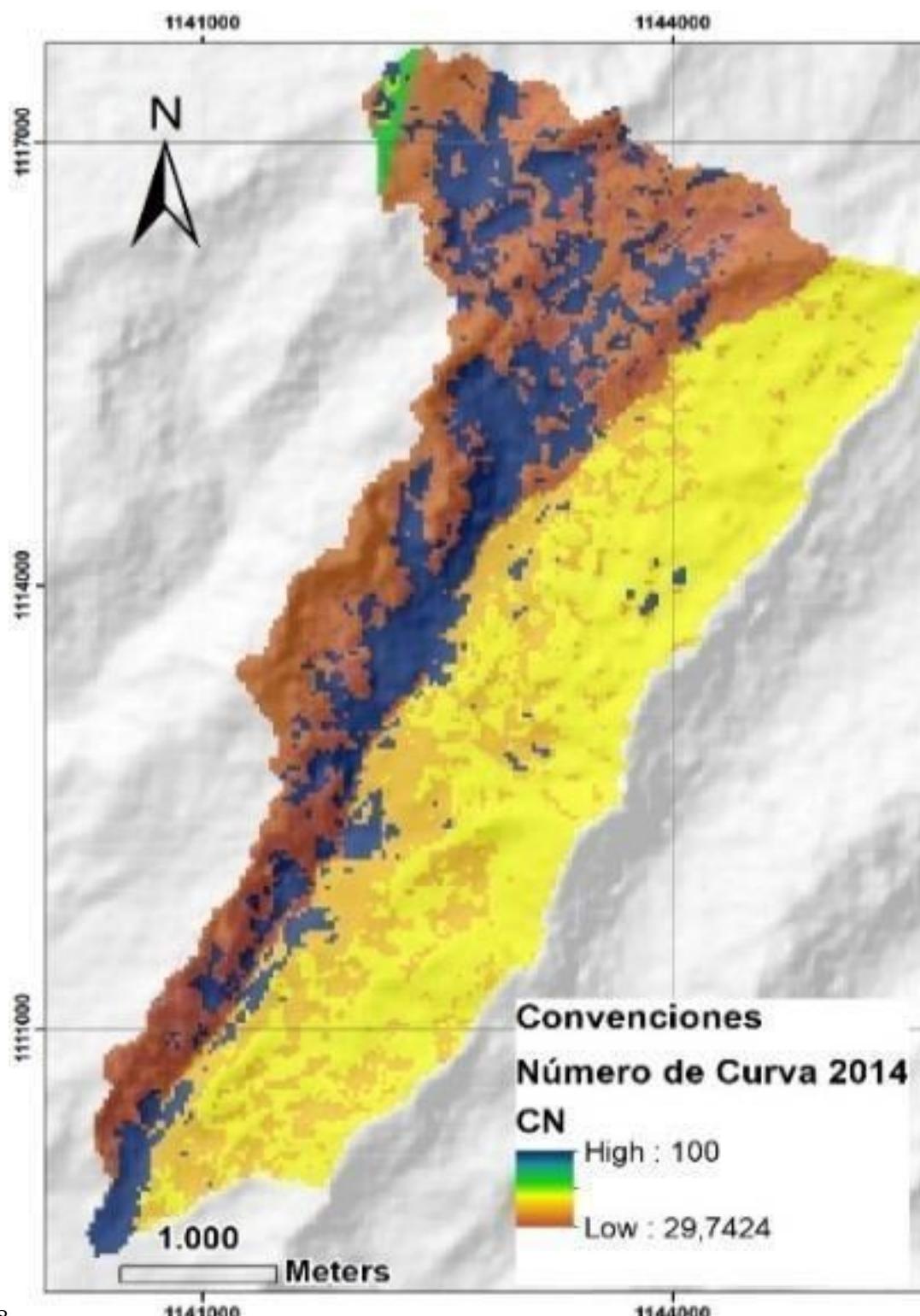


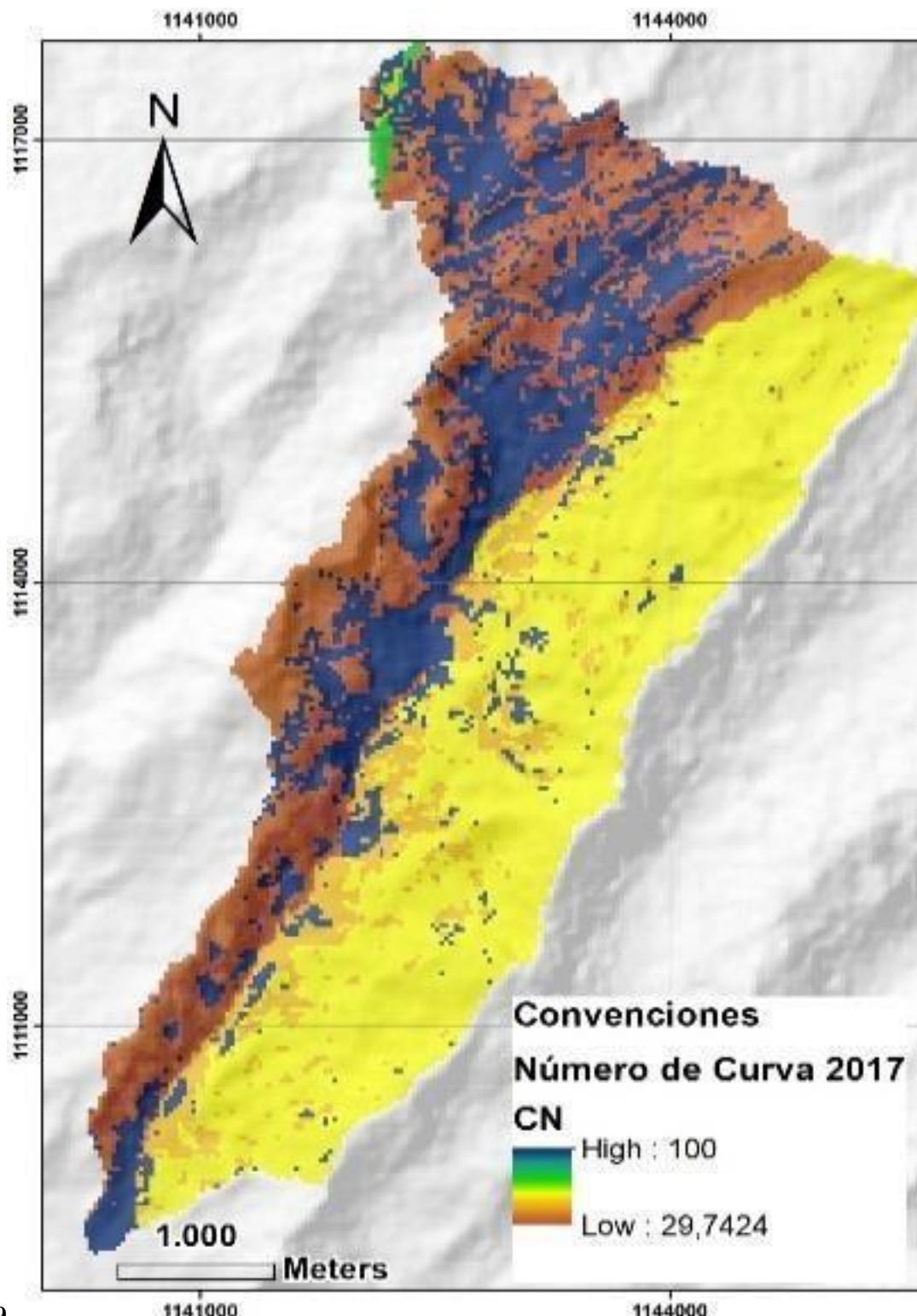
Figure 26:

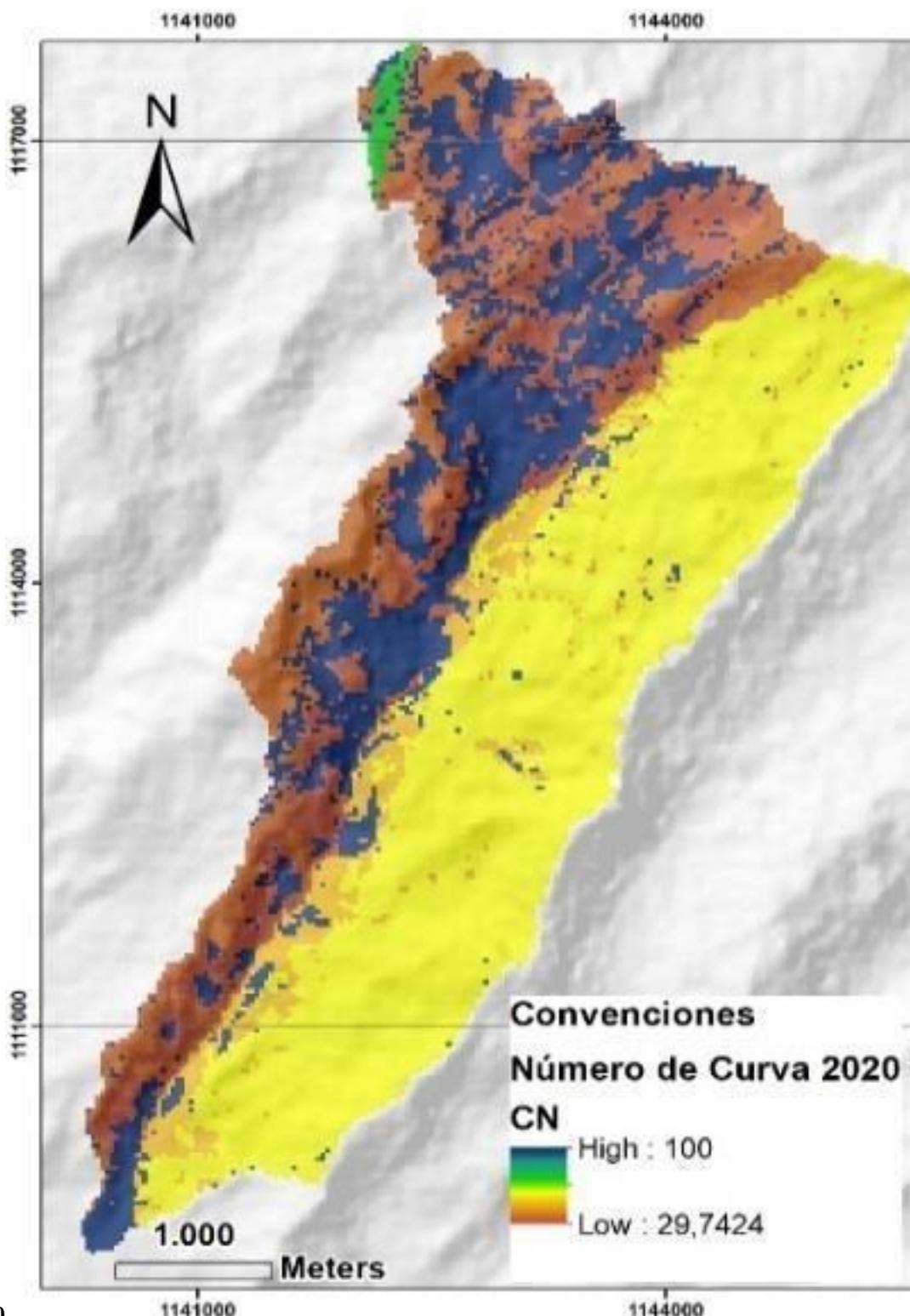




18

Figure 28: Figura 18 :





20

Figure 30: Figura 20 :

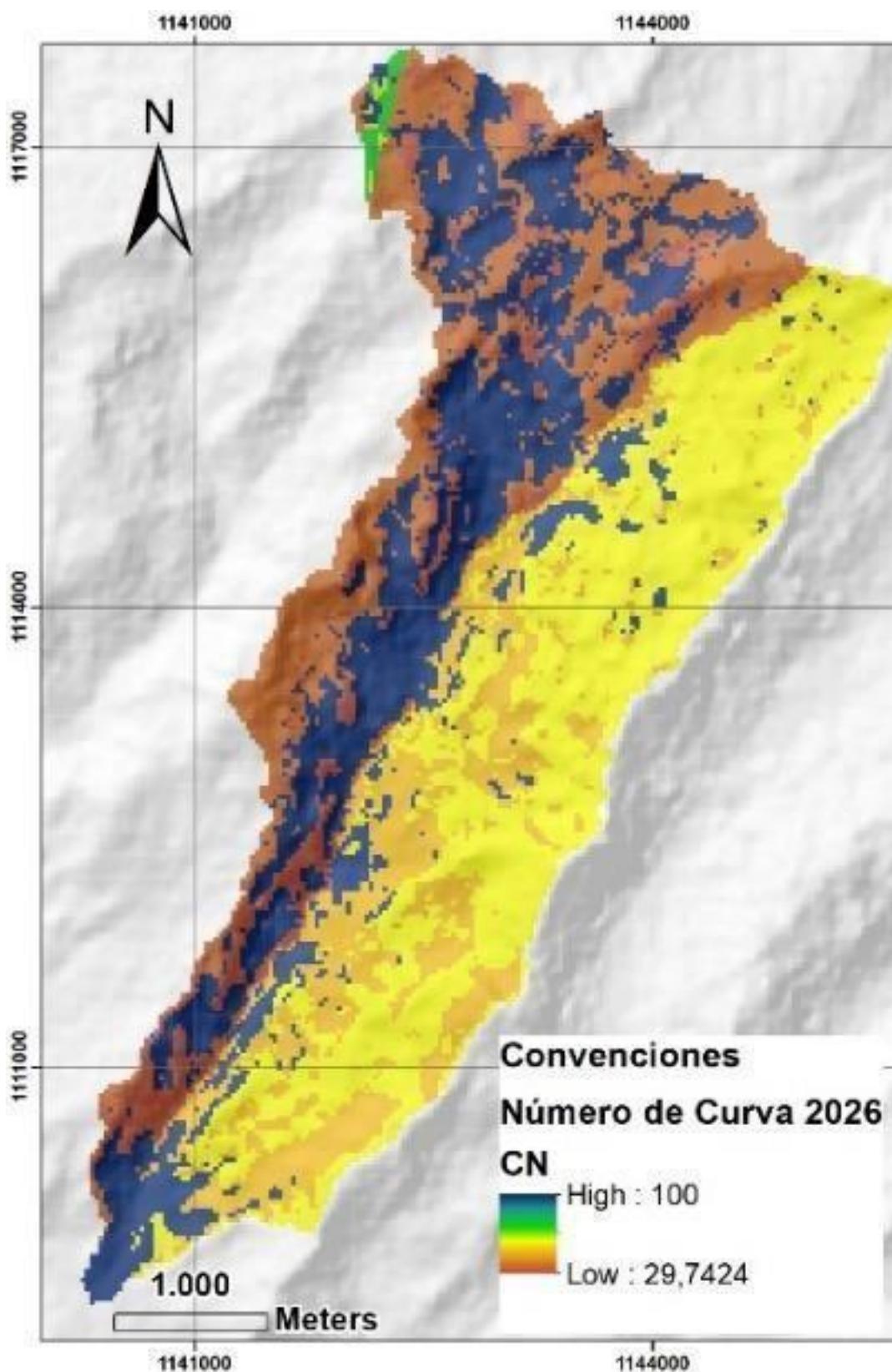


Figure 31:

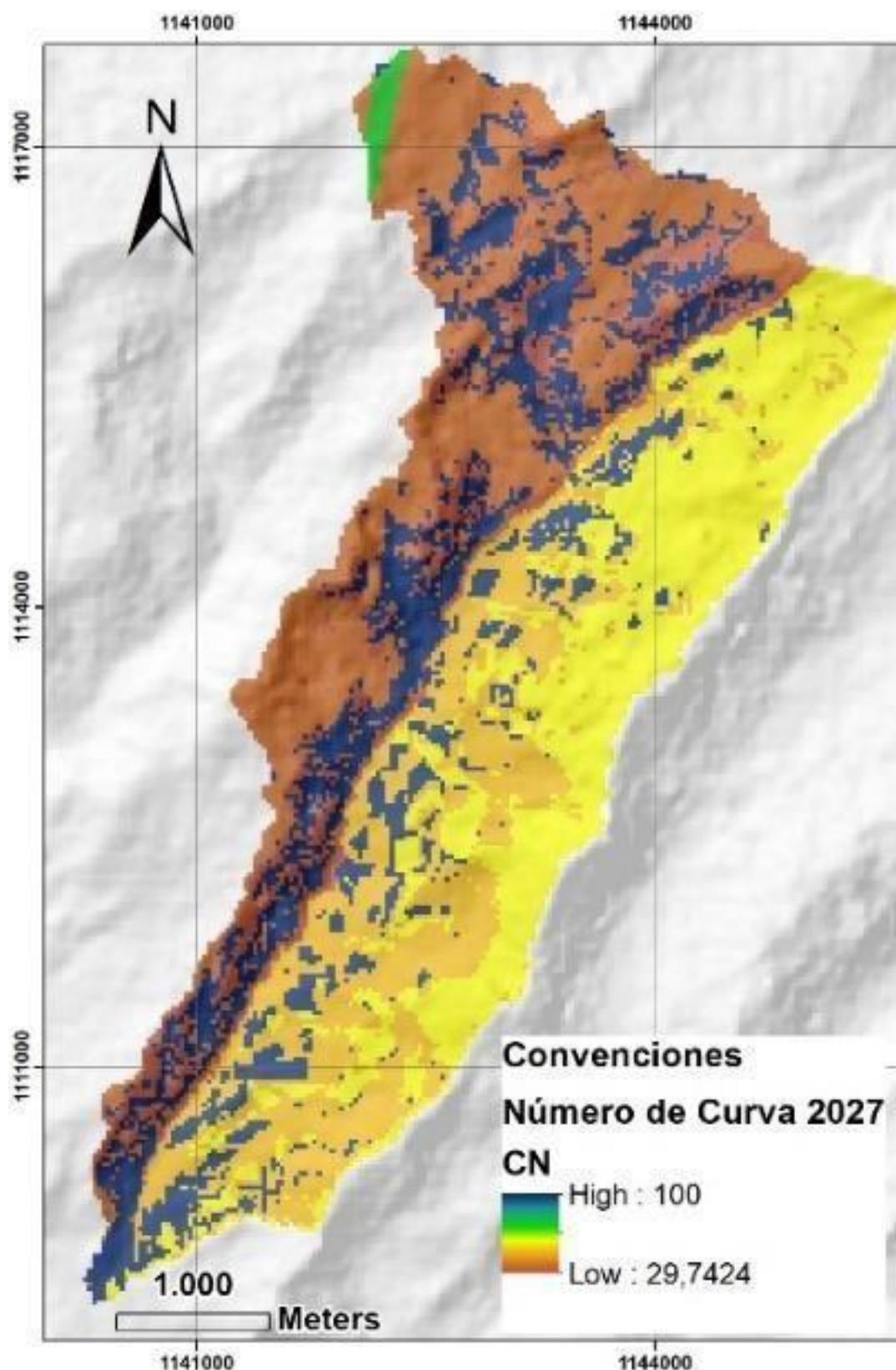


Figure 32:

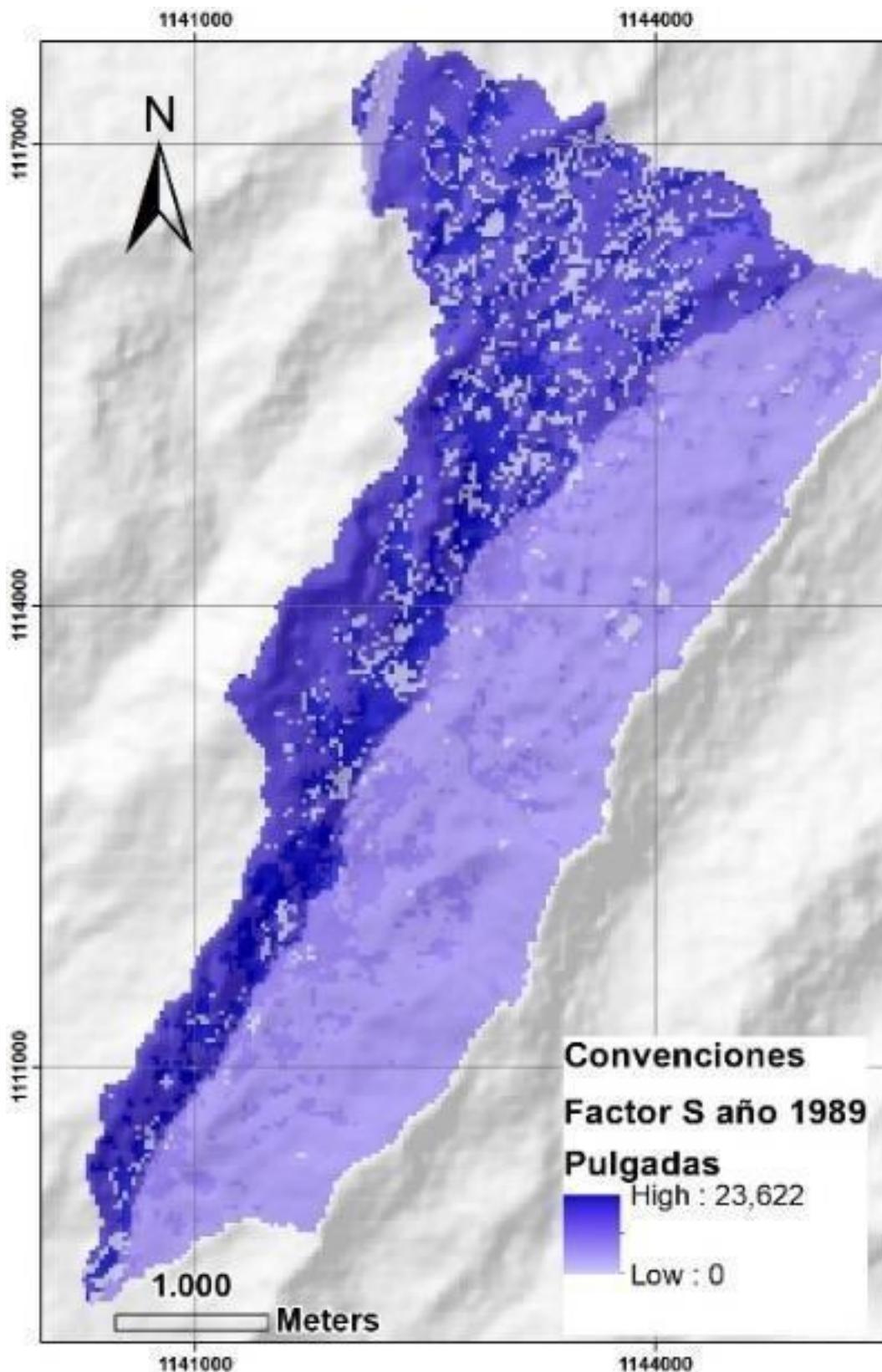


Figure 33:

3

?? ? () =	4,2 ??(??) 10-0,058?? (??)	(3)
?? ??? () =	23 ??(??) 0,13?? (4)	
	(??)	
Lluvia antecedente total de 5 días (pulgadas)		
Grupo	Estación activa (de	Tipo de
AMC	crecimiento)	condición
Estación inactiva (seca)		
I <0,5	<1,4	Seca
II 0,5 a 1,1	1,4 a 2,1	Normal
II Sobre 1,1	Sobre 2,1	Húmeda
Information Systems		

Fuente:(Avellaneda Córdova , 2020) Los números de curva se aplican para condiciones de humedad antecedente normales (AMC II). Las otras dos condiciones se determinan a partir de las siguientes ecuaciones:London Journal of Research in Science: Natural and Formal 15 35 Determination of the Hydrological Parameter of the Curve Number (NC) for the Las Cañas Stream in the Siscunsí Paramo by means of Geographic

Figure 34: Tabla 3 :

27 IV. CONCLUSIONES

Duración D	Modelo de Dick Peschke				Intensidad (I) en mm/	
	T = 5	Método	T= 10	T= 20 Tr (5 años)	T=50 Tr (10 años)	Modelo de
(minutos)		años	años	años	Años	(minutos)
Frederich Bell				43.3	44.9	46.3
			Intensidad (mm)		Inten	(mm)
10	493,62	Dick Peschke	603,23	737,18	960,95	30.1
				30.3		10
20	293,51		358,68	438,33	571,38	
						20
30		216,54	264,63	323,39	421,56	
40	Por medio de los valores de Intensidad I y el coeficiente de escorrentía determinado para la zona de 174,5					
50	estudio (0.39), se calculó la oferta hídrica de la cuenca teniendo en cuenta los 2 modelos empleados. En 1					
60	la Tabla 16 se registran los resultados obtenidos. 128,76 157,35 192,29 250,66					60
70	114,7		140,17	171,3	223,29	
80	103,77	126,81	Tabla 16: Caudales calculados a partir del método racion			
90	95		116,09	141,87	184,93	
100	87,78		107,27	131,09	170,88	Caudal (Q) m ³ /s
110	81,72	Método	99,87	122,05	159,09	Tr (5 años) Tr (10 años)
120	76,56	Frederich Bell	93,56	114,34	0.235	149,04
		Dick Peschke		0.164		0.243
						120
Año	1989		1997	2002	2008	Intensidad (D) e
Q(m ³ /s)	0,521	Método	0,486	Tr (5 años)	0,451	0,500
						Tr (10 años) 0,4
		Frederich Bell		68.4		
					78.7	90.8

3.3 Oferta hídrica de la cuenca de estudio empleando el método racional Dick Peschke 118.63 144.9 177.2 23

Fuer

Método	Caudal (m ³ /s)
Método Racional-Modelo Frederich Bell	0.243
Método Racional-Modelo Dick Peschke	0.163
Precipitación Efectiva	0.423

Fuente: Autores.

Figure 36:

-
- 353 [London Journal of Research in Science: Natural and Formal] , *London Journal of Research in Science: Natural*
354 *and Formal*
- 355 [García Portilla ()] , J García Portilla . 2003. Bogotá, D.C. Universidad Javeriana
- 356 [Calvache ()] , M Calvache . 2010.
- 357 [Rivera Ospina ()] , D Rivera Ospina . 2013.
- 358 [Sánchez Pérez ()] , D F Sánchez Pérez . 2018.
- 359 [Romano Castillo ()] *Algoritmo computacional para describir la dinámica del ciclo hidrológico superficial en una*
360 *cuenca a partir de cartas temáticas topográficas, edafológicas, uso de suelo y vegetación*, E A Romano Castillo
361 . 2007. Foro-Red-Mat: Revista electrónica de contenido matemático.
- 362 [Avellaneda Córdova ()] *Análisis comparativo de los métodos Racional modificado Témez, Hidrogramas unitarios*
363 *SCS, Clark y Snyder en la obtención de caudales máximos para las subcuencas Cañad y Alto Chancay Lambayeque*
364 *Perú*, A D Avellaneda Córdova . 2020. p. . Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
- 365 [Villalobos Chacón ()] ‘Análisis del potencial de escurrimiento en la microcuenca del río Tiribí entre el 2005 al
366 2029 para la conservación de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica. Heredia: Universidad Nacional
367 de Costa Rica’. A Villalobos Chacón . *London Journal of Research in Science: Natural and Formal* 2019. 15
368 p. 55. (Determination of the Hydrological Parameter of the Curve Number (NC) for the Las Cañas Stream
369 in the Siscunsi Paramo by means of Geographic Information Systems)
- 370 [Cuervo Barahona et al. ()] ‘Determinación de las fracciones de carbono orgánico en el suelo del páramo la
371 Cortadera’. E Cuervo Barahona , G Cely Reyes , D Moreno Pérez . *Bojacá. Ingenio Magno* 2016. 7 p.
372 .
- 373 [Díaz Carvajal ()] *Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante*
374 *teledetección y SIG*, Á Díaz Carvajal . 2017. Ingeniería y Desarrollo. p. .
- 375 [Castro López ()] *El sistema de información geográfica aplicado a la investigación urbana en México: balance y*
376 *formación técnica*, J Castro López . 2011. México. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco
- 377 [Deshmukh et al. ()] ‘Estimation and comparision of curve numbers based on dynamic land use land cover change,
378 observed rainfall-runoff data and land slope’. D S Deshmukh , U C Chaube , A Ekube Hailu , D Aberra Gudeta
379 , Tegene Kassa . *Journal of Hydrology* 2013. 492 p. .
- 380 [Galvis ()] Rubiano Galvis , S . *Protección de páramos y derechos campesinos. Aportes jurídicos y de política*
381 *Subdirección de Servicios Científicos y Proyectos Especiales* . Bogotá, D.C: *Instituto de Investigación de*
382 *Recursos Biológicos Alexander von Humboldt*, 2015.
- 383 [Paredes Pinto ()] *Generación de intensidades de precipitación máxima en estaciones sin información pluviográfica (cuenca del río Illpa-Puno)*, R E Paredes Pinto . 2015. Puno-Perú: Universidad Nacional del Altiplano.
- 385 [Cruz ()] *Gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia*, Sedano Cruz , RK . 2013. 37 p. . Universitat
386 Politècnica de València
- 387 [Lemus and Navarro ()] *Manual para el desarrollo de obras de conservación de suelo*, M Lemus , V G Navarro .
388 2003. San Fernando (Chile: Corporación Forestal Nacional).
- 389 [Menéndez and Núñez ()] M Menéndez , V Núñez . *El uso de los sensores remotos en los Recursos Naturales*
390 *Primera parte: La fotografía aérea y la fotointerpretación* Argentina, 2009. 3 p. .
- 391 [Palomino ()] *Modelación precipitación escorrentía en cuencas urbanas-caso de estudio: Distrito de Carmen Alto*,
392 Sánchez Palomino . 2015. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga
- 393 [Ramos ()] Lao Ramos , B . *La teledetección y los Sistemas de Información Geográfica para el manejo de las*
394 *tierras*. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 2018. p. .
- 395 [Rodríguez et al. ()] A Rodríguez , F Gaspari , G Sinisterra , M Delgado , S Besteiro . *Evaluación del efecto de*
396 *la restauración agro-hidrológica mediante la aplicación del modelo hidrológico GeoQ*. *Revista Investigaciones*
397 *Agropecuarias*, 2012. p. .
- 398 [Law and Nichol ()] ‘Topographic correction for differential illumination effects on IKONOS satellite imagery’.
399 K H Law , J Nichol . *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inform. Sci* 2004. 35 p. .
- 400 [Civco ()] ‘Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery’. D L Civco . *Photogram-*
401 *metric Engineering & Remote Sensing* 1989. 55 (9) p. .
- 402 [Morad ()] ‘Una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación’. M Morad . *Sistemas de Información*
403 *Geográfica y modelizaciones hidrológicas*, 2001. 31 p. .
- 404 [Ven Te ()] C Ven Te . *Handbook of Applied Hydrology*, 1984. McGraw Hill Book Company.