



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica.

Estudio del comportamiento hídrico de una cuenca hidrológica en Angola

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería en Geomática y Topografía

Licencia Creative-Commons:

Reconocimiento- No comercial



· El material creado
puede ser distribuido,
copiado y exhibido por terceros si se
muestra en los créditos. No se puede
obtener ningún beneficio comercial.

Autor: Juan Carlos Argente Sanz

Tutor: Dr. Angel Marqués Mateu

Cotutora: Dra. Sara Ibáñez Asensio

Julio, 2014

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer al Dr. Angel Marques Mateu por sus consejos, su simpatía y la orientación necesaria para poder elaborar este trabajo, y a la Dra. Sara Ibañez Asensio por hacer un hueco en su apretada agenda siempre que lo he necesitado para enseñarme los conceptos básicos de hidrología y geomorfología.

Por otra parte, me gustaría agradecer a mi familia y amigos que me ayudaron, y en especial a la Arq. Ana Lucia Reyna que sin su apoyo y motivación que me da día tras día no hubiese sido posible concluir este proyecto en particular, y el grado en Geomática en general.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 - RESUMEN	5
1.2 - OBJETIVOS DEL PROYECTO Y MOTIVACIÓN DEL TRABAJO	6
1.3 - ANTECEDENTES Y ARTÍCULOS RELACIONADOS	7
1.4 - ESTRUCTURA DEL TRABAJO	8
2. PREANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO	9
2.1 - LOCALIZACIÓN	9
2.2 - GEOMORFOLOGÍA	10
2.3 - GEOLOGÍA	11
2.4 - CLIMA	13
2.5 - PRECIPITACIÓN	14
2.6 - BALANCE HÍDRICO	15
2.7 - VEGETACIÓN	17
2.8 - TERMINOLOGÍA UTILIZADA EN LA CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LOS SUELOS	19
2.9 - CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS	21
3. ANÁLISIS DE LA CUENCA	23
3.1 - DELIMITACIÓN DE LA CUENCA	23
3.2 - GEORREFERENCIACIÓN	28
3.3 - CLASIFICACIÓN DE LA VEGETACIÓN	30
3.4 - PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA	31
3.4.1 - <i>Parámetros generales de carácter superficial</i>	32
3.4.2 - <i>Parámetros de la red hídrica:</i>	36
3.4.3 - <i>Resumen de parámetros morfométricos</i>	40
4. ESTUDIO HIDROLÓGICO	41
4.1 - TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	41
4.1.1 - <i>Métodos de estima</i>	42
4.2 - ESTIMACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS	44
4.2.1 - <i>Relación intensidad-duración-frecuencia</i>	45
4.2.2 - <i>Concepto de intensidad máxima esperada</i>	46
4.2.3 - <i>Concepto de periodo de retorno (T)</i>	46
4.2.4 - <i>Curvas de intensidad-duración-frecuencia</i>	46
4.3 - ESTIMA DE LA ESCORRENTÍA	48
4.3.1 - <i>Formula racional</i>	48
4.3.2 - <i>Método del número de curva</i>	50
5. CONCLUSIONES	53
6. REFERENCIAS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista Localización Huambo	9
Figura 2. Localización Centro de Estudios de Chianga	10
Figura 3. Mapa Geológico Centro de Estudios de Chianga	12
Figura 4. Balance Hídrico CEC.....	16
Figura 5. Usos del suelo CEC.....	18
Figura 6. Tipos de suelo.....	19
Figura 7. Comparación gráfica de arena, limo y arcilla.....	20
Figura 8. Aster GDEM 13°S;15°E	23
Figura 9. Imagen satélite CNES / Astrium 23/04/2013	24
Figura 10. a) Proceso dirección de flujo, b) Dirección de centro	25
Figura 12. Imagen raster dirección de flujo (izq) y acumulación de flujo (dcha)	25
Figura 11. Proceso acumulación de flujo.....	25
Figura 13. Imagen vectorial acumulación de flujo	26
Figura 14. Delimitación de la cuenca	27
Figura 15. Herramienta Georreferenciación ArcGis	28
Figura 16. Detalle punto de control	28
Figura 17. Imagen georreferenciada con cuenca delimitada.....	29
Figura 18. Imagen usos del suelo georreferenciada	29
Figura 19. Capa clasificación usos del suelo.....	30
Figura 20. Recorte cuenca: DEM (a), TIN (b), Dirección de flujo (c), Acumulación de flujo (d).....	32
Figura 21. Intervalo de cotas	33
Figura 22. Curva hipsométrica de la cuenca	35
Figura 23. Mapa de pendientes	35
Figura 24. Longitud de flujo	37
Figura 25. Modelbuidier para calcular la orden de la red hídrica	38
Figura 26. Orden de la red hídrica	39
Figura 27. Modelo curva IDF	45
Figura 28. Comparativa tiempo de concentración-curva IDF.....	47
Figura 29. Curva IDF para la región de "M Banza Congo"	47

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Datos meteorológicos del Centro de Estudios de Chianga</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2. Balance Hídrico del Centro de estudios de Chianga</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 3. Serie 320 perfiles típicos</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 4. Cruce estadístico área & altitudes</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 5. Cuadro relación altitudes & Areas</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 6. Cruce estadístico DEM & Pendientes</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 7. Cuadro pendientes</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 8. Longitud de la orden</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 9. Cruce estadístico pendiente & orden de la red</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 10. Pendiente promedio de la red hídrica</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 11. Resumen parámetros morfométricos</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 12. Coeficiente de escorrentía Prevet</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 13. Valores del coef. escorrentía para cada uso de la cuenca</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 14. Factores fórmula de Nadal</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 15. Cuadro relación número de curva</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 16. Cálculo de la escorrentía (número de curva)</i>	<i>52</i>

1. INTRODUCCIÓN

1.1 - RESUMEN

La gestión de espacios naturales en países en vías de desarrollo requiere hoy día el uso de herramientas modernas para la obtención rápida y eficiente de información de apoyo. En este sentido, la modelización hidrológica y del comportamiento erosivo de cuencas frente a las escorrentías generadas por la precipitación pluvial reviste especial interés. En este proyecto, se llevará a cabo una recopilación bibliográfica de las variables medioambientales determinantes del comportamiento hidrológico del terreno, así como de datos geográficos de acceso libre, aspecto este último fundamental en estos países. El tratamiento de la información se realizará en el entorno de un Sistema de Información Geográfica en el cual se implementarán modelos hidrológicos especialmente validados a nivel de cuenca (USLE, SWAT, etc.)

ABSTRACT:

Today the management of natural areas in developing countries requires, the use of modern tools for quick and efficient information support. In this sense, the hydrologic modeling and erosion behavior of river basins in front of the runoff generated by the precipitation is of special interest. In this project, we will conduct a bibliographic collection of the environmental variables determining the hydrological behavior of the field, as well as geo-free access, data which is crucial in these countries. The treatment of the information will be held in the environment of a Geographic Information System which will implement hidrologic models especially validated at the basin level (USLE, SWAT, etc.)

1.2 - OBJETIVOS DEL PROYECTO Y MOTIVACIÓN DEL TRABAJO

El principal objetivo de este trabajo está centrado en la modelización hidrológica y comportamiento erosivo de una pequeña cuenca frente a las escorrentías generadas por la precipitación pluvial de una zona situada en el corazón del país de Angola. Para ello se utilizará las diferentes herramientas de análisis espacial, análisis hidrológico, interpolación y georreferenciación de imágenes que nos permite desarrollar el software especializado en gestión y análisis de información geográfica ArcGIS de ESRI (se ha elegido esta herramienta de trabajo por ser una de las pioneras en el sector y con gran potencial para el tratamiento de datos en formato ráster y vectorial). El problema que se genera es la dificultad de obtener datos precisos de series climáticas referidos a estaciones meteorológicas del terreno para realizar un estudio detallado de las escorrentías, lo cual nos lleva a utilizar datos climáticos libres obtenidos mediante observaciones de satélite.

La utilización de las herramientas modernas para gestionar espacios naturales en países de vías de desarrollo es una de las principales motivaciones para realizar este trabajo por la importancia y utilidad real que les pueda suponer a los angoleños, los cuales están necesitados de nuevos datos cartográficos para ir avanzando en la gestión de sus territorios. Además de ello, se le suma la filosofía de utilización de datos libres y la posibilidad de adquirir nuevas destrezas en el manejo de herramientas de Sistemas de Información Geográfica con ArcGIS.

1.3 - ANTECEDENTES Y ARTÍCULOS RELACIONADOS

Como muchos de los países del continente africano, Angola es uno de ellos en los que su situación socioeconómica se encuentra en vías de desarrollo y lejos todavía de encontrar una estabilidad, debido principalmente a la guerra civil que se desató en el país en 1975 tras independizarse de Portugal y que perduró hasta 2002. El país posee unos abundantes recursos naturales (principalmente minerales y petróleo) y su economía pudo empezar a crecer a partir de 1990 gracias a las exportaciones de estas materias primas, pero a pesar de ello, el nivel de vida de la mayor parte de los angoleños es muy bajo con grandes desigualdades económicas, pues la mayor parte de la riqueza está en manos de un porcentaje muy pequeño de sus habitantes.

Fue durante este periodo bélico donde además de las pérdidas humanas, se destruyeron importantes edificios, patrimonio, y otras datos de interés gubernamental, entre ellos la mayoría de las estaciones meteorológicas ocasionando la pérdida de datos en las series de precipitación y temperatura *in situ* desde 1979 a 2003, que a su vez coincide con el *climate shift* de los 70's, donde se documentaron cambios importantes en el clima global. Por ello, fue de gran utilidad el trabajo de diferentes científicos para reconstruir series meteorológicas a través de una combinación de los datos que se pudieron salvar de las estaciones *in situ* y los datos obtenidos de diferentes satélites: por parte de NCEP¹ (Rodríguez Fonseca et al., 2009) y con datos TRMM² se obtuvieron modelos de comportamiento hídrico y representaciones de curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) para zonas más específicas de Angola, en concreto la zona noroeste (Awadallah et al., 2011 & Awadallah et al., 2013).

Estos artículos y otros, como el "Comparison of satellite rainfall data with observations from gauging station networks" (Hugens, 2006) el cual estudia los datos de precipitación de estaciones terrestre en combinación con las del satélite GPCP³ para cuatro grandes cuencas de regiones africanas, nos servirán para desarrollar la parte del estudio hidrológico del presente Trabajo Fin de Grado (en adelante TFG).

1 NCEP: National Center for Environmental Prediction, dependiente de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) donde se pueden conseguir datos satelitales de diferentes fenómenos atmosféricos entre latitudes 50° y -50°

2 TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission: datos satelitales de precipitación a nivel global entre 40° y -40°, dependientes de la NASA (National Aeronautics and Space Administration)

3 GPCP: Geostationary Satellite Precipitation Data Centre, dependiente de la NASA

1.4 - ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El presente TFG presenta un total de 6 capítulos diferenciados incluyendo esta primera introducción que incluye el resumen, los antecedentes, y los objetivos del trabajo haciendo hincapié en la problemática que tiene la no disponibilidad de datos climáticos y la importancia que tiene el reconstruir esos datos con fuentes externas para posteriores estudios a realizar.

En el capítulo 2 se hará un pre análisis de la zona de estudio indicando su localización y haciendo un repaso de los datos más relevantes extraídos de la “Carta de Solos do Centro de Estudos da Chianga” (Dias Nogueira, 1978) que nos servirán de apoyo para los posteriores análisis morfológico e hidrológico.

En el capítulo 4 se explicarán de forma detallada los diferentes métodos que se han empleado para llevar a cabo los objetivos planteados en el capítulo uno, entre ellos está la obtención de una micro cuenca para la zona de estudio en concreto con la herramienta ArcGIS, un posterior estudio geomorfológico del terreno que finalizará con un estudio hídrológico desarrollado en el capítulo 4.

En el capítulo 5 se argumentarán los resultados obtenidos, comparándolos con otros resultados similares obtenidos en diferentes textos científicos para exponer finalmente las conclusiones de dichos resultados.

Para concluir se hará un listado detallado de todas las fuentes de información que hayan sido útiles para el desarrollo del trabajo en el capítulo 6.

2. PREANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 - LOCALIZACIÓN

El estudio se va a desarrollar dentro del área de una zona experimental del Instituto de Investigación Agronómica de Angola: el Centro de Estudios de Chianga (en adelante CEC) situado a 13 km al noreste de la ciudad de Huambo (Angola) cuyas coordenadas geográficas WGS84 son: -12.741535, 15.831289 (fig.1).

A groso modo, puede decirse que el CEC está limitado al sur y sudoeste por el río Culimaala, al nordeste por la ribera Calaupanda, al este por la ribera Chianga (ambas afluentes de Culimaala), y al norte y nordeste por una línea discontinua cercana a la “Reserva Forestal do Caminho de Ferro de Benguela”. Esta información y la restante para realizar el pre análisis de la zona se obtuvo de la “Carta do Solos do Centro de Estudos da Chianga” (Dias Nogueira, 1978).

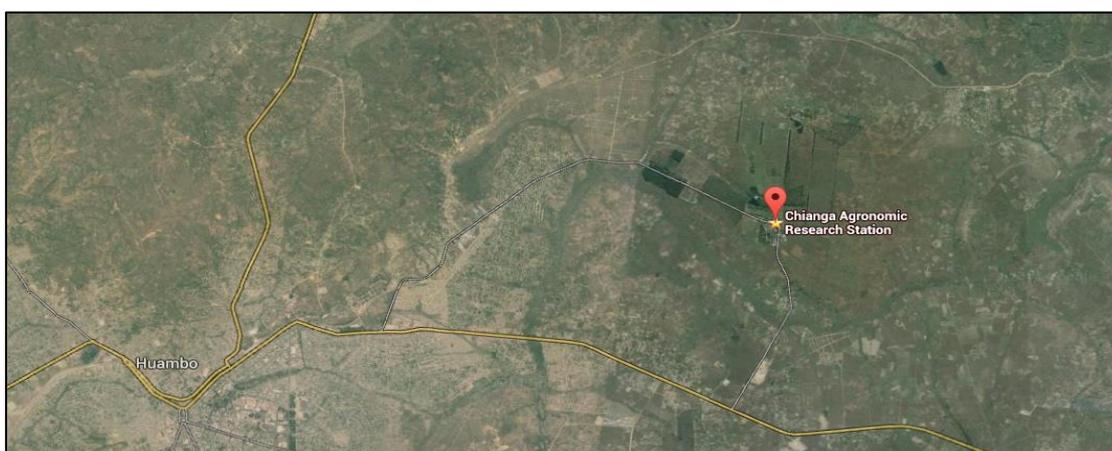


Figura 1. Vista Localización Huambo

2.2 - GEOMORFOLOGÍA

Chianga constituye una "colina" más o menos redondeada, con relieve liso y ondulado con pendientes generalmente pequeñas (entre el 5 y el 7%). Con altitudes comprendidas entre aproximadamente 1650 m y 1740 m (el punto más alto), las laderas de la colina son cortadas por varios canales donde hay numerosos cursos de agua (ríos y arroyos) que desembocan en el río Culimaala y sirve como límite natural para el CEC en el sur y suroeste (fig.2).

Morfológicamente, Chianga es el testimonio residual de una actividad volcánica que estalló a través de una gran erupción de rocas que caracterizan la geología de la región. A. Gieseck había clasificado esta área como unos anillos volcánicos y relacionados con otros anillos existentes en Angola. De hecho, Chianga es parte de una serie de estructuras de anillo de Angola, cuyas primeras referencias remontan a 1939, cuando E. Pollinard estudió esta región.

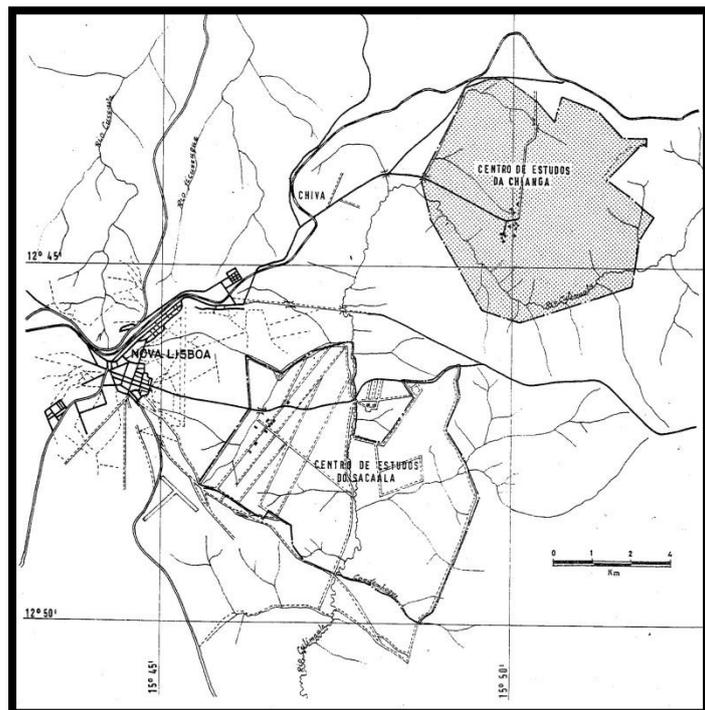


Figura 2. Localización Centro de Estudios de Chianga

Las estructuras principales que se mencionaron son (además de la Canata): Chincca, Chiango, Capuia, Bailundo, Sulima, Chauja, Quizia, Chimboa y Longonjo, estrechamente vinculadas con las rocas alcalinas y carbonatadas. Estas estructuras tienen una alineación de tectónica con orientación SO-NE.

2.3 - GEOLOGÍA

Consultando el esquema geológico de Angola, el CEC se encuentra atrapado en el gran estanque de rocas eruptivas antecámbricas y sin fecha definida con precisión, compuesto de granitos, granodioritos y cuarzo-Diorita. Chianga, sin embargo, tiene características geológicas especiales que hacen prácticamente una excepción dentro del distrito de Huambo.

El CEC se sitúa en una zona con mucho interés en el campo de la investigación geológica, ya que es una zona que, aunque de tamaño reducido, es litológicamente muy variada. Resulta complicado hacer la separación y delimitación de los diferentes tipos litológicos, debido a la enorme capa de adulteración de rocas cubriendo la zona, y el reducido número de afloramientos rocosos y fenómenos de solifluxión en la cual se someten las zonas inclinadas. Este último aspecto puede llevar a encontrar un suelo derivado de sienita sobre una roca de granito, es decir en virtud de la tierra de la cuota de una reunión de formaciones volcánicas más elevada.

Con los aspectos mencionados, bajo el punto de vista geológico y consecuentemente desde el punto de vista edafológico, pueden considerarse en el CEC dos zonas completamente distintas: una zona central que se ha visto afectada por los fenómenos volcánicos y cuyos suelos proceden de rocas lávicas, y otra (a cielo descubierto) cuyos suelos son francos procedentes de rocas ácidas, eruptivas o cristalofísicas y quartzíferas. También hay que señalar, por los aspectos mencionados anteriormente que el paso de una zona a otra es bastante difusa, razón por la cual, estos suelos deberán ser considerados como "suelos de contacto" y derivados de materiales mixtos.

Monteiro Marques (Monteiro Marques, 1963) considera en el CEC dos tipos fundamentales de rocas:

- a) eruptivas quartzíferas, dando suelos como cuarzo
- b) eruptivas no quartzíferas.

Las primeras comprenden los granitos y rocas afines, y las segundas, el sienito nefelínico y rocas piroclásticas (brecha, y toba volcánico).

En la carta de suelos (fig.3) se puede observar la ubicación de los afloramientos rocosos que se encuentran en la cartografía de los suelos y la delimitación de la zona que, desde el punto de vista edafológico, fue influenciada por los fenómenos volcánicos y por las orillas del río Cuilmaala.

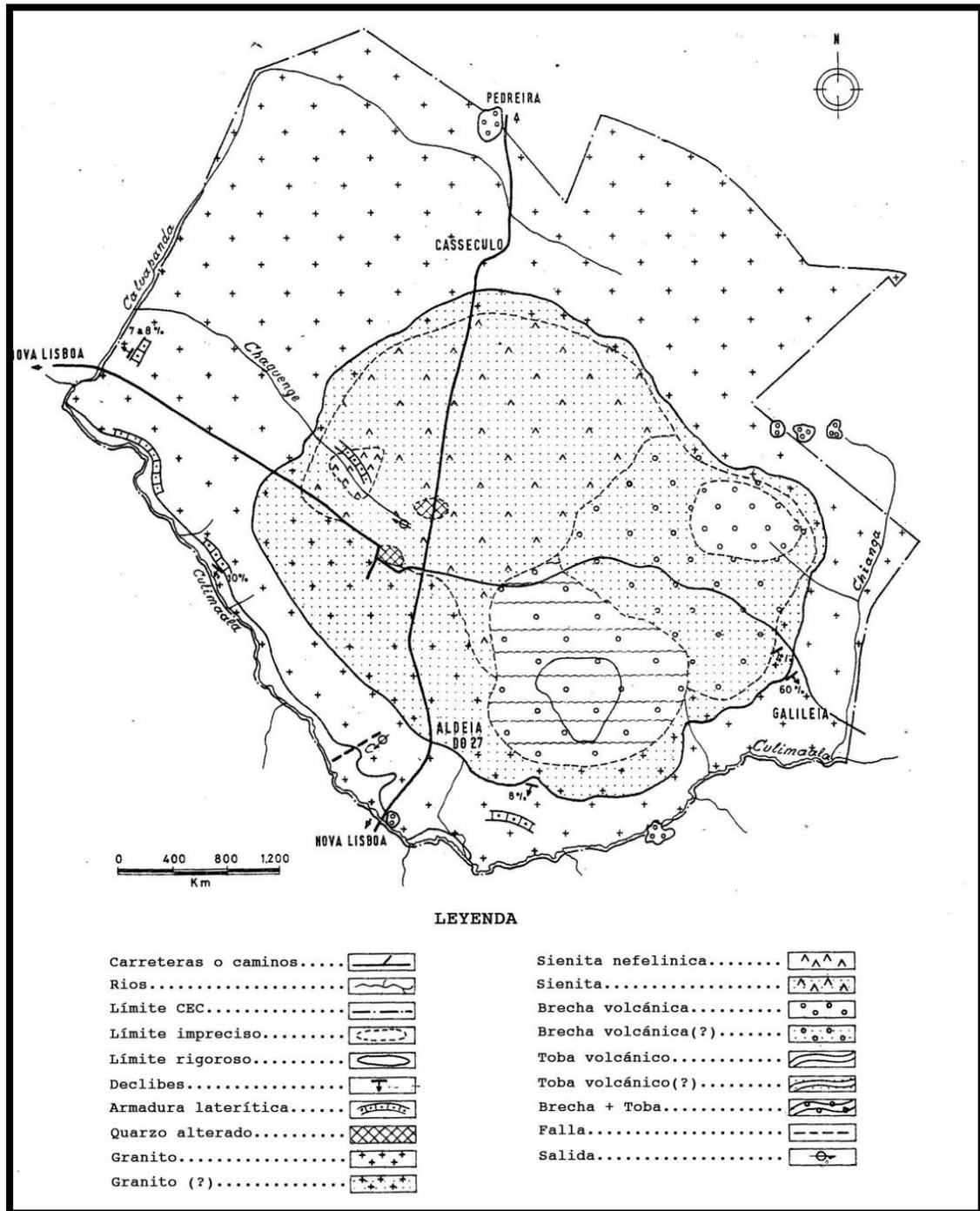


Figura 3. Mapa Geológico Centro de Estudios de Chianga

2.4 - CLIMA

Los datos de los elementos climáticos del CEC han sido ampliamente divulgados a través del Boletín Mensual de la División de Meteorología Agrícola. Algunas ligeras diferencias que puedan encontrarse en los valores ahora representados (tabla 1) son resultantes de la actualización de algunos datos.

Los primeros datos de los elementos meteorológicos datan de 1943, momento en que fue creado el Puesto Udométrico de la Chianga. Este pasó en 1953 a la categoría de Estación Climatológica, que con la creación de Instituto de Investigación Agronómica de Angola, en 1961, fue bastante mejorado y pasó a contar con una batería triple de evapotranspirómetros. Posteriormente, se ha enriquecido con el montaje de una "estación actinométrica" para la medición de los valores horarios de la radiación global, de la radiación difusa y la radiación directa.

Designação	Período	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Ano
Precipitação (mm)	1943-1965	204	161	238	134	25	0	0	2	24	122	215	256	1 381
Temperatura média $\bar{T} = \frac{MAX + MIN}{2}$ (°C)	1953-1967	19,4	19,4	19,5	19,3	17,4	15,7	16,1	18,4	20,5	20,6	19,7	19,4	18,8
Média das Temperaturas Máximas (MAX) (°C)	1953-1967	24,9	25,5	25,0	25,4	25,4	24,6	25,2	27,4	28,9	27,7	25,3	25,0	25,9
Média das Temperaturas Mínimas (MIN) (°C)	1953-1967	14,0	13,4	14,0	13,2	9,4	6,7	7,1	9,3	12,1	13,5	13,9	13,9	11,7
Amplitude Média Diurna da Temperatura AMP = MAX - MIN	1953-1967	10,9	12,1	11,0	12,2	16,0	17,9	18,1	18,1	16,8	14,2	11,4	11,1	14,2
Temperatura Máxima Absoluta (°C) (MAX)	1953-1967	32,5	31,2	29,9	29,5	28,7	29,3	28,6	33,0	34,5	32,7	31,0	30,6	34,5
Temperatura Mínima Absoluta (°C) (MIN)	1953-1967	8,1	4,1	8,5	8,0	-2,5	0,8	-1,3	2,0	6,2	5,0	10,0	10,0	-2,5
Humidade Relativa (U) (%) às 9 horas	1953-1967	79	76	80	73	56	47	42	35	46	63	73	75	62
Insoleção Efectiva (nº de horas)	1953-1963 Nova Lisboa	137,6	152,5	143,6	175,3	262,9	272,2	270,8	275,7	226,2	180,0	148,0	149,1	2 394,0
Percentagem de Insoleção (%)	1953-1963 Nova Lisboa	36	43	38	50	74	69	81	76	63	47	40	38	55
Nebulosidade (décimos) às 9h	1953-1963 Nova Lisboa	7,6	7,5	7,6	6,1	2,5	0,6	0,6	0,7	2,1	4,8	7,0	7,5	4,5
Evaporação Piche (mm)	1951-1965	131,7	121,7	127,7	158,8	254,9	312,4	375,1	449,3	393,5	249,2	141,0	122,7	2 338
Evaporação (Tina classe "A") (mm)	Jun. 1964 a Dez. 1967	141,9	117,0	144,9	149,1	176,4	179,6	205,0	241,1	237,4	180,4	152,8	129,0	2 054,6
Evaporação Potencial Medida (mm)	Nov. 1962 a Set. 1968	108,6	102,7	110,2	112,9	121,8	108,9	119,9	136,2	161,3	137,1	118,7	115,5	1 453,8
Evapotranspiração Potencial Thorntwaite (mm)	1953-1959	83	74	78	72	59	45	52	66	83	90	82	83	867
Evapotranspiração Potencial Penman (mm)	1953-1963	105	110	113	113	99	78	83	99	126	131	127	120	1 304
Nº de dias de precipitação ≥ 10 mm	1943-1967	7	5	9	5	1	0	0	0	1	5	8	9	50
Nº de dias de geada (temperatura da relva ≤ 0 °C)	1958-1965	0	0	0	1	8	14	13	6	1	0	0	0	43

Tabla 1. Datos meteorológicos del Centro de Estudios de Chianga

Para caracterizar el clima según las normas de la Organización Meteorológica Mundial (que considera necesario un periodo de observaciones de 30 años), los datos existentes no son lo suficientemente representativos. El conocimiento de estos datos y sus posteriores análisis son de gran importancia para los técnicos agrarios y agricultores

que constantemente se tienen que preocupar por el estudio de las relaciones entre las labores y el medio ambiente a lo largo del año agrícola.

Desde el punto de vista de las clasificaciones clásicas, se puede decir que el clima del CEC es templado (seco o lluvioso) tomando en cuenta la temperatura media anual, el promedio anual de la humedad relativa, la variación de la amplitud diurna de la temperatura y la precipitación.

2.5 - PRECIPITACIÓN

Desde el punto de vista agrícola, interesa conocer no solo la cantidad anual de precipitación, sino también su distribución a lo largo del año, la intensidad y el tipo de precipitación. Efectivamente, para las plantas, no es indiferente que una determinada precipitación se produzca en los fuertes aguaceros en días consecutivos o se distribuya uniformemente por varios días espaciados a lo largo del mes. Del mismo modo, no es indiferente que la precipitación se verifique bajo la forma de lluvia, granizo, nieve o incluso niebla o rocío.

La precipitación media anual en el periodo considerado (1943-1965) es de 1381 mm, presentando un máximo 1779 mm en 1951 y un mínimo de 1054 mm en 1959.

En cuanto a la distribución de la precipitación a lo largo del año, podemos considerar dos periodos completamente distintos: la "época de lluvias", que abarca los meses de Octubre y Abril, durante la cual se produce aproximadamente el 96% del total anual de precipitación, y la "época seca", normalmente denominada "Cacimbo", que comprende los meses de mayo a Septiembre, en el que prácticamente no llueve. En ésta última época se puede considerar como meses de transición (una vez que la precipitación ocurrida es del orden de los 25 mm y en los meses de Junio, Julio y Agosto, rara vez llueve). Para la agricultura, sin embargo no tiene la misma importancia la lluvia caída en el mes de mayo que la de septiembre. Lo mismo ocurre con la precipitación de septiembre que encuentra el suelo completamente sin reservas de agua en las capas de superficies, y claramente insuficientes para iniciar un nuevo año agrícola.

Durante la estación de las lluvias, en la que generalmente se verifican dos máximos, uno en diciembre y otro en marzo, es normal la ocurrencia de una pequeña estación seca, comúnmente denominada "pequeño Cacimbo", por presentar algunas características del Cacimbo propiamente dicho: la ausencia o la cantidad reducida de

precipitación, gran disminución de la humedad relativa, el cielo limpio o con pocas nubes, aumento de la temperatura y un mayor déficit de saturación.

El inicio del "pequeño Cacimbo" se da generalmente entre los días 28 de Noviembre y el 17 de Febrero, ocurriendo antaño con más frecuencia en los meses de enero y febrero; su duración, en media de 13 días, puede prolongarse por más de 30 días. En algunos casos se ha comprobado que es otro período de "pequeño cacimbo" (no se consideraron los periodos inferiores a 7 días), en cada uno de los cuales la precipitación total nunca alcanzó los 10 mm. Normalmente esta precipitación es bastante reducida, lo que para algunos cultivos anuales, con sistema radicular superficial, puede ser altamente comprometedor.

2.6 - BALANCE HÍDRICO

Conocidos los valores de la precipitación y la evapotranspiración potencial medida, es posible elaborar el balance hídrico o hidrológico, determinando así la evapotranspiración real y los meses en que hay exceso, alteración o deficiencia de agua en el suelo, teniendo en cuenta la capacidad utilizable.

Se presenta en la tabla 2 el balance hídrico para el CEC tomando en cuenta los valores medios de la precipitación en el período 1943-1965 y los valores medios de la evapotranspiración potencial medida desde Noviembre de 1962 a septiembre de 1968.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Ano
Evapotranspiração potencial medida (e)	109	105	110	115	122	109	120	136	161	157	119	116	1 455
Precipitação (P)	204	161	258	154	25	0	0	2	24	122	215	256	1 381
P - E	95	58	128	21	-97	-109	-120	-134	-137	-15	96	140	-
Armazenamento de água útil (A)	100	100	100	100	5	0	0	0	0	0	96	100	-
Variacão do armazenamento de água (ΔA)	0	0	0	0	-97	-3	0	0	0	0	+96	+4	-
Evapotranspiração real (E)	109	105	110	115	122	5	0	2	24	122	119	116	945
Deficiência de água (D)	0	0	0	0	0	106	120	134	137	15	0	0	512
Excesso de água (S)	95	58	128	21	0	0	0	0	0	0	0	136	438
Relação de humidade ($\frac{P-E}{E}$)	0,87	0,56	1,16	0,19	-0,79	-1,00	-1,00	-0,98	-0,85	-0,11	0,81	1,21	-

$$\text{Índice de aridez - Ia} = \frac{100 \times D}{e} = \frac{100 \times 512}{1 455} = 35,2\%$$

$$\text{Índice de humidade - Ihu} = \frac{100 \times S}{e} = \frac{100 \times 438}{1 455} = 30,1\%$$

$$\text{Índice hídrico - Ih} = \text{Ihu} - 0,6 \times \text{Ia} = 30,1 - (0,6 \times 35,2) = 9,0\%$$

$$\text{Concentração estival da eficiência térmica - C.T.E.} = \frac{\text{evapotranspiração de Maio a Setembro}}{e} = \frac{372}{848} = 100 = 25,6\%$$

Tabla 2. Balance Hídrico del Centro de estudios de Chianga

En la figura 4 se encuentra la representación gráfica del balance hídrico. Por su observación se comprueba que hay exceso de agua en los meses de Diciembre, Enero, Febrero, Marzo y Abril y la deficiencia de agua en los meses de Junio, Julio, Agosto, Septiembre y Octubre. En el mes de mayo hubo cadencia del agua almacenada en el suelo y en el mes de noviembre y principios de diciembre hubo reposición de agua en el suelo, hasta completar el valor de su capacidad de campo, a partir del cual comenzó a existir exceso de agua en el suelo.

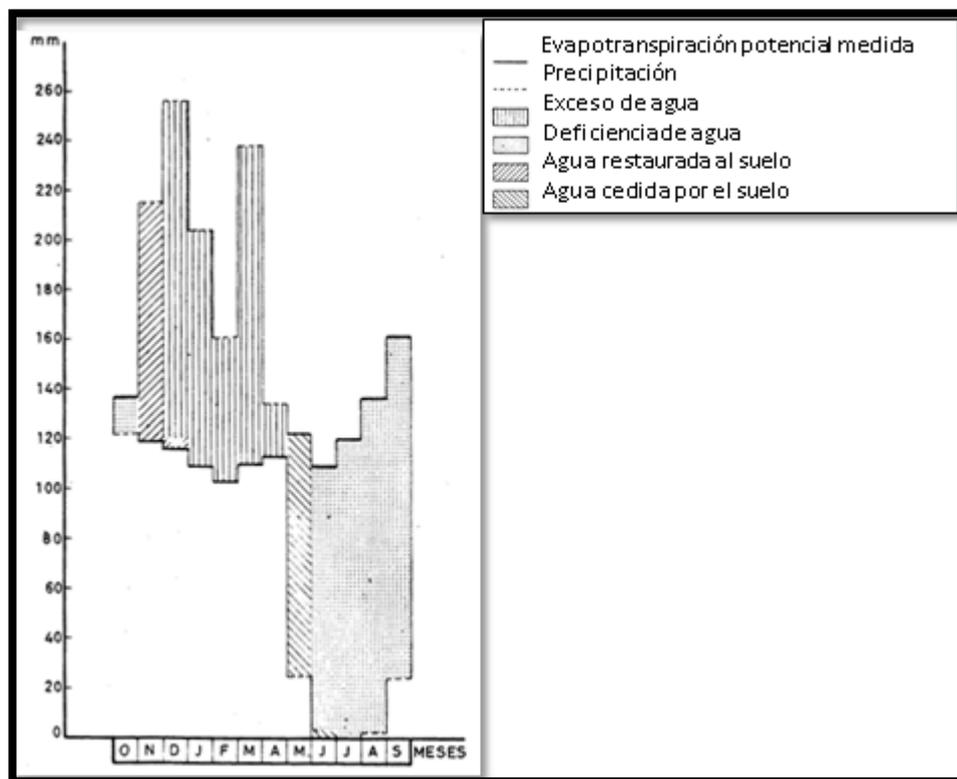


Figura 4. Balance Hídrico CEC

2.7 - VEGETACIÓN

La vegetación del CEC se encuentra bastante modificada por la acción del hombre que, dada la necesidad de uso de la tierra, va procediendo a su caída, y a través de los incendios, a su degradación. La división de la tierra va procediendo a su deterioro, y el cuerpo de Investigación Agronómica de Angola ha tomado algunas medidas en el sentido de evitar daños mayores e incluso se reservó una zona razonable de vegetación natural, menos afectada por el hombre - Reserva florística - en el que se estudió detalladamente la composición florística y en donde se propone observar su evolución a lo largo de los años.

Brito Teixeira y Cardoso de Matos (Dias Nogueira, 1978) elaboraron la carta de vegetación del CEC (fig. 5), incluyendo las siguientes formas: "bosque abierto", "sabana arbolada", "sabanas con arbustos" y a veces "estepas con árboles y/o arbustos".

En algunos casos, y esto también se verifica en algunas manchas de vegetación del CEC, la sabana arbolada es establecida artificialmente por eliminación de algunos árboles y especies de la sabana bosque, con el fin de aumentar la superficie del estrato herbáceo para el pastoreo.

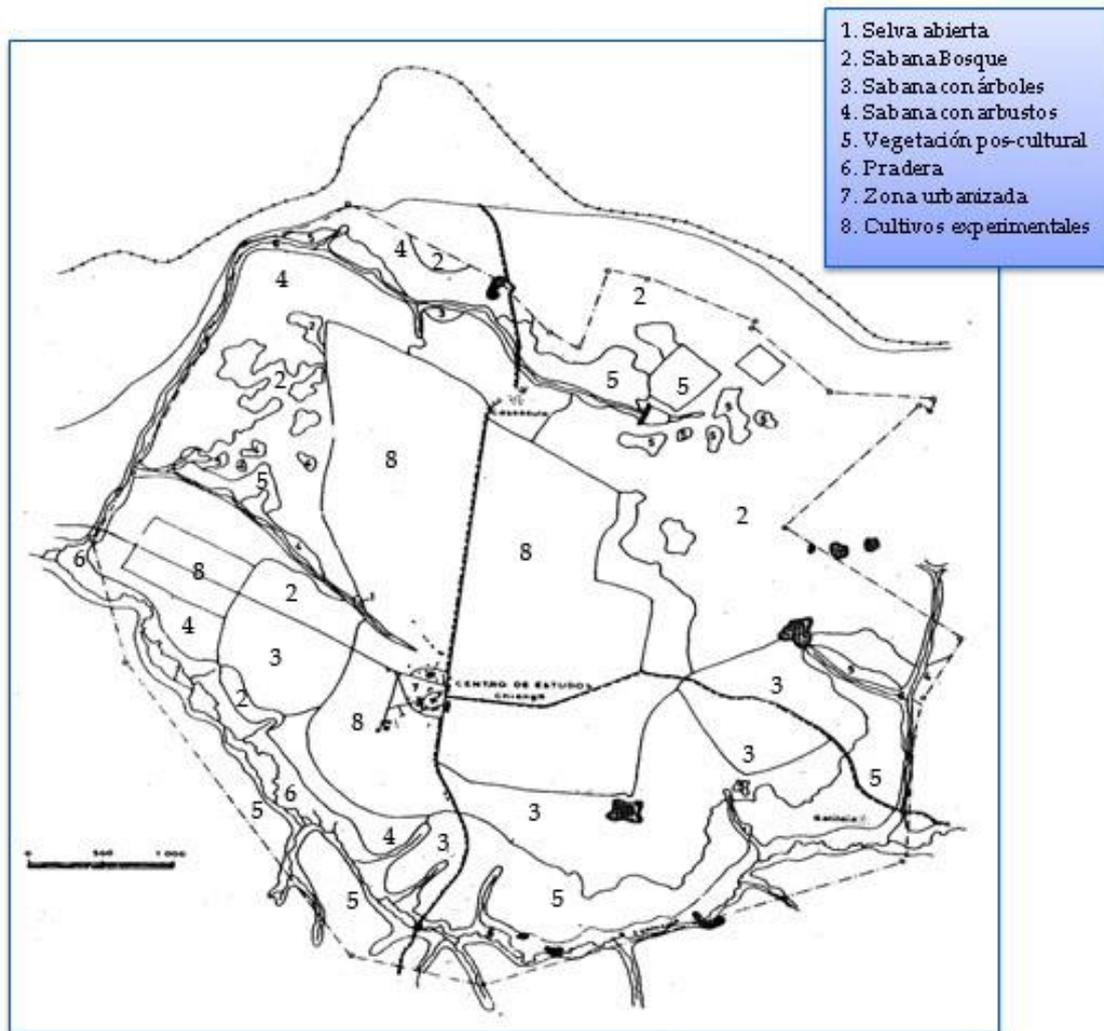


Figura 5. Usos del suelo CEC

2.8 - TERMINOLOGÍA UTILIZADA EN LA CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LOS SUELOS

Se presenta brevemente la terminología referente a la “textura”, “consistencia” y “porosidad visible” utilizada para hacer la descripción morfológica de los diferentes perfiles y de las series correspondientes en el artículo de morfología de las cuencas hidrológicas (Ibañez Asensio et al., 2011):

Textura:

Las designaciones utilizadas son las correspondientes a las clases de textura adoptadas en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (fig. 6):

- Arena (sand)
- Arena-arcillosa (loamy sand)
- Limo arenoso (sandy loam)
- Marga (loam)
- Marga-arcillo-arenoso (sandy clay loam)
- Arcillo-arenoso (sandy clay)
- Marga-arcilloso (clay loam)
- Limoso (silt)
- Marga-limoso (silt marga)
- Marga-arcillo-limoso (silty clay loam)
- Arcilloso-limoso (silty clay)
- Arcillosos (clay)

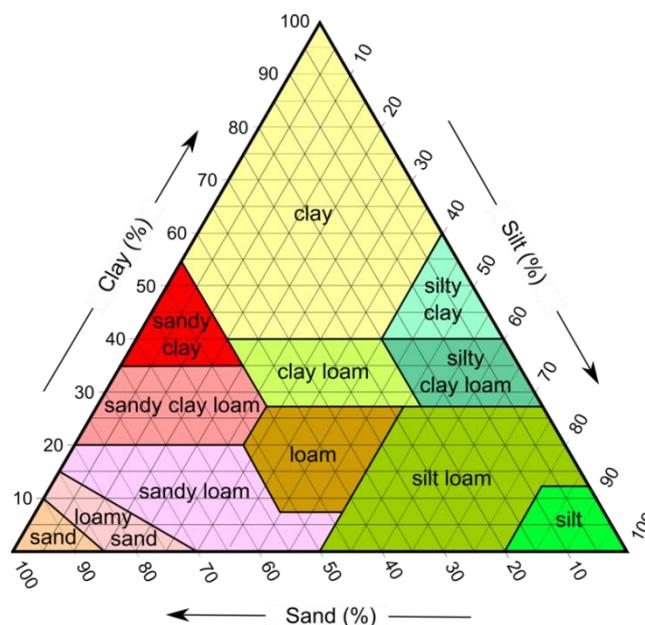
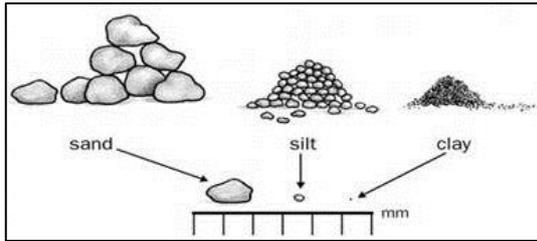


Figura 6. Tipos de suelo



Sand -> [2 - 0.05] mm
 Silt -> [0.05 - 0.002] mm
 Clay -> [< 0.002] mm

Figura 7. Comparación gráfica de arena, limo y arcilla

Consistencia:

Expresando la mayor o menor dificultad al desmenuzamiento de la tierra entre los dedos (en el estado seco y en el estado húmedo), se utilizaron los siguientes términos:

Consistencia en estado seco:

- Suelta (loose)
- Ligéramente dura (slightly hard)
- Dura (hard)
- Muy dura (very hard)
- Extremadamente dura (extremely hard).

Consistencia en estado húmedo:

- Suelto (loose)
- Muy quebradizo (very friable)
- Quebradizo (friable)
- Firme (firm)
- Muy firme (very firm)
- Extremadamente firme (extremely firm).

Porosidad visible:

Se refiere a la existencia de orificios o poros visibles a simple vista o con la ayuda de una lupa. Se utilizan las siguientes designaciones: "cerrado", "poco poroso", "medianamente poroso", "bastante poroso" y "muy poroso". Como norma se refieren también a las dimensiones de los "poros", con las siguientes designaciones:

Ordinario - > 5 mm
 Medios - 2-5 mm

Finos - 1-2 mm
 Muy finos - <1 mm

2.9 - CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Según “A preliminary Atlas and profile of Huambo” (Development Workshop Angola, 2012) dos son los tipos de suelos dominantes en Huambo: ferralsoles en las elevaciones más altas y fluvisol aluvial en la parte inferior, más húmedos, principalmente a lo largo de las líneas de agua. Estas designaciones pertenecen al sistema de clasificación de suelo de la Organización de Alimentación y Agricultura (FAO).

· FERRALSOLES: son de color rojo y amarillo cuyos colores son el resultado de una acumulación de óxidos de metales, especialmente el hierro y el aluminio (a partir de la cual el nombre de la tierra del grupo se deriva). Están formados geológicamente sobre capas de materiales antiguos en climas tropicales húmedos. Debido a los residuos de los óxidos de metal y la lixiviación de nutrientes minerales, son de baja fertilidad y requieren de la adición de cal y fertilizantes, en caso de ser utilizadas para la agricultura. Su principal uso agrícola es el pasto y también son a menudo el cultivo de aceite de palma, caucho, o el café.

Los ferrálsoles son técnicamente definidos por una textura de capa fina arcilloso-limoso, de alto contenido de kaolinitic de barro y de hierro y óxidos de aluminio, y cantidades bajas de iones de calcio o de magnesio. Están relacionados con otros suelos de la clasificación originarios de climas tropicales y con alto contenido en hierro como Plinthosols y Alisols.

Los ferralsoles son derivados de la meteorización de las rocas subyacentes, así como de sedimentos antiguos depositados en el terreno por acción del viento y del agua. Éstos dominan el área de la superficie de Huambo, pero son poco productivos para la agricultura, debido a que los suelos son permeables y por tanto tienen una baja capacidad de retención de agua. Esta permeabilidad en combinación con la alta precipitación conduce a la lixiviación, con la consiguiente pérdida rápida de nutrientes minerales y materia orgánica.

A pesar de los bajos contenidos de nutrientes de agua, el potencial de los ferrálsoles para la producción de cultivos es limitado, con rendimientos moderados, que puede lograrse con el uso adecuado de los fertilizantes, estiércol y otras medidas para incrementar la materia orgánica y el contenido de minerales del suelo. En ausencia de este tipo de medidas para gestionar el suelo, los rendimientos de maíz en los ferrálsoles en Huambo por lo general varían entre 100 y 400 kilogramos por hectárea.

· **FLUVISOLES ALUVIALES:** Se encuentran normalmente en posiciones topográficas que se inundan periódicamente por aguas superficiales o aumento de aguas subterráneas, como en los ríos de las llanuras aluviales y deltas y en las tierras bajas costeras. Estos se utilizan para el pastoreo en la estación seca y se definen por un débil o inexistente horizonte superficial (capa superior) y por materiales derivados de ríos, lagos, o sedimentos marinos. Estos suelos presentan una estratificación del perfil que refleja su deposición capas irregulares orgánicas y minerales en los que el contenido de carbono orgánico disminuye con la profundidad. Se observan grandes variaciones en su textura y composición mineral.

Los suelos aluviales que se encuentran a lo largo de los ríos son más productivos debido a su mayor contenido de materia orgánica y humedad. Por lo tanto, tienen una gran capacidad para retener el agua y los agricultores utilizan diversas técnicas de riego para controlar los niveles de agua durante la lluvia y la temporada seca. Sin embargo, algunos de los parches de suelos aluviales están mal drenados y por lo tanto, son demasiado húmedos para la agricultura. Los rendimientos de maíz en suelos aluviales puede llegar a los 1.000 kilogramos por hectárea, una cifra considerablemente más alta que en los ferralsoles.

Consultando la “Carta Geral dos Solos de Angola – Distrito do Huambo” (Misión de pedología de Angola, 1961), se verifica que los suelos del área del CEC fueron clasificados como “Suelos Ferrálicos Típicos Rojos”, derivados de rocas lávicas. La descripción general de estos suelos, corresponde sensiblemente a los suelos de la serie 320 (tabla 3) representados en el trabajo de la “Carta do solos del Centro de Estudos da Chianga” (Dias Nogueira, 1978) como “suelos rojos, de textura fina y profundos”.

Viendo el análisis de perfil típico de la serie 320 (perfil 53/62) podremos observar la composición de cada tipo de partícula según su tamaño (arena, limo, arcilla) distribuida según la profundidad del suelo. Haciendo una comparativa con la tabla de los suelos podemos generalizar que el suelo del CEC es arcilloso-arenoso que a efectos de cálculo del coeficiente de escorrentía lo catalogaremos como mayoritariamente **arcilloso**.

Amostra nº	Profundidade cm	> 2 mm %	< 2 mm				Relação limo/argila	Matéria orgânica %	Fe ₂ O ₃ livre %	Equivalente de humidade %	Percentagem a 15 atmosferas
			Arena grossa %	Arena fina %	Limo %	Argila %					
798	00- 08	0,63	23,0	20,4	22,8	33,2	0,68	4,71	-	28,03	20,68
799	06- 26	0,41	18,3	14,9	16,0	49,9	0,32	2,47	-	26,43	20,27
900	26- 48	0,36	14,6	15,4	15,7	53,7	0,29	1,66	-	27,22	21,68
801	50- 90	0,62	16,1	16,3	13,2	55,2	0,23	0,93	-	27,73	21,11
802	90-120	0,76	15,0	15,1	12,4	57,2	0,21	0,59	-	27,04	21,27
803	130-160	0,95	13,0	14,5	12,3	60,4	0,20	0,55	-	28,17	22,22

Tabla 3. Serie 320 perfils típicos

3. ANÁLISIS DE LA CUENCA

3.1 - DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

Para calcular los parámetros de la cuenca que nos permitirán realizar un estudio hidrológico y geomorfológico de la zona de estudio haremos uso de la herramienta ArcGIS y de sus componentes ArcCatalog (para gestionar los datos), ArcMap (utilización de herramientas y visualización y 2D) y ArcScene (visualización 3D). Este proceso se desarrollará de una forma estructurada siguiendo los siguientes pasos:

1) Adquisición de datos: El principal conjunto de datos con el cual vamos a trabajar es el modelo digital de elevaciones (DEM) obtenido a través del servidor Aster GDEM⁴ mediante el cual, partiendo de las coordenadas conocidas de CEC, podremos adquirir el archivo TIFF⁵ donde se refleje la información de la elevación del terreno con una extensión de unos 100 km² (fig. 8).

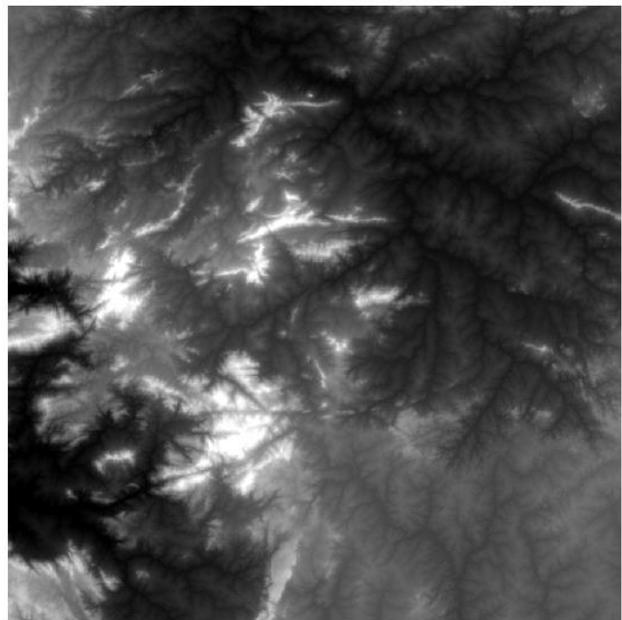


Figura 8. Aster GDEM 13°S;15°E

⁴ <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/index.jsp> : Plataforma creada por la NASA de distribución gratuita de MDT del 99% de la superficie terrestre a partir de pares estereoscópicos ASTER con una resolución espacial de 30 m

⁵ Tagged Image File Format: Formato de archivo informático para imágenes

Otra referencia necesaria para calcular la cuenca será una imagen de satélite donde se refleje con el mayor detalle posible la zona del CEC. Esta se puede obtener directamente a través de Google Earth ya que son libres, están corregidas y a una resolución razonable para el estudio que se quiere realizar (resolución espacial de 10 m). A esta imagen hay que añadirle cuatro marcas desde Google Earth en los extremos (SI, SD, II, ID) salvando sus coordenadas para realizar después la georreferenciación en ArcMap (fig. 9).

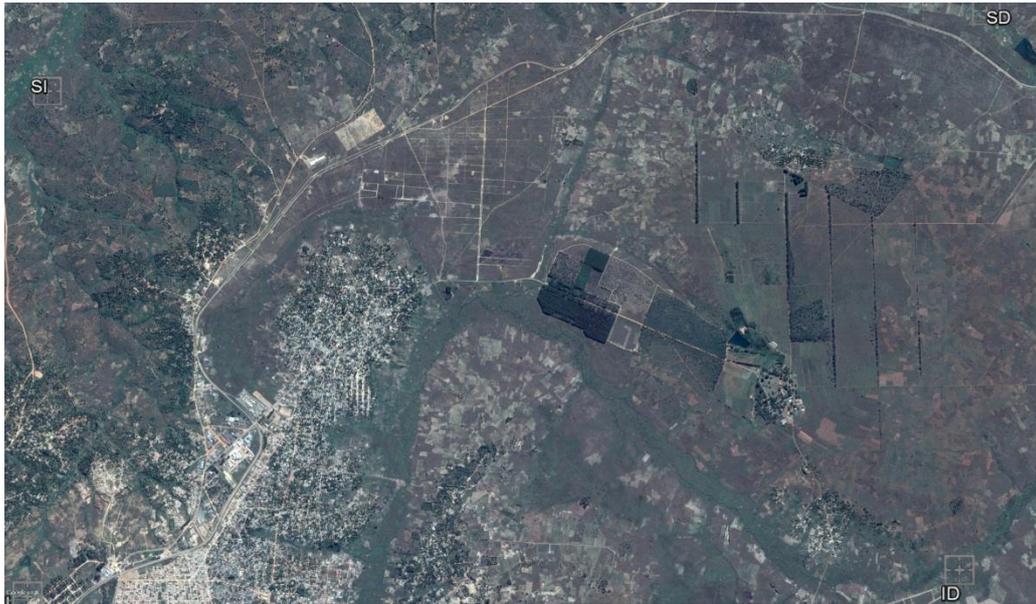


Figura 9. Imagen satélite CNES / Astrium 23/04/2013

2) Reproyección del DEM y eliminación de imperfecciones: Para poder trabajar con unidades métricas es necesario designarle una proyección al raster DEM. En este caso se harán dos reproyecciones⁶: una con la proyección WGS84 para cuando se trate de trabajar con grados decimales y otra UTM correspondiente a la zona 33 sur para trabajar con metros. Una vez definida la proyección usaremos la herramienta Fill⁷, que permite rellenar vacíos en la superficie del raster para quitar imperfecciones en la información del DEM.

3) Dirección de la red hídrica: Por medio de la herramienta Flow Direction⁸, crea un raster con la dirección de flujo de cada una de sus celdas hasta su vecina con la pendiente descendente más pronunciada, aquí seleccionamos el raster generado anteriormente con la herramienta Fill. La salida de la herramienta Dirección del flujo es un raster entero cuyos valores varían de 1 a 255, donde dirección de centro se guiarán según la figura 10b

⁶  Data Management Tools > Projections and Transformations > Raster > Project Raster

⁷  Spatial Analyst Tools > Hydrology > Fill

⁸  Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Direction

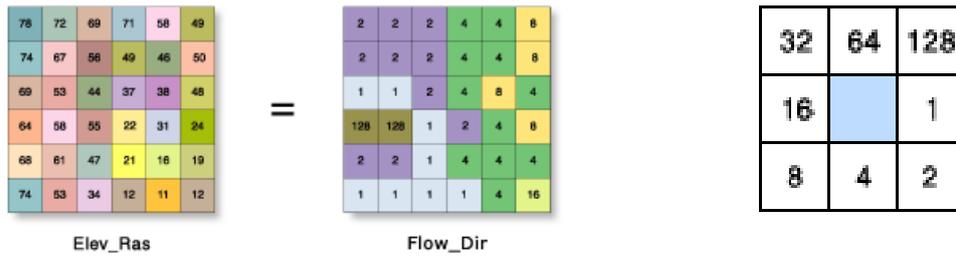


Figura 10. a) Proceso dirección de flujo, b) Dirección de centro

4) Acumulación de flujo: Con la herramienta Flow Accumulation⁹ (fig. 11), se crea un ráster del flujo acumulado para cada una de sus celdas, determinado por la acumulación del peso de todas las celdas que fluyen hacia cada celda de pendiente descendente. La entrada de esta herramienta es el archivo ráster generado con la herramienta Flow Direction, y El resultado de Acumulación de flujo es un ráster de flujo acumulado para cada celda, determinado por la acumulación del peso de todas las celdas que fluyen hacia cada celda de pendiente descendente.

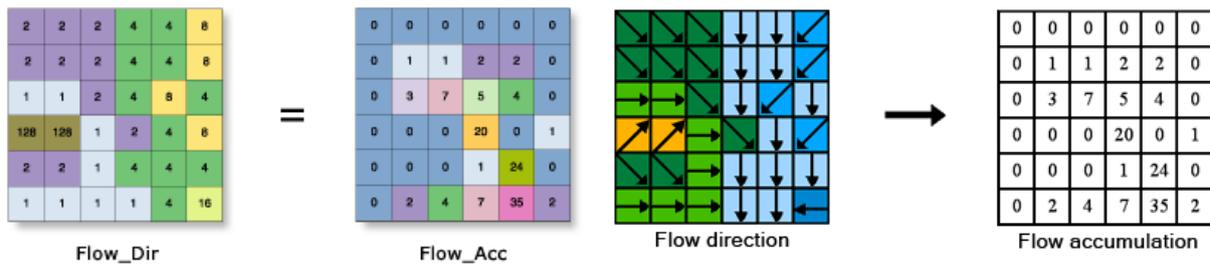


Figura 12. Proceso acumulación de flujo

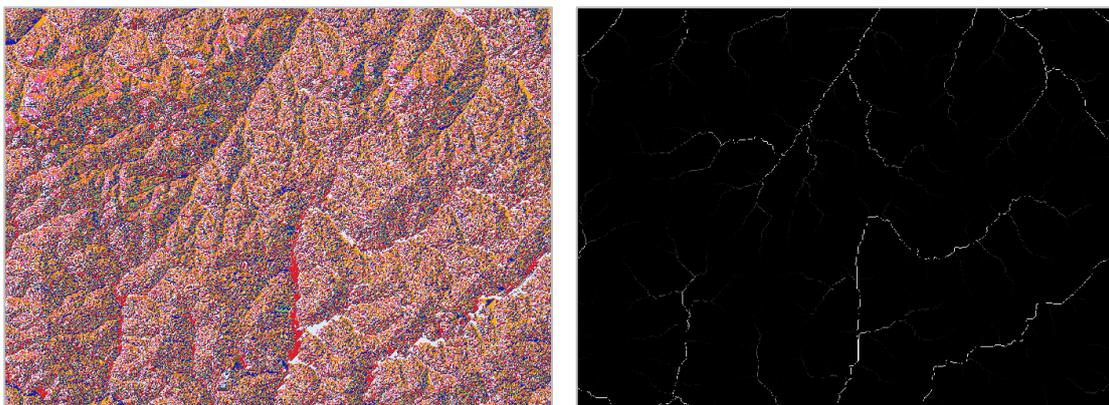


Figura 11. Imagen raster dirección de flujo (izq) y acumulación de flujo (dcha)

⁹  Spatial Analyst Tools > Hydrology > Flow Accumulation

5) Red hídrica: Ahora vamos a construir automáticamente la red hídrica por medio de un condicional (esto depende del tamaño del ráster) en “Input true raster or constant value” colocar la unidad 1 (fig. 13), señalar directorio de salida, ahora es muy importante en “Expression” usar la expresión “value > 400”, este valor depende del tamaño del pixel y del ráster, (mientras más grande sea la microcuenca se debe usar un valor mayor), como la cuenca debe ser menor de 1000 ha será suficiente con 400. Esto se puede llevar a cabo con la herramienta Con¹⁰ (Conditional), el cual permite clasificar las celdas con acumulación de flujo superior a un umbral especificado por el usuario, por ejemplo al ingresar un valor bajo como resultado mostrará afluentes pequeños de la red de drenaje, pero mientras más alto sea el valor se obtendrá la red de drenaje de mayor tamaño.

Como siguiente paso generar un vector entre el resultado de los rásters de la acumulación de flujo y el condicional con ayuda de la herramienta Stream to Feature¹¹ (fig. 13).

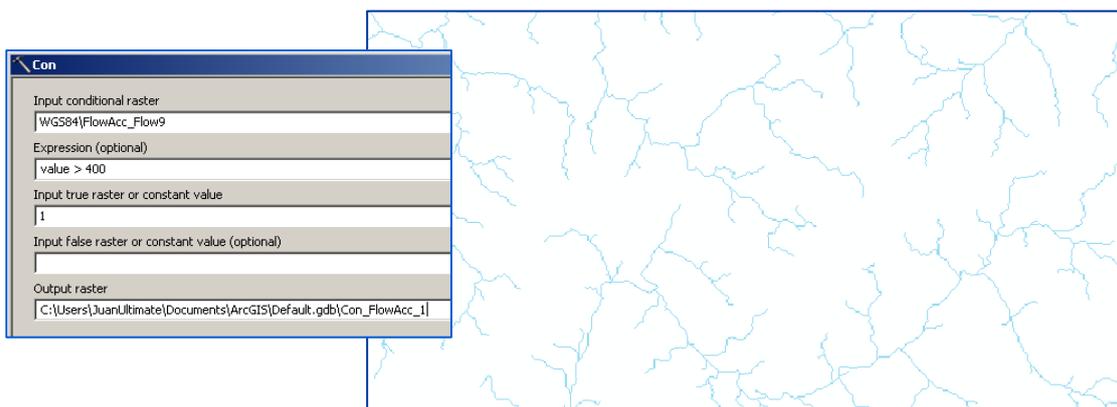


Figura 13. Imagen vectorial acumulación de flujo

6) Delimitación de la cuenca: Para poder delimitar la cuenca debemos crear primero un punto de desagüe que será el punto final donde drenen las aguas contenidas en la cuenca. Esto se puede hacer creando un shapefile tipo punto e interpolando posteriormente con el DEM para obtener las coordenadas en tres dimensiones¹². Con la herramienta Watershed¹³ obtendremos la delimitación de la cuenca en formato raster indicando como archivo de entrada la dirección de flujo, y como punto de desagüe el calculado anteriormente. Para convertirlo en formato vectorial se utiliza la herramienta

¹⁰  Spatial Analyst > Conditional > Con

¹¹  Spatial Analyst > Hydrology > Stream to Feature

¹²  3D Analyst Tools > Functional Surface > Interpolate Shape

¹³  Spatial Analyst Tools > Hydrology > Watershed

de conversión Raster to Polygon¹⁴ (en el caso de que no se haya trabajado con el DEM en la proyección UTM, habría que re proyectar este último para obtener las unidades métricas).

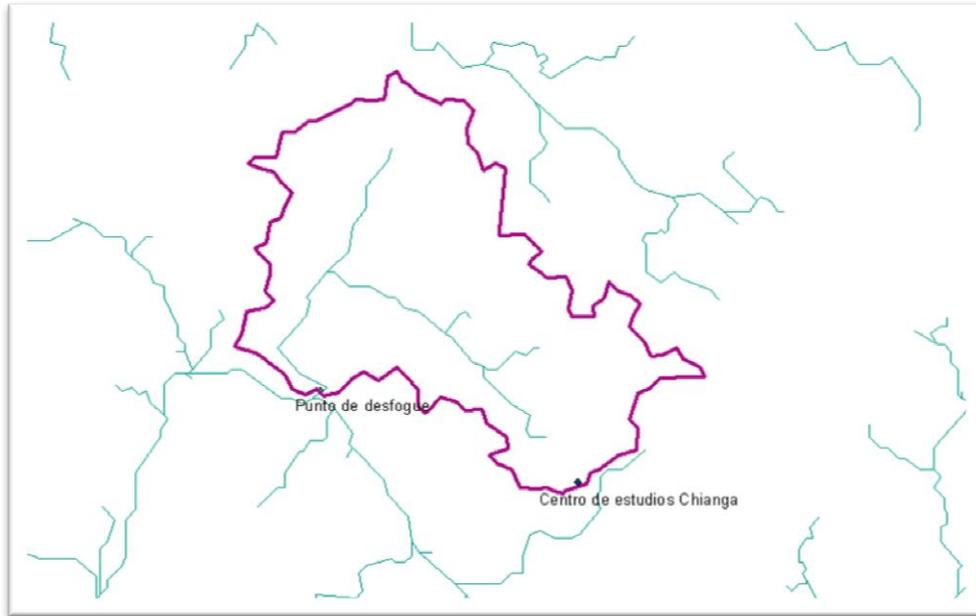


Figura 14. Delimitación de la cuenca

¹⁴  Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon

3.2 - GEORREFERENCIACIÓN

Mediante la georreferenciación podremos representar cualquier objeto espacial (formato raster) en un sistema de coordenadas y un datum determinado, es por ello que se convierte en un aspecto central para los modelados de datos realizados por los SIG. Cuando se realiza una georreferenciación de datos ráster, ArcGIS define su ubicación mediante coordenadas de mapa y asigna el sistema de coordenadas del marco de datos. La georreferenciación de datos ráster permite visualizarlos, consultarlos y analizarlos con otros datos geográficos. A través de la barra de herramientas de Georreferenciación de ArcGIS es posible georreferenciar datasets ráster, capas ráster (que pueden tener funciones ráster e imágenes procedentes de servidores).



Figura 15. Herramienta Georreferenciación ArcGis

La imagen obtenida en Google Earth (fig. 9) será la que posicionaremos con la proyección que se haya definido para trabajar el estudio de la cuenca (UTM 33S). Como tienen diferente proyección, habrá que realizar el geoprocesamiento en WGS84 y después reproyectarlo para definir la imagen en coordenadas UTM 33S. Es necesario saber las coordenadas de las cuatro marcas definidas en la captura de la imagen, estas son:

- SI = 12°42'30.08" S 15°45'54.40" E = (-12.708; 15.765)
- SD = 12°42'32.33" S 15°51'16.94" E = (-12.709; 15.855)
- II = 12°45'15.18" S 15°45'40" E = (-12.754; 15.761)
- ID = 12°45'34.45 S 15°50'42.30" E = (-12.759; 15.845)

Para referenciar la imagen simplemente iremos añadiendo las coordenadas a cada punto de control con la herramienta de Georreferenciación haciendo zoom a cada marca para incrementar la precisión. El resultado será una imagen corregida de su posición original hacia la proyección en la que estemos trabajando (WGS84) y transformando dicha proyección a la UTM33S obtendremos la imagen en formato métrico UTM (fig. 17):



Figura 16. Detalle punto de control

Haciendo uso de la misma herramienta podremos superponer el mapa de vegetación (fig. 18) pero esta vez, en lugar de utilizar coordenadas conocidas se utilizarán elementos representativos que sean identificables en ambas imágenes (cruce de carreteras, edificio conocido, confluencia de arroyos, etc.). Es importante seguir un orden en sentido dextrógiro para tratar de evitar posibles errores en la georreferenciación de la imagen.

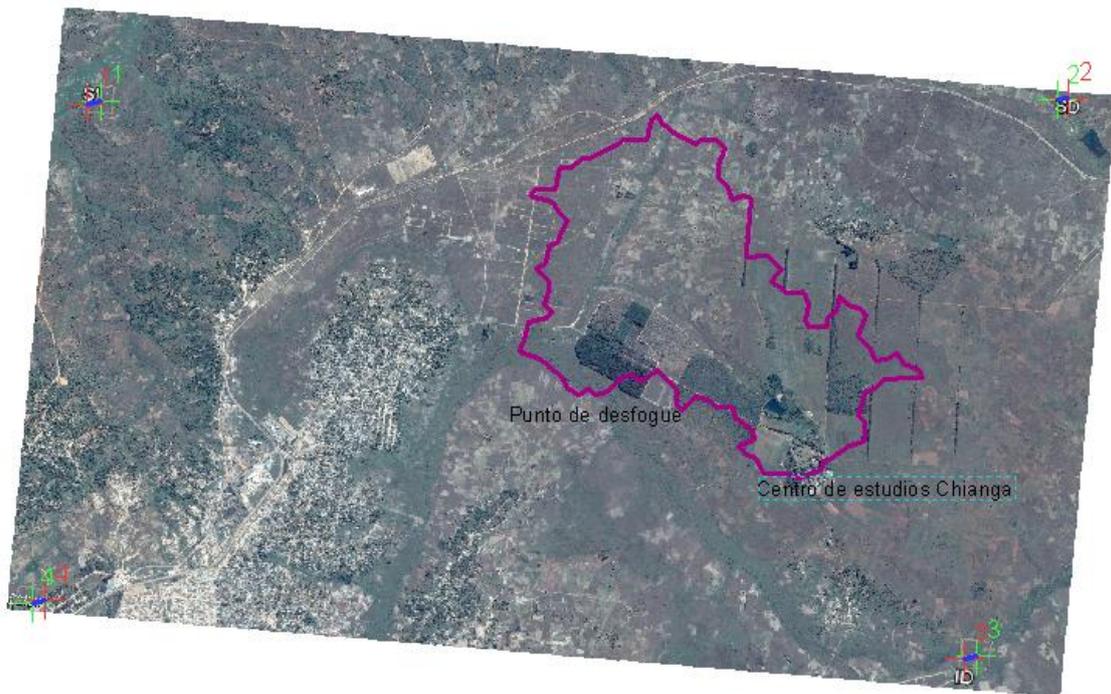


Figura 17. Imagen georreferenciada con cuenca delimitada

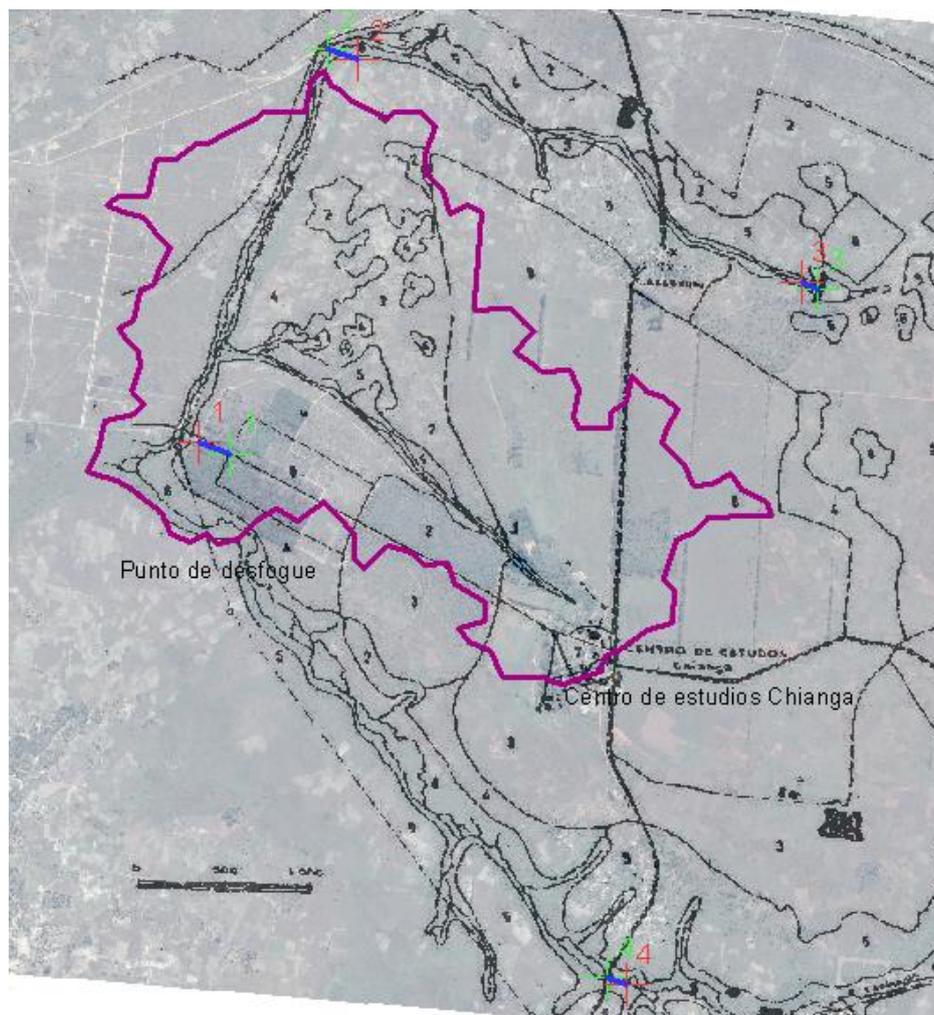


Figura 18. Imagen usos del suelo georreferenciada

3.3 - CLASIFICACIÓN DE LA VEGETACIÓN

ArcMAP posee varias herramientas¹⁵ que permiten obtener clasificaciones automáticas (supervisadas y no supervisadas) de una zona determinada pero necesitaríamos una imagen satélite de mayor resolución espacial para poder determinar una clasificación certera. Otra opción para conseguir una eficaz clasificación podría ser recurrir a software especializados en teledetección como es ENVI y realizar la clasificación a través de imágenes multiespectrales. A la vista de la dificultad para obtener imágenes multiespectrales de buena calidad y los pobres resultados obtenidos con una clasificación automática con ArcGIS, es conveniente optar por realizar una clasificación manual ya que se trata de una extensión relativamente pequeña con pocas clasificaciones a determinar.

Es de gran utilidad el hecho de poseer un análisis cartográfico previo sobre la vegetación de la zona. Con ello, si lo georreferenciamos correctamente podremos obtener una clasificación de los usos del suelo editando clases manualmente, diferenciando cuatro clases dentro de la cuenca (cultivos, vegetación en río, sabana y suelo urbano [CEC]) representadas en la figura 19. Para ello debemos crear una nueva entidad de tipo polígono para cada clase e ir delimitando los límites para completar su área (con la ayuda del geoprocesamiento CLIP fijaremos el límite de cada clase con el perímetro de la cuenca)

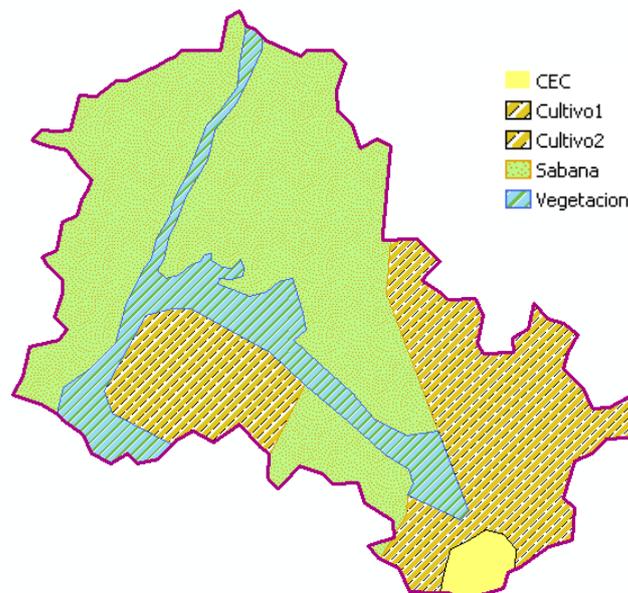


Figura 19. Capa clasificación usos del suelo

¹⁵  Spatial Analyst tool > Multivariate

3.4 - PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA

Una cuenca está formada por un entramado de ríos, arroyos y/o barrancos de mayor o menor entidad que conducen los flujos de agua hacia un cauce principal, que es el que normalmente da su nombre a la cuenca; su perímetro es una línea curvada y ondulada que recorre la divisoria de aguas entre las cuencas adyacentes. El agua que se mueve por toda la superficie o el subsuelo de una cuenca hidrográfica hasta llegar a formar la red de canales constituye el sistema fluvial o red de drenaje de la cuenca.

Puesto que existe una estrecha relación entre el caudal del río y diversos factores morfológicos como son la anchura y la profundidad de los canales de drenaje, la pendiente, el tamaño o la forma de la cuenca, es fundamental llevar a cabo una correcta caracterización de las cuencas hidrográficas si queremos optimizar la planificación y manejo de los recursos naturales.

Para poder llevar a cabo este estudio necesitaremos hacer un análisis de las características morfométricas más representativas de la cuenca, las cuales podremos obtener directamente con herramientas de ArcGIS o apoyándonos de una hoja de cálculo para realizar cálculos externos.

Las propiedades superficiales serán: el área, perímetro, cota máxima y mínima, curva hipsométrica, frecuencia de altitudes, altitud media y pendiente promedio; y de carácter hídrico serán la longitud del curso principal, el orden de la red hídrica, sumatorio de las longitudes de cada orden de la red hídrica, longitud total de la red hídrica, y pendiente promedio. A partir de estos datos podremos obtener otros como el tiempo de concentración para estimar la escorrentía de la cuenca, pendiente del cauce principal, etc.

Necesitaremos 4 archivos base delimitados por la región de la cuenca para desarrollar estos parámetros, los cuales serán: DEM, TIN, Dirección de Flujo y Acumulación de flujo.

- **DEM cuenca:** Aplicamos una extracción por máscara del DEM original¹⁶ reproyectado a través del archivo vectorial de la cuenca. Esta misma herramienta la utilizaremos para obtener la Dirección de Flujo y la Acumulación de Flujo.

¹⁶  *Spatial Analysis > Extraction > Extraction by Mask.*

- **TIN cuenca:** A partir del archivo generado anteriormente creamos un modelo TIN¹⁷ (Red Irregular de Triángulos):

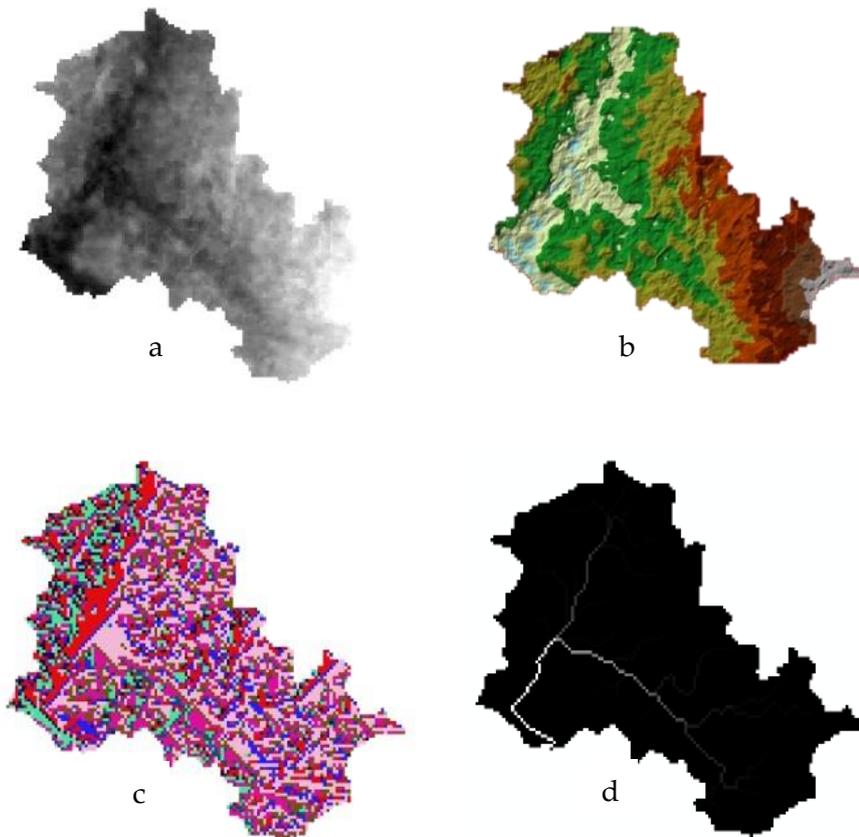


Figura 20. Recorte cuenca: DEM (a), TIN (b), Dirección de flujo (c), Acumulación de flujo (d)

3.4.1 - Parámetros generales de carácter superficial

· Área y perímetro: El área de la cuenca está definida por el espacio delimitado por la curva del perímetro (P). Se puede obtener directamente desde la tabla de atributos del shapefile de la cuenca. Ahí añadiremos un nuevo campo llamado área y calcularemos su geometría de tipo doble y como unidades las Hectáreas: El resultado es 681.8938 Ha. Del mismo modo se creará un nuevo campo para calcular el perímetro obteniendo un resultado de 15437.57 metros.

· Cotas: Observando el valor del DEM extraído en la cuenca comprobamos el rango de los valores máximo y mínimo, siendo $Z_{max} = 1751$ m y $Z_{min} = 1610$ m lo cual corresponde a un desnivel de 141 metros entre el punto más elevado de la cuenca y el punto de desfogue.

¹⁷  3D Spatial Analysis > Conversion > From Raster > Raster to TIN

· Centroides: Otro modo de obtener las cotas máximas y mínimas de la cuenca es creando una nueva entidad polígono a partir de la herramienta Raster Domain¹⁸ indicando el DEM de la cuenca como archivo raster de entrada.

Luego en la tabla de atributos, de igual modo que se hizo para calcular el área, podremos obtener nuevas propiedades superficiales teniendo en cuenta los valores de elevación (perímetro 3D, Zmax, Zmin, y los centroides de X, Y, y Z):

- Perímetro 3D: 18735.57 m
- Centroide X: 589194.82 m
- Centroide Y: 8592883.4 m
- Centroide Z: 1676.86 m

· Altitudes: Seguidamente se calcularán las alturas más características (altura media, altura más frecuente y altura de frecuencia media). Para ello se requiere conocer las diferentes áreas entre curvas de nivel las cuales se puede obtener reclasificando¹⁹ el DEM raster de la cuenca con intervalos iguales. La altura media, H, es la elevación promedia referida al nivel de la estación de aforo de la boca de la cuenca.

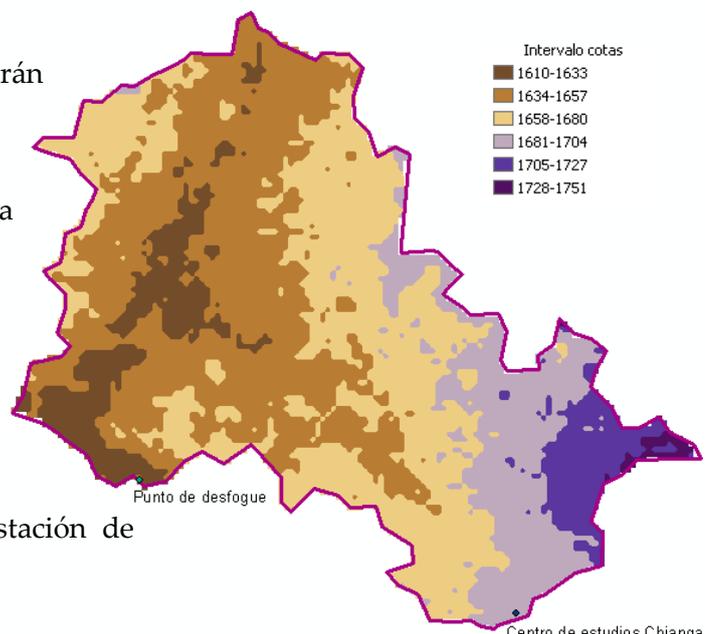


Figura 21. Intervalo de cotas

La variación altitudinal de una cuenca hidrográfica incide directamente sobre su distribución térmica y por lo tanto en la existencia de microclimas y hábitats muy característicos de acuerdo a las condiciones locales reinantes. Constituye un criterio de la variación territorial la escorrentía resultante de una región, la cual, da una base para caracterizar zonas climatológicas y ecológicas de ella.

Una vez obtenidas las diferentes secciones de curvas de nivel podremos calcular sus respectivas áreas con la herramienta Zonal Statics as Table²⁰ (tabla 4). Esto nos permitirá diseñar una tabla que relacione los valores obtenidos de las alturas con los

¹⁸  3D Analyst tools > Conversion > From Raster > Raster Domain

¹⁹  Spatial Analyst tool > Reclass > Reclassify

²⁰  Spatial Analyst Tool > Zonal > Zonal Statistics as table

valores de las áreas (área acumulada, porcentaje de área acumulada, Porcentaje de área entre curvas²¹)[tabla 5]:

OBJECTID *	VALUE	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM	VARIETY	MAJORITY	MINORITY	MEDIAN
1	1	634	591125,8	1610	1633	23	1627,607	4,127542	1031903	21	1632	1611	1628
2	2	2692	2509954	1634	1657	23	1647,404	6,549057	4434812	24	1656	1635	1648
3	3	2516	2345856	1658	1680	22	1667,094	6,493664	4194408	23	1659	1675	1666
4	4	1080	1006965	1681	1704	23	1691,122	6,496143	1826412	24	1681	1704	1691
5	5	384	358032	1705	1727	22	1714,284	6,727211	658285	23	1708	1713	1713
6	6	46	42889,25	1728	1751	23	1731,87	4,846685	79666	11	1730	1750	1730

Tabla 4. Cruce estadístico área & altitudes

Nº	Cota			Area (Ha)			
	Minima	Máximo	Promedio	Area entre curvas	acumulado	% acumulado	% Area entre curvas
1	1610	1633	1627,607	59,11258	685,482205	100	8,62
2	1634	1657	1647,404	250,9954	626,369625	91,37	36,61
3	1658	1680	1667,094	234,5856	375,374225	54,76	34,22
4	1681	1704	1691,122	100,6965	140,788625	20,53	14,68
5	1705	1727	1714,284	35,8032	40,092125	5,84	5,22
6	1728	1751	1731,87	4,288925	4,288925	0,62	0,62

Tabla 5. Cuadro relación altitudes & Areas

La altitud más frecuente corresponderá con la cota promedio correspondiente con el mayor valor de “% Área entre curvas” y la altitud de frecuencia media se puede obtener como un pronóstico del 50% entre los valores de la columna “promedio” y los valores de la columna “% Área entre curvas”. Con estos valores se puede dibujar un gráfico previo para indicar la proporción de superficie con relación a la altitud, denominado curva hipsométrica (fig. 22):

- Altitud media = 1676.8631
- Altitud más frecuente = 1647.404
- Altitud frecuencia media = 1675.86

²¹ $Area\ entre\ curvas = [Area\ entre\ curvas * (\% \text{ acumulado})] / \text{acumulado}$

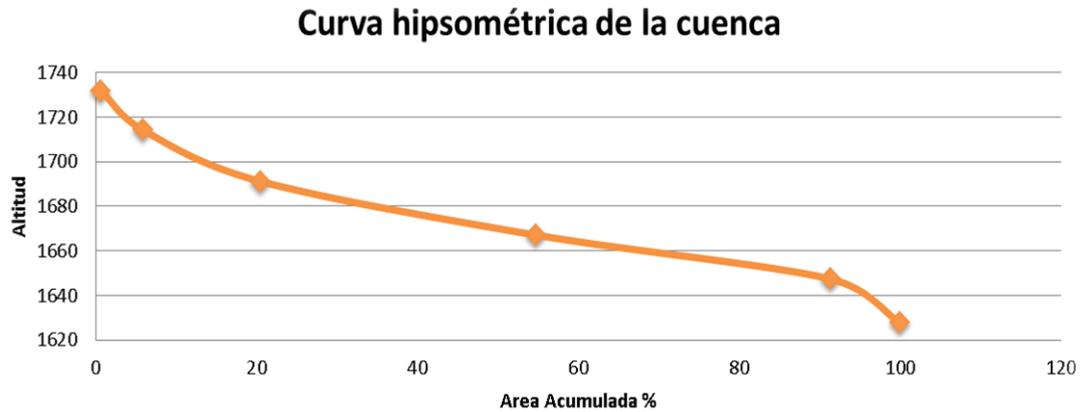


Figura 22. Curva hipsométrica de la cuenca

· Mapa de pendientes: Otra posibilidad que nos permite ArcMap es la de obtener automáticamente un mapa de pendientes a través del DEM raster de la cuenca utilizando la herramienta Slope²²: Seguidamente podremos hacer una reclasificación según los intervalos de pendientes que nos interese, en este caso los dividiremos en intervalos de porcentaje de 10 en 10 (fig. 23).

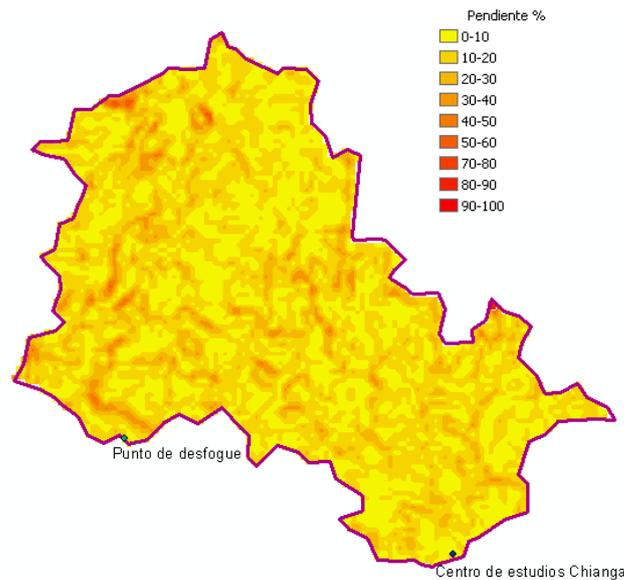


Figura 23. Mapa de pendientes

Realizando una consulta de las estadísticas de este último archivo junto con el DEM de la cuenca (tabla 6) obtendremos el número de repeticiones de cada intervalo que nos servirá para completar la Tabla 7 y así obtener la pendiente media. La pendiente promedio se obtendrá mediante una media ponderada:

²²  Spatial Analyst tool > Surface > Slope.

OBJECTID *	VALUE	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM	VARIETY	MAJORITY	MINORITY	MEDIAN
1	1	2904	2707617	1	11	10	5,07197	1,97557	14729	11	5	1	5
2	2	3147	2934184	1	11	10	5,009533	2,001724	15765	11	4	11	5
3	3	1005	937036,9	1	10	9	4,797015	1,922009	4821	10	4	10	5
4	4	244	227499,5	1	9	8	4,450819	1,642681	1086	9	4	1	4
5	5	37	34497,88	2	8	6	4,108108	1,520736	152	7	3	2	4
6	6	11	10256,13	3	8	5	5,181818	1,465865	57	6	5	4	5
7	8	1	932,375	12	12	0	12	0	12	1	12	12	12
8	9	1	932,375	9	9	0	9	0	9	1	9	9	9
9	10	2	1864,75	8	12	4	10	2	20	2	8	8	8

Tabla 6. Cruce estadístico DEM & Pendientes

PENDIENTE NÚMERO	RANGO DE PENDIENTES			NUMERO DE OCURRENCIAS
	INFERIOR	SUPERIOR	PROMEDIO(1)	
1	0	10	5	2904
2	10	20	15	3147
3	20	30	25	1005
4	30	40	35	244
5	40	50	45	37
6	50	60	55	11
7	60	70	65	0
8	70	80	75	1
9	80	90	85	1
10	90	10	95	2

Tabla 7. Cuadro pendientes

$$\text{Pendiente promedio} = \frac{\sum(\text{Num Ocurrencias} * \text{promedio})}{\sum \text{Num Ocurrencias}} = 13.331 \%$$

3.4.2 - Parámetros de la red hídrica:

La morfología de los canales fluviales naturales depende de la interacción entre el flujo y los materiales erosionables en el límite del canal. Por su parte, el flujo de agua está sometido a dos fuerzas principales: la gravedad y la pendiente del canal, mientras que la fricción se opone al movimiento del agua. En atención a ello, el movimiento del agua se puede producir el régimen laminar o en régimen turbulento:

- En el régimen laminar, el agua fluye a velocidades muy pequeñas, de forma que en el contacto con el lecho la velocidad del agua es prácticamente nula y las capas superiores se deslizan entre sí.
- En el régimen turbulento, el agua fluye a velocidades mayores, de forma que se originan numerosos movimientos caóticos, con remolinos secundarios que se superponen al flujo normal, por lo que la capacidad erosiva del flujo es mayor.

· Longitud del curso principal: La longitud L de la cuenca viene definida por la longitud de su cauce principal, siendo la distancia equivalente que recorre el río entre el punto de desagüe aguas abajo y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba.

Al igual que la superficie, este parámetro influye enormemente en la generación de escorrentía y por ello es determinante para el cálculo de la mayoría de los índices morfométricos. Directamente con la herramienta Flow Length²³ introducimos como dato de partida la Dirección de Flujo ráster (importante que esta esté definida en la proyección UTM para poder ver el resultado en metros) y como dirección de medida DOWNSTREAM que calcula la longitud de flujo aguas abajo que consiste en la distancia que una gota de agua viajaría para alcanzar el punto de cierre de la cuenca.

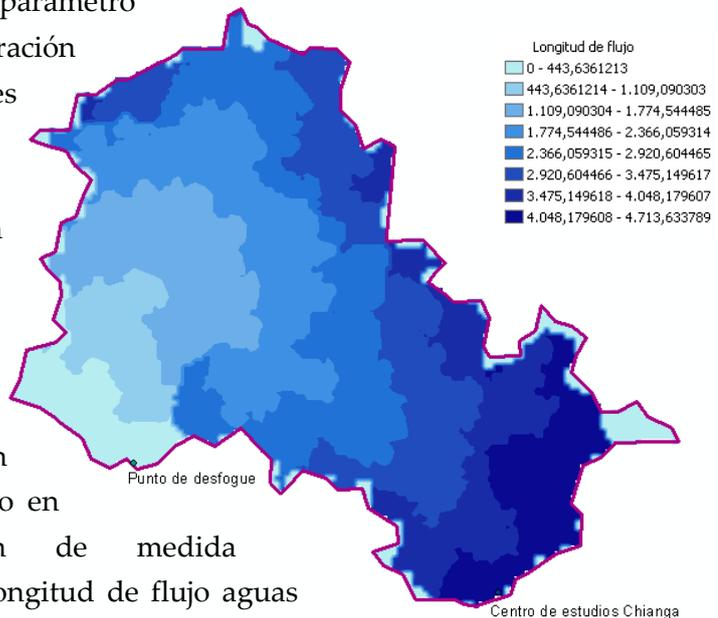


Figura 24. Longitud de flujo

Como resultado obtenemos distancias desde los puntos más alejados hasta la salida de la cuenca. En este caso la distancia más larga es de 4713 m, que sería la longitud del cauce principal de la cuenca.

· Orden de la red hídrica: haciendo uso de la calculadora raster calcularemos el log10 de la acumulación de flujo, y a ese mismo archivo hay que darle una condicional mayor o igual a 2 cuyo resultado será un archivo raster de toda la red hídrica. Ahora bien, para diferenciar el orden de la red hay que utilizar la herramienta Stream Order introduciendo como raster de entrada el calculado anteriormente y la dirección de flujo de la cuenca. El archivo resultante mostrará en diferentes colores cada nivel del orden de la red. Para ordenarlo de una manera adecuada hay que convertirlo en formato shapefile (cambiando las propiedades se pueden obtener los atributos que indican el orden de cada una de las redes) (fig. 26).

Estos pasos se pueden implementar de manera esquemática utilizando la herramienta modelbuilder de ArcGIS²⁴ (fig. 25):

²³  Spatial Analyst Tool > Hidrology > Flow Length

²⁴ Geoprocessing > ModelBuilder

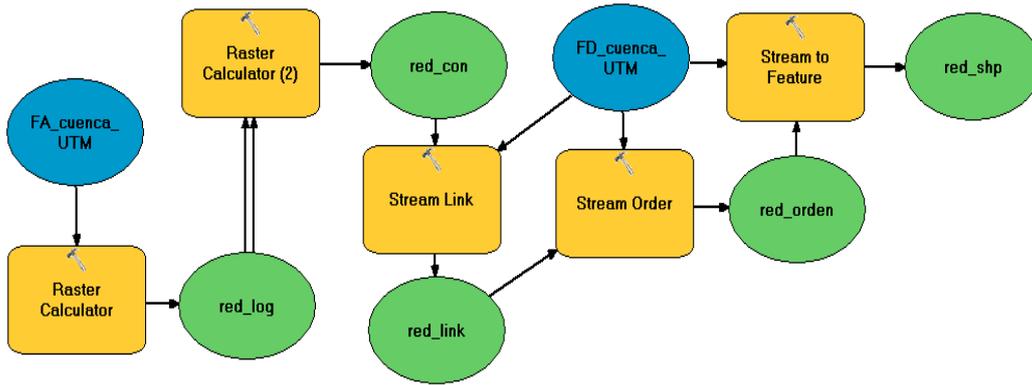


Figura 25. Modelbuidier para calcular la orden de la red hidrica

· Densidad de drenaje: Se calcula dividiendo la longitud total de las corrientes de la cuenca por el área total que las contiene:

Dónde: $D_d = L/A = 2,475$

L: Σ longitud de las corrientes efímeras, intermitentes y continuas de la cuenca en km.

A: superficie de la cuenca en km²

Este índice permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. En general, una mayor densidad de escurrimientos indica mayor estructuración de la red fluvial, o bien que existe mayor potencial de erosión. La densidad de drenaje varía inversamente con la extensión de la cuenca.

· Longitud de cada orden: En la tabla de atributos del último shapefile creado (red_order) añadimos un nuevo campo llamado longitud, en el cual calcularemos su geometría de propiedad Length. Basta con hacerle una consulta al campo de grid_code del tipo sumatorio para que nos calcule la longitud total de cada orden de la red hídrica, que haciendo un sumatorio nos dara como resultado la longitud total de la red (tabla 8).

Orden de la red	Longitud (m)
1	10589,86
2	2432,7
3	2904,78
4	949,12
TOTAL	16876,46

Tabla 8. Longitud de la orden

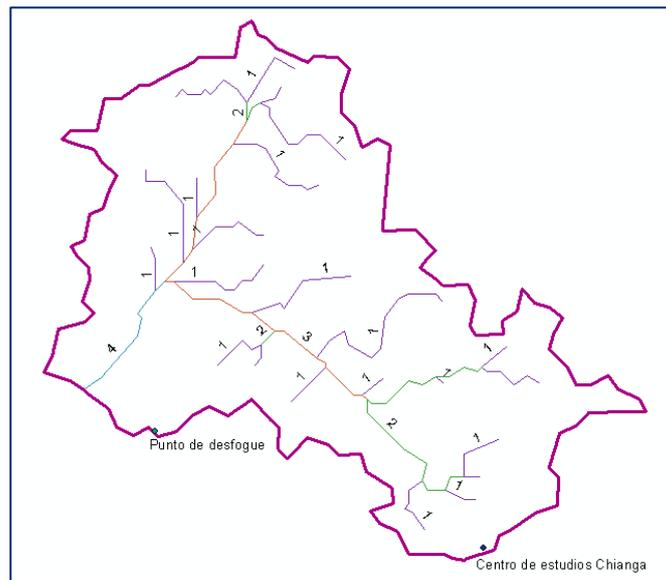


Figura 26. Orden de la red hídrica

· Pendiente promedio de la red hídrica: Se calcula como media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales de la cuenca en las que la línea de máxima pendiente se mantiene constante; es un índice de la velocidad media de la escorrentía y, por lo tanto, de su poder de arrastre o poder erosivo.

$$J = 100 \frac{\sum Li * E}{A}$$

J= pendiente media de la cuenca

Li= Longitud de cada tramo de la red hídrica en las curvas de nivel (km)

E= Equidistancia de las curvas de nivel (km)

A= superficie de la cuenca (km2)

Para este último paso será necesario interpolar el mapa de pendientes con la red_shp mediante la herramienta Interpolate Shape²⁵ y posteriormente hacer un cálculo estadístico con “Zonal Statistics as table” (tabla 9) combinando el archivo este último creado con el mapa de pendientes. El campo que nos interesa de este cálculo es el de MEAN donde se refleja el promedio de las pendientes de cada orden.

pendiente_red_statistics														
OBJECTID *	GRID CODE	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM	VARIETY	MAJORITY	MINORITY	MEDIAN	
1	1	437	407447,9	1	4	3	1,624714	0,690659	710	4	1	4	2	
2	2	97	90440,38	1	3	2	1,597938	0,58609	155	3	2	3	2	
3	3	117	109087,9	1	4	3	1,820513	0,801872	213	4	1	4	2	
4	4	42	39159,75	1	5	4	2,238095	1,34181	94	5	1	5	2	

Tabla 9. Cruce estadístico pendiente & orden de la red

²⁵  3D Analyst tool > Functional surface > Interpolate shape

Orden de la red	Número de veces (1)	Pendiente promedio (2)	(1)*(2)
1	437	1,6247	709,9939
2	97	1,5979	154,9963
3	117	1,82051	212,99967
4	42	2,238	93,996
Total	693		1171,98587
Pendiente promedio RH		1,6911	

Tabla 10. Pendiente promedio de la red hídrica

3.4.3 - Resumen de parámetros morfométricos

A continuación se agrupa a modo de resumen todos los parámetros morfométricos de la cuenca en la siguiente tabla:

Descripción	Valor	Unidades
Superficiales		
Área	681,8938	Ha
Perímetro	15437,57	m
Cota máxima	1751	msnm
Cota mínima	1610	msnm
Centroide X	589194,8219	m
Centroide Y	8592883,444	m
Centroide Z	1676,8631	msnm
Altitud Media	1676,86	msnm
Altitud más frecuente	1647,404	msnm
Altitud de frecuencia media	1675,86827	msnm
Pendiente promedio de la cuenca	13,3310664	%
De la red Hídrica		
Longitud del curso principal	4713	m
Densidad de drenaje	2,475	
Orden de la Red Hídrica	4	
Longitud de la red Hídrica	16876,46	m
Pendiente Promedio de la red Hídrica	1,6911	%

Tabla 11. Resumen parámetros morfométricos.

4. ESTUDIO HIDROLÓGICO

4.1 - TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

El tiempo de concentración es una de las variables más importantes a determinar en la planificación de usos del suelo y en la conservación de suelos y aguas o gestión de recursos.

Este se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de desagüe.

Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al tiempo que máximo; el punto hidrológicamente más alejado es aquél desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida.

Para una lluvia de intensidad constante el caudal en la salida irá aumentando a medida que vaya llegando el agua de escorrentía procedente de puntos hidrológicamente cada vez más alejado, manteniéndose constante a partir del momento en el que el punto más alejado ya esté aportando agua a la salida. El tiempo de concentración es un parámetro característico de cada cuenca y depende de los siguientes factores:

- Del tamaño de la cuenca: a mayor tamaño mayor t_c .
- De la topografía: a mayor accidentalidad o pendiente, menor t_c .
- La forma: a igualdad de otros factores, las cuencas alargadas presentan menores t_c que las cuencas apaisadas o redondeadas.

4.1.1 - Métodos de estima

La determinación del tiempo de concentración se puede realizar con ayuda de tablas o ecuaciones empíricas (Gisbert Blanquer et. al, 2011) , siendo las más utilizadas, en cuanto a tablas, las de Agres, la del USDA y la de Comack; en cuanto a las ecuaciones, destacan las de Bransby-Williams, Ventura-Heras, Giandotti, Kirpich, Passinni y la Dirección General de Carreteras (España). Como la cuenca estudiada tiene un área de menos de 1250 Ha podremos obtener el valor del tiempo de concentración como promedio de las ecuaciones de la USDA, Giandotti, Kirpich, Bransby-Williams y la de la DGC (eliminaremos las que presenten valores extremos y nos quedaremos con el promedio de las 3 últimas):

• **Ecuación USDA:**

$$T_c = 0.01947 * K^{0.77} = 6.836 \text{ min}$$

$$K = 3.3 * L * \sqrt{S}$$

$$L = \text{Longitud del cauce principal (m)} = 4713 \text{ m}$$

$$S = \text{Pendiente media del recorrido (m/m)} = 0.0169$$

• **Giandotti:**

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 * L}{25.3 * \sqrt{SL}} = 5.32 \text{ min}$$

$$A = \text{Área de la cuenca (Km}^2\text{)} = 6.8189 \text{ Km}^2$$

$$L = \text{Longitud del cauce principal (Km)} = 4.713 \text{ Km}$$

$$S = \text{Pendiente media del recorrido (m/m)} = 0.0169$$

• **Kirpich:**

$$T_c = 0.02 * L^{0.77} * S^{-0.385} = 64.824 \text{ min} = 1.08 \text{ horas}$$

$$L = \text{Longitud máxima a la salida (m)} = 4713 \text{ m}$$

$$S = \text{Pendiente media del lecho (m/m)} = 0.0169$$

• **Bransby-Williams:**

$$Tc = \frac{L}{1.5 * D} \sqrt[5]{\frac{M^2}{F}} = 1.131 \text{ horas}$$

L = distancia máxima a la salida (km) = 4.713 km

D = diámetro del círculo de área equivalente a la superficie de la cuenca (km²)

D = 2.946547 km

M = área de la cuenca (km²) = 6.818938

F = pendiente media del cauce principal (%) = 1.69

• **Dirección General de Carreteras (DGC):**

$$Tc = 0.3 \left(\frac{L}{J^{0.25}} \right)^{0.76} = 1.89 \text{ horas}$$

J= pendiente media del cauce principal (H/L) = 0.0169 m/m

H= diferencia de nivel entre el punto de desagüe y el punto hidrológicamente más alejado (m) = 141 m

L= longitud del cauce principal (km) = 4.713 Km

Promedio [DGC, Bransby-Williams, Kirpich] = 1.367 horas = 82.028 min

4.2 - ESTIMACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS

Cuando se produce una precipitación en una zona, pocas veces es exactamente igual a la anterior lluvia precipitada días atrás. Aunque estemos en el mismo lugar y no hayan transcurrido muchos días desde entonces la duración de la lluvia es diferente, y su intensidad o agresividad también. La variabilidad de la lluvia es enorme, tanto espacial como temporalmente, pero el uso y gestión del terreno y de todo tipo de recurso (suelo, agua, biomasa, etc...), nos exige un conocimiento previo de la precipitación que podemos esperar en una zona.

El análisis de las series de precipitación de suficiente longitud nos permite disponer de información fiable relativa a tres preguntas fundamentales: ¿cuál es la intensidad de precipitación máxima que podemos esperar en una zona?, ¿cada cuánto tiempo es posible que se produzca un fenómeno de dicha intensidad?, y ¿existe la posibilidad de estimar intensidades máximas de tormentas de duración inferior a 24 horas?

Definir la lluvia característica de una zona es una tarea compleja. Datos como la precipitación media anual o la distribución estacional de las lluvias aportan información muy valiosa en muchos ámbitos que incluso es válida para clasificar climáticamente los territorios, pero que resulta claramente insuficiente cuando tratamos de dimensionar una cuenca de pequeño tamaño. En éstas situaciones en las que trabajamos con escorrentías lo que necesitamos saber es cómo va a responder el suelo frente a la lluvia y si va a ser superada o no su capacidad de infiltración, y esto no depende exclusivamente de la cantidad total de agua recibida sino más bien de en cuánto tiempo se recibe y cómo se recibe (tamaño de gota, velocidad de caída, etc...) (Ibañez Asension S. et al, 2011).

La relación entre lluvia caída y el tiempo que dura la precipitación es lo que conocemos como intensidad de la precipitación (I). La intensidad se mide en mm/h y su valor se deduce de las bandas de los pluviógrafos o de los registros de las estaciones meteorológicas automáticas. Es un dato muy importante en hidrología puesto que junto con la capacidad de infiltración del suelo determina la cantidad de escorrentía generada por un aguacero. Considerando despreciable las pérdidas de agua debidas a la evaporación y a la transpiración de las plantas, la expresión simplificada del ciclo del agua refleja esta relación:

$$E = P - I,$$

siendo E= escorrentía
P= Precipitación
I= Infiltración

4.2.1 - Relación intensidad-duración-frecuencia

En estas curvas, sobre el eje de las abscisas se representa la duración de la tormenta (expresada en minutos o en horas) y en el eje de las ordenadas la intensidad (expresada en mm/h). Son características de cada lugar en particular, pero en todas las regiones climáticas del mundo siguen la misma tendencia (fig. 27):

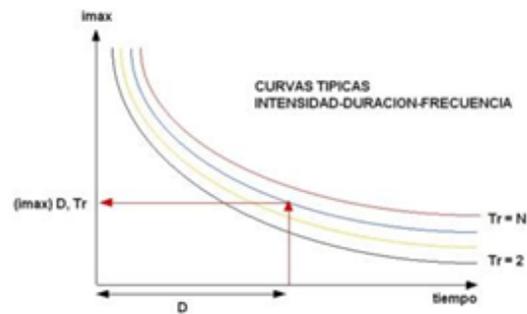


Figura 27. Modelo curva IDF

Las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF) son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Temez, 1978).

Junto con la definición de las curvas, surgen otros elementos a considerar como son la intensidad de precipitación, la frecuencia o la probabilidad de excedencia de un determinado evento. Por ello es de suma importancia tener claro el concepto de cada una de estas variables para tener una visión más clara de las curvas IDF.

En este sentido, se debe destacar que la intensidad se define como la tasa temporal de precipitación, o sea, la profundidad por unidad de tiempo (mm/h) y esta se expresa como:

$$I = P/Td \quad \text{donde } P = \text{Profundidad de lluvia (mm)}$$

$$Td = \text{Duración (hr)}$$

Es importante señalar que cuando sólo se dispone de un pluviómetro en una estación es evidente que en general solo se podrá conocer la intensidad media en 24 horas. Esta información puede inducir a errores por defecto ya que las lluvias de corta duración son en general las más intensas.

4.2.2 - Concepto de intensidad máxima esperada

Si lo que queremos es estar seguros de que la obra que la cuenca “cumpla correctamente su cometido” deberemos tomar aquella intensidad que genere mayor escorrentía. Es decir, que de todas las posibles tormentas nos deberemos fijar únicamente en las más extremas, en las más torrenciales, que son las que aportan lluvias de intensidad máxima. Las curvas Intensidad-Duración se elaboran por tanto a partir de los datos de precipitaciones extremas, por lo que la intensidad correspondiente a una duración de tormenta determinada siempre es máxima.

Ahora bien, aunque la obra de ingeniería funcione correctamente durante algunos años es previsible que no siempre sea así, y no podemos estar seguros de que no se producirá una precipitación que rebase nuestros cálculos puesto que realmente no todos los años llueve de la misma manera y es posible que de vez en cuando ocurra una precipitación “anormalmente” elevada comparativamente con lo que consideremos como “normal” en un año cualquiera. Se introduce así el concepto de frecuencia o periodo de retorno (T).

4.2.3 - Concepto de periodo de retorno (T)

El concepto de periodo de retorno (T) responde a la idea de que la probabilidad de que se produzca una lluvia de determinadas características (en intensidad y duración) siempre va asociada a un intervalo de tiempo concreto (la frecuencia o periodo de retorno T). Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) son el conjunto de curvas que representan para cada periodo de retorno concreto (hay una curva para cada T) los valores de las intensidades máximas medias de lluvia esperables en función de la duración del aguacero. Como el estudio se centra en una cuenca hidrológica para observar el comportamiento de unos cultivos experimentales, consideraremos un periodo de retorno de 20 años.

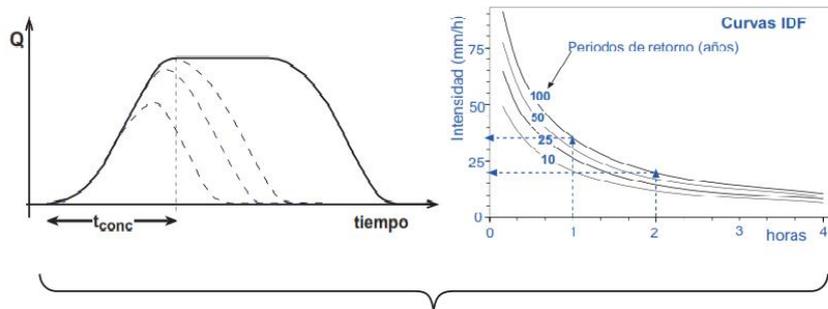
4.2.4 - Curvas de intensidad-duración-frecuencia

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) son características para cada localidad y para obtenerlas se deben considerar todos los episodios de lluvia ocurridos en dicho sitio a lo largo de un gran número de años, siendo imprescindible tener

registrados los datos correspondientes tanto a la cantidad de lluvia (mm) caída como a la duración de las tormentas.

Debido a los escasos datos climáticos y la dificultad de relacionar los datos TRMM de satélite con los de las estaciones terrestres (este apartado se deja abierto para posteriores trabajos), para el estudio de nuestra cuenca, se obtendrán las curvas IDF de una región climática similar a la zona de Huambo: la zona elegida ha sido extraída del artículo “Developing Intensity-Duration-Frecuency Curves in Scarce Data Region: An approach using regional analysis and Satellite data” (Awadallah et. al, 2011) y hace referencia a la base situada en M Baza Congo (con clima tropical húmedo cuya longitud es similar a la de Huambo pero su latitud la sitúa en el norte de Angola).

También se hace necesario evaluar la Intensidad de Precipitación para el tiempo de concentración de la cuenca. Si utilizamos un tiempo menor, no permitimos que toda la cuenca contribuya al caudal, y si utilizamos un tiempo mayor, la intensidad máxima será menor (fig. 28). De este modo con la ayuda de la figura 29 podremos fijar la intensidad máxima para nuestra cuenca que en este caso para un T_c de 82.028 minutos y un periodo de retorno de 20 años será de aproximadamente 77 mm/h.



El compromiso entre estas dos circunstancias nos indica que debemos trabajar con la **Intensidad de Precipitación producida en un tiempo igual al tiempo de concentración**

Figura 28. Comparativa tiempo de concentración-curva IDF

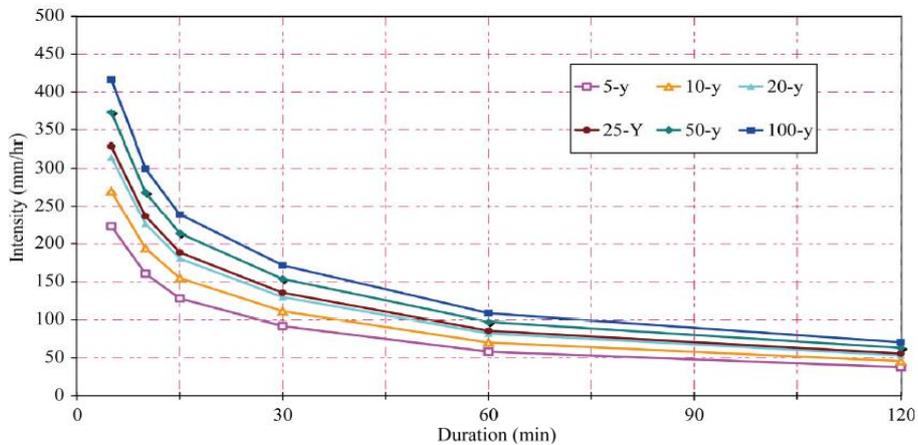


Figura 29. Curva IDF para la región de "M Banza Congo"

4.3 - ESTIMA DE LA ESCORRENTÍA

Existen diferentes métodos para estimar la escorrentía que se generará en una zona a partir de sus datos climáticos, topográficos, edáficos, etc... Se utilizan en el ámbito de la ingeniería, tanto civil como agronómica o forestal, siendo igualmente muy comunes en conservación de suelos. La mayor parte de ellos son de naturaleza empírica, por lo que para que la estima sea realmente fiable es necesario que las condiciones de nuestra cuenca sean similares a los supuestos sobre los que se han desarrollado y validado los diferentes métodos (Ibañez Asensio S. et al., 2011). Desarrollaremos dos métodos empíricos diferentes para obtener la escorrentía: La fórmula racional y el método de número de curva.

4.3.1 - Formula racional

Es un método muy apropiado cuando la información disponible de la zona de trabajo, de superficie no superior a 1.000 ha, no es muy exhaustiva; su validez además depende de la fiabilidad de los valores del coeficiente de escorrentía (c) y del tiempo de concentración empleados en el cálculo. La expresión utilizada para el cálculo toma la siguiente forma:

$$Q = cIA/360$$

donde: Q = caudal de escorrentía (m³/s)

c = coeficiente de escorrentía

I = intensidad de la precipitación (mm/h)

A = superficie de la cuenca (ha)

COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

Para determinar el coeficiente de escorrentía (c) más acorde con las condiciones de relieve, vegetación, etc. de nuestra zona deberemos utilizar alguna tabla o ecuación desarrollada al efecto en el artículo de "Metodos para determinar el coeficiente de escorrentía" (Ibañez Asensio S. et al., 2011). De entre los diferentes métodos posibles (Método de Raws, Molchanov, Prevet, Formula de Nadal y formula de Keler) se utilizará la fórmula de Nadal y el método de Prevet porque está diseñado para parcelas experimentales teniendo en cuenta el uso de suelo, la pendiente y la textura del suelo (tabla 13).

Volvemos a ArcMAP para reclasificar¹⁸ el mapa de pendientes en nuevos valores (0-5,5-10,10-30,>30) que combinándolo con el mapa de usos del suelo (fig. 5) obtendremos la superficie que ocupa cada uso en relación a la pendiente. Sabiendo esto y que el tipo de suelo es arcilloso obtendremos el valor de “c” mediante Prevet con la ayuda de la siguiente tabla (tabla 12):

Uso del suelo	Pendiente (%)	Textura del suelo (%)		
		Arenos-limoso Limoso-arenoso	Limoso Limoso-arcilloso	Arcilloso
Bosque	0 – 5	0,10	0,30	0,40
	5 – 10	0,25	0,35	0,50
	10 – 30	0,30	0,40	0,60
	> 30	0,32	0,42	0,63
Pastizal	0,15	0,15	0,35	0,45
	5 –10	0,30	0,40	0,55
	10 – 30	0,35	0,45	0,65
	>30	0,37	0,47	0,68
Cultivo agrícola	0 – 5	0,30	0,50	0,60
	5 – 10	0,40	0,66	0,70
	10 – 30	0,50	0,70	0,80
	> 30	0,53	0,74	0,84

Tabla 12. Coeficiente de escorrentía Prevet

Prevet	Pendiente	C _{arcilloso}	Area	Area*C
Vegetación	0-5	0,4	345825	138330
	05-010	0,5	398025	199012,5
	010-30	0,6	189900	113940
	30-44	0,63		0
Sabana	0-5	0,45	1434375	645468,8
	05-010	0,55	1505025	827763,8
	010-30	0,65	526050	341932,5
	30-44	0,68		0
Cultivos	0-5	0,6	915300	549180
	05-010	0,7	961200	672840
	010-30	0,8	344025	275220
	30-44	0,84	2925	2457
TOTAL			6622650	3766145

Tabla 13. Valores del coef. escorrentía para cada uso de la cuenca

$$C_{\text{total}} = (\text{Area} \cdot c)_{\text{total}} / \text{Area}_{\text{total}} = 0.568676$$

Para la fórmula de Nadal nos fijamos en los diferentes factores que influyen en su cálculo (extensión, lluvia y pendiente) y calculamos el coeficiente de escorrentía según la fórmula:

K_1 es el factor de la extensión de la cuenca
 K_2 es el factor de la lluvia media anual
 K_3 es el factor de la pendiente y de la permeabilidad del suelo

Extensión		Lluvia media anual		Características de la Cuenca	K_3
Km^2	K_1	mm	K_2		
10	2.60	200	0.25		
20	2.45	300	0.50	Llana y permeable	0.5 – 0.7
40	2.15	400	0.75	Ondulada	0.5 – 1.2
100	1.80	500	1.00	Montañosa e impermeable	1.2 – 1.5
200	1.70	600	1.10		
500	1.40	700	1.17		
1.000	1.30	800	1.25		
5.000	1.00	900	1.32		
10.000	0.90	1.000	1.40		
20.000	0.87	1.200	1.50		

Tabla 14. Factores fórmula de Nadal

$$c = 0.25 * k_1 * k_2 * k_3 = 0.585$$

$c_{promedio} = 0.5768$, cuyo resultado en la escorrentía nos dará:

$$Q = 0.5768 * 77 * 681,8938 / 360 = 84,126 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.3.2 - Método del número de curva

El método del número de curva, que proporciona el volumen de la escorrentía total (L^3), utiliza como primer dato de entrada la escorrentía precipitada (I) en la zona, asumiendo por tanto que en una misma cuenca diferentes lluvias provocarán diferentes escorrentías. Lo más conveniente será considerar para la estima aquella lluvia que genere mayor escorrentía, de ahí que debamos utilizar el tiempo de concentración (t_c) como punto de entrada en las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) de nuestra zona. Conocida la cantidad de lluvia precipitada la escorrentía generada puede obtenerse mediante la expresión matemática siguiente:

$$Q = \frac{(I - 2S)^2}{(I + 0.8S)} \quad \text{donde: } Q = \text{Caudal de la escorrentía (mm)}$$

I = Cantidad de lluvia (mm)

$S = (25400/N) - 254$

N = Numero de curva

El valor del n° de curva N de entrada en la ecuación se obtiene mediante tablas (tabla 15) cuyas condiciones del terreno contempladas son:

- **Uso de la tierra:** Cultivos alineados, cultivos no alineados, prados, pastizales, prados permanentes, bosques, caseríos.

- **Medidas de conservación empleadas en el cultivo:** Dado un determinado uso de la tierra, la realización o no de prácticas de conservación normalmente es determinante en el volumen de escorrentía generado por la lluvia. Las posibles medidas agronómicas destinadas a la corrección de la erosión hídrica son inexistencia (R), curvas de nivel (c), y aterrazamientos (C-T).

- **Condiciones hidrológicas para la infiltración:** Se diferenciarán entre muy pobres, pobres, regulares, buenas y muy buenas.

- **Grupo hidrológico del suelo:** Se diferenciarán 4 clases de permeabilidad en atención a su profundidad y su textura:
 - Grupo A: Incluye los suelos que presentan mayor permeabilidad (arenosos, arenosos-limosos).
 - Grupo B: Incluye los suelos de moderada permeabilidad cuando están saturados comprendiendo los terrenos arenosos menos profundos que los del grupo A.
 - Grupo C: Incluye los suelos que ofrecen poca permeabilidad cuando están saturados, por presentar un estrato impermeable que dificulta la infiltración o porque su textura es franco-arcillosa o arcillosa.
 - Grupo D: Es el que ofrece mayor escorrentía por ser menos permeables tales como los terrenos muy arcillosos profundo con alto grado de tumefacción.

Con estos matices se puede obtener una escorrentía diferente para cada uso del suelo teniendo en cuenta la superficie de cada uso para al final obtener la escorrentía final como suma ponderada de cada uso del suelo. Trazada en la tabla 16.

Cubierta del suelo			Números de curva correspondientes a los grupos hidrológicos del suelo			
Clase	Laboreo	Condiciones hidrológicas para la infiltración	A	B	C	D
Barbecho	-	-	77	86	91	94
Cultivos alineados	R	Pobres	72	81	88	91
	R	Buenas	67	78	85	89
	C	Pobres	70	79	84	88
	C	Buenas	65	75	82	86
	C-T	Pobres	66	74	80	82
Cultivos no alineados o con surcos pequeños o mal definidos	C-T	Buenas	62	71	78	81
	R	Pobres	65	76	84	88
	R	Buenas	63	75	83	87
	C	Pobres	63	74	82	85
	C	Buenas	61	73	81	84
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternativa	C-T	Pobres	61	72	79	82
	C-T	Buenas	59	70	78	81
	R	Pobres	66	77	84	88
	R	Buenas	58	72	81	85
	C	Pobres	64	75	83	85
Pastizales (pastos naturales)	C	Buenas	55	69	78	83
	C-T	Pobres	63	73	80	83
	C-T	Buenas	51	67	76	80
	-	Pobres	68	79	86	89
	-	Regulares	49	69	79	84
	-	Buenas	39	61	74	80
	C	Pobres	47	67	81	88
	C	Regulares	25	59	75	83
Prados permanentes Montes con pastos (ganadero-forestal)	C	Buenas	6	35	70	79
	-	-	30	58	71	78
	-	Pobres	45	66	77	83
	-	Regulares	36	60	73	79
	-	Buenas	25	55	70	77
Bosques (forestales)	-	Muy pobres	56	75	86	91
	-	Pobres	46	68	78	84
	-	Regulares	36	60	70	76
	-	Buenas	26	52	63	69
	-	Muy buenas	15	44	54	61
Caseros	-	-	59	74	82	86
Camino de tierra	-	-	72	82	87	89
Camino en firme	-	-	74	84	90	92

Tabla 15. Cuadro relación número de curva

Uso del suelo	Área (Ha)	Clase	Laboreo	Condiciones para la infiltración	Grupo hidrológico	Numero de curva	S	Escorrentía Q (mm)
Veget.	93,375	Forestal	-	Pobre	C	78	71,6	32,70954
Sabana	346,545	Pastizal	-	Buenas	C	74	89,2	69,40621
Cultivos	222,345	Cultivo	R	Buenas	C	85	44,8	1,417241
CEC	19,6288	Caserío	-	-	C	82	55,8	9,794768
TOTAL	681,893							40,49605

Tabla 16. Cálculo de la escorrentía (número de curva)

5. CONCLUSIONES

Mediante la realización de este proyecto se ha podido establecer los parámetros hídricos y geomorfológicos de una pequeña cuenca hidrológica cercana al Centro de Estudios Agronómicos de Chianga, obteniéndose parámetros útiles para el estudio de los cultivos experimentales allí situados. A su vez, se deja abierta la puerta a profundizar sobre este estudio para obtener otros parámetros hidrológicos como la ecuación universal de pérdidas del suelo (USLE) que no se han podido desarrollar por carecer de datos experimentales de campo.

Personalmente ha sido de gran utilidad el hecho de poder trabajar con datos climáticos libres (TRMM) para poder dar apoyo a zonas que carecen de dicha información y el hecho de trabajar con el software ArcGIS me ha servido para poder descubrir nuevas herramientas (análisis espacial, análisis 3D, interpolación, hidrología, etc.) y ampliar mis conocimientos en la gestión de usos del suelo con dicho software.

A su vez, este tipo de proyectos se adapta a la estructura y requerimientos de proyectos de Cooperación al Desarrollo para países con necesidad de progreso económico y social como lo es Angola.

6. REFERENCIAS

- [1] DIAS NOGUEIRA M., "A Carta de Solos do Centro de Estudos da Chianga", *Instituto de Investigación Agronómica de Angola*, 1978.
- [2] CHANCHARI GUTIERREZ E., "Obtención de las características morfométricas de cuencas hidrográficas con ArcGIS 10", 2013, url: https://www.youtube.com/watch?v=qmldnqtV_Do
- [3] RODRÍGUEZ-FONSECA B., ADOLFO XAVIER, J. "Angola Rainfall Reconstruction and Rainfall Variability during the War Period: 1979-2003". *Física De La Tierra*, 2010, vol. 21. url: <http://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/view/FITE0909110191A/11433>
- [4] AWADALLAH A., ELGAMAL M., ELMOSTAFA A., ELBADRY H., "Developing Intensity-Duration-Frequency Curves in Scarce Data Region: An Approach using Regional Analysis and Satellite Data," *Engineering*, Vol. 3 No. 3, 2011, pp. 215-226. url: [10.4236/eng.2011.33025](http://dx.doi.org/10.4236/eng.2011.33025).
- [5] AWADALLAH A., AWADALLAH N., "A Novel Approach for the Joint Use of Rainfall Monthly and Daily Ground Station Data with TRMM Data to Generate IDF Estimates in a Poorly Gauged Arid Region," *Open Journal of Modern Hydrology*, Vol. 3 No. 1, 2013, pp. 1-7. url: [10.4236/ojmh.2013.31001](http://dx.doi.org/10.4236/ojmh.2013.31001).
- [6] HUGENS D.A., "Comparison of satellite rainfall data with observations from gauging station networks". *Journal of Hydrology*, 327 (3&4), 2006, pp. 399-410. url: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.041>
- [7] DEVELOPMENT WORKSHOP ANGOLA, "A preliminary atlas and profile of Huambo, Angola", 2012

- [8] GISBERT BLANQUER J.M., MORENO RAMÓN H., IBAÑEZ ASENSIO S., “Métodos Para Determinar El Tiempo De Concentración De Una Cuenca Hidrográfica”, 2011, url: <http://hdl.handle.net/10251/10779>
- [9] IBAÑEZ ASENSIO S., GISBERT BLANQUER J.M., MORENO RAMÓN H., “Valores Del nº De Curva (Cálculo De La Escorrentía)”, 2011, url: <http://hdl.handle.net/10251/10783>
- [10] IBAÑEZ ASENSIO S., GISBERT BLANQUER J.M., MORENO RAMÓN H., “Métodos Para La Determinación Del Coeficiente De Escorrentía.”, 2011, url: <http://hdl.handle.net/10251/10781>
- [11] IBAÑEZ ASENSIO S., GISBERT BLANQUER J.M., MORENO RAMÓN H., “Métodos Para Estimar La Escorrentía De Una Cuenca De Pequeño Tamaño.”, 2011, url: <http://hdl.handle.net/10251/10780>
- [12] IBAÑEZ ASENSIO S., GISBERT BLANQUER J.M., MORENO RAMÓN H., “Morfología De Las Cuencas Hidrológicas”, 2011 url: <http://hdl.handle.net/10251/10782>
- [13] IBAÑEZ ASENSIO S., GISBERT BLANQUER J.M., MORENO RAMÓN H., IBAÑEZ ASENSIO S., “Estima De Precipitaciones Máximas Por El Método De Gumbell”, 2011, url: <http://hdl.handle.net/10251/10774>
- [14] FRANZ LEONARDO, “Clasificación supervisada y no supervisada en ArcGIS”, 2012, url: <http://acolita.com/clasificacion-supervisada-no-supervisada-en-arcgis/>
- [15] ACASI DAVID, “Clasificación no supervisada en ArcGIS 10.1”, 2013, url: https://www.youtube.com/watch?v=1LZr_pJGPMw
- [16] AGUA Y SIG, url: www.aguaysig.com
- [17] FRANZ LEONARDO, “Delimitar una cuenca hidrográfica en ArcGIS”, 2011, url: <http://acolita.com/delimitar-automaticamente-micro-cuenca-hidrografica-especifica-en-arcgis/>
- [18] ESRI Resource center, “Herramientas de hidrología”, 2012, url: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help./index.html#/009z0000004w000000>

- [19] ROBERTO PIZARRO T., JUAN PABLO FLORES V., CLAUDIA SANGÜESA P., ENZO MARTÍNEZ A., “Curvas Intensidad Duración Frecuencia”, 2010.
- [20] FRANCÉS GARCÍA, F., et al. “Hidrología Básica Para Ingenieros: Para La Asignatura De Hidráulica e Hidrología De 2º Del PIE-IC” Editorial UPV, 2003.
- [21] BEERNAERT F.R., “Development of a soil and terrain map/database for Angola”, *Institute for Land and Water Management Catholic University of Leuven (Belgium)*, 1997.
- [22] MISION DE PEDOLOGÍA DE ANGOLA, “Carta Geral dos solos de Angola, distrito de Huambo”, *Junta de investigaciones de Ultramar*, 1961.
- [23] MARQUES MONTEIRO M., “Contribução para os Estudos Geológico e Geomorgológico da Area do Centro de Estudos da Chianga”, *Centro de Estudos de Pedologia Tropical, Lisboa*, 1963.