

**ANÁLISIS, COMPARACIÓN Y APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA
SIMULACIÓN DE INUNDACIONES SÚBITAS**

**ISABEL CRISTINA TRUJILLO POTOSÍ
YILBER AUGUSTO LUNA GALLARDO**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
2015**

**ANÁLISIS, COMPARACIÓN Y APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA
SIMULACIÓN DE INUNDACIONES SÚBITAS**

**ISABEL CRISTINA TRUJILLO POTOSÍ
YILBER AUGUSTO LUNA GALLARDO**

**Trabajo de grado modalidad investigación como requisito para optar al título
de Ingenieros Ambientales**

**Directora
Ing. M. Sc. María Elvira Guevara A.**

**Codirectora
Ing. M. Carolina Castrillón Ojeda**

**Asesor Externo
Ph.D. Juan Manuel Diez Hernández**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN
2015**

NOTA DE ACEPTACIÓN

El director y los respectivos jurados han leído este documento escuchando la sustentación del mismo por su autor y lo encuentran satisfactorio

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del director

Popayán, 19 de Octubre del 2015

DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A nuestros padres, Deysi Potosí y Olivo Trujillo; Ana Magdalena Gallardo y Nicodemus Luna y hermanos, Ingrid Luna Gallardo y Edwin Luna Gallardo. Por darnos su amor, apoyo incondicional y bendiciones.

A nuestros profesores, por impulsar el desarrollo de nuestra formación profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad del Cauca, en especial a la facultad de Ingeniería Civil, y a cada una de las personas que ayudaron a nuestro crecimiento académico y a formarnos como personas de bien.

A la ingeniera MARÍA ELVIRA GUEVARA, por el apoyo, acompañamiento y disposición para realizar este trabajo de grado.

A la Ingeniera CAROLINA CASTRILLÓN, docente de la facultad de Ciencias Humanas y Sociales, por compartir con nosotros su conocimiento invaluable durante el desarrollo del proceso de este trabajo de investigación.

Al Ph.D JUAN MANUEL DIEZ HERNÁNDEZ, profesor de la Universidad de Valladolid España, quien nos impartió su conocimiento y experiencia en el tema de modelación.

A los ingenieros LUIS JORGE GONZALES y CARLOS GALLARDO quienes desde un inicio nos involucraron como monitores en el proyecto, Convenio 20131800008927 ALCALDÍA-UNICAUCA, que nos motivó a realizar el trabajo de investigación.

A la ALCALDIA MUNICIPAL DE POPAYAN; ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYAN. S.A. E.S.P.; CORPORACION REGIONAL DEL CAUCA; proyecto en curso "ESTUDIO DE RIESGOS PRELIMINAR (AFECTACIÓN Y DAÑOS) ASOCIADOS A FENÓMENOS DE INUNDACIÓN LENTA Y SÚBITA (AVENIDA TORRENCIAL) EN LA ZONA URBANA Y RURAL DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN" Convenio 20131800008927 ALCALDÍA-UNICAUCA, quienes aportaron los datos necesarios para la ejecución de los objetivos planteados en esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

1. ASPECTOS GENERALES	11
1.1 INTRODUCCIÓN	11
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 Objetivo general	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.4 HIPÓTESIS.....	12
1.5 JUSTIFICACIÓN	13
1.6 METODOLOGÍA	14
1.7 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	15
1.7.1 Revisión de información	15
1.7.2 Selección y Justificación de los métodos escogidos	15
1.7.3 Preparación de la información	15
1.7.4 Modelación de la inundación súbita	15
1.7.5 Resultados	15
1.7.6 Preparación del informe final	15
2 MARCO TEÓRICO	16
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS.....	16
2.2 MÉTODOS APLICABLES A EVALUACIÓN DE INUNDACIONES SÚBITAS	18
2.2.1 Lógica difusa	18
2.2.2 Redes neuronales	19
2.2.3 Onda de choque	20
2.2.4 Rompimiento de presas.....	20
2.2.5 Álgebra de mapas	21
2.3 MÉTODOS SELECCIONADOS	21
3 ESTADO DEL ARTE	22
3.1 ESTUDIOS REALIZADOS EN INUNDACIONES MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LÓGICA DIFUSA	22

3.1.1	Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el valle de Aburrá.	22
3.1.2	Uso de lógica difusa para la estimación de índices de riesgo y falla de obras hidráulicas en tiempo real.....	22
3.1.3	Application of fuzzy logic to the evaluation of runoff in a tropical watershed - aplicación de lógica difusa para la evaluación de escorrentía en una cuenca tropical-	23
3.1.4	Identifying low impact development strategies for flood mitigation using a fuzzy-probabilistic approach. -identificación de estrategias de desarrollo de bajo impacto para la mitigación de inundaciones utilizando un enfoque difuso probabilístico-	23
3.1.5	Fuzzy logic based flood forecasting model for the Kelantan river basin, Malaysia. -modelo de pronóstico de inundaciones basado en la lógica difusa para la cuenca del río Kelantan, Malasia-.....	23
3.1.6	Una introducción a la lógica difusa - an introduction to the fuzzy logic....	24
3.2	ESTUDIOS REALIZADOS EN INUNDACIONES MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ÁLGEBRA DE MAPAS.....	24
3.2.1	Evaluación y zonificación de riesgos y dimensionamiento de procesos erosivos de la jurisdicción de CORNARE.	24
3.2.2	Propuesta metodológica para la ubicación de áreas de disposición de residuos sólidos urbanos.....	24
3.2.3	Ministerio de ciencia y tecnología. Instituto nacional de investigación espacial.....	25
4	APLICACIÓN PARA LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MOLINO .	26
4.1	LOCALIZACIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO MOLINO	26
4.2	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	26
4.2.1	Datos básicos	27
4.3	SELECCIÓN Y DEPURACIÓN DE INFORMACIÓN	28
4.4	HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES	28
4.5	GEOPROCESAMIENTO Y SUPERPOSICIÓN DE REPRESENTACIONES DIFUSAS	29
4.5.1	Clasificación de datos y lógica difusa	30
4.5.2	Pertenencia difusa.....	30
4.5.3	Tipos de pertenencia difusa.....	31
4.5.4	Superposición difusa	34

4.5.5	Proceso de análisis de superposición en lógica difusa	35
4.5.6	Técnicas de superposición del conjunto difuso	35
4.5.7	Análisis de superposición	37
4.6	SUMA POR ALGEBRA DE MAPAS	37
4.7	PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA DIGITAL	38
4.8	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	39
4.8.1	Representaciones temáticas.....	39
4.8.2	Representación ráster difusa	46
5	RESULTADOS	51
5.1	REPRESENTACIÓN RÁSTER AL APLICAR LÓGICA DIFUSA	51
5.2	REPRESENTACIÓN RÁSTER AL APLICAR ÁLGEBRA DE MAPAS	56
5.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	59
6	OBSERVACIONES.....	61
7	CONCLUSIONES	61
8	RECOMENDACIONES.....	62
9	BIBLIOGRAFÍA	63

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Estaciones acueducto de Popayán sobre la sub cuenca del río Molino. .	27
Tabla 2. Tipos de pertenencia.....	32
Tabla 3. Técnicas de superposición difusa	36
Tabla 4. Estaciones usadas para la sub cuenca del río Molino.	38
Tabla 5. Comparación lógica difusa vs álgebra de mapas y foto aérea	60

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de metodología	14
Figura 2. Sistemas de lógica difusa	19
Figura 3. Localización de la sub cuenca del río Molino.	26
Figura 4. Geoprocesamiento.	29
Figura 5 Diagrama de la función de pertenencia difusa.	31
Figura 6. Suma por álgebra de mapas.....	37
Figura 7. Red hídrica y divisoria de la sub cuenca río Molino.	39
Figura 8. Representación ráster de pendientes.	40
Figura 9. Representación ráster de acumulación de flujo.....	41
Figura 10. Isoyetas.	42
Figura 11. Representación ráster de curvaturas.	43
Figura 12. Representación ráster del mapa geológico.	44
Figura 13. Cobertura vegetal formato véctor.....	45
Figura 14. Cobertura vegetal formato ráster.	46
Figura 15. Representación ráster de pendiente con función de membresía fuzzylinear.	47
Figura 16. Isoyetas con función de membresía FuzzyMSLarge.....	48
Figura 17. Representación ráster geológico con función de membresía FuzzyMSLarge.	49
Figura 18. Representación ráster de cobertura Vegetal con función de membresía fuzzylinear.	50

Figura 19. Superposición de pendiente y cobertura vegetal difusa mediante la función OR.....	52
Figura 20. Superposición de pendiente y cobertura difusa mediante la función GAMMA.....	53
Figura 21. Superposición de pendiente y geológico difusa mediante la función GAMMA.....	54
Figura 22. Resultado de la unión de las 3 representaciones preliminares de superposición difusa. Sub cuenca río Molino.....	55
Figura 23. Reclasificación ráster de pendientes.....	56
Figura 24. Reclasificación de representación geológica	57
Figura 25. Reclasificación de cobertura vegetal.....	58
Figura 26. Representación final de suma algebraica.	59

1. ASPECTOS GENERALES

1.1 INTRODUCCIÓN

Una alternativa para análisis de inundaciones, se puede generar mediante comparación y aplicación de diferentes metodologías, para lo que se hace pertinente tener en cuenta las clases de inundaciones.

Las inundaciones se pueden clasificar desde varios puntos de vista, siendo frecuente distinguir entre inundaciones lentas o de tipo aluvial y súbitas o de tipo torrencial.

Con respecto a las inundaciones lentas o de tipo aluvial, se producen cuando ocurren lluvias persistentes y generalizadas en la parte alta de las cuencas, lo que genera ondas de creciente que superan la capacidad máxima de transporte, haciendo que el río se salga de su cauce inundando áreas planas aledañas al mismo, con tiempos de duración mayores a 6 horas.

Por otra parte, las inundaciones súbitas o de tipo torrencial, suelen producirse en ríos de montaña o en ríos cuyas cuencas vertientes presentan fuertes pendientes por efecto de lluvias intensas. Las crecidas son repentinas y de corta duración, con pequeña extensión del área de influencia, alto caudal pico, flujo rápido generalmente causante de daños importantes a la propiedad. Usualmente, la cobertura vegetal de la cuenca es pobre y se ven afectadas de manera importante cuando el índice de infiltración se reduce por tormentas previas. (Ministerio de Ambiente, Desarrollo Sostenible, Universidad Nacional de Colombia, 2013).

Tal es el caso del municipio de Popayán, que debido a sus constantes precipitaciones y su topografía, se producen inundaciones súbitas en el área urbana y rural en los distintos ríos, por lo cual se hace necesario buscar, analizar y aplicar algún tipo de metodología de simulación de este tipo de inundaciones, para determinar su comportamiento y así tener mejores bases para su posible mitigación.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Aplicar metodologías para simular inundaciones súbitas en el río Molino en el municipio de Popayán, Colombia.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Identificación de información secundaria de utilidad para el trabajo.
- b) Evaluar metodologías para modelación de inundaciones súbitas.
- c) Determinar la/s metodología/s más apropiada/s de acuerdo con la información existente.
- d) Simular inundaciones súbitas en el cauce del río Molino.
- e) Analizar resultados buscando identificar la representatividad o no del método/s usado/s.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las altas precipitaciones en el municipio de Popayán junto con sus condiciones topográficas, la inestabilidad de los suelos en las zonas altas de la cuenca hidrográfica, los fenómenos naturales asociados a la sismicidad, las remociones en masa y el mal uso de las cuencas por parte de las comunidades ribereñas, conllevan al represamiento de las quebradas o ríos por el arrastre y deposición de materiales, siendo estas algunas de las causas principales de inundaciones, que afectan a varias comunidades urbanas y rurales. Estos estudios pueden resultar muy complejos y costosos, por lo que es importante explorar metodologías novedosas aplicables a este tipo de problemas.

1.4 HIPÓTESIS

A raíz del desarrollo del Convenio 20131800008927 ALCALDÍA-UNICAUCA, cuyo objetivo fue realizar un Estudio Preliminar de Riesgos (Afectación y Daños) Asociados a Fenómenos de Inundación Lenta y Súbita (Avenida Torrencial) en la Zona Urbana y Rural del Municipio de Popayán –AVR- y de la inundación presentada el 24 de diciembre de 2013 en la sub cuenca del río Molino con consecuencias para el municipio de Popayán, se vio la necesidad de investigar sobre metodologías novedosas para realizar la modelación de inundaciones súbitas en cuencas hidrográficas, que permitieran su comparación y sugerir la conveniencia o no de su uso.

1.5 JUSTIFICACIÓN

La sub cuenca del río Molino se encuentra localizada al sur occidente de Colombia, en el centro del Departamento del Cauca, hacia el oriente del Municipio de Popayán (Plan de Ordenación y Manejo Sub cuenca río Molino – Pubús, 2006).

Esta sub cuenca se encuentra ordenada y en constante planificación bajo procesos institucionales y comunitarios que la posicionan como modelo integral de desarrollo regional, fundamentado en la sostenibilidad ambiental y equidad social. El río Molino se ha consolidado no solo como fuente abastecedora del acueducto sino también como espacio paisajístico articulador de dinámicas socio-ambientales rurales y urbanas, (Acueducto y Alcantarillado de Popayán, 2014).

El río Molino se ha visto expuesto históricamente a problemas de inundaciones causadas por diferentes factores, entre ellos, lluvias intensas sobre las cuencas hidrográficas; sismos; deslizamientos; formación de presas naturales; deficiencias de drenaje; desbordamiento; obstáculos al flujo por la construcción de obras civiles; sedimentación y erosión de cauces.

Los principales problemas asociados al río Molino se derivan de las inundaciones súbitas que se han presentado a través de los años por lo cual se considera importante poder avanzar en el conocimiento en este campo.

Tal como se consigna en el Plan de Ordenamiento Territorial POT y en el Plan de Ordenación y Manejo de la sub cuenca del río Molino - quebrada Pubús, 2006, la amenaza por inundaciones “es quizá junto con los deslizamientos y los incendios las que producen mayores daños a la población asentada en las riberas de los cauces que conforman la red hídrica de Popayán, (Plan de Ordenación y manejo Sub cuenca río Molino – Pubús, 2006).

Tal como se consigna en el informe final del documento Metodología para la Evaluación del Riesgo en los POMCAS, (Ministerio de Ambiente, Desarrollo Sostenible, Universidad Nacional de Colombia, 2013). “para la evaluación de la amenaza por inundación existen diversas metodologías y herramientas que varían con base al objetivo de análisis y las variables de trabajo”.

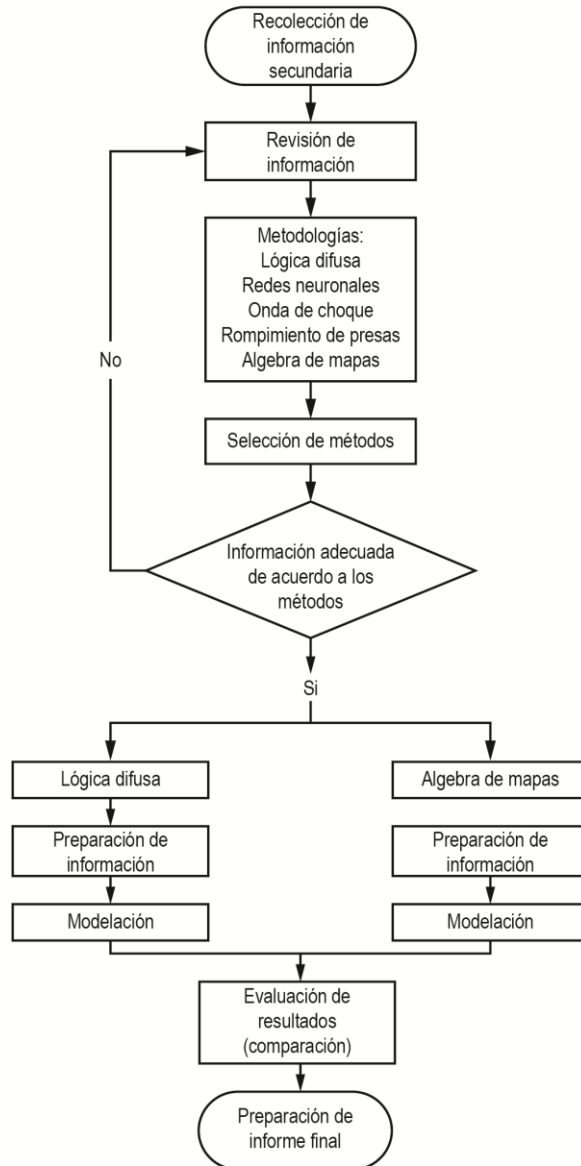
Las metodologías de evaluación de amenaza involucran eventos históricos, análisis geomorfológicos, cálculos hidrológicos-hidráulicos además de otras metodologías más novedosas como lógica difusa, algebra de mapas, etc. Cuya aplicación se facilita con el uso de herramientas geomáticas, (Ministerio de ambiente, desarrollo sostenible, Universidad Nacional de Colombia, 2013).

Partiendo de la observación de los métodos de evaluación de la amenaza por inundación, uno de los principales factores con los que se tiene problema es el recurso económico. Es por esto que se decide realizar un estudio de metodologías que puedan ser aplicadas para su evaluación.

1.6 METODOLOGÍA

Las etapas seguidas para el análisis, comparación y aplicación de metodologías de simulación de inundaciones súbitas, incluye los siguientes pasos esquematizados en la Figura 1.

Figura 1. Esquema de metodología



Fuente: propia

1.7 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La información secundaria requerida para la presente propuesta de investigación es obtenida del proyecto "Estudio Preliminar de Riesgos (Afectación y Daños) Asociados a Fenómenos de Inundación Lenta y Súbita (Avenida Torrencial) en la Zona Urbana y Rural del Municipio de Popayán" –AVR-, mediante Convenio 20131800008927, entre la Universidad del Cauca y la Alcaldía Municipal de Popayán. Básicamente, se utilizó un modelo digital de elevaciones con resolución de 5 m –DEM-, preparado a partir de la Geo Data Base entregada por el Servicio Geológico Colombiano a la Oficina Asesora de Planeación del Municipio de Popayán. El Anexo digital A incluye la carta de autorización para el uso de la información. También se usó información suministrada por el Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A.E.S.P.

1.7.1 Revisión de información

De la información recolectada, se seleccionó la información adecuada para el desarrollo metodológico y se estructuró en la plataforma SIG, en formato véctor y ráster.

1.7.2 Selección y Justificación de los métodos escogidos

Inicialmente, se proponen distintas metodologías, de las cuales se deben seleccionar las más convenientes considerando la información disponible.

1.7.3 Preparación de la información

Se hizo necesaria la utilización de herramientas computacionales como ArcGIS 10 y la aplicación HEC-GeoHMS 10. Al igual que la aplicación Magna Sirgas Pro 3 Beta.

1.7.4 Modelación de la inundación súbita

La información preparada anteriormente fue ingresada al programa ArcGIS 10 para ser procesada mediante las metodologías a seleccionar.

1.7.5 Resultados

Se analizarán los resultados obtenidos del proceso de simulación haciendo uso del conocimiento de los asesores que apoyan esta investigación.

1.7.6 Preparación del informe final

Análisis y redacción de los resultados obtenidos de los diferentes métodos especificados anteriormente.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

ÁLGEBRA DE MAPAS: Es un conjunto de procedimientos que permiten analizar con ayuda de sistemas de información geográfica, capas ráster y extraer información a partir de ellas.

ArcGIS: Es una plataforma que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG), ArcGIS es utilizada por personas de todo el mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, la empresa, la ciencia, la educación y los medios. ArcGIS permite publicar la información geográfica para que esté accesible para cualquier usuario. El sistema está disponible en cualquier lugar a través de navegadores Web, dispositivos móviles como smartphones y equipos de escritorio, (ESRI, 2015).

AVENIDAS TORRENCIALES: Las avenidas torrenciales o también conocidas como crecientes, borrascas o avalanchas son un fenómeno común en las cuencas montañosas de alta pendiente de todo el territorio Colombiano. Usualmente son de carácter súbito y afectan cauces como el río Molino en Popayán. Aunque la frecuencia de su ocurrencia es baja comparada con los fenómenos de inundaciones lentas, sus daños a la población y a la infraestructura generalmente son de magnitud mayor, al igual que el tiempo necesario para recuperación de las cuencas después de un desastre ocasionado por este fenómeno. Las avenidas torrenciales se originan comúnmente en ríos cuyas cuencas presentan fuertes vertientes y por efecto de fenómenos hidrometeorológicos intensos, cuando en un evento de lluvias se superan valores de precipitación pico en pocas horas. Esto genera la saturación de los materiales de las laderas facilitando el desprendimiento del suelo, produciéndose de esta manera numerosos desgarres superficiales y deslizamientos cuyo material cae al cauce y es transportado inmediatamente aguas abajo o queda inicialmente represado y luego, una vez que se rompe el represamiento, es transportado violentamente de forma repentina.

HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER- GEOSPATIAL HYDROLOGIC MODELING EXTENSION (HEC-GeoHMS): Es un software libre del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers) y está disponible para su descarga en (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx>), que trabaja sobre la plataforma ArcGiS 10. Está diseñado para apoyar el modelamiento de las cuencas hidrográficas para lo que crea

archivos de mapas de las cuencas, de los datos meteorológicos y una malla de parámetros como áreas, perímetros, longitudes de los cauces, que se pueden usar en el HEC-HMS para desarrollar el modelo hidrológico y generar hidrogramas de creciente.

INUNDACIÓN SÚBITA: Es el resultado de lluvias repentinas e intensas que ocurren en áreas específicas. Pueden ocasionar que pequeñas corrientes se transformen, en cuestión de minutos, en violentos torrentes capaces de causar grandes daños. Normalmente se asocian a terrenos con gran pendiente, (Protección civil, 2009).

LÓGICA DIFUSA: La lógica difusa, como su nombre indica, es una lógica alternativa a la lógica clásica que pretende introducir un grado de vaguedad en las cosas que califica. El término “difuso” fue propuesto primero por Zadeh en 1962. Este ingeniero nacido en Azerbaijan, desarrolló su carrera científica en la Universidad de Berkeley (EUA), y fue quien tal vez, primero discutió la necesidad de desarrollar un nuevo paradigma para los matemáticos con el propósito de tratar con sistemas que son generalmente más complejos que los sistemas construidos por el hombre. Hay otros investigadores anteriores a Zadeh como Lukasiewicz (1920) quien desarrolló la lógica multivalor con una infinidad de valores entre 0 y 1 y Black quien desarrolló la teoría general de la imprecisión en 1937, (Correa, 2010).

MODELOS: Son representaciones aproximadas de la realidad. En la actualidad se dispone de técnicas avanzadas de modelación física de fenómenos hidráulicos que, unidas al desarrollo de instrumentos de medición y equipos generadores de fenómenos a escala, permiten predecir con alto grado de certidumbre lo que pueda ocurrir en el prototipo y por tanto, se obtienen óptimos resultados. Esto justifica ampliamente la utilización de modelos hidráulicos los cuales pueden ser físicos o computacionales, (Valenzuela, Guzmán, Riquelme, 2014).

MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES –DEM-: se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1999). Es una representación digital de información espacial en forma de trama, que consiste en una matriz de una muestra de elevaciones para un número de posiciones de suelo a intervalos regularmente espaciados. Estos archivos de datos cartográficos/geográficos digitales son producidos por entidades como el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), como parte del Programa Nacional de Cartografía (GEO COMMUNITY, 2012), y en el caso de Colombia por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC-.

SIMULACIÓN: Es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempo, (Naylor, 2015).

2.2 MÉTODOS APLICABLES A EVALUACIÓN DE INUNDACIONES SÚBITAS

Las siguientes son algunas metodologías encontradas en la bibliografía especializada que podrían ser aplicadas para realizar simulación de inundación súbita, siendo este el tema en que se centrará esta investigación.

2.2.1 Lógica difusa

El concepto de lógica difusa apareció en la década de los 60 gracias al ingeniero y matemático Lotfi Zadeh vinculado con la Universidad de California en Berkeley, USA. Esta tecnología nace como una herramienta práctica que pretende describir, con el objetivo de simular, el comportamiento de ciertos fenómenos sin la necesidad de un modelamiento físico-matemático extensivo.

La lógica difusa se enmarca en el área de la llamada Inteligencia Artificial y ha dado origen a sistemas expertos y sistemas de control automático, siendo ampliamente utilizada en esta área.

Los esquemas que emplean la lógica difusa o FIS (Fuzzy Inference System), procuran crear aproximaciones matemáticas en la descripción de ciertos tipos de fenómenos, con el objetivo de producir resultados exactos a partir de datos imprecisos. El adjetivo "difuso" aplicado a ellas se debe a que los valores de verdad no deterministas utilizados, tienen por lo general, una connotación de incertidumbre. En consecuencia, lo difuso puede entenderse como la posibilidad de asignar valores de verdad intermedios entre "falso" o "verdadero", (Santander, 2004).

Los datos que se necesitan para la aplicación del método para el análisis de la susceptibilidad a inundaciones desde una perspectiva de la lógica difusa, son:

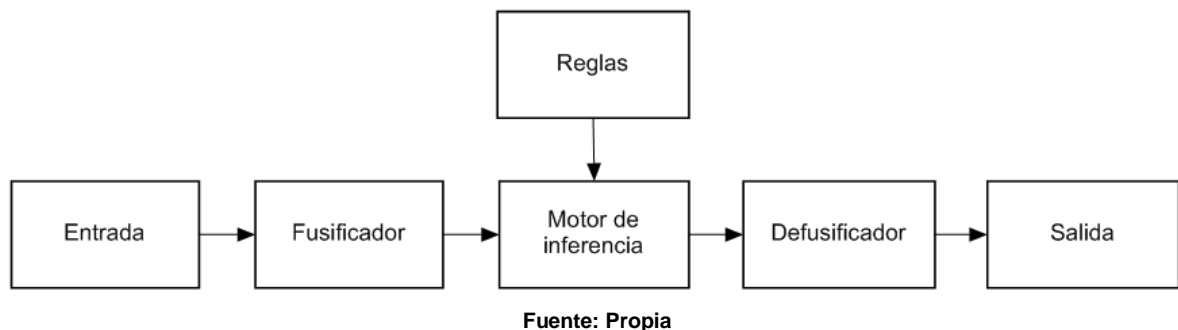
- Zonificación del territorio con base en las apreciaciones y aportes de investigadores con experiencia y conocimiento del tema.
- Elaboración de mapas temáticos teniendo en cuenta: formaciones superficiales, ángulo de la pendiente, forma de la pendiente, acumulación del flujo de agua, asignación de un conjunto difuso para los mapas temáticos, y posteriormente modelar los sistemas difusos, generando un mapa que identifique las zonas con alta amenaza y las que no, (Andocilla, 2012).

La lógica difusa se puede aplicar en procesos demasiado complejos, cuando no existe un modelo de solución simple o un modelo matemático preciso. Es útil también cuando se necesite usar el conocimiento de un experto que utiliza conceptos ambiguos o imprecisos. De la misma manera, se puede aplicar cuando ciertas partes de un sistema a controlar son desconocidas y no pueden medirse de forma confiable y cuando el ajuste de una variable puede producir el desajuste de otras. No es recomendable utilizar la lógica difusa cuando el modelo matemático ya soluciona eficientemente el problema, cuando los problemas son lineales o cuando no tienen solución, (Santander, 2004).

Algunas aplicaciones que tiene la lógica difusa son: control de sistemas como tráfico, vehículos, compuertas en plantas hidroeléctricas, centrales térmicas, etc, (Santander, 2004). La metodología de lógica difusa debe seleccionarse según la información disponible y en el conocimiento tanto del fenómeno analizado como de la zona de estudio.

En resumen, la metodología que maneja la lógica difusa se presenta en la Figura 2.

Figura 2. Sistemas de lógica difusa



2.2.2 Redes neuronales

El concepto de Redes Neuronales Artificiales (RNA) surge en 1943 por Walter Pitts y Warren McCulloch que proponen una conceptualización del funcionamiento del cerebro humano basada en una red de células interconectadas, (Pujol, 2009).

La utilización de las redes neuronales en Ingeniería Civil viene de los años 80s pero solo a partir de 1991 aparece una de las primeras aplicaciones en hidrología, como predicción de lluvia, consumo de agua y predicción de caudales, (Karunanithi, et al. 1994).

“Una red neuronal artificial (RNA) es un modelo heurístico que copia la estructura de un sistema neuronal biológico con el fin de alcanzar una funcionalidad similar. El procesador elemental o neurona es un dispositivo simple de cálculo que, a partir de un vector de entrada del exterior o de otra neurona, proporciona una única respuesta o salida. En general, una red neuronal consiste en el establecimiento de

un conjunto de nodos o neuronas agrupadas en varias capas e interconectadas entre sí (capa de entrada, capas ocultas o intermedias y capa de salida), (Gómez, 2012).

Las redes neuronales artificiales deben su capacidad de procesamiento de información a su estructura distribuida y paralela (la información queda almacenada en los nodos de la red de forma no centralizada) y a su capacidad de aprendizaje y, por tanto, de generalización (en contraposición con la memorización), (Pujol, 2009).

Las desventajas de las redes son: «cajas negras» para identificar las interacciones; tienen dificultad de utilización; necesitan mayores recursos computacionales; metodología menos conocida; implementación llena de procesos empíricos; problemas metodológicos no resueltos totalmente, (Trujillano, et al. 2004).

2.2.3 Onda de choque

Los modelos de tránsito de onda permiten obtener una buena descripción de la propagación de hidrógrafas en aguas pandas tales como ríos, flujo por el terreno, redes hídricas y adicionalmente, determinar la altura requerida para estructuras de control tales como puentes, diques, vertederos y obras de protección, para lo que se puede usar métodos numéricos. (Montoya, et al. 2005).

2.2.4 Rompimiento de presas

Las presas son estructuras cuya razón de ser, se funda en la condición de que el agua que retienen se utilice con dos finalidades alternativas o simultáneas: elevar su nivel para conducirla y formar un depósito que retenga los excedentes hídricos y poder compensar luego los períodos de escasez, o para amortiguar (laminar) las crecidas.

Esa condición de producir un embalse, hace que el agua retenida ejerza un empuje de gran entidad sobre la estructura, siendo ésta la mayor solicitud para la que debe diseñarse la obra. Desde el punto de vista resistente, el problema fundamental que debe resolverse es la forma en que la presa absorberá la presión que le transmite el agua sin romperse y sin transmitir al terreno natural más carga de la que éste puede soportar, (ORSEP, 2011). Sin embargo, puede suceder que se rompa la presa, propagando hacia abajo gran cantidad de agua y sedimentos llegando a ocasionar inundaciones. En la práctica se pueden usar modelos capaces de simular una corriente unidimensional en condiciones de flujo permanente a través de la ecuación de la energía y para régimen no permanente,

aplicando las ecuaciones de Saint Venant completas; para esto, existen programas computacionales como el HEC-RAS y otros. (Montoya, et al. 2005).

2.2.5 Álgebra de mapas

El álgebra de mapas son funciones de análisis espacial que se realizan desde los sistemas de información geográfica; estas funciones buscan analizar fenómenos de una realidad a través del ingreso de un serie de parámetros o variables de análisis.

2.3 MÉTODOS SELECCIONADOS

Después de analizarse y evaluarse las anteriores metodologías, se determinó con el apoyo de los asesores de la investigación, que deberían usarse al menos dos de ellas que usaran el mismo tipo de datos y que permitieran su comparación. Es por esto, que se escogió la lógica difusa y el álgebra de mapas, pues ambas metodologías se enmarcaron en el campo de la inteligencia artificial, se apoya en herramientas ArcGIS y pueden usarse a partir de la misma la información digital disponible. Los otros métodos investigados como onda de choque, rompimiento de presas y redes neuronales, requieren otro tipo de datos (caudales, topobatimetría, condiciones de frontera, etc.) y usan herramientas computacionales diferentes (HEC-RAS, FLO 2D, MATLAB, etc.).

3 ESTADO DEL ARTE

A continuación se presentan algunos estudios realizados aplicando lógica difusa y álgebra de mapas, con énfasis en problemas hidrológicos e hidráulicos.

3.1 ESTUDIOS REALIZADOS EN INUNDACIONES MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LÓGICA DIFUSA

3.1.1 *Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el valle de Aburrá.*

Se realizó un análisis regional de las zonas susceptibles a inundación por medio de lógica difusa aplicada en una plataforma SIG, lo cual generó un mapa de susceptibilidad preliminar. Con la información secundaria, el mapa obtenido con lógica difusa y la fotointerpretación, se crean las zonas preliminares de inundación y de avenidas torrenciales. Posteriormente, se realiza un trabajo de campo detallado, según la escala de trabajo definida previamente (1:5,000 para Medellín y 1:10,000 para los demás municipios del Valle de Aburrá), durante el cual se analizaron las zonas de inundación preliminares y se hicieron las correcciones necesarias según los criterios de los expertos. Durante el trabajo de campo no sólo se verificó la zona de incidencia de la amenaza, sino que, siempre que fue posible, se solicitó a los vecinos de la zona información acerca del comportamiento de la quebrada y sobre la ocurrencia de eventos previos de inundación o avenidas torrenciales, (Convenio 4800002397, 2007).

3.1.2 *Uso de lógica difusa para la estimación de índices de riesgo y falla de obras hidráulicas en tiempo real*

La tesis trata sobre la confección de un sistema de alerta temprana por inundaciones o falla de obras hidráulicas a nivel regional y tiene como propósito el uso de dos técnicas de incipiente empleo en el área de la hidrología: lógica difusa y algoritmo genético, las cuales se enmarcan en el campo de los sistemas expertos o también denominados de Inteligencia Artificial.

Se utilizó lógica difusa para dos implementaciones tipo: la primera consiste en el uso del esquema general aplicado al pronóstico de caudales, modelo que fue calibrado con un algoritmo genético. La segunda implementación de los modelos de lógica difusa tuvo por objeto la generación de índices de riesgo agregados por zonas geográficas (comunas), empleando en este caso el esquema conceptual base, (Santander, 2004).

3.1.3 Application of fuzzy logic to the evaluation of runoff in a tropical watershed - aplicación de lógica difusa para la evaluación de escorrentía en una cuenca tropical-

Este artículo presenta un modelo basado en reglas difusas para estimar la escorrentía en una cuenca tropical por el método del Soil Conservation Service. Los datos utilizados fueron recolectados dentro de una cuenca tropical cubierta por bosque atlántico y pastizales. La teoría Fuzzy permitió la elaboración de modelos matemáticos en las zonas de imprecisión y/o incertidumbres ya que la teoría difusa considera las zonas de transición entre geo-objetos. La evaluación de la escorrentía procedente de métodos difusos y booleanos demostró el cálculo proporcionado de la escorrentía medida en la cuenca, lo que confirma la idoneidad de la teoría difusa en la modelización de fenómenos naturales, (Azevedo y Souza, 2007).

3.1.4 Identifying low impact development strategies for flood mitigation using a fuzzy-probabilistic approach. -identificación de estrategias de desarrollo de bajo impacto para la mitigación de inundaciones utilizando un enfoque difuso probabilístico-

Desarrollo de bajo impacto (*Low Impact Development-LID*). Incluye estrategias y prácticas que están diseñadas para controlar la escorrentía superficial en sus fuentes de una manera sostenible. El rendimiento de estas estrategias ha sido abordado con frecuencia a través del enfoque de número de curva. Esta estrategia, somete a una gran cantidad de incertidumbres debido a la naturaleza incierta de números de curva y la variabilidad espacial / temporal de las inundaciones. Este documento presenta una nueva metodología para hacer frente a las dos incertidumbres, inundaciones inherentes e incertidumbres epistémicas que identifican estrategias LID óptimas para la mitigación de inundaciones. La metodología propuesta integra una gran variedad de herramientas matemáticas incluyendo funciones cópula, modelos hidrológicos e hidráulicos, algoritmo evolutivo para optimización multiobjetivo (NSGA-II), así como red neuronal artificial (ANN) y la teoría de conjuntos difusos. Los resultados obtenidos a partir de un estudio de caso demuestran claramente que la metodología propuesta no sólo presenta medidas rentables, pero también puede manejar simultáneamente, incertidumbres inherentes y epistémicas en la gestión del riesgo de inundación, (Yazdi y Neyshabouri, 2014).

3.1.5 Fuzzy logic based flood forecasting model for the Kelantan river basin, Malaysia. -modelo de pronóstico de inundaciones basado en la lógica difusa para la cuenca del río Kelantan, Malasia-

Entre otras herramientas de predicción de crecidas, la lógica difusa tiene un enfoque simple y flexible que puede ser implementado en las cuencas hidrográficas donde existe información hidrológica disponible adecuada y no lo suficientemente buena para su uso en un modelo más sofisticado. En este trabajo se evalúa el potencial de aproximación lógica difusa para la predicción de crecidas

en tiempo real, utilizando el Mamdani “sistema de inferencia difuso mínimo tipo función de implicación” para la aplicación del modelo en la cuenca del río Kelantan en Malasia. Los modelos desarrollados se probaron para la predicción de los niveles de agua río abajo de las estaciones Guillemard y Kuala Krai, utilizando los niveles de agua por hora telemétricos aguas arriba de las estaciones Dabong y Tualang, (Pradeep y Lahat, 2014).

3.1.6 Una introducción a la lógica difusa - an introduction to the fuzzy logic

El artículo “tiene como alcance realizar una revisión general sobre el tema de la lógica difusa y presentar un caso de aplicación que permita comparar este enfoque con el de la lógica binaria. En el análisis espacial con superposición booleana todos los criterios se reducen a variable lógicas de viabilidad (Si/No), a las que se le aplican operadores lógicos como la intersección y la unión. En contraposición a esto, la teoría de los conjuntos difusos ofrece otra manera para representar y manejar la incertidumbre presente en el mundo real continuo, ya que provee un marco de referencia para procesar el conocimiento lingüístico y sus correspondientes datos numéricos a través de funciones de pertenencia. Correa M., N. A. (2010).

3.2 ESTUDIOS REALIZADOS EN INUNDACIONES MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ÁLGEBRA DE MAPAS

3.2.1 Evaluación y zonificación de riesgos y dimensionamiento de procesos erosivos de la jurisdicción de CORNARE.

Éste estudio tuvo por objetivo zonificar el riesgo por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales en los 26 municipios de la jurisdicción de CORNARE usando álgebra de mapas. La evaluación se realiza a través de análisis y revisión de información científica disponible como mapas, informes y estudios anteriores, con el fin de conocer las probables zonas y la intensidad de los procesos erosivos, (Henao, 2012).

3.2.2 Propuesta metodológica para la ubicación de áreas de disposición de residuos sólidos urbanos

Se propone una metodología encaminada a la localización de sitios ambientalmente seguros para la disposición de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), que deberán cumplir con todos los requerimientos indicados en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, como son: afectaciones a obras civiles (autopistas, aeropuertos, oleoductos, gasoductos, torres de energía eléctrica, áreas naturales protegidas), distancias mínimas a poblaciones, cuerpos de agua, zonas de inundación, fallas geológicas, taludes inestables e hidrogeología. Esta investigación se realizó en la región del Bajío Michoacano, comprendiendo los municipios de Zináparo, Numarán, Penjamillo, Ecuandureo, Churintzio y La Piedad. Los factores considerados fueron: vulnerabilidad acuífera, uso actual del

suelo, densidad de fracturamiento, infraestructura urbana e industrial y áreas de inundación. El análisis de cada uno de los factores anteriores se realizó en áreas de 0.25 km²; a cada factor se le asignó un rango y peso, integrándolos posteriormente en rangos normalizados en escala de 0-1. Los pesos varían de 1 a 5 y representan la influencia en el impacto ambiental y social del factor considerado, siendo el valor de 5, el de mayor relevancia y 1 el de menor impacto. El proceso de la información implicó álgebra de mapas para obtener como producto final un mapa paramétrico denominado Índice de Riesgo Ambiental (IRA). Los valores obtenidos estuvieron en el rango de 16-160, proponiéndose con ello, seis niveles de riesgo ambiental que son: extremadamente alto, Muy alto, Alto, Medio, Bajo y Muy bajo, (Silvia, Estrada, Ochoa y Cruz, 2006).

3.2.3 Ministerio de ciencia y tecnología. Instituto nacional de investigación espacial

El término "álgebra de mapas" se utiliza en los SIG para denotar el conjunto de operadores que manipulan los campos geográficos (imágenes, mapas temáticos y modelos numéricos del terreno). En éste trabajo se analizan los diferentes aspectos relacionados con el diseño, la implementación y el uso de mapas operadores del álgebra. La estrecha coherencia entre los resultados obtenidos por esta técnica y los producidos anteriormente con el uso de la interpretación visual reveló que el álgebra de mapas es potencial como herramienta de apoyo a la detección de los estudios SIG y remoto, (Faria, 1997).

4 APLICACIÓN PARA LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MOLINO

4.1 LOCALIZACIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO MOLINO

El río Molino nace en la vereda de Santa Helena, en las coordenadas 1063100 Este, 752900 Norte y desemboca en el río Cauca en las coordenadas 1050335 Este y 763668 Norte.

La sub-cuenca del río Molino cuenta con un área de 67.87 Km², donde incluye diferentes situaciones socioeconómicas y biofísicas que se encuentran reflejadas en la división político administrativa actual, de la cual existe claridad hasta el nivel de corregimientos. La localización se puede observar en la Figura 3, (Acueducto y Alcantarillado de Popayán, 2014).

Figura 3. Localización de la sub cuenca del río Molino.



Fuente: propia

4.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La recolección de la información se hizo desde dos puntos de vista: aspectos conceptuales y estado del arte tal como quedaron consignados anteriormente y los datos básicos necesarios para hacer las aplicaciones.

4.2.1 Datos básicos

La información secundaria requerida para la presente propuesta de investigación, es obtenida del proyecto "Estudio Preliminar de Riesgos (Afectación y Daños) Asociados a Fenómenos de Inundación Lenta y Súbita (Avenida Torrencial) en la Zona Urbana y Rural del Municipio de Popayán" mediante Convenio 20131800008927, entre la Universidad del Cauca y la Alcaldía Municipal de Popayán (Convenio 20131800008927, 2015). Además, se recopiló información en la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S. A. E.S.P.

Se utilizó un modelo digital de elevaciones DEM con una resolución de 5 m suministrado por la alcaldía de Popayán, oficina de planeación.

Además, se hizo uso de información suministrada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P. a través de la fundación pro Cuenca río Piedras, bajo la dirección de la Ingeniera Liliana Recaman y con el apoyo del Ingeniero Víctor Hugo Zúñiga, que maneja la parte hidrológica.

La recolección de la información básica y su revisión se llevaron a cabo en conjunto con los estudiantes del programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad del Cauca Olga Lucia Tacha y Luis Felipe Quiñones, investigadores del proyecto Análisis, Comparación y Aplicación de Modelación de Crecientes en 1 D, con Flujo Permanente y No Permanente. La Tabla 1. Relaciona las estaciones administradas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. E.S.P. para la sub cuenca del río Molino.

Tabla 1. Estaciones acueducto de Popayán sobre la sub cuenca del río Molino.

INFORMACION ACUEDUCTO- DATOS COORDENADAS GEOGRÁFICAS ESTACIONES MOLINO					
VEREDA	ESTACIÓN	SUB CUENCA	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN (MSNM)
El Hogar	Helena Mapayo	Río Molino	2°26'15,90"	76°33'53,30"	2047
El Hogar	Marcelina Lame	Río Molino	2°26'1,60"	76°33'27,61"	2057
Santa Helena	Narcisa Bonilla- ARRAYANES	Río Molino	2°23'38,40"	76°31'46,10"	2308
Santa Helena	Carlos A. León	Río Molino	2°22'33,10"	76°31'31,01"	2525
Santa Helena	Saúl Bonilla	Río Molino	2°23'2,30"	76°30'50,50"	2539
	Bocatoma Molino	Río Molino	2°27'31,17"	76°27'21,52"	1834
Santa Bárbara	Santa Bárbara	Río Molino	2°27'11,35"	76°28'22,11"	1907
Santa Helena	EL UMUY	Río Molino	2°23'24,10"	76°30'38,10"	2525

Fuente: Acueducto de Popayán, fundación pro Cuenca Río Piedras

La información del IDEAM, fue adquirida por la Universidad del Cauca para el Convenio 20131800008927 –AVR-, y consistió en datos de lluvia, curva duración, intensidad y frecuencia para períodos de retorno hasta de 100 años, así como tablas con valores totales mensuales de precipitación y valores máximos mensuales de precipitación en 24 horas, para la estación del Aeropuerto Guillermo León Valencia. Además, se tuvo información de la estación que administra la Facultad de Ingeniería Civil -FIC- de la Universidad del Cauca.

Se contó también con el mapa de cobertura vegetal (Anexo digital C) generado en el Plan de Ordenación y Manejo de la sub cuenca río Molino - Quebrada Pubús (2006); y mapa geológico (Anexo digital E),

4.3 SELECCIÓN Y DEPURACIÓN DE INFORMACIÓN

Se realizó una depuración de la información recolectada: recorte del DEM para considerar solo la cuenca del río Molino; conversión de coordenadas de las estaciones meteorológicas de geográficas a planas en el sistema Magna Sirgas; análisis de datos de precipitaciones máximas en 24 horas para el año 2013, en que se presentó un evento mayor de inundación (Anexo digital D). Además, se utilizó el mapa cobertura vegetal del POT, (2002); y mapa geológico.

4.4 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Como se explicó anteriormente, se determinó usar metodologías como son la lógica difusa y el álgebra de mapas, para analizar zonas susceptibles a inundaciones, las cuales se apoyan en herramientas ArcGIS.

Para ésto, se hizo necesaria la utilización de herramientas computacionales como ArcGIS 10 en su versión de prueba y su aplicación HEC-GeoHMS 10 y el Magna Sirgas Pro 3 Beta para cambio de coordenadas. El HEC-GeoHMS fue adquirido mediante descarga de la página del cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos de América <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/>.

La conversión de coordenadas se realizó mediante la aplicación gratuita Magna Sirgas Pro 3 Beta, la cual se puede descargar libremente de la página del IGAC.

El aplicativo Magna Sirgas Pro 3.0 se refiere a la colección de archivos distribuidos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), agrupados bajo el nombre Magna Sirgas Pro 3.0 Beta. Las coordenadas se deben ingresar en la ventana de cálculo de punto individual. Esta ventana permite realizar los procesos de conversión o transformación de coordenadas entre los sistemas de referencia Datum Bogotá y MAGNA-SIRGAS (GRS80) para un punto ingresado (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2010).

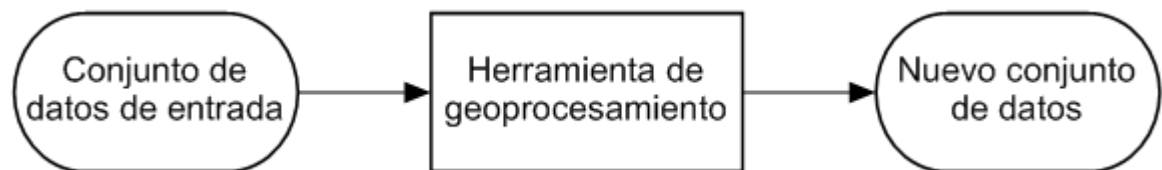
4.5 GEOPROCESAMIENTO Y SUPERPOSICIÓN DE REPRESENTACIONES DIFUSAS

El geoprocésamiento permite automatizar las tareas SIG, realizar análisis y modelado espacial. Casi todos los usos de SIG incluyen la repetición del trabajo y esto crea la necesidad de contar con métodos para automatizar, documentar y compartir procedimientos de varios pasos conocidos como flujos de trabajo.

El geoprocésamiento admite la automatización de los flujos de trabajo al proporcionar un amplio conjunto de instrumentos y un mecanismo para combinar una serie de herramientas en una secuencia de operaciones mediante modelos y secuencias de comandos.

Una herramienta de geoprocésamiento típica realiza una operación en un dataset de ArcGIS (datos de entrada como una clase de entidad, un ráster o una tabla) y produce un nuevo dataset como el resultado de la herramienta (nuevo conjunto de datos) tal como se ve en la Figura 4 que ilustra el geoprocésamiento. Cada herramienta de geoprocésamiento realiza una operación pequeña pero esencial en los datos geográficos, tal como proyectar un dataset de una proyección de mapa a otra, agregar un campo a una tabla o crear una zona de influencia alrededor de las entidades. ArcGIS incluye cientos de herramientas de Geoprocésamiento (ESRI, 2015).

Figura 4. Geoprocésamiento.



Fuente: ESRI

La lógica difusa es una herramienta que proporciona una manera simple de obtener una conclusión a partir de información de entrada vaga, ambigua, imprecisa, con ruido o incompleta. Esta herramienta está basada en proposiciones que no cumplen con la ley de la media excluida de la lógica clásica, es decir una proposición difusa no necesariamente es falsa o completamente verdadera sino que puede tener valores intermedios.

4.5.1 Clasificación de datos y lógica difusa

Para describir u ordenar fenómenos, por lo general, se deben caracterizar en clases. En los conjuntos nítidos, la pertenencia es binaria y el fenómeno está dentro o fuera de la clase, los límites de la clase deben estar bien definidos. En los conjuntos difusos, debido a la imprecisión del pensamiento, las reglas ambiguas de caracterización, la vaguedad y la ambivalencia, los límites entre clases no son siempre claros.

4.5.2 Pertenencia difusa

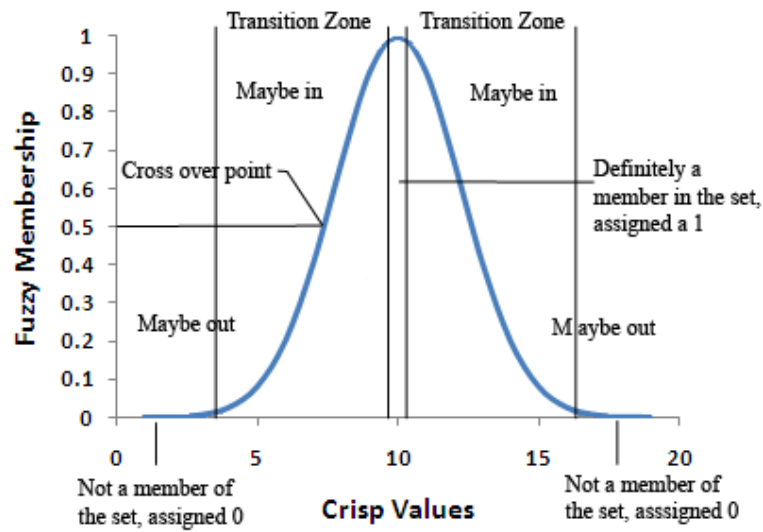
El proceso de fusificación es característico de la imprecisión de las clases en fenómenos que no poseen límites bien definidos.

La fusificación convierte los valores originales del fenómeno y les da la posibilidad de que pertenezcan a un conjunto definido. El conjunto definido puede ser adecuado, estar dentro de una distancia favorable o tener la posibilidad de buscar un mineral especificado. Los valores originales del fenómeno se reclasifican en este proceso continuo de pertenencia a través de funciones de pertenencia difusa predefinidas o a través de cualquier otra técnica de reclasificación.

En el proceso de fusificación, se define la pertenencia al conjunto mediante números binarios. A cada valor del fenómeno que se encuentre más cerca del concepto de la definición del conjunto se le asignará un valor de 1. A aquellos valores que definitivamente no forman parte del conjunto se les asigna un valor de 0. Los valores que se encuentran entre los dos extremos caen en la zona de transición del conjunto, el límite. A medida que los valores se alejan del valor ideal o del centro del conjunto, se les asigna un valor decreciente en la escala continua de 1 a 0. La Figura 5. Representa la función de membresía o de pertenencia difusa. A medida que los valores asignados disminuyen, el valor original del fenómeno tiene menos posibilidad de pertenecer a ese conjunto.

El valor de fusificación de 0.5 es el punto de cruce. Todo valor difuso mayor que 0.5 implica que el valor original del fenómeno puede pertenecer al conjunto. Cuando los valores de fusificación son menores que 0.5, es menos probable que el valor original del fenómeno pertenezca al conjunto; es probable que los valores no formen parte del conjunto.

Figura 5 Diagrama de la función de pertenencia difusa.

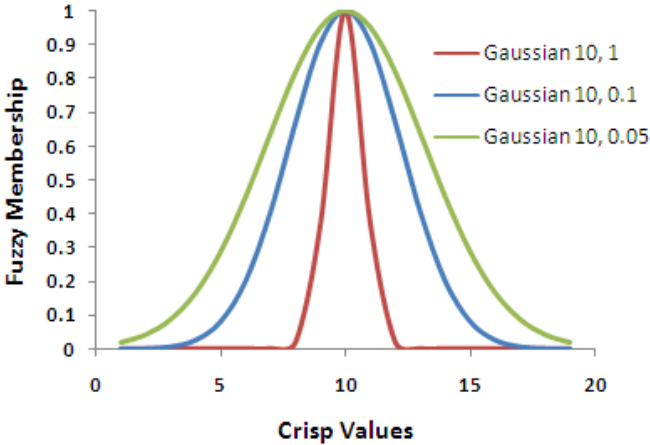
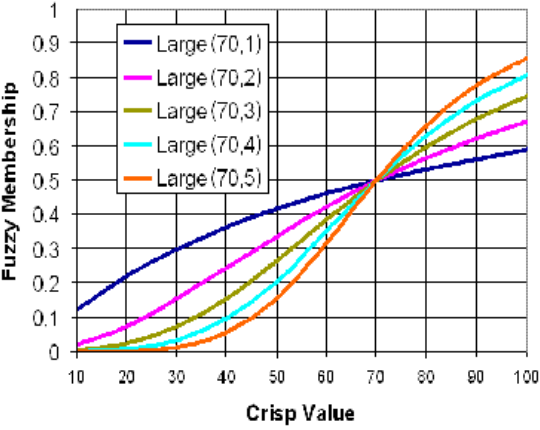


Fuente: ESRI

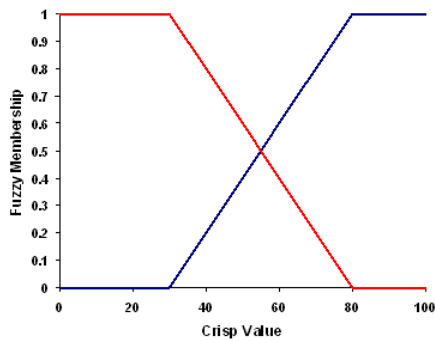
4.5.3 Tipos de pertenencia difusa

A continuación, en la Tabla 2 se presenta cada una de las siete funciones de pertenencia difusa: Gaussiana difusa, Alta difusa, Lineal difusa, Alta difusa ME, Baja difusa ME, Cercana difusa, Baja difusa.

Tabla 2. Tipos de pertenencia.

Tipo de pertenencia	Características
<p>Gaussiana difusa (Fuzzy Gaussian)</p>  <p>Fuente: ESRI</p>	<p>Transforma los valores originales en una distribución normal. El punto medio de la distribución normal determina la definición ideal para el conjunto, a la que se asigna un 1; la pertenencia del resto de los valores de entrada disminuye a medida que se alejan del punto medio, tanto en la dirección positiva como en la negativa. La pertenencia de los valores de entrada disminuye desde el punto medio hasta que alcanzan un punto donde los valores se alejan demasiado de la definición ideal y definitivamente dejan de pertenecer al conjunto y, por lo tanto, se les asignan valores cero.</p>
<p>Alta difusa (Fuzzy Large)</p>  <p>Fuente: ESRI</p>	<p>Se utiliza cuando los valores de entrada más altos tienen más posibilidad de pertenecer al conjunto. El punto medio definido identifica el punto de cruce (al que se asigna una pertenencia de 0.5), donde los valores mayores que el punto medio tienen más posibilidad de pertenecer al conjunto y los valores por debajo del punto medio tienen una posibilidad de pertenencia decreciente</p>

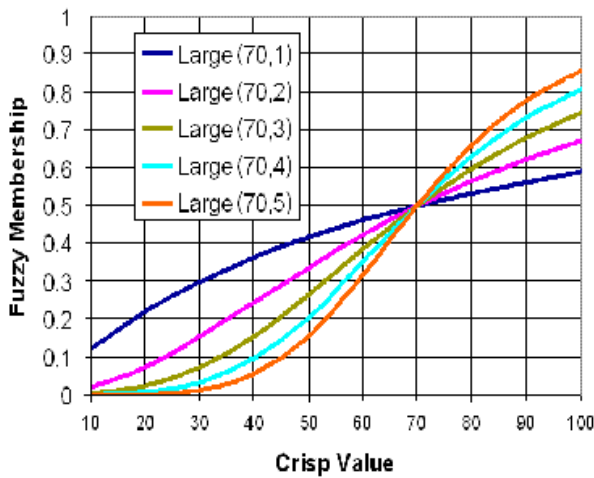
Lineal difusa (Fuzzy Linear)



Fuente: ESRI

Aplica una función lineal entre los valores mínimos y máximos especificados por el usuario. A todo lo que esté por debajo del mínimo se asignará un 0 (definitivamente no pertenece) y a todo lo que esté por encima del máximo, un 1 (definitivamente pertenece).

Alta difusa ME (Fuzzy MSLarge)

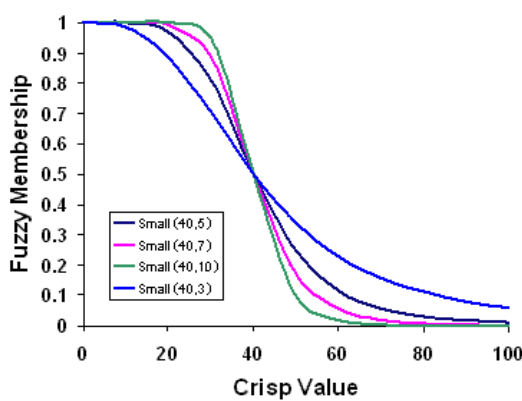


Fuente: ESRI

Similar a la función alta difusa, excepto que está basada en una desviación media y estándar.

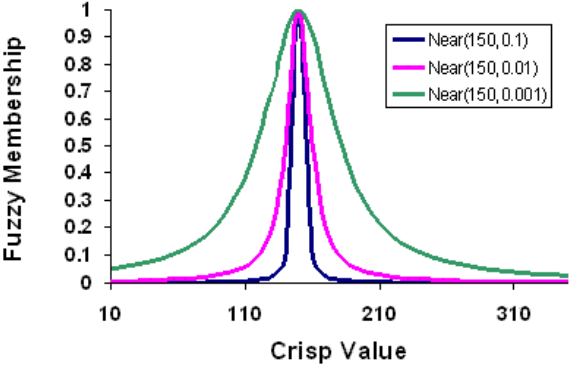
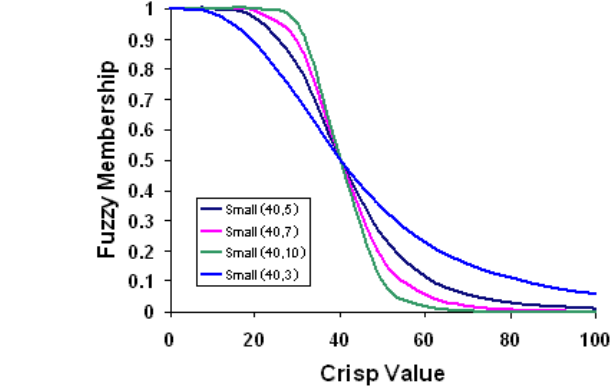
La función Alta difusa ME puede ser más pertinente si los valores muy altos tienen mayor posibilidad de pertenecer al conjunto.

Baja Difusa ME (Fuzzy MSSmall)



Similar a la función baja difusa, excepto que está basada en una desviación media y estándar.

La función Baja difusa ME puede ser más pertinente si los valores más bajos tienen mayor posibilidad de pertenecer al conjunto.

<p>Cercana difusa (Fuzzy Near)</p>  <p>Fuente: ESRI</p>	<p>Las funciones cercana difusa y Gaussiana difusa pueden ser similares según los parámetros especificados. Por lo general la cercana difusa disminuye más rápido y tiene una expansión menor que la función Gaussiana difusa.</p>
<p>Baja difusa (Fuzzy Small)</p>  <p>Fuente: ESRI</p>	<p>Se utiliza cuando los valores de entrada más bajos tienen más posibilidad de pertenecer al conjunto. El punto medio definido identifica el punto de cruce (al que se asigna una pertenencia de 0.5), donde los valores mayores que el punto medio tienen una posibilidad menor de pertenecer al conjunto y los valores por debajo del punto medio tienen una posibilidad mayor de pertenencia.</p>

4.5.4 Superposición difusa

La lógica difusa se puede utilizar como una técnica de análisis de superposición para resolver aplicaciones tradicionales como la selección de sitios y los modelos de adecuación.

La premisa básica detrás de la lógica difusa es que existen imprecisiones en los datos espaciales de atributos y en la geometría de los datos espaciales. La lógica difusa proporciona técnicas para solucionar los dos tipos de imprecisiones, pero en cuanto al análisis de superposición, se enfoca en las imprecisiones de los datos de atributos. Las dos áreas principales donde surgen las imprecisiones de los datos de atributos son la definición de clases y la medición del fenómeno. Ambas fuentes de imprecisiones, especialmente la definición de clases, pueden causar una impresión al asignar celdas a clases específicas.

La definición de las clases en una clasificación y la imprecisión al asignar fenómenos a las clases pueden afectar la toma de decisiones. Las herramientas de superposición difusa ayudan a tomar decisiones acerca de estas imprecisiones. La lógica difusa se enfoca en modelar las imprecisiones de los límites de clases.

La Superposición ponderada y la Suma ponderada están basadas en conjuntos nítidos, donde cada celda se encuentra dentro o fuera de una clase. La lógica difusa trata específicamente situaciones en las que los límites entre clases no son claros. A diferencia de los conjuntos nítidos, la lógica difusa no considera si un elemento está dentro de una clase o no, sino que define la posibilidad de que el fenómeno pertenezca al conjunto (o a la clase). La lógica difusa está basada en la teoría de conjuntos, por lo tanto, se definen las posibilidades, no las probabilidades.

Para determinar las ubicaciones que mejor cumplen con todos los criterios, es decir, que tienen una gran posibilidad de pertenecer a todos los conjuntos, se utiliza la herramienta de superposición difusa en el ArcGIS. Al combinar varios criterios, la herramienta Superposición difusa explora la posibilidad de que una celda pertenezca a cada conjunto definido por los diversos criterios.

Por lo tanto, los dos pasos principales para el análisis de superposición en la lógica difusa son la fusificación, o el proceso de pertenencia difusa y el análisis de superposición difusa. Estos dos pasos son correlativos con los pasos de reclasificar/transformar y agregar/combinar, respectivamente, en el proceso de superposición general.

4.5.5 Proceso de análisis de superposición en lógica difusa

El análisis de superposición de lógica difusa sigue los siguientes pasos:

1. Definir el problema.
2. Dividir el problema en sub modelos.
3. Determinar las capas significativas.
4. Reclasificar o transformar los datos que están dentro de una capa.
5. Pesar las capas de entrada.
6. Agregar o combinar las capas.
7. Analizar los resultados obtenidos.

4.5.6 Técnicas de superposición del conjunto difuso

Las técnicas de superposición de conjuntos difusos son: And difusa, Or difusa, Producto difuso, Suma difusa y Gamma difusa, y se ven resumidas en la Tabla 3.

Tabla 3. Técnicas de superposición difusa

Técnicas de superposición	Características
AND difusa	Devuelve el valor mínimo de los conjuntos a los que pertenece la ubicación de la celda. Esta técnica es útil cuando desea identificar el mínimo denominador común para la pertenencia de todos los criterios de entrada. (ESRI, 2015).
OR difusa	Devuelve el valor máximo de los conjuntos a los que pertenece la ubicación de la celda. Esta técnica es útil cuando desea identificar los valores de pertenencia máximos para cualquiera de los criterios de entrada, (ESRI, 2015).
PRODUCTO difuso	Multiplica para cada celda, cada uno de los valores difusos para todos los criterios de entrada. El producto resultante será menor que cualquiera de las entradas y, cuando la entrada pertenece a varios conjuntos, el valor puede ser muy bajo, (ESRI, 2015).
SUMA difusa	Suma los valores difusos de cada conjunto al que pertenece la ubicación de la celda. La suma resultante es una función de combinación lineal creciente que está basada en el número de criterios introducidos en el análisis, (ESRI, 2015).
GAMMA difuso	Es un producto algebraico del producto difuso y la suma difusa, los cuales se elevan a la potencia de Gamma, (ESRI, 2015).

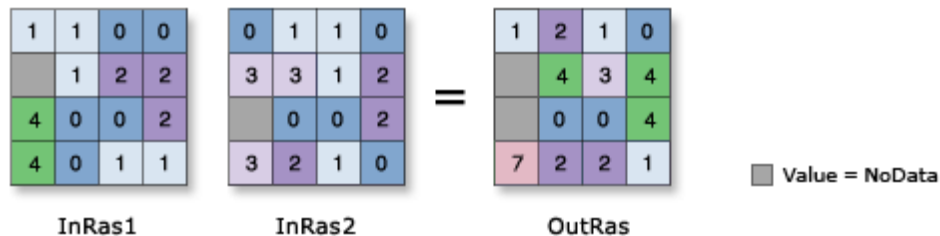
4.5.7 Análisis de superposición

Muchas veces no está claro si un elemento pertenece a una clase o no, sino que es subjetivo. En el lenguaje humano, estas imprecisiones se califican mediante modificadores, tales como: muy, levemente y moderadamente. La lógica difusa realiza el análisis de superposición en forma muy parecida al pensamiento humano natural. Las cosas no son tan claras, los límites pueden ser difusos. La lógica difusa no analiza la incertidumbre en los datos, sino que explora la imprecisión en los límites de clases.

4.6 SUMA POR ALGEBRA DE MAPAS

La interpretación del álgebra de mapas usando herramientas ArcGIS se puede entender fácilmente a partir de la Figura 6.

Figura 6. Suma por álgebra de mapas.



$$\text{OutRas} = \text{Raster}(\text{"InRas1"}) + \text{Raster}(\text{"InRas2"})$$

Fuente: ESRI

Cuando se utiliza un operador con una entrada ráster, el resultado será un ráster. Sin embargo, si todas las entradas son números, entonces el resultado es un número.

Cuando se utilizan varios operadores en una expresión, no necesariamente se ejecutan en orden de izquierda a derecha. El operador con el valor de jerarquía más alta se ejecutará primero. Puede utilizar paréntesis para controlar el orden de ejecución.

El orden de entrada no es importante para este operador.

Si los valores de entrada son enteros, los valores de salida serán enteros; de lo contrario, las salidas serán puntos flotantes.

Para esta investigación se tomaron tres calificaciones muy usadas en la práctica de estudios de amenaza por eventos naturales:

- 3: susceptibilidad a inundación alta.
- 2: susceptibilidad a inundación media.
- 1: susceptibilidad a inundación baja.

4.7 PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA DIGITAL

Debido a que el modelo digital del terreno cubría todo el Municipio de Popayán, se procedió a realizar un recorte del área de interés. De esta manera se obtuvo un DEM acorde a la necesidad de delimitar la cuenca del río Molino.

Además, fue necesario cambiar las coordenadas de las estaciones meteorológicas de geográficas a planas, para lo que se usó la aplicación Magna Sirgas pro 3 Beta. El listado de estaciones usadas se presenta en la Tabla 4 y se puede observar en el Anexo digital F.

Tabla 4. Estaciones usadas para la sub cuenca del río Molino.

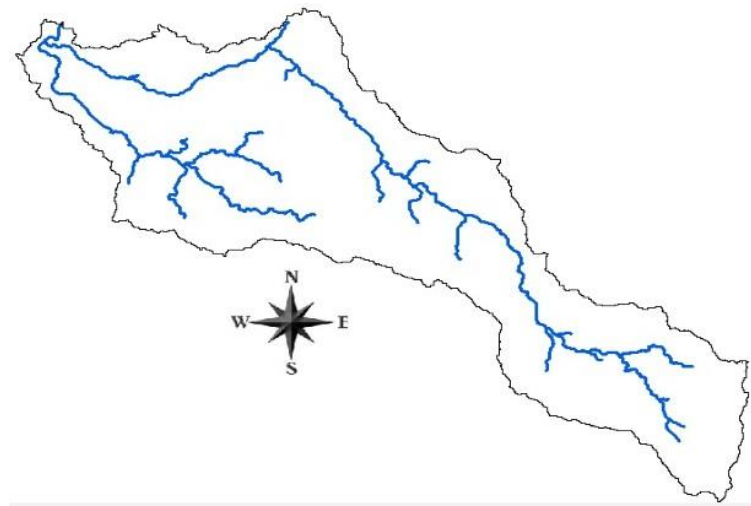
Estación	Vereda	Coordenada_Y	Coordenada_X
Saul Bonilla	Santa Helena	755419.831	1062679.885
Umuy	Santa Helena	756080.097	1063056.865
Narcisa Bonilla	Santa Helena	756522.492	1060957.558
Carlos A. León	Santa Helena	754501.495	1061419.038
Bocatoma		761616.212	1056019.941
Santa Barbara	Santa Barbara	760289.760	1056575.140
Helena Mapayo	El Hogar	761293.274	1051447.234
Marcelina Lame	El Hogar	760888.898	1057799.491
Estacion Fic	Popayán	762368.124	1053409.013
Aeropuerto	Popayán	762967.468	1051842.113

4.8 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

4.8.1 Representaciones temáticas

A partir del DEM se obtienen la red de drenajes y delimitación de la cuenca. En la Figura 7, se observa el resultado del procesamiento basado en el módulo la herramienta HEC-GeoHMS, destacándose el curso del río Molino y el de afluente principal el río Ejido (Diez, 2014).

Figura 7. Red hídrica y divisoria de la sub cuenca río Molino.



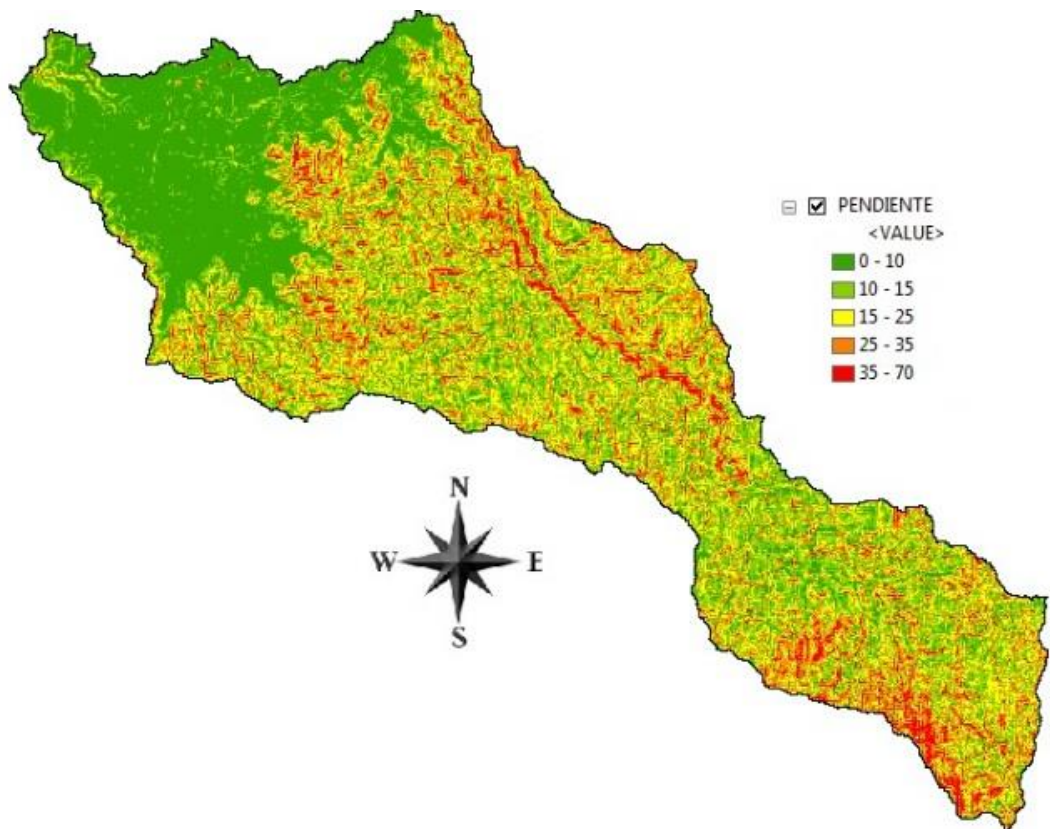
Fuente: Propia, elaborado con ArcGIS 10

Posteriormente, a partir de este resultado se generaron tres representaciones temáticas: representación ráster de pendiente, isoyetas y curvatura con ayuda de las herramientas del 3D analyst tools del ArcGIS; y acumulación de flujo que se obtuvo a partir de HEC-GeoHMS. También se cuenta con el mapa de cobertura vegetal proporcionado por la alcaldía de Popayán y la cobertura geológica, resultado del Convenio 20131800008927 ALCALDÍA-UNICAUCA.

4.8.1.1 Representación ráster de pendientes

Esta representación fue generada por medio de la herramienta de Slope, la cual da como resultado valores de pendientes en grados sobre toda la cuenca, en donde las tonalidades verdes representan zonas de pendiente baja y las tonalidades rojas representan zonas de alta pendiente, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Representación ráster de pendientes.

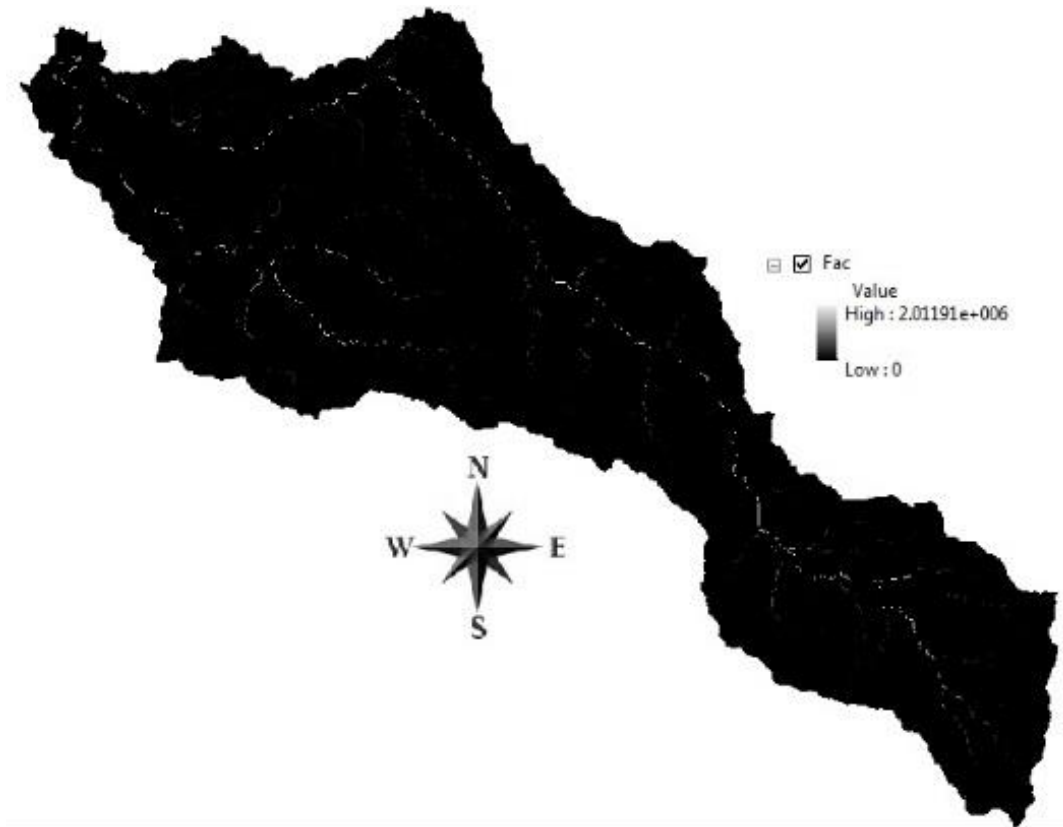


Fuente: propia

4.8.1.2 Representación ráster de acumulación de flujo

La representación ráster de acumulación de flujo permite obtener el caudal que puede recibir una celda en función de su recorrido aguas arriba, (Diez, 2014). Esta representación ráster de acumulación de flujo representada en la Figura 9 fue descartada por no ser representativa para el objetivo deseado, pero si para definir la red de drenaje.

Figura 9. Representación ráster de acumulación de flujo.

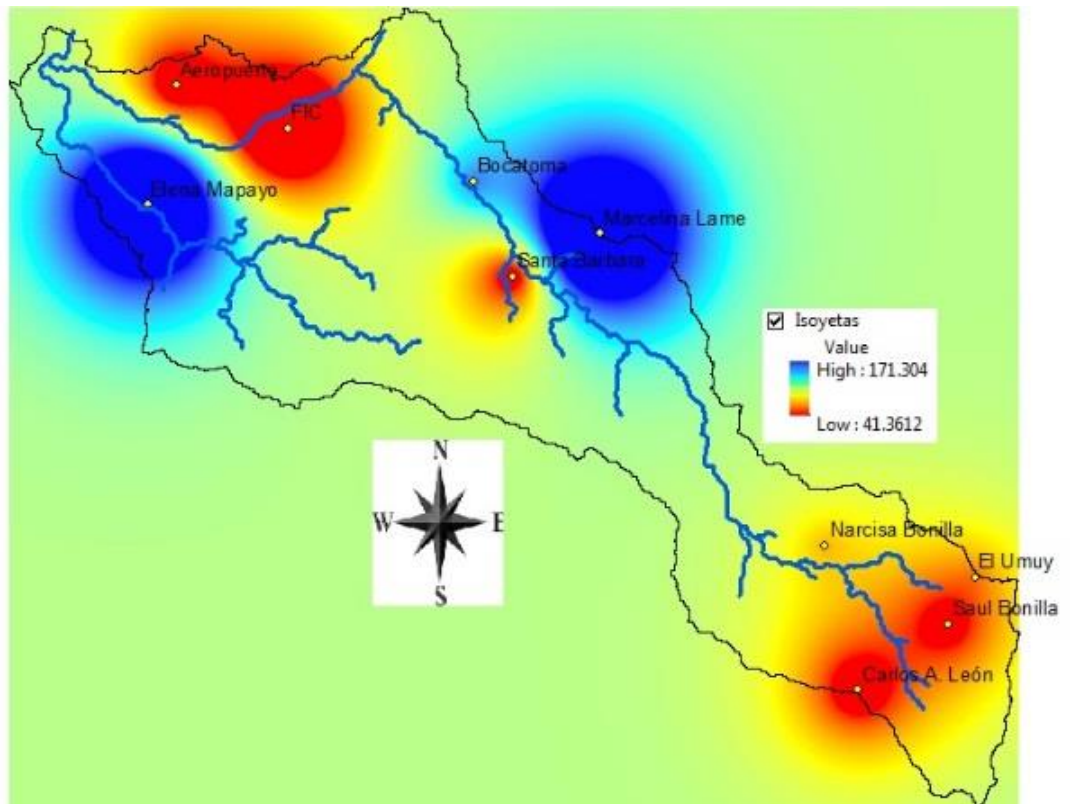


Fuente: propia

4.8.1.3 Isoyetas

Las isoyetas representan el comportamiento de las lluvias en la cuenca. Los datos para su elaboración se basaron en la precipitación máximas en 24 horas para el año 2013, arrojadas por 10 estaciones como se mostró en la Tabla 4. Este se trabajó con el método de Kriging de ArcGis 10, que permite visualizar los focos de precipitación, así como se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Isoyetas.

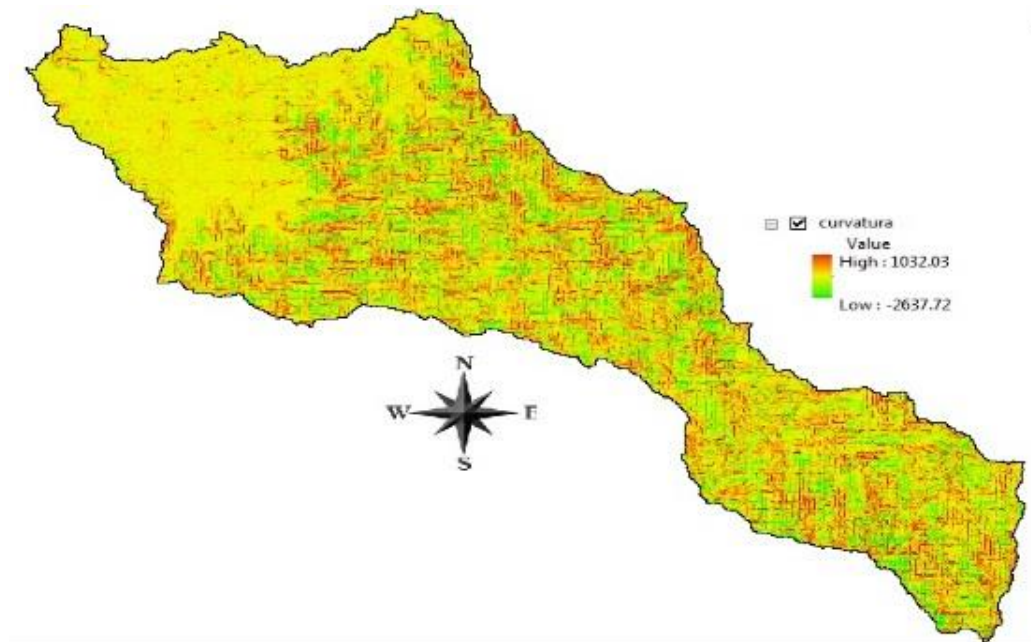


Fuente: propia

4.8.1.4 Representación ráster de curvaturas

Esta representación fue elaborada mediante la herramienta curvature que se encuentra en la caja del 3D analyst tools, sin embargo fue descartada por su difícil interpretación y poca representación de zonas de concavidad y convexidad, como se muestra en la siguiente Figura 11.

Figura 11. Representación ráster de curvaturas.



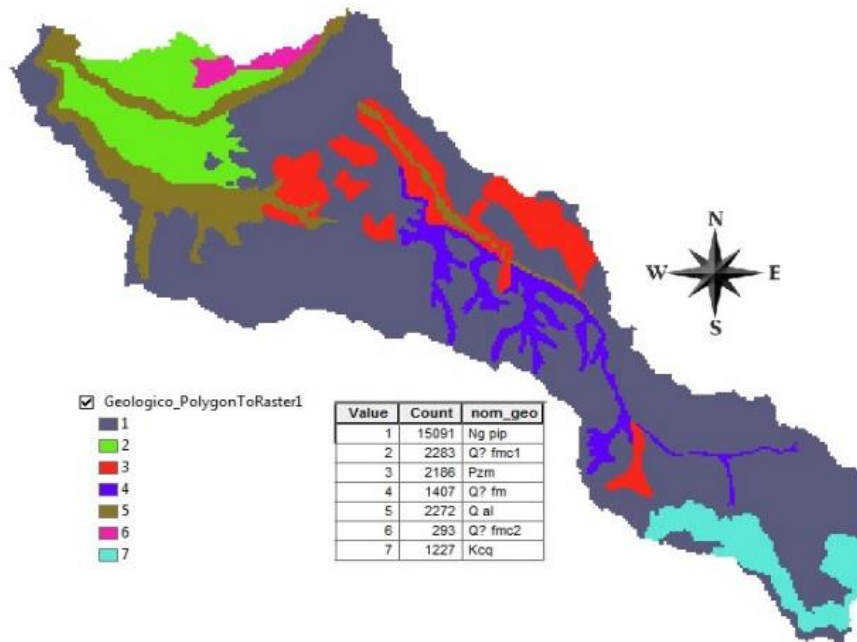
Fuente: propia

4.8.1.5 Representación ráster del mapa geológico

Extraído del mapa geológico general del Convenio 20131800008927 ALCALDÍA-UNICAUCA en formato vécotor y pasado a formato ráster, elaborado por Geol. Patricia Torres – Universidad del Cauca, Figura 12.

El mapa geológico contiene información como: secuencia de Depósitos de flujos e Ignimbritas riolíticas de Popayán (Ng pip); Depósitos de flujos de escombros volcánicos de los ríos Molino y Cauca nivel 1 (Q? fmc1); Complejo Arquía (Pzm); Depósitos de flujos de escombros volcánicos del río Molino (Q? fm); Depósito de llanura aluvial (Q al); Depósitos de flujos de escombros volcánicos de los ríos Molino y Cauca nivel 2 (Q? fmc2) y complejo Quebrada Grande (Kcq).

Figura 12. Representación ráster del mapa geológico.



Fuente: propia

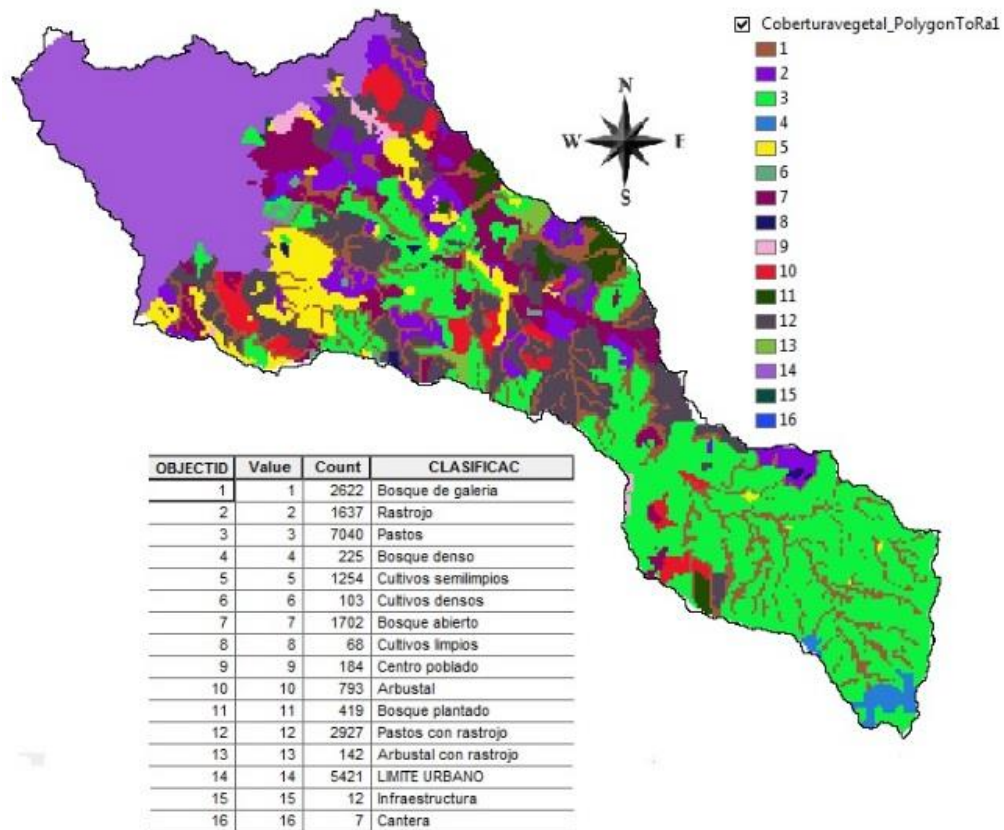
4.8.1.6 Cobertura vegetal

El procesamiento de la cobertura vegetal fue similar a la representación gráfica del mapa geológico, puesto que se encontraba en formato véctor, Figura 13. Se tomó como valor importante el dato de curva número para convertirlo a ráster, Figura 14.

La cobertura vegetal fue obtenida de la Alcaldía de Popayán a través del Convenio 20131800008927 ALCALDÍA-UNICAUCA; y originalmente fue elaborado por Geógrafo José Eduardo Fuentes, en el año 2005.

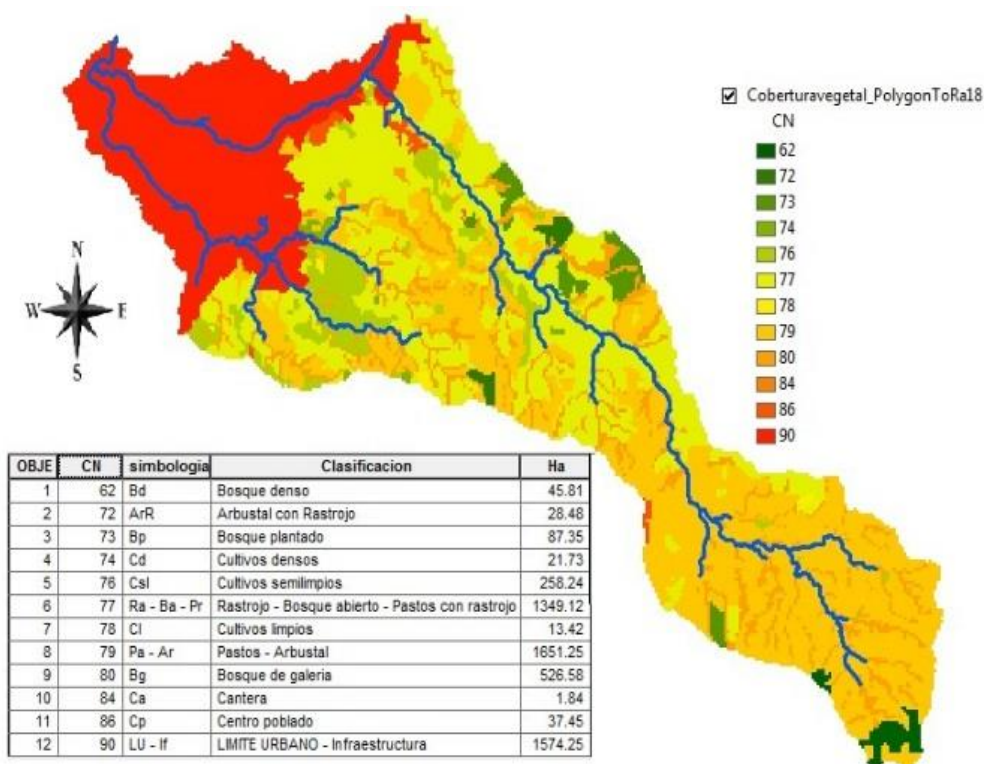
En él se puede encontrar doce tipos de coberturas: Bosque denso (Bd); Arbustal con Rastrojo (ArR); Bosque plantado (Bp); Cultivos densos (Cd); Cultivos semilimpios (Csl); Rastrojo - Bosque abierto - Pastos con rastrojo (Ra - Ba - Pr); Cultivos limpios (Cl); Pastos – Arbustal (Pa - Ar); Bosque de galería (Bg); Cantera (Ca); Centro poblado (Cp) y LÍMITE URBANO – Infraestructura (LU - lf).

Figura 13. Cobertura vegetal formato véctor.



Fuente: propia

Figura 14. Cobertura vegetal formato ráster.



Fuente: Propia

4.8.2 Representación ráster difusa

Para realizar cada uno de las representaciones difusas se analizaron diferentes escenarios, con el fin de determinar cuál era el más apropiado para la sub cuenca del río Molino. Estos escenarios se basaron en los tipos de membresía acorde a las propiedades de cada representación temática, para así obtener un resultado adecuado sobre susceptibilidad a inundación en el sistema binario, donde:

- 0 indica la no pertenencia: definitivamente no, lo que significa que sería nula la susceptibilidad a inundación
- 1 indica la pertenencia: definitivamente sí, lo que significa que sería alta la susceptibilidad a inundación.

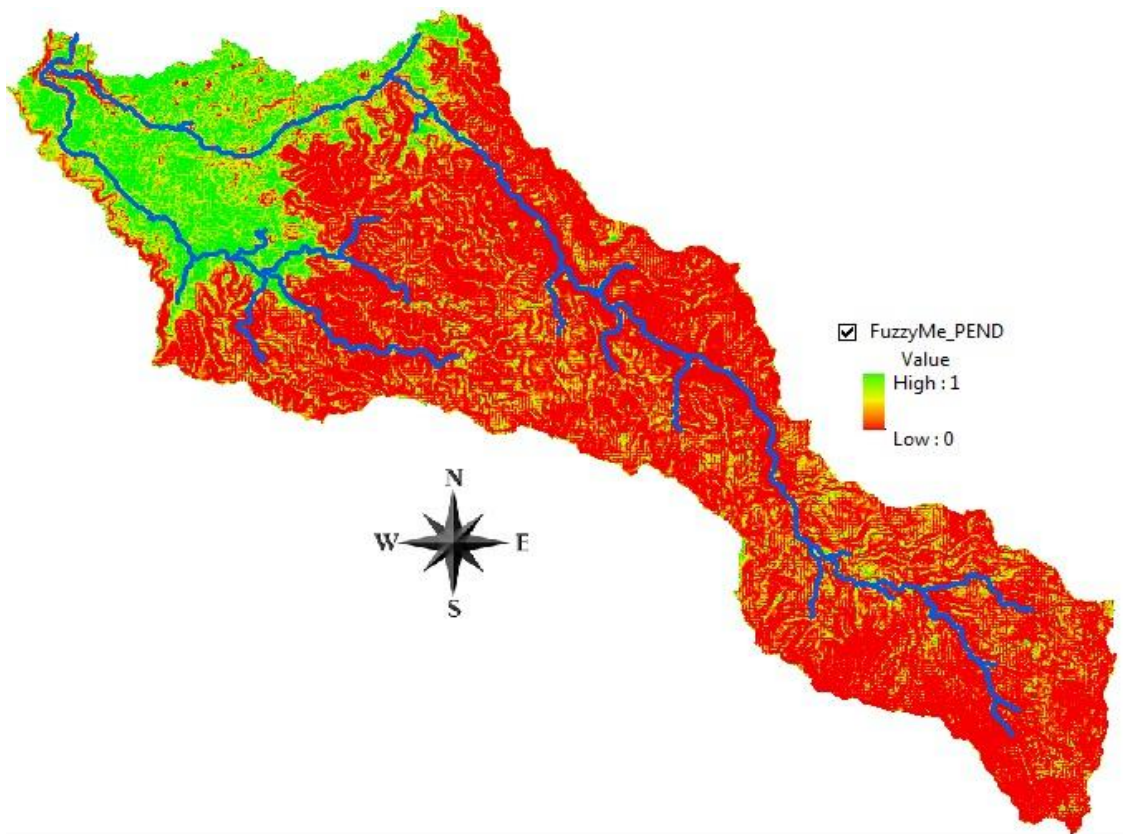
El resto de valores recibieron un cierto grado de pertenencia. Como los valores transformados representan las posibilidades de pertenencia al conjunto, en este análisis no se le asignan pesos a los datos de entrada.

Otorgando la función de membresía mediante la herramienta Overlay, se obtienen los siguientes resultados para las tres representaciones ráster de: pendiente, geológico y cobertura vegetal, y la representación en formato véctor de isoyetas.

4.8.2.1 Representación ráster de pendiente con función de membresía fuzzylinear

Debido a que la cobertura de pendientes contaba con valores entre 0 a 70 grados, se escogió la pendiente de 15° para trabajar en la función lineal, con el fin de especificar que los valores por debajo del 15° se acercarán mas a 1 (pertenece), mientras que los valores por encima del 15° serán cada vez más cercanos a 0, lo cual equivale a decir que habrá menos pertenencia al conjunto difuso, como se representa en la Figura 15.

Figura 15. Representación ráster de pendiente con función de membresía fuzzylinear.

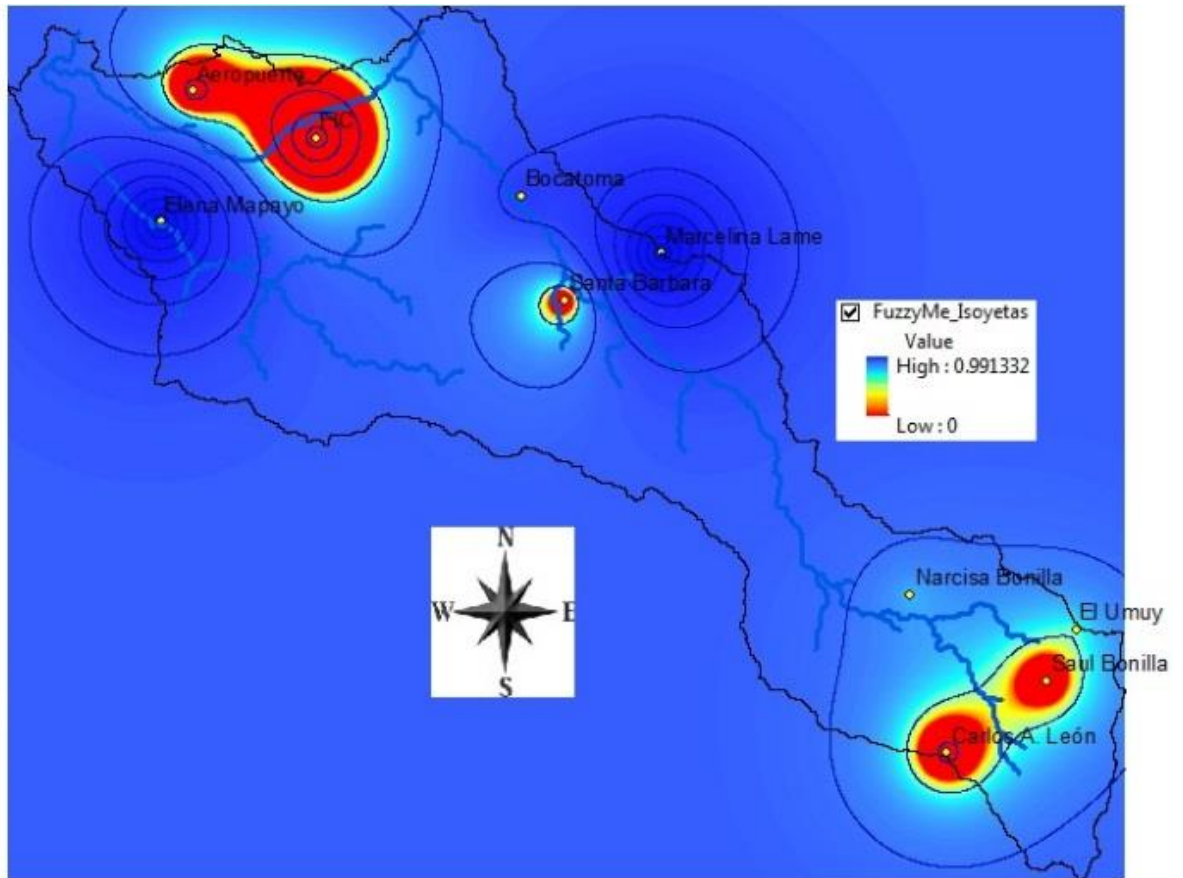


Fuente: propia

4.8.2.2 Isoyetas con función de membresía FuzzyMSLarge

Se decidió este método porque toma los valores muy altos y les da la posibilidad de pertenecer al conjunto. Por tanto, los valores de precipitación altos son los que obtendrían el valor de 1 (pertenecen) y los datos de precipitación bajos tomarían el valor de 0 (no pertenecen). En color degradado azul hasta rojo, se puede observar cómo trabajó este tipo de membresía las isoyetas, donde azul oscuro es 1 y rojo es 0, tal como se muestra en la Figura 16.

Figura 16. Isoyetas con función de membresía FuzzyMSLarge.

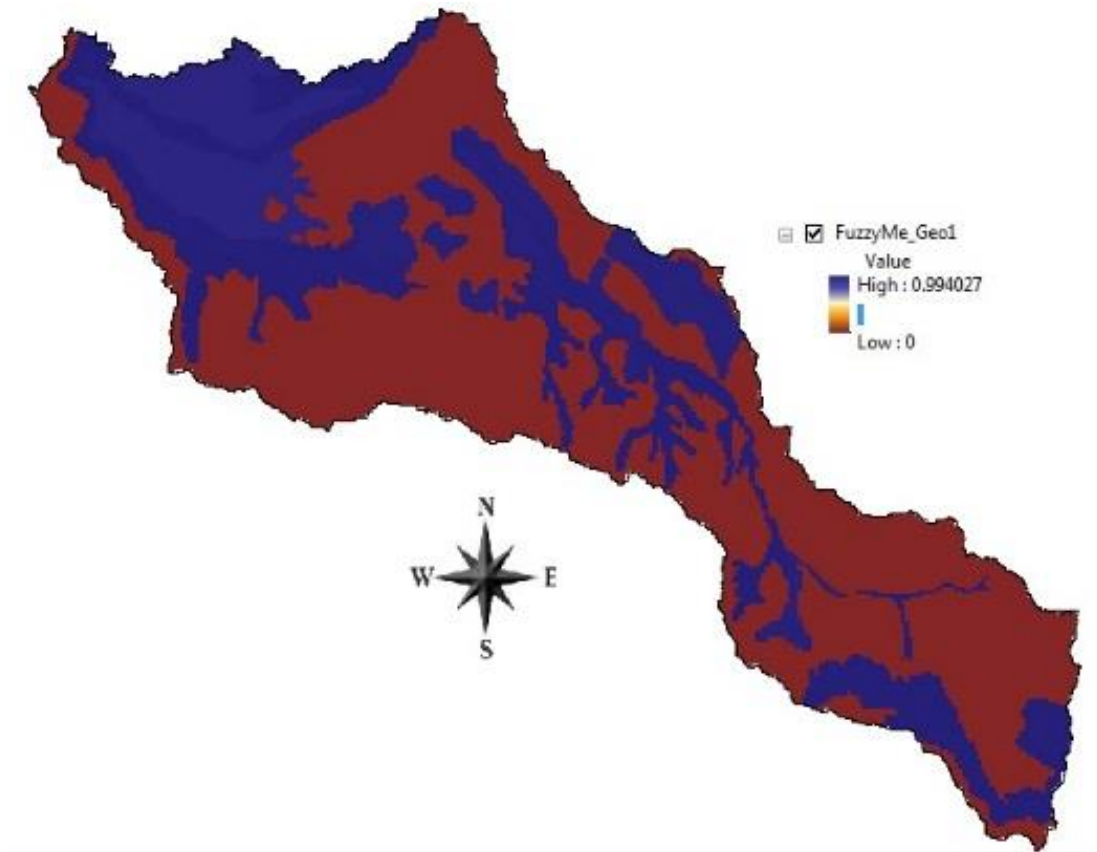


Fuente: propia

4.8.2.3 Representación ráster geológico con función de membresía FuzzyMSLarge

Para este caso se trabajó de tal manera que la mayor importancia dentro de la representación ráster geológico difusa fuera la región correspondiente a los depósitos de llanura aluvial (Qal), producto de las crecidas al producirse precipitaciones de alta intensidad. Tomando así Qal el valor de 1 (pertenencia) y los que se van alejando gradualmente de él tomarían el valor de 0 (no pertenece), tal como se representa en la Figura 17.

Figura 17. Representación ráster geológico con función de membresía FuzzyMSLarge.

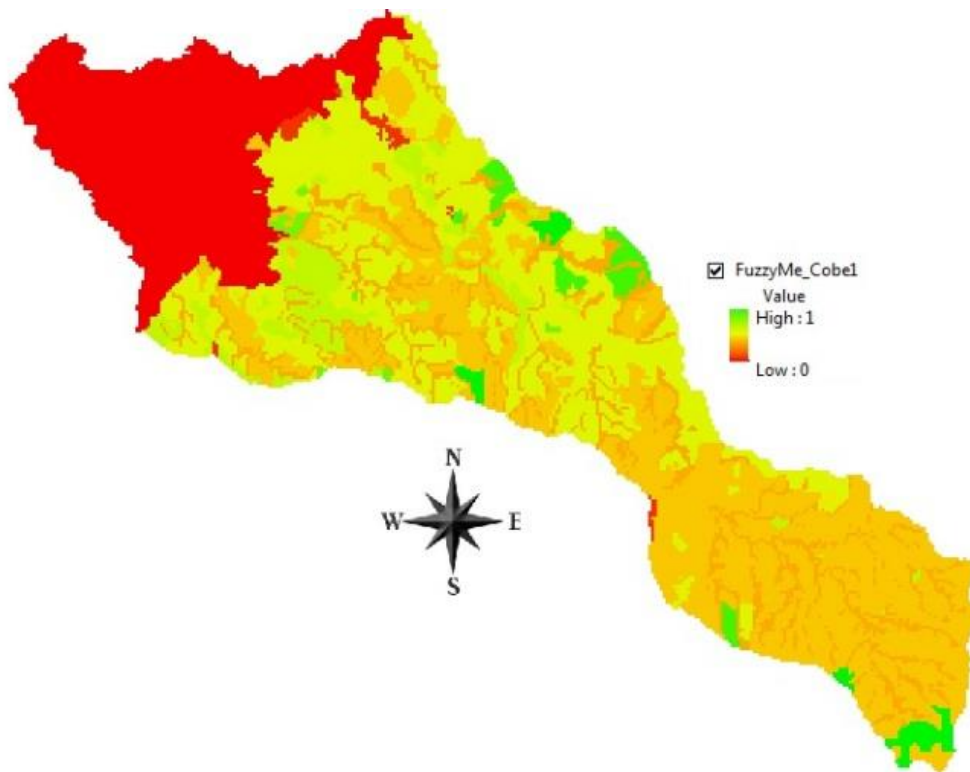


Fuente: propia

4.8.2.4 Representación ráster de cobertura vegetal con función de membresía fuzzylinear

Uno de los datos de apoyo para asignar el tipo de membresía a esta representación fueron sus valores de curva número, que indica la escorrentía, donde la zona de bosque, rastrojos y potreros tienen mayor facilidad de filtración y son los que se encuentran en la zona alta de la cuenca, produciéndose así en estos lugares grandes deslizamientos que terminan provocando represamientos del río aguas arriba e inundaciones súbitas aguas abajo de la cuenca. Las tonalidades de rojo a verde indican los niveles de pertenencia. En la ciudad toma el color rojo el valor de 0 (no pertenece), al existir baja filtración y la zona alta dependiendo de su actividad toma el color verde 1 (pertenece) por su mayor filtración de agua y menor posibilidad de escorrentía, Figura 18.

Figura 18. Representación ráster de cobertura Vegetal con función de membresía fuzzylinear.



Fuente: propia

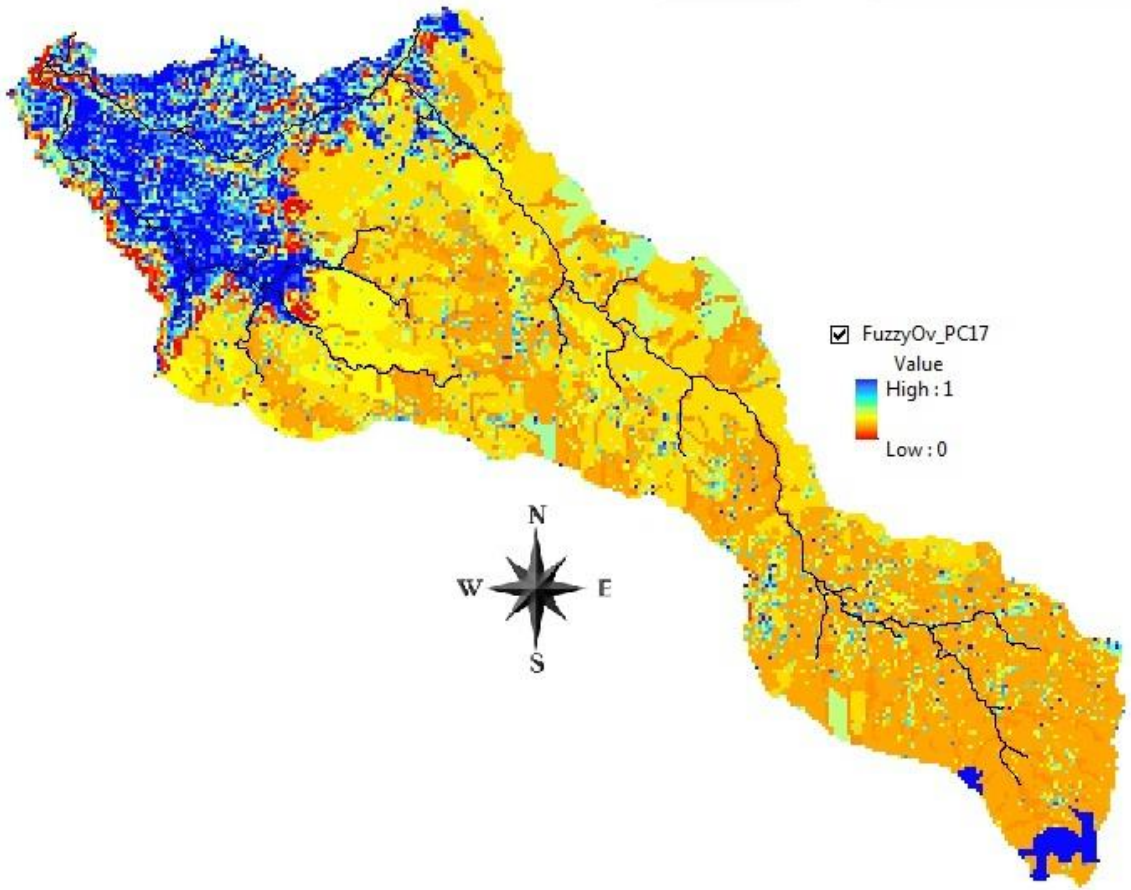
5 RESULTADOS

5.1 REPRESENTACIÓN RÁSTER AL APLICAR LÓGICA DIFUSA

Después de organizar, editar y estructurar la información, se procede a hacer una representación de posibles polígonos de inundación utilizando la superposición de capas mediante lógica difusa y álgebra de mapas, para su comparación. Para el caso de la lógica difusa fue necesario realizar diferentes escenarios de combinación de representaciones ráster difusos, haciendo una depuración de los mismos dependiendo de la coherencia que se presentara en el resultado, basándose en sectores conocidos que por su topografía son zonas de inundación; también se hizo uso de fotografías satelitales. En el anexo B y Anexo G se presentan las combinaciones realizadas para este paso. Los resultados preliminares más pertinentes obtenidos se observan de la siguiente manera:

OR: Unión de las capas difusas de pendientes y cobertura vegetal, con tipo de superposición OR. Indican las posibles zonas más planas en color azul intenso, zonas que de acuerdo a la representación ráster de pendiente, tienen los valores más bajos en pendiente y mayor valor difuso para la inundación. Esta tonalidad de color se va degradando hasta tomar el color rojo, que representa en la zona urbana las pendientes más fuertes con menos posibilidades a ser inundadas. En la zona alta de la cuenca predomina el color amarillo, que viene de la capa de cobertura vegetal, indicando las mayores filtraciones de agua según el uso del suelo. Es posible que en estas zonas se llegue a presentar deslizamientos que pueden provocar represamiento del río y posteriormente inundaciones súbitas río abajo. En el transcurso del río desde su nacimiento hasta llegar a la ciudad, también se pueden observar zonas con pequeñas manchas azules que sugieren espacios de acumulación del río debido a su baja pendiente, Figura 19.

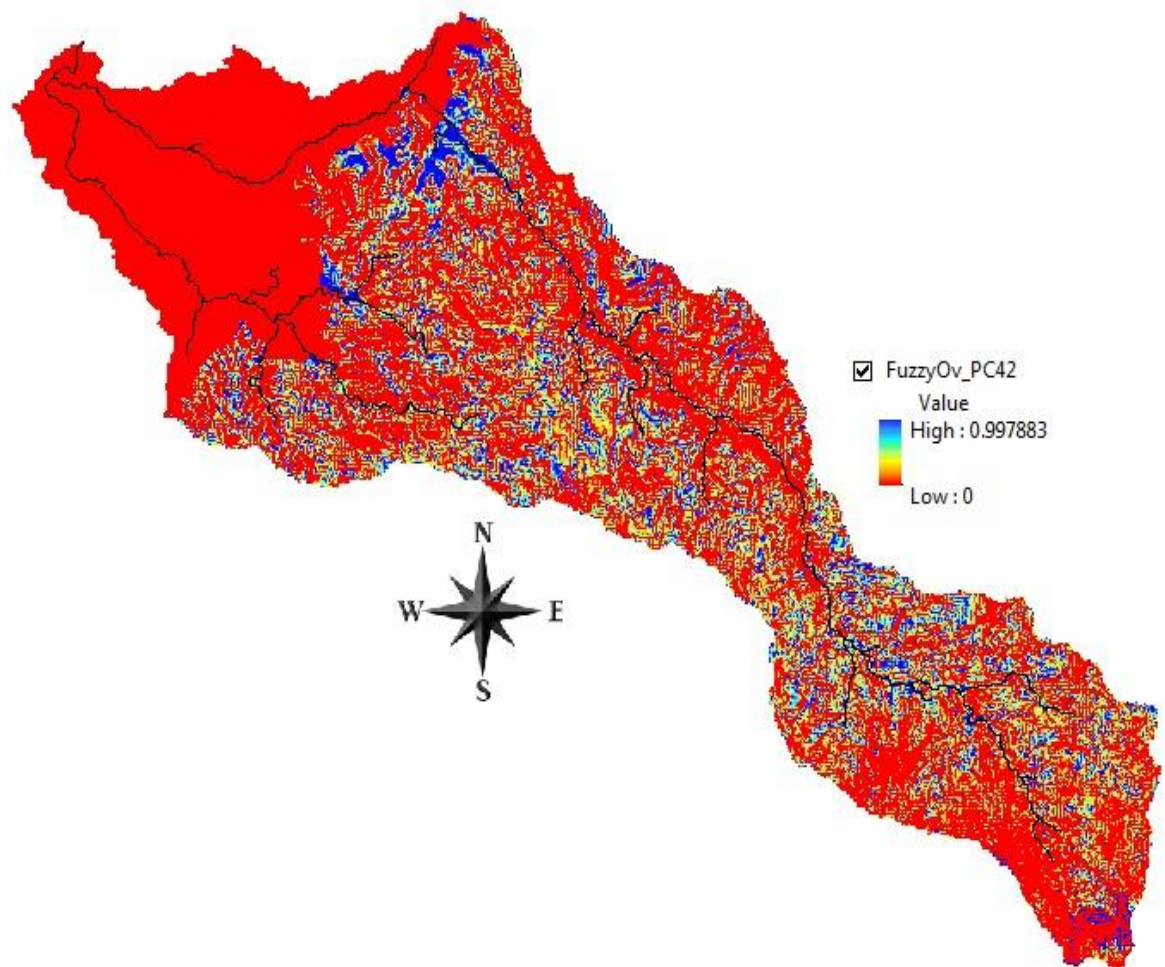
Figura 19. Superposición de pendiente y cobertura vegetal difusa mediante la función OR



Fuente: propia

GAMMA: Unión de las capas pendiente y cobertura vegetal con el tipo de superposición GAMMA 0.9 y un análisis ráster de la capa de pendientes. Este tipo de unión se presenta sin pixelado. La tonalidad de colores manejados indica que el color azul muestra susceptibilidad alta y el color rojo menor susceptibilidad. Realizando un recorrido por el río, se pueden observar lugares más detallados de inundación, Figura 20.

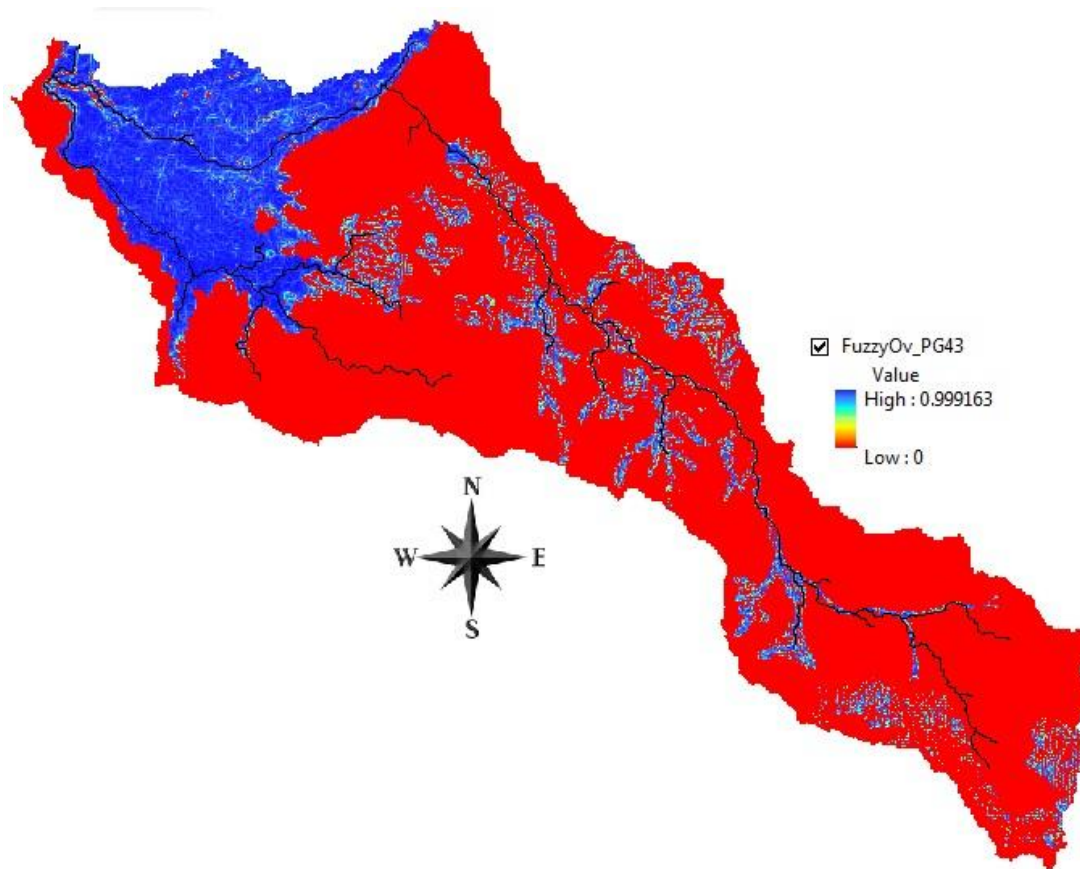
Figura 20. Superposición de pendiente y cobertura difusa mediante la función GAMMA



Fuente: propia

GAMMA: Unión de las capas pendiente y geológico con el tipo de superposición GAMMA 0.9 y un análisis de raster de la capa de pendientes. Este tipo de unión se presenta sin pixelado. Sugiere algunas manchas de inundación en la zona rural y en ciertos lugares a lo largo de la cuenca. La tonalidad de colores manejados indica que el color azul muestra susceptibilidad alta y el color rojo menor susceptibilidad, Figura 21.

Figura 21. Superposición de pendiente y geológico difusa mediante la función GAMMA

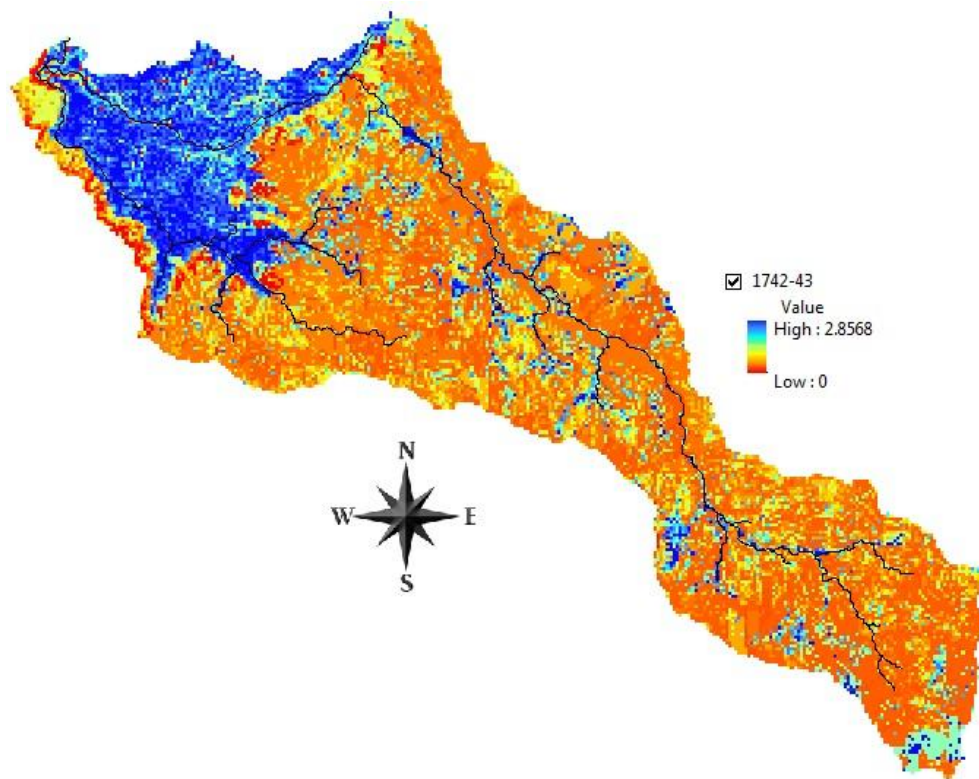


Fuente: propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, se realizó la unión de estas tres representaciones que se ven reflejadas en la Figura 22. Debido a que en la representación de tipo de superposición OR mostró mejores resultados en la zona urbana, y las dos siguientes representaciones con tipo de superposición gamma mostraron buenos resultados en la zona rural, se tomó la decisión de unificarlos

con el fin de realizar un análisis de estos tres resultados en conjunto. Se puede observar una mayor representatividad de zonas de acumulación de agua en la parte superior de la cuenca e inundaciones súbitas en la parte inferior a ella. El color degradado de azul oscuro pixelado, muestra los sectores donde se puede estar presentando mayores problemas, que el rojo que indica zona con menor susceptibilidad. El color naranja y el azul de tonalidad clara indican las filtraciones de agua de acuerdo al uso del suelo, evidenciándose en este sector, problemáticas de deslizamientos de acuerdo a su topografía.

Figura 22. Resultado de la unión de las 3 representaciones preliminares de superposición difusa. Sub cuenca río Molino.



Fuente: propia

Debido a que con la representación difusa de isoyetas no se obtuvieron resultados coherentes en todos los ensayos, se determinó no hacer uso de ella.

En todas las combinaciones realizadas para cada uno de las representaciones difusas, se encuentra que el orden en que se adiciona la representación, no influye en el resultado; por lo tanto, puede ir una combinación de representaciones de pendientes, geológico y coberturas, luego una combinación inversa a la anterior y su resultado es el mismo si se hacen las mismas especificaciones del tipo de superposición.

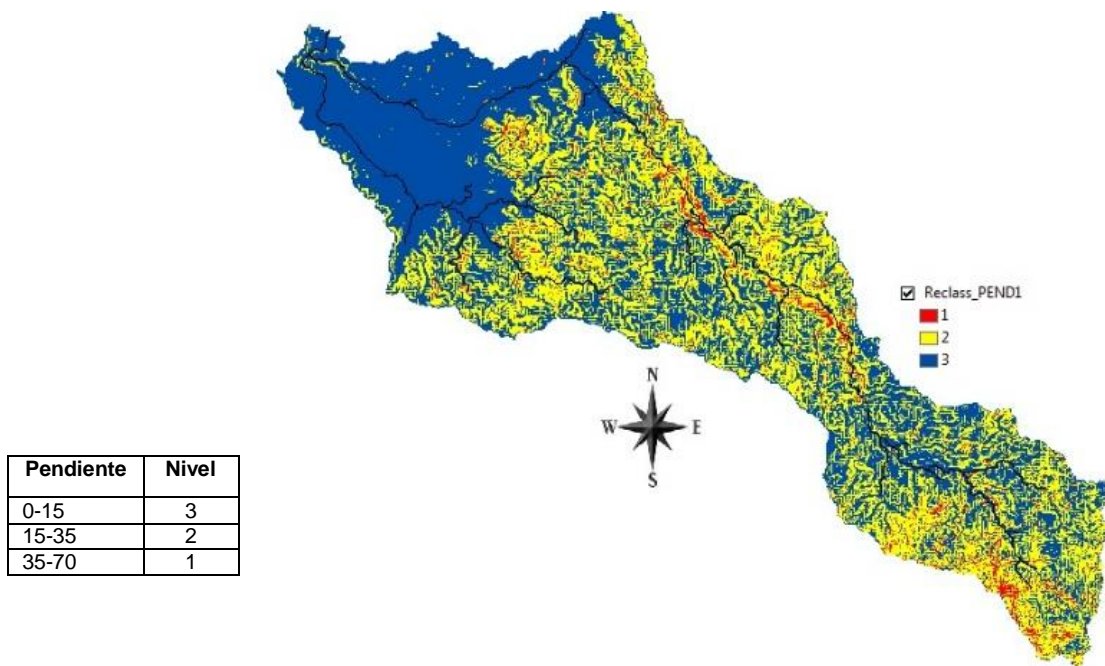
5.2 REPRESENTACIÓN RÁSTER AL APLICAR ÁLGEBRA DE MAPAS

Para el trabajo de álgebra de mapa, es necesario hacer una reclasificación de cada uno de las coberturas escogidas dando valores de 1 a 3 según la importancia de cada zona de trabajo, de la siguiente manera:

Escenario 1: La representación ráster de pendientes se reclasificó, dependiendo de su grado, donde 3 significa una importancia alta, 2 una importancia media y 1 importancia baja.

En la Figura 23, se puede observar el resultado de la reclasificación, donde las zonas con pendientes entre 0 a 15 se representaron en color azul; las pendientes entre 15 y 35 una coloración amarilla y finalmente las pendientes entre 35 a 70 un color rojo.

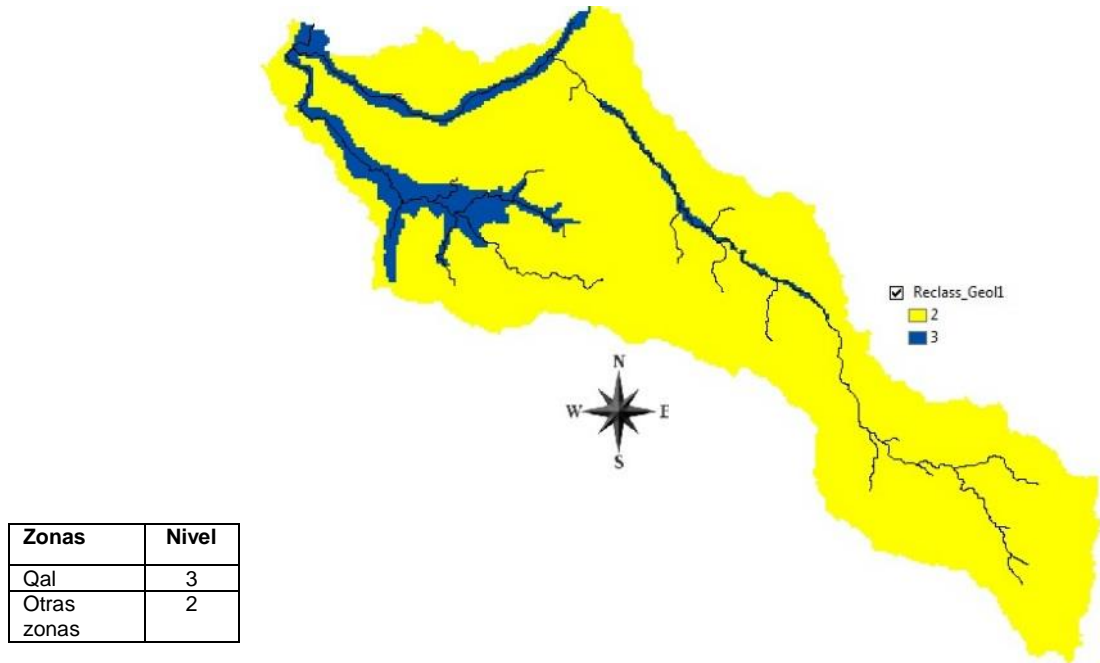
Figura 23. Reclasificación ráster de pendientes



Fuente: propia

Escenario 2: A la reclasificación de la representación geológica se le dio una mayor importancia a la zona del Qal (3) y las otras zonas (2). De esta forma se puede detallar la presencia de dos colores: el azul que corresponde a Qal y el amarillo a las otras zonas, tal como se muestra en la Figura 24.

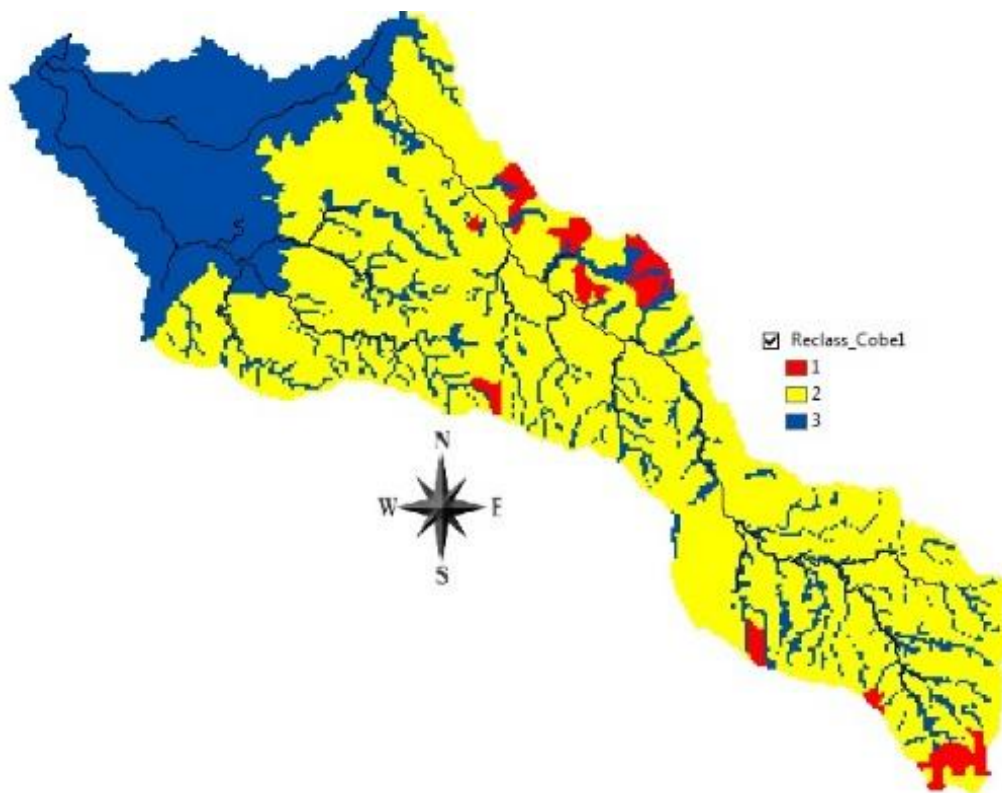
Figura 24. Reclasificación de representación geológica



Fuente: propia

Escenario 3: Las zonas se reclasificaron teniendo en cuenta la curva número, donde las zonas correspondientes a Cantera (Ca); Centro poblado (Cp) y límite urbano – Infraestructura (LU - If) se les dio el valor de 3; Cultivos densos (Cd); Cultivos semilimpios (Csl); Rastrojo - Bosque abierto - Pastos con rastrojo (Ra - Ba - Pr); Cultivos limpios (Cl); Pastos – Arbustal (Pa - Ar); Bosque de galería (Bg) el valor de 2 y Bosque denso (Bd); Arbustal con Rastrojo (ArR); Bosque plantado (Bp) el valor de 1, Figura 25.

Figura 25. Reclasificación de cobertura vegetal

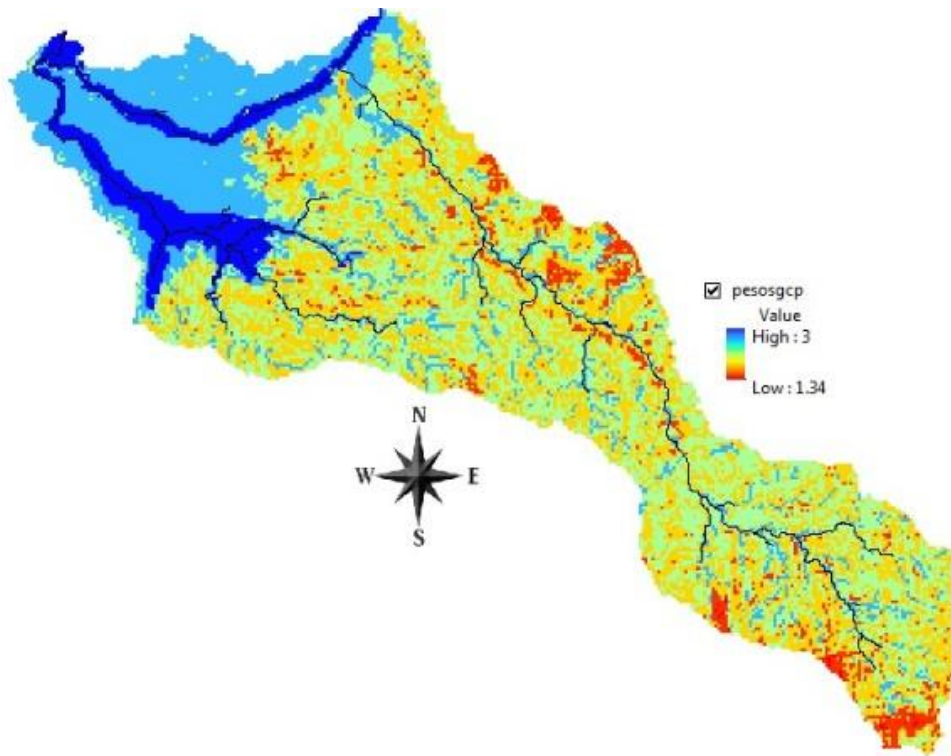


zonas	nivel
12-11-10	3
9-8-7-6-5-4	2
3-2-1	1

Fuente: propia

La capa resultante al sumar las zonas anteriores con igual importancia, se aprecia en la Figura 26.

Figura 26. Representación final de suma algebraica.

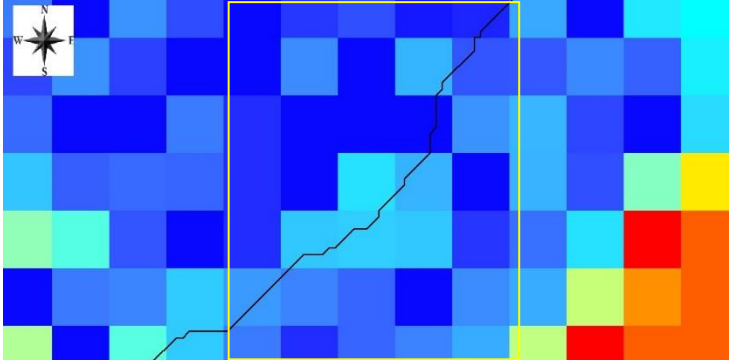

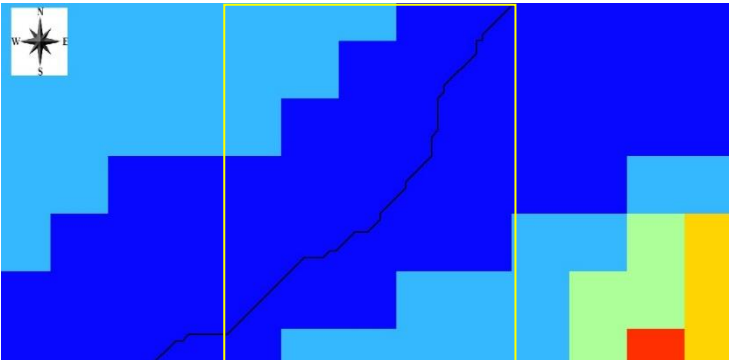


Fuente: Propia

5.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, en la Tabla 5, se presentan las comparaciones del trabajo realizado con lógica difusa y álgebra de mapas, para un sector específico apoyándose en una fotografía aérea del municipio de Popayán.

Tabla 5. Comparación lógica difusa vs álgebra de mapas y foto aérea

<p style="text-align: center;">Resultado con lógica difusa</p> 	<p>Esta imagen muestra un zoom de la Figura 22 en el sector de la galería del Barrio Bolívar, que es una de las zonas más afectadas en el momento de una inundación súbita, según los resultados obtenidos a partir del procesamiento de la información con lógica difusa. Se muestra una coloración degradada que identifica como azul oscuro las zonas con mayores posibilidades a ser afectadas, dato corroborado en el suceso del 24 de diciembre de 2013 en la ciudad de Popayán.</p> <p>Los colores rojos indican la no probabilidad a inundación, siendo este dato correcto en esta comparación ya que pertenece al sector del Morro.</p> <p>Sin embargo, llama la atención que en la zona central justo en el cauce, el color es más claro que en las márgenes, lo que indicaría que justo en el cauce la probabilidad de inundación es menor que en las márgenes.</p>
<p style="text-align: center;">Foto satelital para comparar resultados</p> 	<p>Los resultados obtenidos con álgebra de mapas, tratan de acercarse a los resultados de la metodología de lógica difusa, Sin embargo, en la representación de álgebra de mapas a la zona del cauce se le asigna mayor susceptibilidad de inundación.</p> <p>Adicional a ello muestra también una similitud marcada en el sector del Morro, que se determina aquí con color rojo y amarillo.</p>
<p style="text-align: center;">Resultado con álgebra de mapas</p> 	

Según los resultados obtenidos por estos dos métodos, se puede observar como la metodología de lógica difusa permite aplicar mayor número de criterios, obteniendo resultados favorables, llevando este proceso de trabajo a un lenguaje más humano y lógico.

Se tiene que en la representación final Figura 26, la cual ilustra la metodología de álgebra de mapas, brinda la posibilidad de observar las problemáticas de inundación en la zona urbana y rural de la cuenca, según una coloración degradada, pero más definida que el lógica difusa; esto se ve reflejado en los cauces y en las márgenes del río Ejido y Molino, las cuales presentan coloraciones azul oscuro, indicando la mancha posible de inundación.

En el Anexo digital H se encuentra registrado la base de datos ArcGIS de esta investigación.

6 OBSERVACIONES

- a) Para realizar un trabajo confiable se requiere utilizar información actualizada que refleje los cambios que ocurren a lo largo del tiempo en sistemas tan dinámicos como las cuencas hidrográficas.
- b) Es necesario contar con fotografías aéreas recientes de toda el área de estudio para realizar una mejor lectura final.
- c) Este tipo de ensayos de metodologías sería bueno realizarlos a una escala más detallada, para obtener mejores resultados.
- d) Para hacer una mejor interpretación de los resultados de las representaciones se debe hacer una lectura por pixeles, los cuales indican las zonas de mayor o menor probabilidad de ocurrencia.

7 CONCLUSIONES

- a) Se analizaron las diferentes metodologías posibles a ser usadas en la modelación de inundaciones súbitas, determinando que las más convenientes en este caso eran la lógica difusa y la suma algebraica de mapas.
- b) Tanto la lógica difusa como el álgebra de mapas se apoyan en SIG e información digital de relativo fácil acceso y costo económico, frente a otras que implican toma directa de información de campo.
- c) Se realizó la simulación de inundaciones en la sub cuenca del río Molino usando las dos metodologías escogidas, dando como resultado en ambos casos una representación de posibles zonas inundables, acercándose positivamente a lugares donde realmente se han presentado problemas de este tipo.

- d) Se analizaron los resultados obtenidos a partir de las dos metodologías usadas, determinando que el álgebra de mapas sería la metodología más acertada, al representar mejor las manchas de inundación a lo largo de río Ejido y Molino.
- e) En caso de usar la lógica difusa como metodología los datos de entrada no necesariamente deben ser certeros, sino que pueden tener un cierto grado de incertidumbre.
- f) El álgebra de mapas y la lógica difusa se pueden usar para hacer un primer acercamiento en el estudio de una cuenca, siempre y cuando se cuente con la información requerida, pues minimiza los costos del trabajo de campo y visitas, especialmente cuando se conoce muy poco la zona de estudio o sobre todo si el sector es de muy difícil acceso, ya sea por su topografía o por orden público.
- g) Fue necesario hacer una interpretación en zonas conocidas variando la escala, para poder determinar la diferencia entre las metodologías escogidas. Sin embargo, ambos métodos presentan manchas de inundación muy conservadoras, que no podrían usarse en planificación urbana.
- h) Esta investigación no permite concluir definitivamente sobre la conveniencia o no de este tipo de metodologías para definir zonas de inundación, pero se piensa que el álgebra de mapas representa mejor las manchas de inundación.
- i) La aplicación de cualquier método requiere que se tenga un buen conocimiento técnico del tema y del comportamiento hidráulico de las cuencas hidrográficas, para poder interpretar correctamente los resultados obtenidos.
- j) Se considera que este tipo de metodologías sirven no solo para simular inundaciones súbitas sino, también lentas.

8 RECOMENDACIONES

- a) Usar este tipo de metodologías solamente en estudios preliminares.
- b) Usar un modelo digital de elevaciones con buena resolución para obtener buenos resultados.
- c) Usar más de dos representaciones para hacer combinaciones y poder obtener un resultado más certero.
- d) Desde el momento de realizar las fusificaciones, es necesario tener muy en cuenta los colores usados en las representaciones para evitar posibles confusiones en el momento de la lectura final.
- e) Una buena representación final no necesariamente debe tener muchos datos de entrada, sino datos que finalmente sean representativos y de fácil lectura.

9 BIBLIOGRAFÍA

Acueducto y Alcantarillado de Popayán, (2015). S. A. E.S.P – NIT 891.500.117-1-SSPD. Cuenca Molino. [En línea]. <<http://www.acueductopopayan.com.co/gestion-ambiental/fundacion-procuenca-rio-las-piedras/fuentes-de-abastecimiento/cuenca-molino/>>. [Consultado: 28 de noviembre de 2014].

Andocilla, L. (2012). Implementación de algoritmo de lógica fuzzy aplicado a la determinación del grado de susceptibilidad a deslizamientos en el área Monjas-Ferroviaria-La Magdalena-Itchimbia del distrito metropolitano de Quito. Previa a la obtención del título: Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente. Escuela Politécnica del Ejército. Sangolquí. Disponible en [<file:///C:/Users/Admin/Downloads/T-ESPE-033731.pdf>].

Azevedo, A., Souza C. (2007). Application of fuzzy logic to the evaluation of runoff in a tropical watershed. “Aplicación de lógica difusa para la evaluación de escorrentía en una cuenca tropical”. 244e253. Science Direct. Disponible en pdf. [Consultado 21 de febrero de 2015].

Câmara, G., Barbosa, C., Cordeiro, J. P., Lopes, E., Freitas, U. D., & Lucena, I. (2004). Álgebra de mapas. Introdução à ciência da geoinformação. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em, 1(05).

[Consulta: 12 de agosto de 2015].

Convenio 4800002397. (2007). Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de propuestas de gestión. Libro II. Amenaza por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones. Facultad de Arquitectura, Escuela del Hábitat. Facultad de Minas. Escuela de Ingeniería Civil y Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad nacional de Colombia sede Medellín.

Correa M., N. A. (2010). Una introducción a la lógica difusa. Revista Ingeniería Hoy N 32. Pgs. 9-22. Universidad del Cauca. Colombia.

Diez, J. (2014) Modulo 8. Extensión HEC-GeoHMS. Curso online HEC-HMS. Uva.

ESRI [En Línea]. (2015). <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>. [Consulta: 23 de mayo del 2015]

ESRI. Cómo funciona la superposición difusa. [En línea]. (2015). <<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z000000s0000000>>. [Consulta: 28 de mayo de 2015].

ESRI. Enfoques del análisis de superposición. [En línea]. (2015). <<http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#//009z000000rt000000>> [Consulta: 28 de mayo de 2015].

ESRI. Qué es el Geoprocesamiento. [En línea]. (2015). <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//002s00000001000000> >. [Consulta: 28 de mayo de 2015].

Faria, C. (1997). Ministerio de Ciencia y Tecnología Instituto Nacional de Investigación Espacial. Álgebra de mapas y sus aplicaciones en sensores remotos y Geoprocesamiento.

Felicísimo, A. (1999), Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Definición y estructura del modelo digital de elevaciones (MDE). Disponible en PDF. <http://www.thedigitalmap.com/EasyDEM/download/help/html/documentos/libroMDT_Felicisimo.pdf>. Pág. 12.

GEO COMMUNITY, (2012). GeoCommunit, Wireless Developer Network, GIS Data Depot, and Spatial News. [En línea] < <http://data.geocomm.com/dem/> >. [Consultado: 18 de abril de 2015]

Gómez, M. (2012). Redes Neuronales Artificiales para la simulación, estimación y control de caudales impulsados por estaciones de bombeo en zonas regables. Pulido, I. (Directora). Proyecto Fin de Carrera presentado para optar al grado de Ingeniero Técnico Industrial, especialidad en Mecánica. Universidad de Huelva Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Disponible en [<http://www.uhu.es/juanc.gutierrez/PID11030/PDFs/MJoseGomez.pdf>]

Henao, D. (2012). Evaluación y zonificación de riesgos y dimensionamiento de procesos erosivos en los 26 municipios de la jurisdicción de Cornare. Convenio Cornare-gobernación de Antioquia nº 2011-cf-12-0051 y 217-2011 municipio de San Rafael

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, (2010). Manual de Usuario Magna Sirgas Pro 3 Beta. Subdirección de Geografía y Cartografía Grupo Interno de Trabajo Geodesia Bogotá, Colombia. Disponible en PDF. <<http://www.igac.gov.co/wps/wcm/connect/8749800044b54dcf816a8b52f70544db/AyudaMagna.pdf?MOD=AJPERES>>.

Karunanithi N., Grenney J., Whitley D., Bovee K. (1994). Neural networks for river flow prediction. Journal of Computing in Civil Engineering 8(2), 201-220.

Ministerio de Ambiente, Desarrollo Sostenible y Universidad Nacional de Colombia, (2013). Proyecto: Implementación de la Guía para el Acotamiento de Rondas Hídricas en Tres Corrientes Priorizadas y Proponer Metodologías de

Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo en Cuencas. Informe Final: Metodología para la Evaluación del Riesgo en los POMCAS.

Montoya V., J. D., Toro B., M., Carvajal S., L. F. & Vélez U., J. I. (2005). Tránsito de la Onda de Choque en Canales de Alta Pendiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Naylor, T. (2015). Dirección Nacional de innovación Académica. Universidad Nacional de Colombia. [En línea]. <
<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4060010/lecciones/Capitulo1/simulacion.htm> > [Consultado: 25 de abril de 2015].

ORSEP, (2011). Organismo Regulador de Seguridad de Presas; “tipos de Presa”. En: internet <http://www.orsep.gov.ar/tipos-de-presas.php>. [Consultado: abril 9 de 2014].

Parga J., Fernández R., Castrillón O., C. (2015). Análisis del Cambio en el Uso del Suelo y la Cobertura Vegetal de la Microcuenca Río Tunía, Quebrada Agua Vieja. Eje Temático: TIGs, Territorios y Comunidades. Tesis de pregrado en Geografía. Universidad del Cauca. (En proceso).

Plan de Ordenación y Manejo de la Sub cuenca río Molino - quebrada Pubús. Convenio 1130-12-04 Corporación Autónoma Regional del Cauca - Fundación pro Cuenca Río Las Piedras. (2006).

<http://www.crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/POMCH/Rio%20Molino-Pubus/Plan%20de%20Ordenacion%20y%20Manejo.pdf> [consultado: 28 de noviembre del 2014].

Pradeep, E., Lahat, L. (2014). Fuzzy logic based flood forecasting model for the Kelantan River basin, Malaysia. “Fuzzy modelo de pronóstico de inundaciones lógica basada en la cuenca del río Kelantan, Malasia”. Journal of Hydro-environment Research XX (2014) 1-12. El Servier. Science Direct. [En línea] <www.sciencedirect.com>. Disponible en pdf. [Consultado 21 de febrero de 2015]

Protección civil, (2009). Secretaría de Gobernación (SEGOB) impreso en México, D.F [En línea]. <
<http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/37803/1/calcanobalcazarjonathandavid.pdf> >. [Consultado: 25 de abril de 2015].

Pujo, L. (2009). Predicción de caudales en tiempo real en grandes cuencas utilizando redes neuronales artificiales. García, R. (Director). Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente Universidad Politécnica de Valencia – España. Disponible en [<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/6422/tesisUPV3107.pdf.txt>]

Santander, A. (2004). "Uso de lógica difusa para la estimación de índices de riesgo y falla de obras hidráulicas en tiempo real". Vargas, X. (Directora). Tesis para optar al grado de magíster en ciencias de la ingeniería, mención recursos y medio ambiente hídrico. Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemática. Disponible en [\[http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2004/cf-santander_ah/pdfAmont/cf-santander_ah.pdf\]](http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2004/cf-santander_ah/pdfAmont/cf-santander_ah.pdf).

Silva T., Estrada F., Ochoa S y Cruz G. (2006). Propuesta metodológica para la ubicación de áreas de disposición de residuos sólidos urbanos. Rev. Int. Contam. Ambient. 22 (4) 147-156.

Trujillano, J. et al. (2004). Aproximación metodológica al uso de redes neuronales artificiales para la predicción de resultados en medicina. 122(Supl 1):59-67

Universidad del Cauca - Alcaldía Municipal de Popayán - Convenio 20131800008927, (2015). Estudio Preliminar de Riesgos (Afectación y Daños) Asociados a Fenómenos de Inundación Lenta y Súbita (Avenida Torrencial) en la Zona Urbana y Rural del Municipio de Popayán. En preparación.

U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center (2010, October). Geospatial Hydrologic Modeling Extension, HEC-GeoHMS. User's Manual. Version 5.CPD-77. 197 pp.

Valenzuela, J; Guzmán, F; Riquelme, C. (2014). Universidad del Bio-Bio Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Civil y Ambiental Modelación Hidráulica. <<http://es.scribd.com/doc/239563507/Informe-Modelacion-Numerica-Lab>> [consultado: 28 de noviembre del 2014].

Yazdi, J., Neyshabouri, s. (2014). Identifying low impact development strategies for flood mitigation using a fuzzy-probabilistic approach. "Identificar estrategias de desarrollo bajo impacto para la mitigación de inundaciones utilizando un enfoque difuso probabilística". Environmental Modelling & Software 60(2014) 31-44. El Servier. Science Direct. [En línea] < www.elsevier.com/locate/envsoft > Disponible en pdf. [Consultado 21 de febrero de 2015]

ANEXOS DIGITALES

ANEXO	DESCRIPCIÓN
A	Aval municipio, solicitud apoyo proyectos de investigación en hidráulica en el río Molino.
B	Combinaciones realizadas para unión de representaciones difusas.
C	Cobertura vegetal (información alcaldía)
D	Datos de precipitaciones año 2013 Unicauca – Información precipitaciones máximas en 24 horas (IDEAM – Unicauca)
E	Mapa Geológica (Información convenio Alcaldía-Unicauca)
F	Estaciones (Información acueducto Popayán)
G	Información de productos de investigación-representaciones descritas en el proceso de fusificación – representaciones finales – Ráster descargado para ensayo
H	Archivo ArcGIS final (Geo-HMS)