

**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA:**

**MODELADO DIGITAL GEOMORFOLÓGICO FLUVIAL DEL RÍO MILAGRO  
UBICADO EN LA PROVINCIA DE GUAYAS MEDIANTE EL USO DE  
SENSORES REMOTOS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

**AUTOR:**

**Tejena Tapia, José Damián**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:**

**Ing. Castro Beltrán, Andrés Fernando**

**Guayaquil, Ecuador**

**26 de febrero del 2020**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Tejena Tapia, José Damián**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

**TUTOR**

f. \_\_\_\_\_  
**Ing. Castro Beltrán, Andrés**

**DIRECTORA DE LA CARRERA**

f. \_\_\_\_\_  
**Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther**

**Guayaquil, a los 26 del mes de febrero del año 2020**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Tejena Tapia, José Damián**

### **DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación, **Modelado digital geomorfológico fluvial del río Milagro ubicado en la provincia de Guayas mediante el uso de Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG)** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 26 del mes de febrero del año 2020**

### **EL AUTOR**

f. \_\_\_\_\_  
**Tejena Tapia, José Damián**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Tejena Tapia, José Damián**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Modelado digital geomorfológico fluvial del río Milagro ubicado en la provincia de Guayas mediante el uso de Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG)**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 26 del mes de febrero del año 2020**

**EL AUTOR:**

f. \_\_\_\_\_  
**Tejena Tapia, José Damián**

# REPORTE URKUND



## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** Tejena\_Jose\_Final.docx (D64084881)  
**Submitted:** 2/19/2020 12:34:00 AM  
**Submitted By:** claglas@hotmail.com  
**Significance:** 1 %

Sources included in the report:

1548822788\_80\_Proyecto2.pdf (D47397752)

Instances where selected sources appear:

1

## **AGRADECIMIENTO**

A mis amigos, por ser la fuente de mi felicidad en muchos momentos en que la vida parecía no dar motivos suficientes para serlo, y por acompañarme a lo largo de este camino. Maily Coello, por ser la persona con la que puedo ser auténtico, me brinda calma en momentos que la necesito, me ayuda a ser mejor persona, y por estar para mí cuando más la necesito. Cristóbal Chong- Qui, por compartir tantos momentos a lo largo de esta experiencia académica, alguien quien me brinda su amistad y consejo en el momento apropiado. Paula Montalvo, por ser una amiga inigualable, ejemplo de esfuerzo, tenacidad, y deseo de superación.

A mis hermanos, Carlos, Jorge, y Pedro, por ser quienes siempre me escuchan y ayudan de cualquier manera posible, sin ustedes en mi vida no podría ser la persona que soy ahora.

A mi hermana, María del Mar, por ser la fuente de mi motivación, y darme siempre una razón por la cual ser mejor persona y superarme en todo tipo de ámbito.

A mis padres, Mónica Isabel y José Vicente, por ser quienes formaron mi carácter y me ayudaron a tener la perspectiva de vida que tengo, no sería nadie sin sus enseñanzas. Mi madre, por ser mi apoyo emocional durante gran parte de mi vida y por enseñarme tanto sobre perseverancia y superación. Y mi padre, por ser un modelo a seguir y gran ejemplo de buen ser humano, alguien que no tiene temor a aprender y ser mejor siempre.

A todas aquellas personas que estuvieron para mí a lo largo de este camino, me brindaron su apoyo y amistad, y tuvieron siempre los mejores deseos.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi madre, Mónica Tapia Vera, siempre fuiste mi más grande soporte y a quien le debo todo lo que soy en la vida.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Stefany Esther Alcívar Bastidas**  
DIRECTORA DE CARRERA

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Mélida Alexandra Camacho Monar**  
COORDINADORA DEL ÁREA

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Iván González Mora**  
OPONENTE

# Índice General

CAPITULO I.....	2
1. INTRODUCCION.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Objetivo General.....	2
1.3. Objetivos Específicos.....	3
1.4. Alcance.....	3
1.5. Área de Estudio.....	3
CAPITULO II.....	5
2. MARCO TEORICO.....	5
2.1. Geomorfología.....	5
2.2. Geomorfología y la ecología de los paisajes.....	6
2.3. Paisaje Geomorfológico.....	6
2.4. Clasificación de paisajes geomorfológicos.....	7
2.5. Geomorfología Fluvial.....	9
2.6. Escalas para el análisis espacial.....	9
2.7. Niveles de percepción.....	10
2.8. Agua Subterránea y Precipitaciones.....	12
2.9. Topografía del terreno.....	12
2.10. Fotogrametría.....	12
2.11. Sensores Remotos.....	13
2.12. Ventajas de la teledetección.....	15
2.13. Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	15
2.14. Modelo Digital del Terreno DTM.....	16
2.15. Ráster.....	16
2.16. Stream Power.....	17
2.17. Índice de Stream Power.....	18

2.18. Índice de Humedad Topográfica.....	19
CAPITULO III.....	21
3. METODOLOGÍA.....	21
3.1. Obtención de datos digitales relevantes .....	21
3.2. Generación y adaptación de datos .....	24
3.3. Elaboración del DEM .....	24
3.4. Preprocesamiento del terreno.....	27
3.5. Índice de Stream Power (SPI) e índice Topográfico de Humedad (CTI) .....	36
CAPITULO IV.....	45
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	45
4.1. Comparación de Líneas de drenaje.....	45
4.2. Comparación de la obtención de datos por medio de sensores remotos vs trabajos de campo para la elaboración de un modelo digital .	46
4.3. Capa creada por GeoHMS .....	49
4.4. Posibles predicciones del comportamiento del río .....	50
4.5. Índice Topográfico de Humedad y la geomorfología.....	61
CAPITULO V.....	64
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
5.1. Conclusiones .....	64
5.2. Recomendaciones .....	66
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

## Índice de Imágenes

Imagen 1. Mapa Satelital del Río Milagro. Elaborado por José Damián Tejena. .....	4
Imagen 2. Niveles sucesivos de percepción de Geoformas. (Tomado de "Geopedología" por J.A. Zinck)(Zinck, 2012) .....	6
Imagen 3. Paisaje geomorfológico. 1: Valle, 2: Planicie, 3: Altiplanicie, 4: Piedemonte, 5: Lomerío, 6: Montaña. (Tomado de "Geopedología" por J.A. Zinck) (Zinck, 2012) .....	8
Imagen 4. Jerarquía de las escalas espaciales. (Tomado de "Characterizing geomorphological change to support sustainable river restoration and management" por Grabowski)(Grabowski et al., 2014) .....	11
Imagen 5. Plataformas de sensores remotos y su variación de altura. Tomado de "Introductory Remote Sensing" por Gibson & Power) (Gibson & Power, 2000).....	14
Imagen 6. Matriz de celdas en un Ráster. (¿Tomado de '¿Que son los datos ráster?' de la pagina web de ArcGis)(¿Qué son los datos ráster?—Ayuda   ArcGIS for Desktop, 2018) .....	17
Imagen 7. Rango de Valores SPI. (Tomado de 'Vermont River Sensitivity Coarse Screen', por Schiff y Milone&MacBroom) (Schiff & Milone & MacBroom, 2014) .....	19
Imagen 8. Ortofoto del cantón Milagro. Obtenida del SNI.....	22
Imagen 9. Capas interpuestas: Curvas de Nivel (negro), Catones (rosado), Río Milagro (Beige). Obtenidas de IGM.....	22
Imagen 10. Carta Topográfica Milagro. Obtenida de IGM.....	23
Imagen 11. Curvas de nivel generadas por Global Mapper y ArcGIS. Elaborado por José Damián Tejena.....	24
Imagen 12. Ventana para creación de capa TIN. Extraído de ArcMap .....	25
Imagen 13. TIN de río Milagro. Elaborado por José Damián Tejena .....	25
Imagen 14. Ventana para transformación de TIN a Ráster. Extraído de ArcMap .....	26
Imagen 15. Ráster de río Milagro. Elaborado por José Damián Tejena .....	26
Imagen 16. Ventana Fill Sinks. Extraído de ArcMap .....	27

Imagen 17. Capa Fill Sinks, ráster corregido. Elaborado por José Damián Tejena Tapia.....	28
Imagen18. Ventana de Dirección de Flujo. Extraído de ArcMap.....	28
Imagen 19. Capa Dirección de Flujo. Elaborado por José Damián Tejena Tapia.....	29
Imagen 20. Ventana de Acumulación de Flujo. Extraído de ArcMap.....	29
Imagen 21. Capa de Acumulación de Flujo. Elaborado por José Damián Tejena.....	30
Imagen 22. Ventana Stream Definition. Extraído de ArcMap.....	31
Imagen 23. Capa Stream Definition. Elaborado por José Damián Tejena Tapia .....	31
Imagen 24. Ventana Stream Segmentation. Extraído de ArcMap.....	32
Imagen 25. Capa Stream Segmentation. Elaborado por José Damián Tejena .....	32
Imagen 26. Ventana Catchment Grid Delineation. Extraído de ArcMap .....	33
Imagen 27. Capa Catchment Grid Delineation. Elaborado por José Damián Tejena.....	33
Imagen 28. Ventana Catchment Polygon Processing. Extraído de ArcMap	34
Imagen 29. Capa Catchment Polygon Processing. Elaborado por José Damián Tejena.....	34
Imagen 30. Ventana Drainage Line Processing. Extraído de ArcMap .....	35
Imagen 31. Línea de drenaje Río Milagro. Elaborado por José Damián Tejena .....	35
Imagen 32. Ventana Adjoint Catchment Processing. Extraído de ArcMap ..	36
Imagen 33. Capa Adjoint Catchment Processing. Elaborado por José Damián Tejena.....	36
Imagen 34. Ventana para la creación de la capa de pendientes. Extraído de ArcMap.....	37
Imagen 35. Capa de pendientes. Elaborado por José Damián Tejena.....	37
Imagen 36. Capa Hillshade. Elaborado por José Damián Tejena.....	38
Imagen 37. Ventana Hillshade. Extraído de ArcMap .....	38

Imagen 38. Capa Aspect. Elaborado por José Damián Tejena .....	39
Imagen 39. Ventana Aspect. Extraído de ArcMap .....	39
Imagen 40. Valores de cada color de la capa Aspect. Extraído de ArcMap.	39
Imagen 41. Ventana Curvature. Extraído de ArcMap .....	40
Imagen 42. Capa CurvPlan con acercamiento al detalle. Elaborado por José Damián Tejena.....	41
Imagen 43. Capa CurvProf con acercamiento al detalle. Elaborado por José Damián Tejena.....	41
Imagen 44. Capa CurvEst, capa de curvas que incluye la curvas en planta y las de perfil. Elaborado por José Damián Tejena .....	42
Imagen 45. Ventana de la calculadora de capas ráster, fórmula para creación de SPI. Extraído de ArcMap.....	43
Imagen 46. Ventana de la calculadora de capas ráster, fórmula para creación de CTI. Extraído de ArcMap.....	44
Imagen 47. Comparación de línea de drenaje generada, la capa obtenida del IGM, y la vista Satelital del río Milagro. Elaborado por José Damián Tejena	45
Imagen 48. Precisión de las curvas de nivel de carta topográfica. Extraído del portal IGM. ....	46
Imagen 49. DEM SIGTIERRAS. Extraído de Global Mapper.....	47
Imagen 50. DEM ASTER.V2. Extraído de Global Mapper .....	47
Imagen 51. DEM SRTM.V3. Extraído de Global Mapper .....	48
Imagen 52. DEM ASTER.V3. Extraído de Global Mapper .....	48
Imagen 53. Representación de subcuencas de la cuenca generada del río Milagro. Elaborado por José Damián Tejena .....	49
Imagen 54. Representación del área de la cuenca y el río generado. Elaborado por José Damián Tejena .....	50
Imagen 55. Acercamiento a capa de pendientes para visualización del detalle. Elaborado por José Damián Tejena.....	51
Imagen 56. Comparación de zonas SPI. Elaborado por José Damián Tejen .....	52
Imagen 57. Rango de valores de cada color en capa SPI. Extraído de ArcMap .....	52

Imagen 58. Zonas con SPI más alto en la región. Elaborado por José Damián Tejena.....	53
Imagen 59. Comparación a través de los años de Zona 1. Extraído desde Google Earth.....	53
Imagen 60. Foto Ampliada Zona 1 (2002). Extraído desde Google Earth ...	54
Imagen 61. Foto Ampliada Zona 1 (2011). Extraído desde Google Earth ...	54
Imagen 62. Foto Ampliada Zona 1 (2014). Extraído desde Google Earth ...	55
Imagen 63. Foto Ampliada Zona 1 (2018). Extraído desde Google Earth ...	55
Imagen 64. Comparación a través de los años de Zona 2. Extraído desde Google Earth.....	56
Imagen 65. Foto Ampliada Zona 2 (2002). Extraído desde Google Earth ...	56
Imagen 66. Foto Ampliada Zona 2 (2011). Extraído desde Google Earth ...	57
Imagen 67. Foto Ampliada Zona 2 (2014). Extraído desde Google Earth ...	57
Imagen 68. Foto Ampliada Zona 2 (2018). Extraído desde Google Earth ...	58
Imagen 69. Comparación a través de los años de Zona 3. Extraído desde Google Earth.....	58
Imagen 70. Foto Ampliada Zona 3 (2002). Extraído desde Google Earth ...	59
Imagen 71. Foto Ampliada Zona 3 (2011). Extraído desde Google Earth ...	59
Imagen 72. Foto Ampliada Zona 3 (2014). Extraído desde Google Earth ...	60
Imagen 73. Foto Ampliada Zona 3 (2018). Extraído desde Google Earth ...	60
Imagen 74. Comparación de capa del SNI y la capa generada de CTI. Elaborado por José Damián Tejena.....	62
Imagen 75. Comparación entre zonas de susceptibilidad de inundación y morfología del cantón. Elaborado por José Damián Tejena Tapia .....	63

## RESUMEN

*La ciudad Milagro se encuentra en una región que presenta un nivel de terreno casi constante en toda su expansión y experimenta fenómenos climatológicos como las inundaciones, las cuales causan daños que pueden ser muy severos si no se toman las medidas necesarias. El río que cruza la ciudad es de gran extensión y su estudio debe ser de principal importancia para la planificación de obras civiles que lo circunden. Por esta razón existen varios métodos para realizar estudios de río que involucran estudios de campo, distintos equipos, y grandes esfuerzos por parte de los ingenieros que los realizan. El propósito de este trabajo es presentar una alternativa a la ejecución de trabajos de campo a través de la implementación de sensores remotos y sistema de información geográfica para la elaboración del modelo geomorfológico del río, y de esta forma evitar la necesidad de un numeroso personal, largos periodos de tiempo, y gastos elevados. El modelo digital nos podrá dar datos relevantes para la planificación de una obra civil, y nos ayudará a entender mejor el comportamiento del río y las zonas aledañas a este. Es preciso destacar que la información fue obtenida a través de medios gratuitos o de muy bajo costo, y el modelo generado es relativo a la calidad de la información obtenida.*

**Palabras Claves:** **Sistema de Información Geográfica, Sensores Remotos, Río, Milagro, Modelo, Geomorfológico**

## ABSTRACT

*Milagro city is located in a region that has an almost constant field level throughout its expansion and experiences weather phenomena such as floods, which cause damage that can be very severe if the necessary measures are not taken. The river that crosses the city is of great extension and its study must be of main importance for the planning of civil works that surround it. For this reason, there are several methods for conducting river studies that involve field studies, different equipment, and great efforts by the engineers who perform them. The purpose of this work is to present an alternative to the execution of field work, through the implementation of remote sensing and geographic information system (GIS) for the development of the river's geomorphological model, and thus avoiding the need for a numerous personnel, long periods of time, and high expenses. The digital model can give us relevant data for the planning of a civil engineering work, and it will help us to better understand the behavior of the river and its surrounding area. It should be noted that the information was obtained through free or very low-cost means, and the model generated is related to the quality of the information obtained.*

***Keywords: Geographic Information System, Remote Sensing, River, Milagro, Model, Geomorphological***

# **CAPITULO I**

## **1. INTRODUCCION**

### **1.1. Antecedentes**

El uso de programas de procesamiento de información geográfica permitirá realizar de manera digital la mayor cantidad posible de trabajos de análisis fluvial como topografía e hidrología, entre otros, para generar un modelo geomorfológico fluvial, pero sin la necesidad de tener que realizar los procesos en el campo, tratando de esta forma reducir tiempo, costos y mano de obra en su realización. En la época actual, hacer uso de medios digitales para la obtención de información es cada vez más común, y por esta razón que cada vez se siguen desarrollando más métodos para el procesamiento de estos datos y su interpretación.

El río Milagro está ubicado en una zona que tiene terreno plano en su mayoría al nivel del mar, y por esta razón es más probable que sucedan inundaciones en la región. De la misma forma, parte del río se encuentra en un piedemonte lo cual podría vincularse con la presencia de erosión en la zona. La información actual de la zona que ofrecen los medios de información nacional es muy limitada, por lo que es necesario la obtención de datos de distintas fuentes, y con resoluciones distintas.

### **1.2. Objetivo General**

Realizar el modelo digital geomorfológico fluvial del río Milagro ubicado en la provincia de Guayas, mediante el uso de Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG), para minimizar costos, recursos y tiempo empleados de forma habitual.

### **1.3. Objetivos Específicos**

- Recopilar información necesaria de los diferentes estudios de terreno en el río Milagro.
- Emplear SIG en los programas de procesamiento de datos geográficos como ArcGIS y sus extensiones, para generar el modelado.
- Evaluar las ventajas y desventajas de implementar el uso del modelo digital vs los métodos habituales de campo.
- Determinar posibles predicciones sobre el comportamiento de los ríos, basado en los datos obtenidos previamente.

### **1.4. Alcance**

La obtención de datos se va a desarrollar basada en el espacio que ocupa la cuenca del río Milagro a lo largo de toda su extensión.

Esta información busca optimizar procesos actuales, como los trabajos en campo, pero realizando la mayor cantidad posible de análisis de datos por medio de datos digitales, con la finalidad de tratar de minimizar los esfuerzos de los ingenieros en la generación de modelos geomorfológicos de ríos para ser usados de obras que lo requieran.

### **1.5. Área de Estudio**

El río Milagro es una corriente de agua que atraviesa el cantón Milagro en la provincia del Guayas y se encuentra en una zona principalmente de relieve plano. A lo largo de su extensión existe densa vegetación arbórea, y cuenta con curvas poco pronunciadas. Su longitud total es de 49.5 km y pertenece a la cuenca del Río Guayas.



**Imagen 1. Mapa Satelital del Río Milagro. Elaborado por José Damián Tejena.**

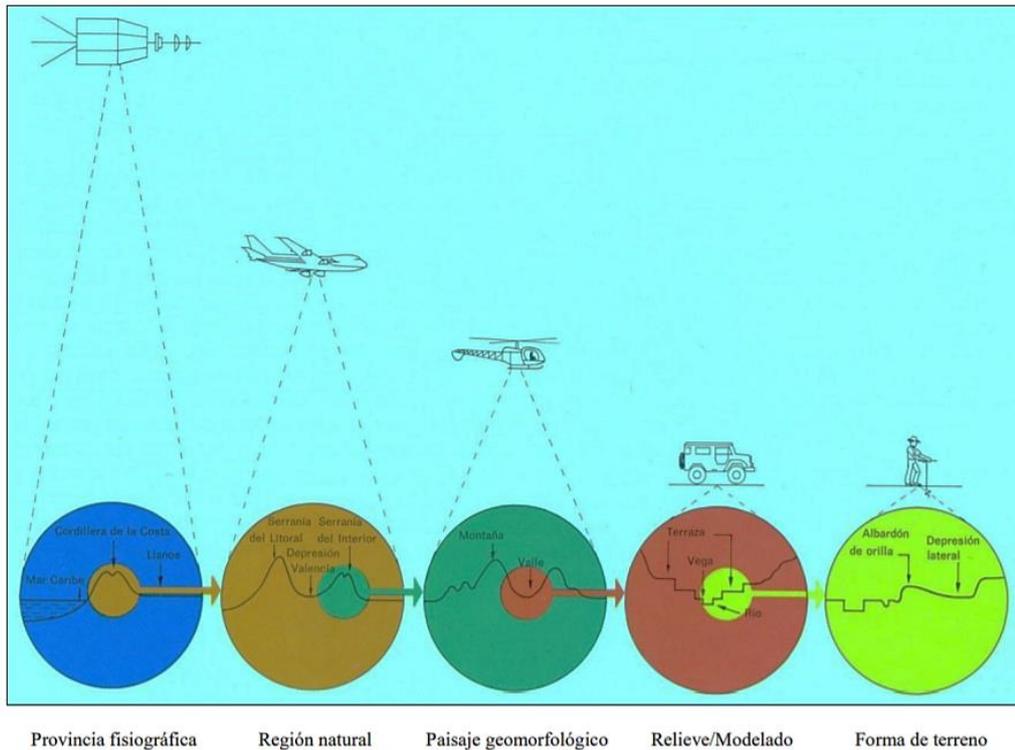
## **CAPITULO II**

### **2. MARCO TEORICO**

#### **2.1. Geomorfología**

El término geomorfología hace referencia al campo de la ciencia que se encarga del estudio de la forma del terreno y de sus cambios. Esta ciencia como tal, se desarrolló mucho después que la geología a pesar de que la geología depende en varios de sus aspectos de enfoques geomorfológicos. Es a través de esta ciencia que se puede conocer el origen de la forma de los relieves de la superficie terrestre. Para tener un completo entendimiento del medio en el que vivimos es necesario conocer y analizar profundamente los variados procesos de cambios en el suelo que llevan a la existencia de fallas geológicas y geográficas. (Rao, 2002)

Esta ciencia se basa principalmente en la observación como método de obtención de información debido a que se dirige a la identificación, diferenciación y clasificación de paisajes por medio de modelos digitales de terreno, mapas topográficos de la región, imágenes de visión estereoscópica encontradas en archivos de teledetección remota, y de forma directa por medio del análisis de las manifestaciones físicas en la superficie del terreno observadas en el campo. Existen varias formas de percibir las geoformas en el medio, pero las principales son mediante la visión al momento de realizar un trabajo de campo, y mediante el uso de sensores remotos que detectan las características fisionómicas de los distintos geopaisajes. (Zinck, 2012)



**Imagen 2. Niveles sucesivos de percepción de Geoformas. (Tomado de “Geopedología” por J.A. Zinck)(Zinck, 2012)**

## 2.2. Geomorfología y la ecología de los paisajes

Verstappen asegura: "... los paisajes naturales y culturales están compuestos por una serie de elementos o componentes que se interrelacionan mutuamente a través de un sistema de trabajo de la ecología del paisaje" (Verstappen, 1977)

## 2.3. Paisaje Geomorfológico

Un paisaje geomorfológico se conoce como una gran sección del terreno que se caracteriza por tener rasgos físicos similares y delimitados por la forma de los relieves del suelo, y la forma en que estos relacionan. En otras palabras, corresponde a la forma en que se encuentra compuesta la región en la que se encuentra, por ejemplo, en un paisaje de planicie aluvial se pueden notar llanuras de inundación por lo general al contar con un modelo de terreno semejante a lo largo de su extensión; mientras que, por otro lado, un valle puede contar con varios modelos de terreno como llanuras de inundación, abanicos, terrazas, entre otros. (Zinck, 2012)

## **2.4. Clasificación de paisajes geomorfológicos**

Al subdividir los distintos paisajes en relación con sus características similares, se cuenta con siete niveles para clasificarlos. Estos niveles son el valle, planicie, peniplanicie, altiplanicie, piedemonte, lomerío, y montaña, y cada uno cuenta con propiedades que los hacen distintos en su estudio. (Zinck, 2012)

### **2.4.1. Valle**

Sección del terreno que se encuentra limitada entre zonas de un alto relieve, como montañas o altiplanicies, usualmente alargada y plana. A lo largo del valle pasa generalmente un río y es la porción de terreno donde normalmente convergen las corrientes de agua. Para que reconozca a la sección de terreno como un valle, este debe poseer al menos una terraza o plataforma sedimentaria y una vega, ya que, de otra forma, se lo considera simplemente como un entalle fluvial. (Zinck, 2012)

### **2.4.2. Planicie**

Esta sección de la superficie es amplia, plana, sin límites notables, usualmente de posición baja, con gradientes y pendientes pequeñas, en donde el cambio de alturas es bajo, con una variación de 1 a 10 metros por lo general. Es aquí donde las corrientes de agua se pueden conectar y bifurcar. (Zinck, 2012)

### **2.4.3. Peniplanicie**

Terreno que cuenta con relieves ondulados y que presenta una cantidad notable de pequeñas elevaciones, con cimas de forma usualmente redondeadas en el caso de las colinas o alargadas en el caso de las lomas, que tienen alturas parecidas, y que se generan por la presencia de altiplanicies o planicies en sus alrededores, o por procesos erosivos del terreno. Por lo general, es aquí donde se pueden observar distintos tipos de relieve rodeados por pequeños valles coluviales (depósito de material transportado, usualmente arena o gravas) por acción del río. (Zinck, 2012)

#### 2.4.4. Piedemonte

Segmento del terreno ubicado al pie de paisajes elevados como las montañas o altiplanicies, y que se componen por porciones de suelo inclinadas y por lo general heterogéneas. Entre estas porciones de terreno tenemos las colinas y lomas, y abanicos y glacis, que se presentan circundadas de relieves montañosos. Estos piedemontes, localizados en cordilleras recientes en el tiempo geológico, presentan características neotectónicas generadas por fallas geográficas y deformaciones actuales de la corteza terrestre. (Zinck, 2012)

#### 2.4.5. Lomerío

Al igual que en la peniplanicie, este paisaje cuenta con gran cantidad de colinas y lomas, redondas y alargadas, pero cuyas alturas se alteran mucho más, teniendo una gama muy variada de estas. Su red de drenaje es densa, y así mismo, están presentes pequeños valles coluviales. (Zinck, 2012)

#### 2.4.6. Montaña

Sección del terreno caracterizado principalmente por tener altura significativamente mayor al resto de paisajes, con un relieve elevado, y con pendientes muy pronunciadas y rocosas que dificultan el acceso. Es este paisaje el de mayor magnitud en cuanto a la altura de estos. (Zinck, 2012)

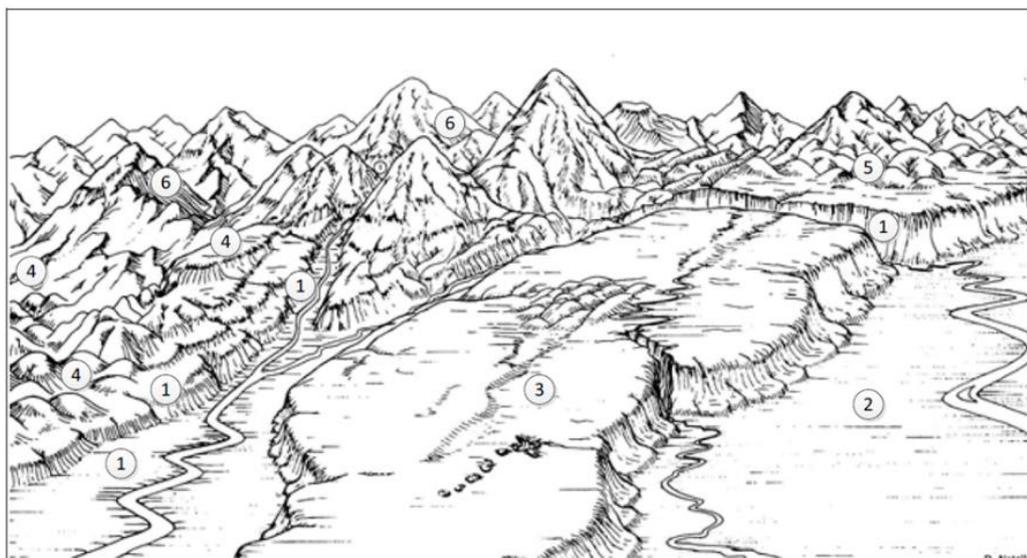


Imagen 3. Paisaje geomorfológico. 1: Valle, 2: Planicie, 3: Altiplanicie, 4: Piedemonte, 5: Lomerío, 6: Montaña. (Tomado de "Geopedología" por J.A. Zinck) (Zinck, 2012)

## **2.5. Geomorfología Fluvial**

La geomorfología enfocada al estudio de los ríos estudia la forma de estos, como se encuentran estructurados y configurados, las características que poseen a lo largo de su extensión, y los datos pertinentes a sus características físicas como su longitud, perímetro y área que cubre su cuenca.

La geomorfología ha tenido un importante enfoque sobre los ríos en las últimas décadas ya que se ha orientado al avance de métodos cuantitativos para el análisis de redes de drenaje superficial, su desarrollo y comportamiento. (Pareta & Pareta, 2012)

Los ríos y arroyos tienen una gran importancia no solo como los medios por los cuales se lleva a cabo la denudación del terreno continental hacia los lagos y océanos, pero también como recurso natural en donde acontecen una gama amplia de actividades humanas como la recreación, transporte, pesca, abastecimiento de agua, y obtención de energía. Es por esta razón que el entendimiento de su dinámica y estructura es de gran valor para poder gestionar y proteger correctamente este recurso. (Aswathy et al., 2008)

## **2.6. Escalas para el análisis espacial**

El comportamiento de un tramo de río depende de factores que intervienen de forma directa en lo que sucede dentro del tramo, sin embargo, es notable también mencionar que no son los únicos factores pues existen muchos otros actuando en la cuenca aguas arriba y en ocasiones aguas abajo del tramo. El tramo de río se encuentra influenciado por procesos paulatinos a lo largo de la cuenca. Es por esta razón que, para el correcto entendimiento de la geomorfología a nivel de un tramo de río, se necesita primero conocer todos aquellos eventos actuales y pasados en una escala espacial aún más grande. Al no realizar el procedimiento de comprensión en diferentes escalas, resulta imposible realizar una estrategia de gestión que se encuentre completamente informada y que brinde soluciones sostenibles. (Grabowski et al., 2014)

Los niveles de percepción de un ambiente tan grande como puede ser la cuenca de un río llegan a ser un poco subjetivos si se realizan con el ojo humano, no obstante, son necesarios para poder dar una jerarquía a los

elementos que forman una estructura de terreno. Es por esta razón que los niveles en los que se puede dividir un terreno se encuentran a distintas escalas y están condicionados al tipo de medio de percepción que se use. (Zinck, 2012)

## **2.7. Niveles de percepción**

### **2.7.1. Cuenca del río**

Una cuenca es el área de terreno que se encuentra delimitada por un río y sus afluentes, y que se puede obtener en función de su división topográfica. (Grabowski et al., 2014)

### **2.7.2. Región**

Es en la cuenca en donde existen varias unidades de paisaje, como regiones o provincias fisiográficas, los cuales son porciones de la cuenca que cuentan con características similares geomorfológicamente hablando. Una cuenca se encuentra subdividida en regiones que son generalmente consistentes en la cobertura del suelo, la topografía, y las características geológicas que presentan, pues son estos los factores que van a establecer la respuesta hidrológica que se obtiene en términos de las fuentes y vías del transporte de sedimentos en el río. (Grabowski et al., 2014)

### **2.7.3. Segmento**

Un segmento de río es una sección del sistema fluvial que se encuentra afectado por propiedades similares a nivel de valle, y que comparten las mismas condiciones de energía de flujo. Se puede delimitar un segmento tomando como referencia el cambio en los patrones de la pendiente, en sus líneas de afluentes, y en la forma que se encuentra confinada la sección de terreno. (Grabowski et al., 2014)

### **2.7.4. Tramo**

El término 'tramo' en la geomorfología de sistemas fluviales, se refiere la sección de río que cuenta con condiciones de límite casi idénticas y uniformes, suficientemente para que sus interacciones forma-proceso sean casi

constantes, dando como resultado los patrones de accidentes geográficos que caracterizan el canal o llanura de inundación, tales como meandros, lagunas, o riberas. Es este nivel considerado uno de los más importantes, ya que es en esta escala espacial donde podremos observar una gran cantidad de características del canal que se ven influenciadas directamente por las interacciones en escalas mayores, y a su vez influenciada también por unidades de paisaje aún más pequeñas como la acción de la vegetación, partículas grandes de madera, o bancos de sedimentos en el tramo. Es también en esta escala en que se desarrollan las actividades humanas e interacciones, y en la cual se focalizan los trabajos de gestión y manejo de ríos. (Grabowski et al., 2014)

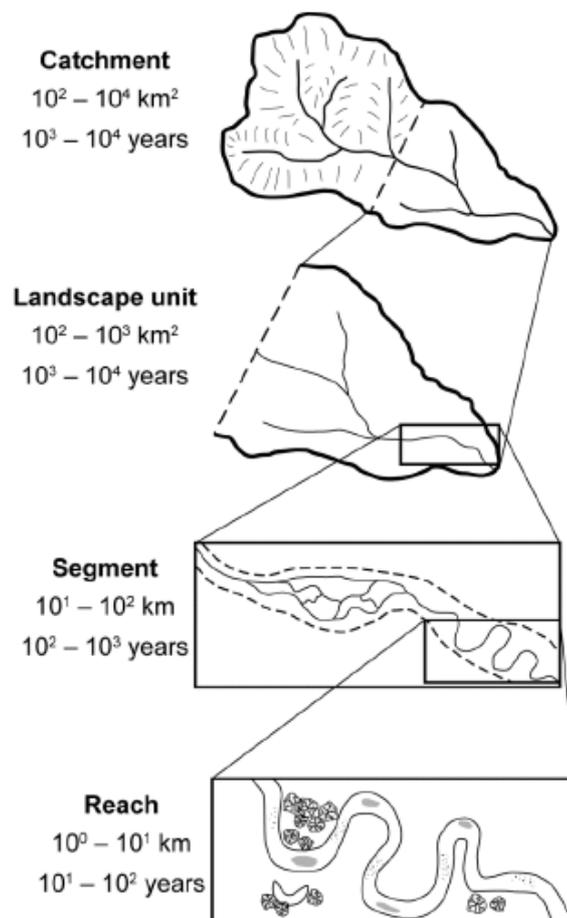


Imagen 4. Jerarquía de las escalas espaciales. (Tomado de "Characterizing geomorphological change to support sustainable river restoration and management" por Grabowski)(Grabowski et al., 2014)

## **2.8. Agua Subterránea y Precipitaciones**

Los ríos son impulsados por la acción del agua. Por esto, para estudiar el cambio temporal de los ríos y su geomorfología, se debe contar con datos sobre su precipitación, hidrología superficial, y agua subterránea. Estos datos se pueden obtener de registros de monitoreo hidrológico, y recientemente se usa cada vez más los sensores remotos para poder definir los procesos hidrológicos en la superficie y detectar cambios significativos en el paso del tiempo. (Tang et al., 2009)

## **2.9. Topografía del terreno**

A lo largo del tiempo existen varios cambios notables en la topografía de los terrenos, y son estos cambios los que influyen en la hidrología del sistema fluvial y en la acumulación de sedimentos. Es en este último ámbito que se está centrando cada vez más el interés para manejar y gestionar los ríos. (Hinderer et al., 2013)

La teledetección remota es el medio preferido para poder analizar en las distintas escalas de paisaje estos cambios en la topografía y la producción de sedimentos a lo largo del tiempo, junto con la ayuda de datos estratigráficos y sedimentológicos obtenidos a lo largo de los años. Es solo cuando se relacionan ambos que se obtiene un estudio más extenso y se pueden verificar los datos que se generan por la detección remota. (Grabowski et al., 2014)

## **2.10. Fotogrametría**

La fotogrametría se considera como una técnica de obtención de datos métricos por medio de una fotografía como fuente de información y que representa de manera fiable al terreno observable. Esta información se puede conseguir de formas distintas dependiendo del sensor que se use. Se conoce a aquellas fotografías tomadas desde la superficie como fotogramas terrestres, y las que se consiguen por medio de un sensor en aviones o cámaras integradas se llaman fotogramas aéreos. (Buill et al., 2003)

Es común el uso de los términos fotografía e imagen en la vida cotidiana. Sin embargo, cuando se habla de estos términos relacionados a la teledetección,

su significado es más específico. Una fotografía se conoce a la representación de una escena u objeto por medio de un sistema de cámara, y que graba información dentro del rango electromagnético, es decir, que puede ser obtenido por dentro del espectro ultravioleta visible. Por otro lado, una imagen puede ser obtenida por un medio fotográfico, o que puede ser escaneado del medio. El uso del escáner para la obtención de imágenes da una ventaja sobre las fotografías, ya que puede ser calibrado para detectar información dentro del espectro electromagnético que no es detectado por una cámara, y de esta forma obtener distintos datos digitales. (Gibson & Power, 2000)

### **2.11. Sensores Remotos**

La teledetección remota se define como la ciencia y arte que ayuda a obtener información sobre un área, objeto o fenómeno, mediante la evaluación de los datos generados por un instrumento o sensor que no se encuentra en contacto con dicha área, objeto o fenómeno que se analiza. Es por esta razón que se considera también como un proceso de lectura. Haciendo uso de varios sensores remotos se pueden obtener una gran variedad de datos que tienen distintas formas, como son las variaciones en ondas acústicas, o patrones cambiantes en la energía electromagnética. Entre los sensores remotos más conocidos se tiene al sonar, que genera información a través de los cambios en los patrones de las ondas acústicas; y por otro lado hay sensores más avanzados como los medidores de gravedad que detectan la variación de fuerza de gravedad. El ojo humano podría considerarse un sensor remoto ya que obtiene información generada por la acción de la luz sobre los objetos. De forma concreta, los procesos necesarios para el funcionamiento de un sensor remoto son, adquirir datos y analizarlos. (Lillesand et al., 2015)

La teledetección de imágenes ofrece información adquirida en tres grandes campos. En primer lugar, tenemos las imágenes que se obtienen por medio de aeronaves que navegan dentro de los 500 metros a 20 km de altura, aunque lo común es que no pasen de los 5 km en la mayoría de los casos; sin embargo, se conoce que Estados Unidos ha adaptado aviones para conseguir datos a alturas mucho mayores a los 20 km. Luego tenemos a los sensores que se encuentran posicionados en medios espaciales y satelitales operando

en alturas entre los 250 km a 1000 km. Por lo general, las naves espaciales tripuladas no viajan a alturas mayores a 300 km; aunque es conocido que la estación espacial rusa opera a una altura de hasta 400 km aproximadamente sobre el planeta. Por otro lado, los satélites como el Landsat, SPOT, o incluso los designados a vigilancia militar, en su mayoría trabajan a una altura de hasta 1.000 km, y pueden funcionar durante varios años hasta que fallen, y dependiendo de su altura relativa al planeta pueden mantenerse en órbita, o reingresar al planeta y desintegrarse al atravesar la atmosfera. Por último, tenemos a los satélites de muy alta operación que llegan a viajar hasta 36.000 km fuera del planeta y son geoestacionarios, es decir, se pueden mantener en la misma región del planeta todo el tiempo. (Gibson & Power, 2000)

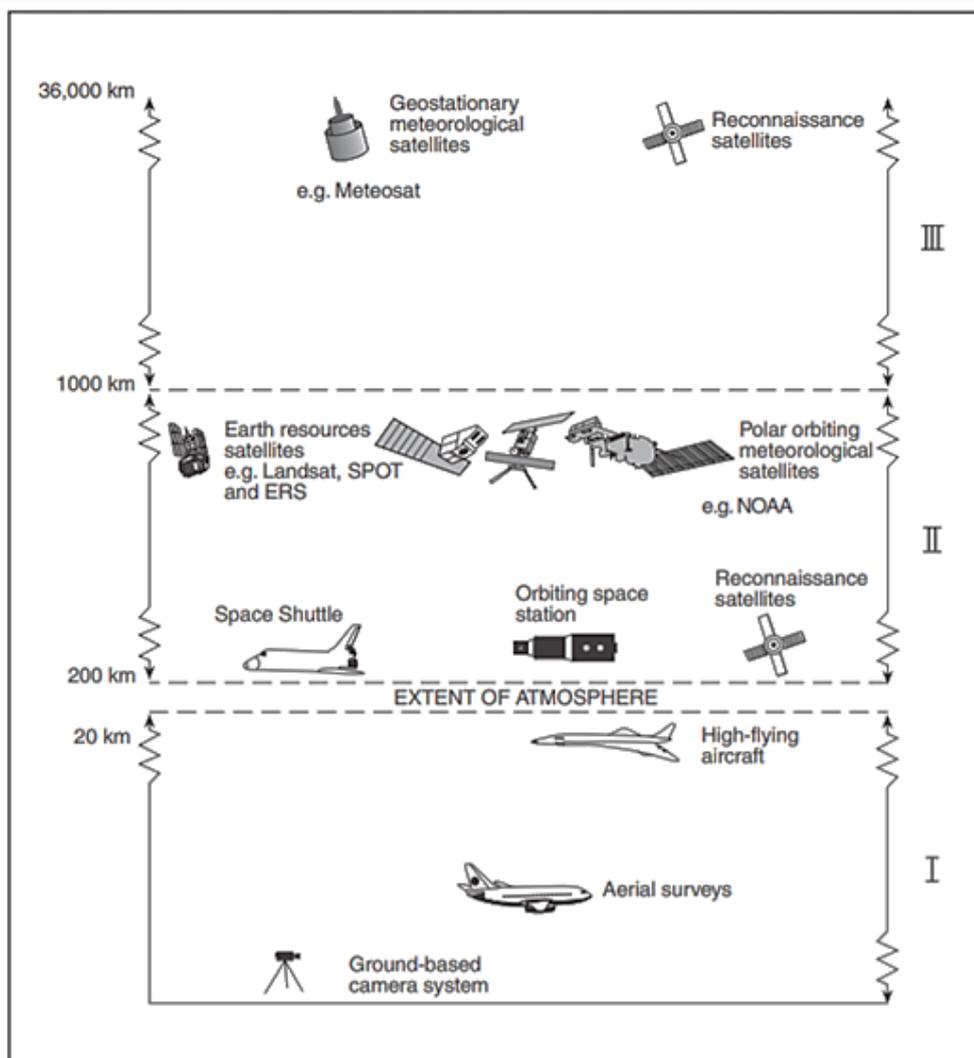


Imagen 5. Plataformas de sensores remotos y su variación de altura. Tomado de "Introductory Remote Sensing" por Gibson & Power) (Gibson & Power, 2000)

## **2.12. Ventajas de la teledetección**

Los satélites que incorporan sensores remotos, al orbitar de forma sincronizada al sol y cruzando la línea ecuatorial a una hora local constante, son capaces de capturar imágenes de la superficie terrestre con la misma iluminación y con cobertura continua, es decir, vuelven a visitar los mismos lugares en distintos intervalos de tiempo. (Rao, 2002)

El uso de sensores remotos en el campo de la geomorfología se hace cada vez más presente debido a que se encuentra directamente relacionado con otros campos de interés y estudios similares, como son la geología, topografía, hidrología, y el uso del suelo. (Rao, 2002)

Los sistemas de información geográfica y los sensores remotos son ideales para los análisis geomorfológicos del terreno ya que es este el que contrala el movimiento y la acumulación de flujo de agua. (Srivastava & Bhattacharya, 2000)

## **2.13. Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

Según (Olaya, 2016): “Un SIG es fundamentalmente una herramienta para trabajar con información georreferenciada, una definición en la que pueden entrar un gran número de tecnologías y de otros elementos no tecnológicos”

En otras palabras, un SIG nos permite realizar operaciones variadas como la gestión de datos espaciales, su lectura, edición y almacenamiento. Con esta información, nos permite analizar distintos escenarios, y realizar consultas que pueden ser desde evaluaciones simples hasta complejos modelos. Con estas consultas se puede obtener resultados como mapas, generar gráficas, y elaborar informes, entre otras aplicaciones. (Olaya, 2016)

Para poder estudiar de mejor forma los SIG, se debe realizar una división de cinco factores clave para la correcta operación del sistema. Estos factores son los datos, el análisis y sus procesos, la visualización, los métodos vinculados a la interpretación de datos, y la tecnología que se va a usar para operar el sistema, tanto software como hardware son muy importantes en este aspecto. (Olaya, 2016)

Los SIG nos brindan variables de entrada para el modelado hidrológico que otros sistemas no pueden ofrecer haciendo uso de una mezcla de datos espaciales, funciones de visualización, de análisis, y de gestión de información. Con estas herramientas es posible trabajar la variabilidad del terreno, los cambios de pendientes, y la variación de la forma de la cuenca. Esta información es sumamente importante en un estudio hidrológico y geomorfológico ya que el agua al fluir cuesta abajo, y será del suelo el cual precise la velocidad, dirección, cantidad de infiltración, y acumulación del flujo de agua que tendrá el río. (Heywood et al., 2006)

#### **2.14. Modelo Digital del Terreno DTM**

Un modelo digital del terreno, DTM por sus siglas en inglés, es una representación estadística de la superficie de terreno, generado en un campo de coordenadas por una gran cantidad de puntos que tienen coordenadas X, Y y Z respectivamente. (Li et al., 2005)

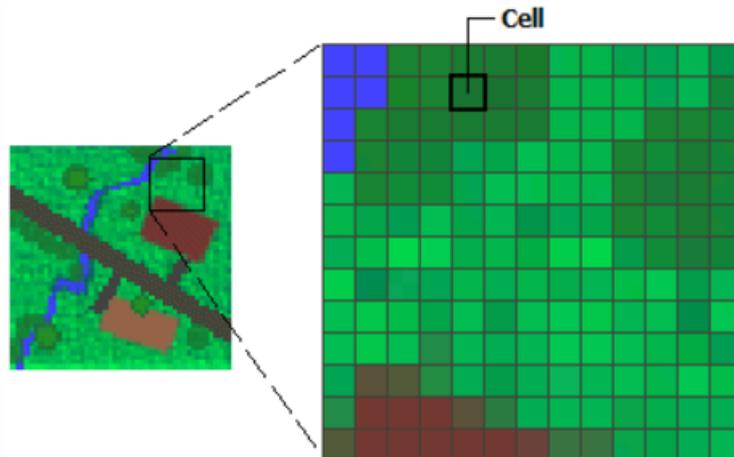
Se conoce de forma común el término Modelo Digital de Elevación, DEM por sus siglas en inglés, como un sinónimo de los DTM, y se lo usa para describir los DTM, y los modelos digitales de superficie, DSM. Estos modelos de elevación son usualmente son obtenidos por medio de teledetección remota a través de radares o fotogrametría. (Hirt, 2014)

Los modelos digitales de terreno se relacionan con otras disciplinas de las que dependen para poder ser de utilidad en la creación de proyectos. Entre estas disciplinas se tiene a la computación, la adquisición y manipulación de datos, entre otras.

#### **2.15. Ráster**

Un ráster es una matriz de celdas en las que cada columna y fila tiene un valor específico para caracterizar un dato o serie de datos. Estos datos almacenados en cada celda son representaciones de fenómenos del mundo real. En la actualidad existen imágenes ráster para mostrar todo tipo de información como valores de temperatura, densidad poblacional, elevaciones,

y concentraciones de flujo en el caso de ríos. (*¿Qué son los datos ráster?—Ayuda | ArcGIS for Desktop, 2018*)



**Imagen 6. Matriz de celdas en un Ráster.** (*¿Tomado de '¿Que son los datos ráster?' de la pagina web de ArcGis)(¿Qué son los datos ráster?—Ayuda | ArcGIS for Desktop, 2018)*)

## 2.16. Stream Power

Stream Power es la tasa de energía potencial de una corriente, es decir, es la capacidad de la corriente de agua para generar trabajo geomórfico como puede ser el transporte de sedimentos y la producción de calor al superar la resistencia a la fricción. (Huggett, 2011)

Fue R.A. Bagnold quien uso por primera vez el termino Stream Power para referirse a la cuantificación del suministro de energía a una longitud de corriente de agua para indagar en el transporte de sedimentos en canales. Trabajo previo mostraba una relación entre la energía de la corriente con el arrastre de sedimentos, y lo hacían en función de la descarga, la pendiente, y la gravedad. No obstante, fue Bagnold quien dio a conocer la importancia de la potencia de la corriente, así como también proporcionó ecuaciones de predicción para la concentración total de sedimentos. En su ecuación define a la potencia como producto de la descarga del río, su pendiente, y el peso del agua. (Bagnold, 1966)

$$\Omega = \rho g Q S$$

De la cual  $\Omega$  es la potencia de la corriente,  $\rho$  es la densidad del agua (1,000 kg/m<sup>3</sup>),  $g$  es la gravedad (9.8 m/s<sup>2</sup>),  $Q$  es la descarga del río y  $S$  es la pendiente en flujo uniforme. (Bagnold, 1966)

Fue Bagnold también quien definió la fuente de potencia media para la columna de fluido sobre unidad de área del lecho. (Bagnold, 1966)

$$\omega = \Omega / W$$

Donde  $W$  es el ancho del flujo. (Bagnold, 1966)

Desde entonces se ha demostrado que la potencia de la corriente puede influir en la forma del canal, en las características del rápido y de la ribera, en la migración del canal, en la dinámica de la llanura de inundación, los cambios geomórficos extremos en inundaciones, el tamaño de las partículas del lecho, los deslizamientos de suelo, y la tasa de incisión en lechos de roca. (Gartner, 2016)

## 2.17. Índice de Stream Power

El índice de Stream Power, SPI por sus siglas en inglés, es un valor que se usa para reconocer los sectores más adecuados para reducir el efecto de la escorrentía concentrada de la superficie y así poder tener una mejor conservación del terreno para diversos usos humanos. Este valor se calcula tomando en cuenta el área de captación aguas arriba, el poder erosivo de la corriente de agua, y relacionándolos con la pendiente que muestra cada celda en un ráster. El SPI también ofrece datos para el análisis de la erosión potencial del flujo asociándolos con procesos para la gestión de la preservación de paisajes. Si el área de captación y la inclinación de la pendiente del río aumentan, también lo harán la velocidad del flujo y la cantidad de agua que es aportada por áreas ascendentes, ocasionando a su vez que aumente el SPI, es decir, el riesgo de erosión. Con esto se tiene que este índice, al ser un producto del Stream Power, se calcula en función de la pendiente local del río y el área de drenaje aguas arriba. (Thalacker, 2014)

El índice de Stream Power presenta un rango de valores para mostrar el potencial de erosión y el potencial de deposición. Estos valores tienen la denotación de bajo, moderado, y alto, y son inversamente proporcionales el uno con el otro, es decir, mientras más bajo sea el potencial de erosión, más alto será el potencial de deposición. (Schiff & Milone & MacBroom, 2014)

Erosion Potential Screen			
Specific stream power (W/m <sup>2</sup> )	0-60	60-300	> 300
Natural channel confinement by the valley (1)	> 10	6-10	< 6
Percent (%) increase in confinement by existing permanent infrastructure	< 10	10-25	> 25
Level of risk→	LOW	MODERATE	HIGH

---

Deposition Potential Screen			
Specific stream power (W/m <sup>2</sup> )	> 300	60-300	0-60
Number of 5% or larger slope decrease areas	0	1	≥ 2
Number of 3 <sup>rd</sup> order or larger confluence areas	0	1	> 1
Number of road crossings	0	1-2	> 2
Level of risk→	LOW	MODERATE	HIGH

**Imagen 7. Rango de Valores SPI. (Tomado de 'Vermont River Sensitivity Coarse Screen', por Schiff y Milone&MacBroom) (Schiff & Milone & MacBroom, 2014)**

## 2.18. Índice de Humedad Topográfica

El índice de humedad topográfica, TWI, es un índice de humedad en estado estable, cuya función es el de calcular un valor que exprese la relación entre el área de captación aguas arriba por unidad de ancho perpendicular a la dirección de flujo, y la pendiente del flujo. Este índice también se conoce como CTI, índice topográfico compuesto, y se calcula como se muestra a continuación. (Yang et al., 2005)

$$CTI = \ln\left(\frac{As}{\tan \beta}\right) \quad (\text{Beven \& Kirkby, 1979})$$

Del cual  $A_s$  es 'área de captación específica' en  $m^2$  por unidad de ancho perpendicular a la dirección de flujo, y  $\beta$  es 'ángulo de pendiente de la corriente' (Gessler et al., 1995)

Este índice toma como base la hipótesis de que la topografía controla el movimiento del agua cuando existe inclinación en el terreno, por lo tanto, formando un patrón espacial de humedad. (Schmidt & Persson, 2003)

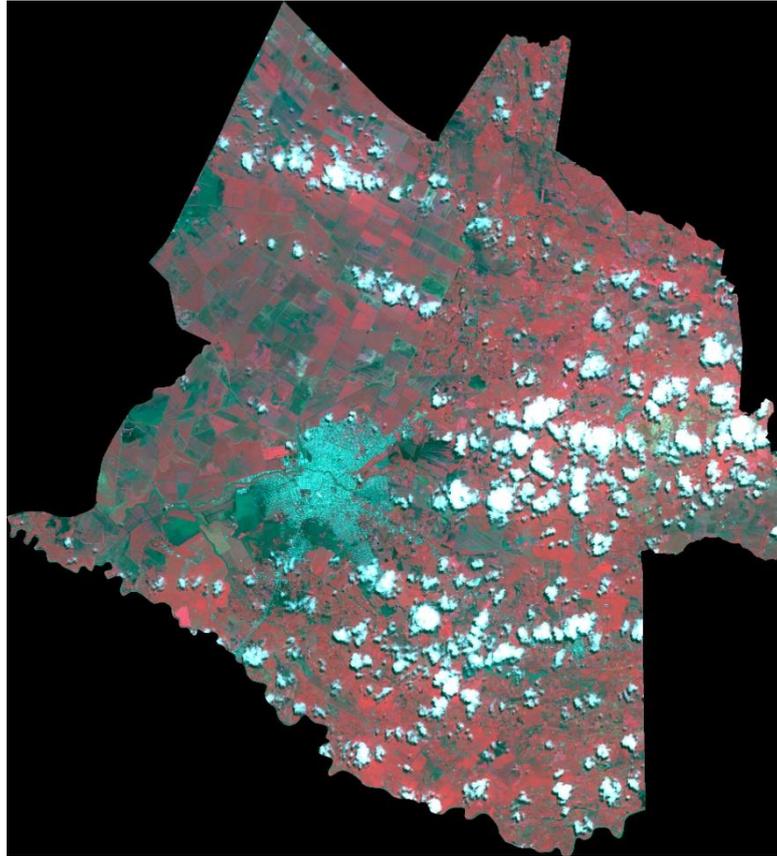
## **CAPITULO III**

### **3. METODOLOGÍA**

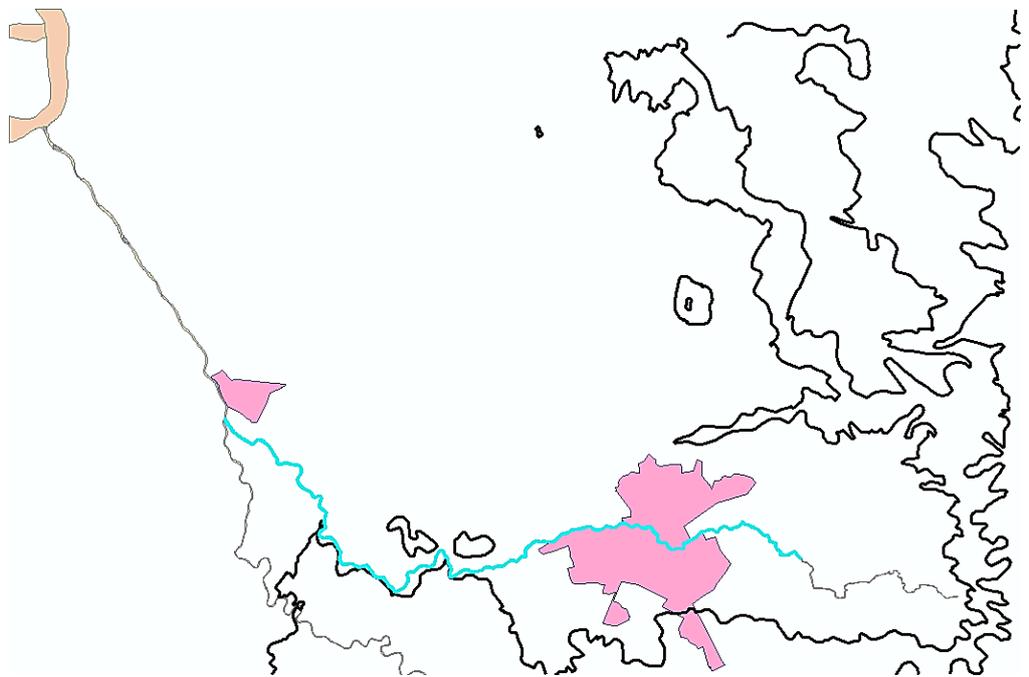
Se obtiene información a partir de los medios digitales como datos, imágenes y fotografías satelitales, sistemas en láser, entre otros, para evitar realizar la mayor cantidad de trabajos de campo. Luego se ingresan los datos dentro de los programas SIG para poder procesar la información y generar los modelos digitales fluviales del río Milagro. En esta sección se hace una especificación de los procesos para la obtención de resultados que se podrán utilizar para analizar las ventajas y desventajas que se pueden obtener en comparación a los métodos habituales para obtener los mismos resultados. Finalmente, se determina la efectividad del proceso de elaboración del modelo que se espera alcanzar con el modelado digital del río con las capas creadas, al utilizarlas para generar datos que pueden ser equiparados a la información existente. A continuación, se presenta más detallado el procedimiento de cada paso de la metodología para la generación del modelo.

#### **3.1. Obtención de datos digitales relevantes**

Para dar inicio al modelado, la obtención de información es el paso más importante, ya que es de esta que va a depender la calidad del procesamiento para la realización del modelo geomorfológico. Estos datos fueron obtenidos a partir de varios sistemas nacionales de información y de sensores remotos disponibles en la web, y son datos que se encuentran disponibles para el público en general. Entre estos datos se tienen cartas topográficas, imágenes satelitales, ortofotos, archivos Shape, entre otros. Sin embargo, de estos datos, la resolución debía ser adaptada para mostrar la escala en la que el río Milagro es observable.



**Imagen 8. Ortografía del cantón Milagro. Obtenida del SNI**



**Imagen 9. Capas interpuestas: Curvas de Nivel (negro), Catones (rosado), Río Milagro (Beige). Obtenidas de IGM.**

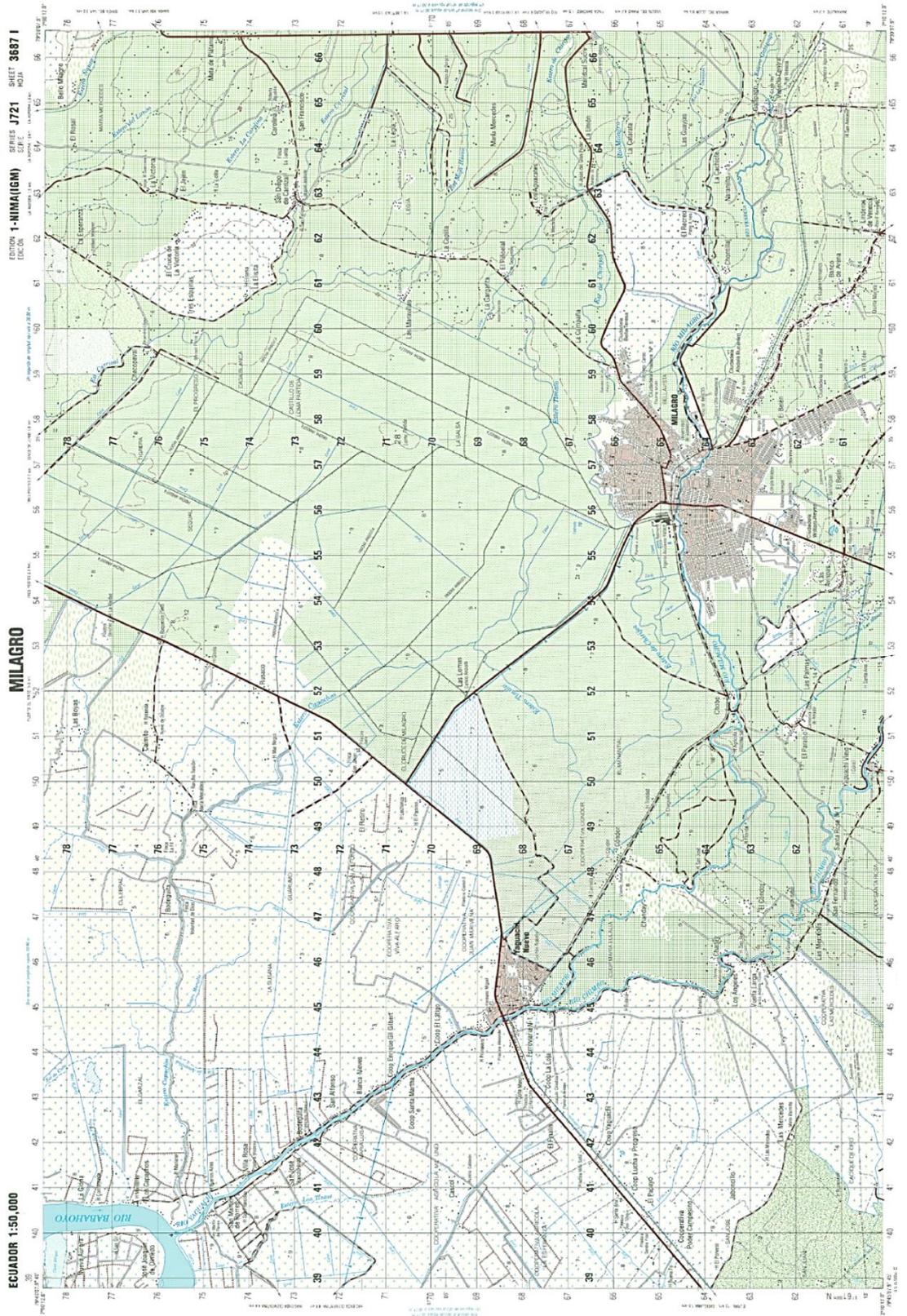
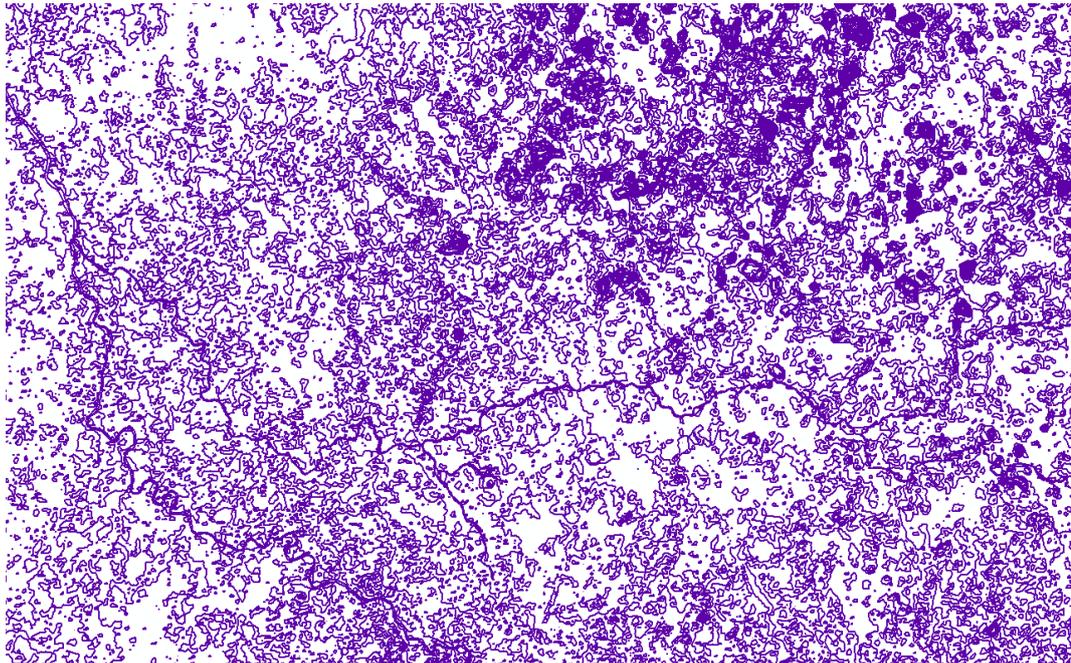


Imagen 10. Carta Topográfica Milagro. Obtenida de IGM.

### 3.2. Generación y adaptación de datos

Tal como se mencionó anteriormente, los datos fueron adaptados de forma que muestren la información de forma específica para el río. Al tener una capa de curvas con muy poca información, se procedió a generar curvas a partir de satélites por medio del programa Global Mapper. El satélite que se usó es Aster v3. Las curvas luego fueron referenciadas para que trabajen en conjunto con la capa de datos del río milagro y poder así obtener una nueva capa con información detallada de la región.



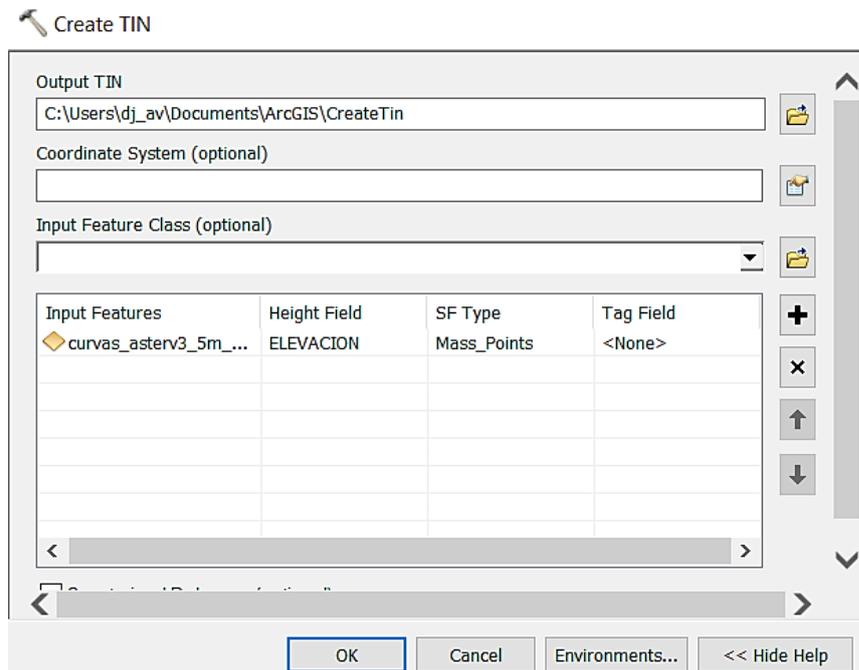
**Imagen 11. Curvas de nivel generadas por Global Mapper y ArcGIS. Elaborado por José Damián Tejena**

Una vez que se tiene la capa de información detallada, se pueden realizar los demás procesos en ArcGIS para obtener el DEM.

### 3.3. Elaboración del DEM

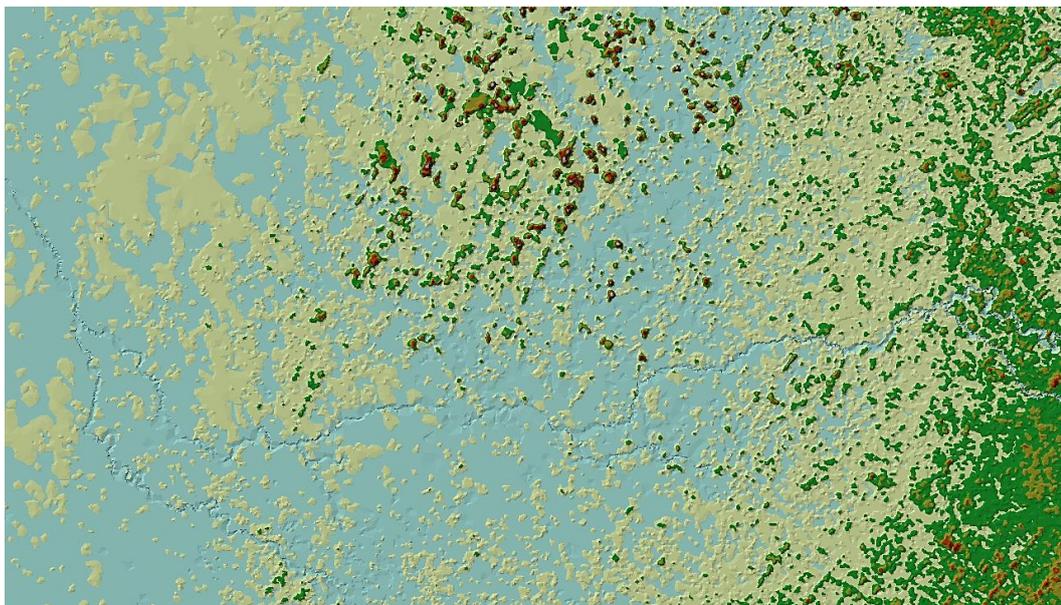
1. A partir de la capa de curvas de nivel se puede generar una capa de Triángulos Irregulares TIN, con la cual se puede apreciar mejor los relieves del terreno. Para generar esta capa se hace uso de la caja de herramientas de ArcGIS, ArcToolbox, en donde se sigue el siguiente procedimiento: 3D Analyst Tools → Data Management → TIN → Create TIN. Luego aparece la

siguiente ventana en donde seleccionamos los datos de entrada, y el nombre que tendrá la capa creada.



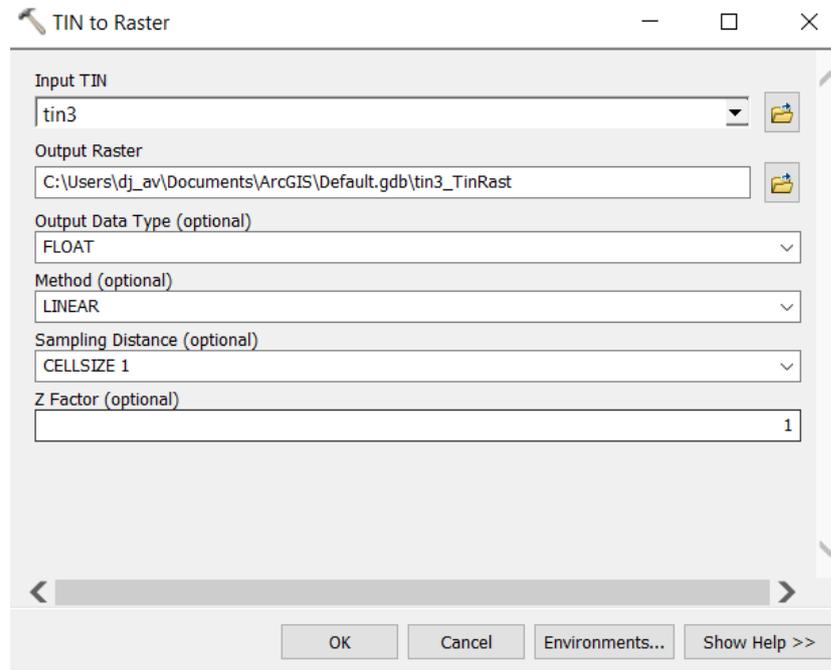
**Imagen 12. Ventana para creación de capa TIN. Extraído de ArcMap**

En esta ventana seleccionamos el campo de elevación según la tabla de atributos de la capa seleccionada, y también se elige el tipo de visualización que se dará a los datos creados. A continuación, se presenta la capa creada según los parámetros establecidos.



**Imagen 13. TIN de río Milagro. Elaborado por José Damián Tejena**

2. Con la capa creada se puede utilizar la herramienta de conversión de capas en ArcToolbox. Esta herramienta permite interpolar los valores de elevación obtenidos desde el TIN para generar un archivo ráster con un tamaño de celda definido. El procedimiento es como se muestra: 3D Analyst Tools → Conversion → From TIN → TIN to Raster.



**Imagen 14. Ventana para transformación de TIN a Ráster. Extraído de ArcMap**



**Imagen 15. Ráster de río Milagro. Elaborado por José Damián Tejena**

Una vez que se obtiene la capa ráster, el DEM está listo para ser procesado por la extensión de herramientas de ArcHydro Tools y GeoHMS, que se instalan para ayudar con la generación de datos relevantes en el proyecto.

### 3.4. Preprocesamiento del terreno

1. El primero de los procesos de las herramientas agregadas, es el de corregir los valores del ráster que puedan presentar errores de elevación en caso de que una celda se encuentre encerrada por celdas de mayor elevación a su alrededor. Se usa la herramienta de Fill Sinks para modificar estos valores de elevación y permitir que el flujo de la celda siga su curso. Para este caso se utilizó la herramienta Fill Sinks de la extensión GeoHMS. Fill Sinks es útil en caso de que el río cruce secciones por donde cruza un puente ya que esta herramienta toma las características del río antes y después del puente y permite que se puede trabajar como un flujo continuo.

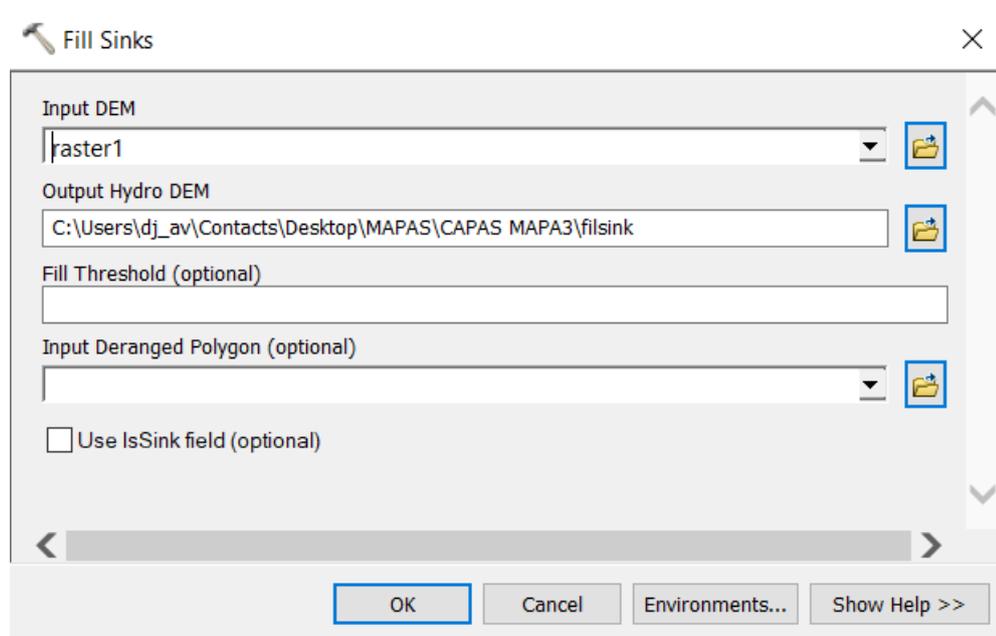
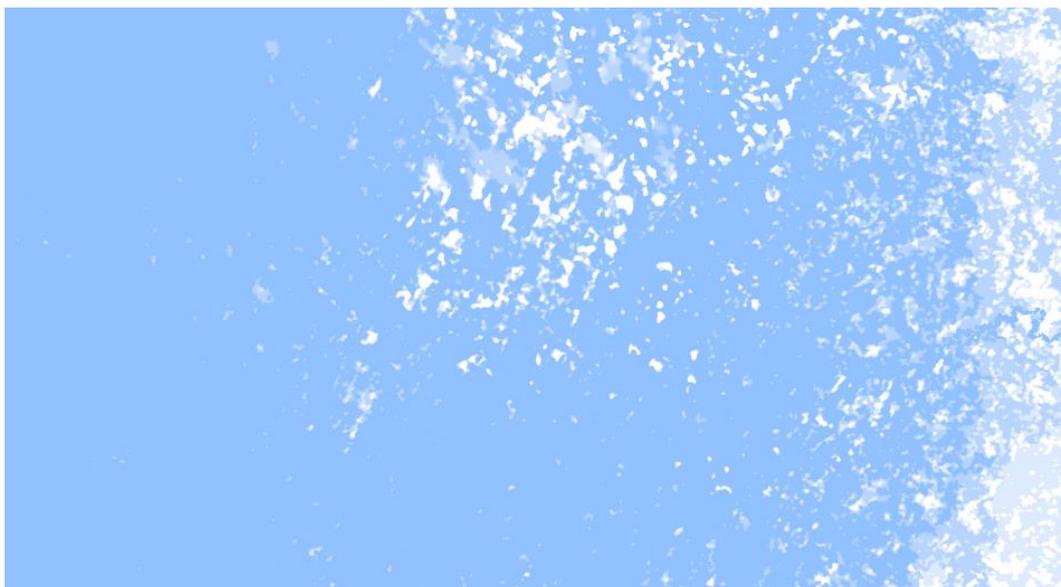
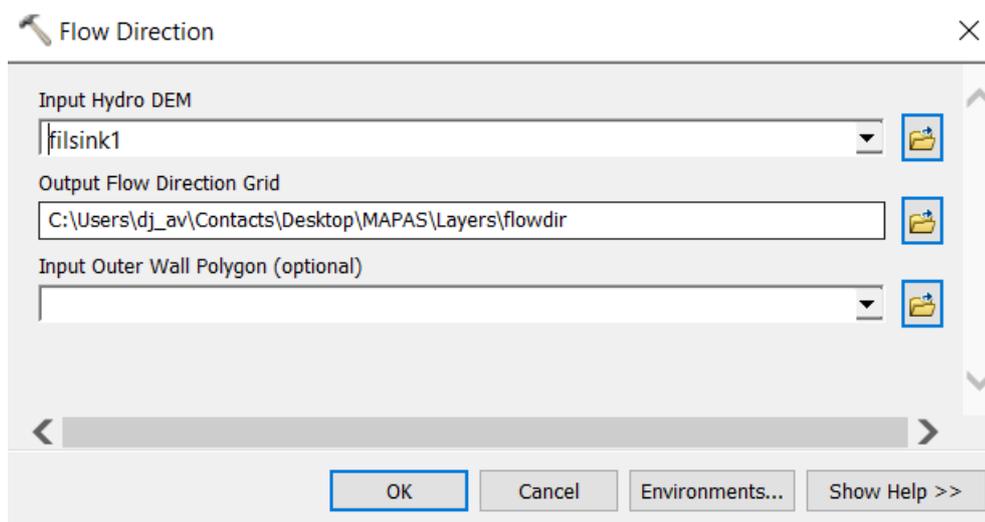


Imagen 16. Ventana Fill Sinks. Extraído de ArcMap

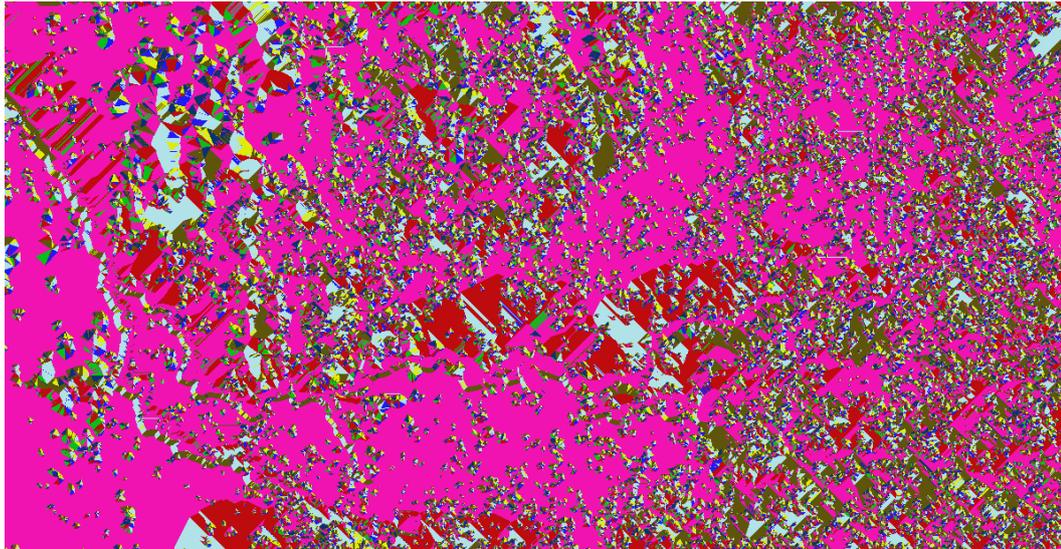


**Imagen 17. Capa Fill Sinks, ráster corregido. Elaborado por José Damián Tejena Tapia**

2. Una vez que se tiene una capa corregida se genera la dirección de flujo. La herramienta Flow Direction permite crear una red que indica la dirección en que fluye el agua desde la zona más pronunciada de la celda, y permite visualizarlo. A continuación, se presenta la ventana para el ingreso de datos y su representación visual

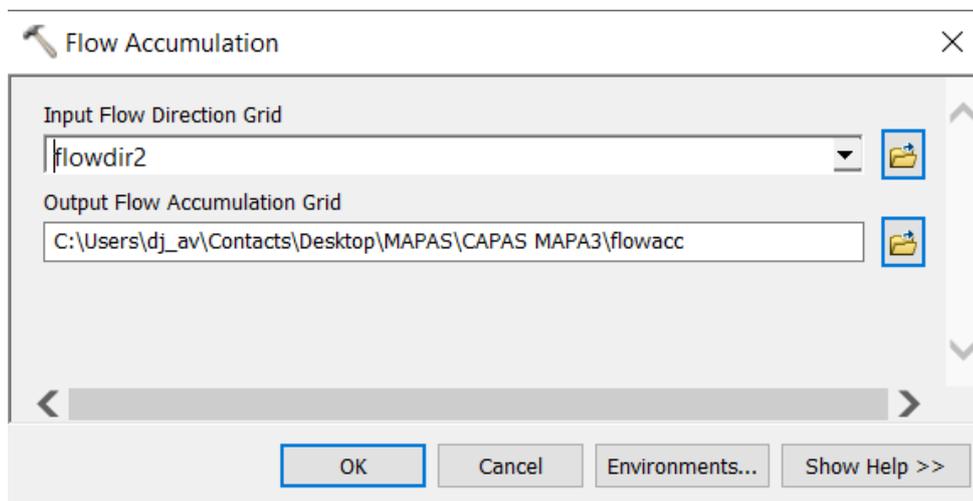


**Imagen18. Ventana de Dirección de Flujo. Extraído de ArcMap**



**Imagen 19. Capa Dirección de Flujo. Elaborado por José Damián Tejena Tapia**

3. La capa de dirección de flujo nos permite crear la capa de Acumulación de Flujo a continuación. Esta capa es de utilidad para mostrar las zonas en que existe una acumulación de celdas del mismo nivel de elevación, representando la forma en que existen zonas del río donde hay mayor flujo de corriente del río.



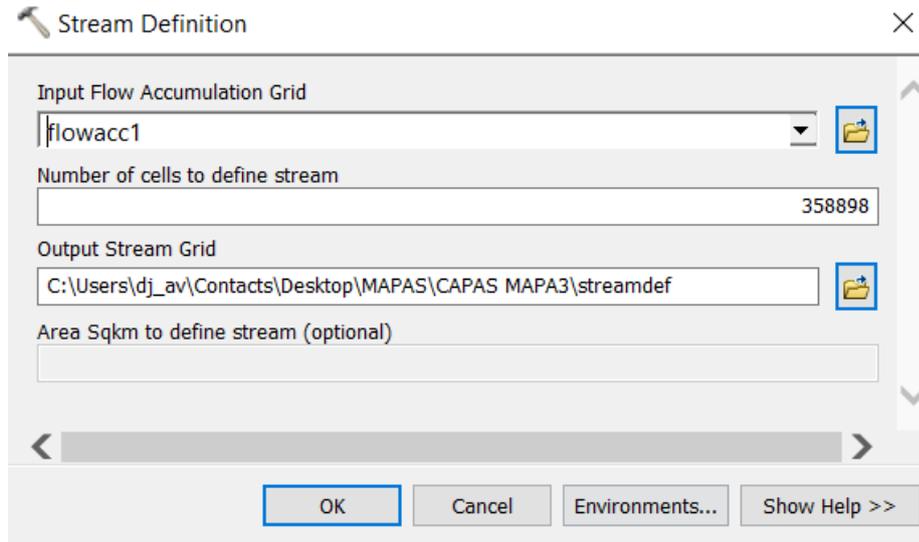
**Imagen 20. Ventana de Acumulación de Flujo. Extraído de ArcMap**



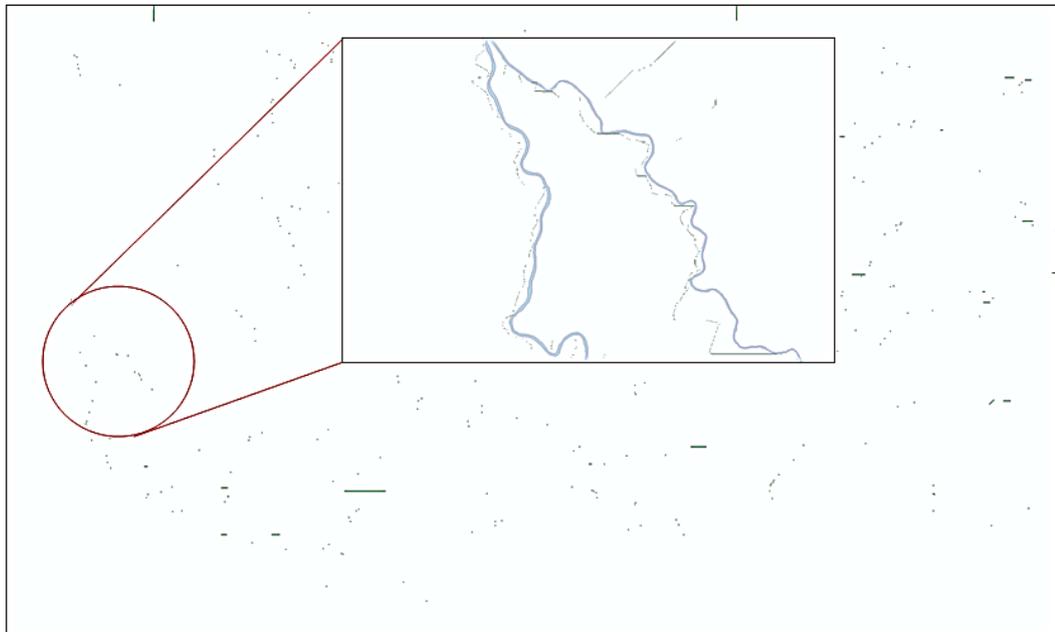
**Imagen 21. Capa de Acumulación de Flujo. Elaborado por José Damián Tejena**

En la última imagen, las leves líneas negras son las que marcan la acumulación de flujo, y la capa que muestra el río se puso de referencia para poder apreciar que la acumulación de flujo corresponde a la de la corriente del río.

4. La capa que sigue es la de la definición de la corriente. Stream Definition permite tomar la capa de la acumulación de flujo, y delimitar la corriente de agua en un rango de número de celdas definidas. En este caso se analiza el río con los parámetros que da el programa por defecto divididos entre 10, para de esta forma lograr una mejor precisión de la sección del río. Mientras más se reduzca el valor en esta casilla, mayor será la definición de la corriente y sus afluentes.

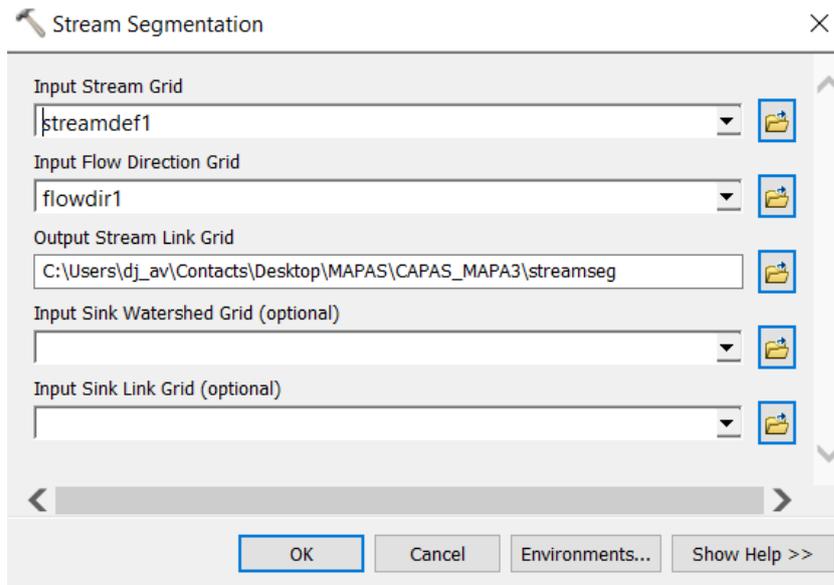


**Imagen 22. Ventana Stream Definition. Extraído de ArcMap**

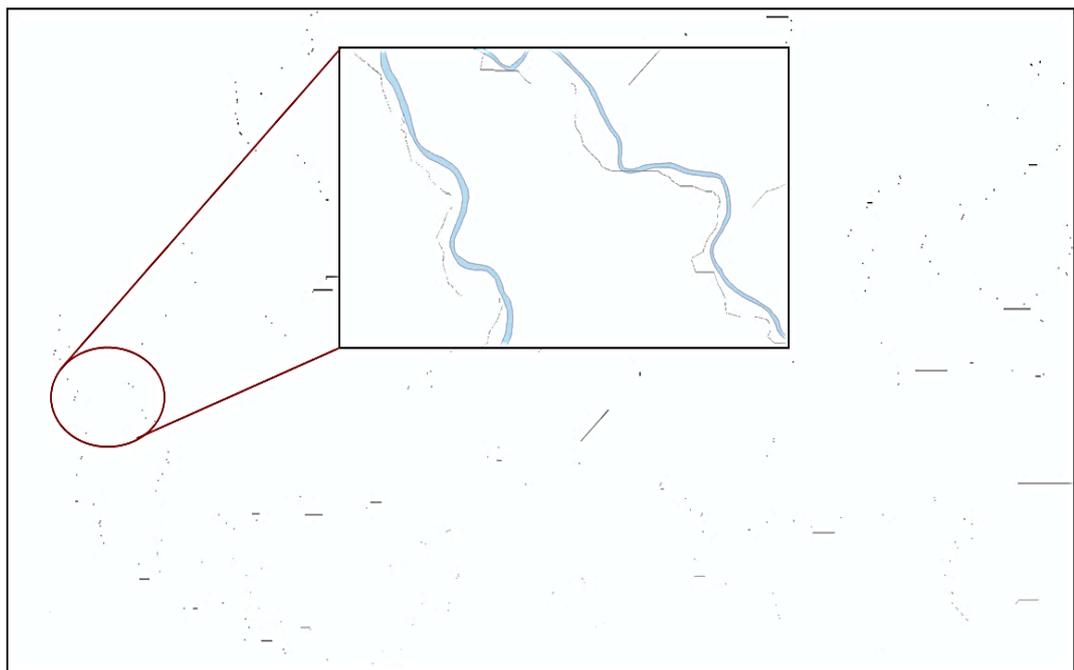


**Imagen 23. Capa Stream Definition. Elaborado por José Damián Tejena Tapia**

5. La capa de Stream Segmentation es la que continua, y como su nombre insinúa, crea una red de segmentos de corriente del río que tienen valoración específica. Aunque estas últimas 3 capas parezcan, no comparten los mismos datos y se enfocan respectivamente en diferentes formas de analizar la información.



**Imagen 24. Ventana Stream Segmentation. Extraído de ArcMap**



**Imagen 25. Capa Stream Segmentation. Elaborado por José Damián Tejena**

6. Una vez que se tienen todas las capas correspondientes a la corriente del río, se procedió a crear las primeras delimitaciones de la cuenca. Catchment Grid Delineation nos permite crear una cuadrícula de celdas en la que cada una de las celdas tiene un valor específico que determina a que área pertenece de la cuenca, separándola en subcuencas. Estos valores específicos son obtenidos de la capa anterior de Segmentos de corriente relacionando sus valores con la capa de dirección de flujo para conocer a que región se está drenando el agua. Una vez que se crea esta capa, se generan polígonos que representan cada una de las subcuencas establecidas con sus respectivos valores.

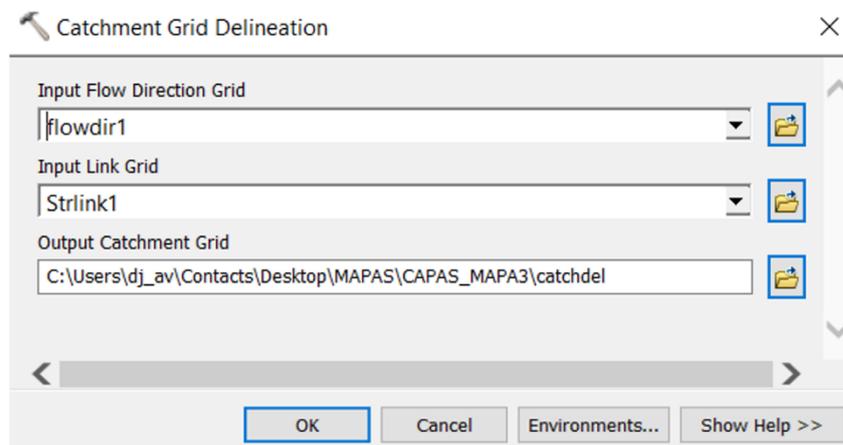


Imagen 26. Ventana Catchment Grid Delineation. Extraído de ArcMap

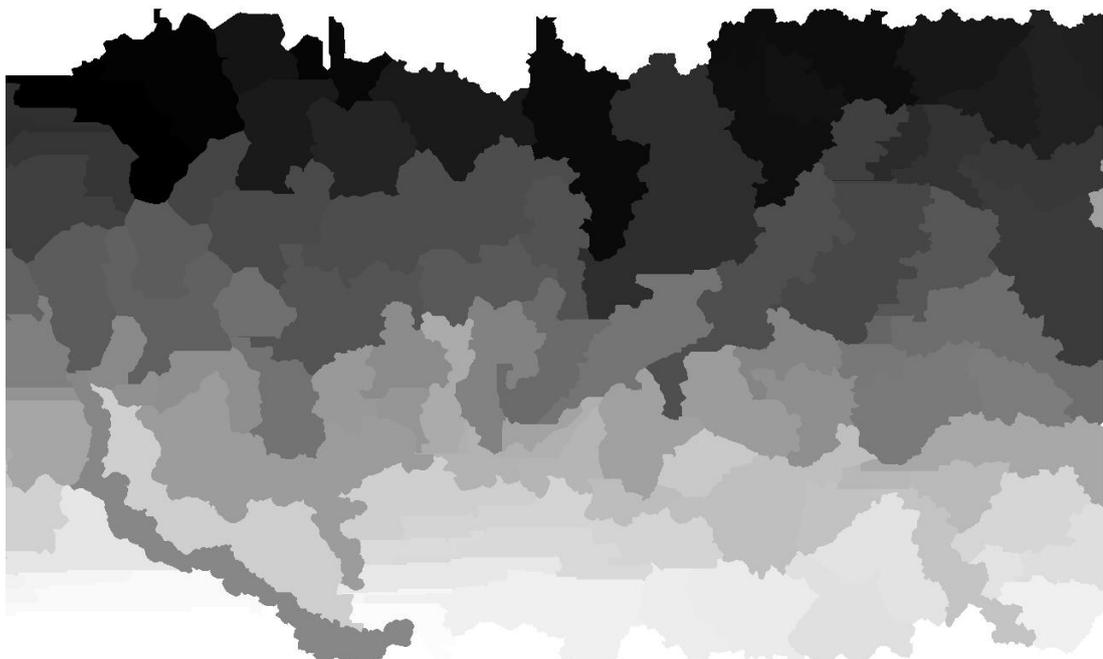
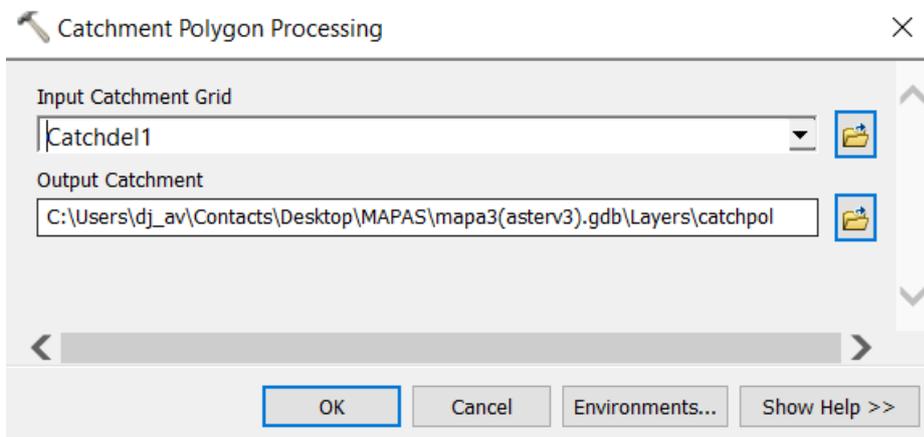
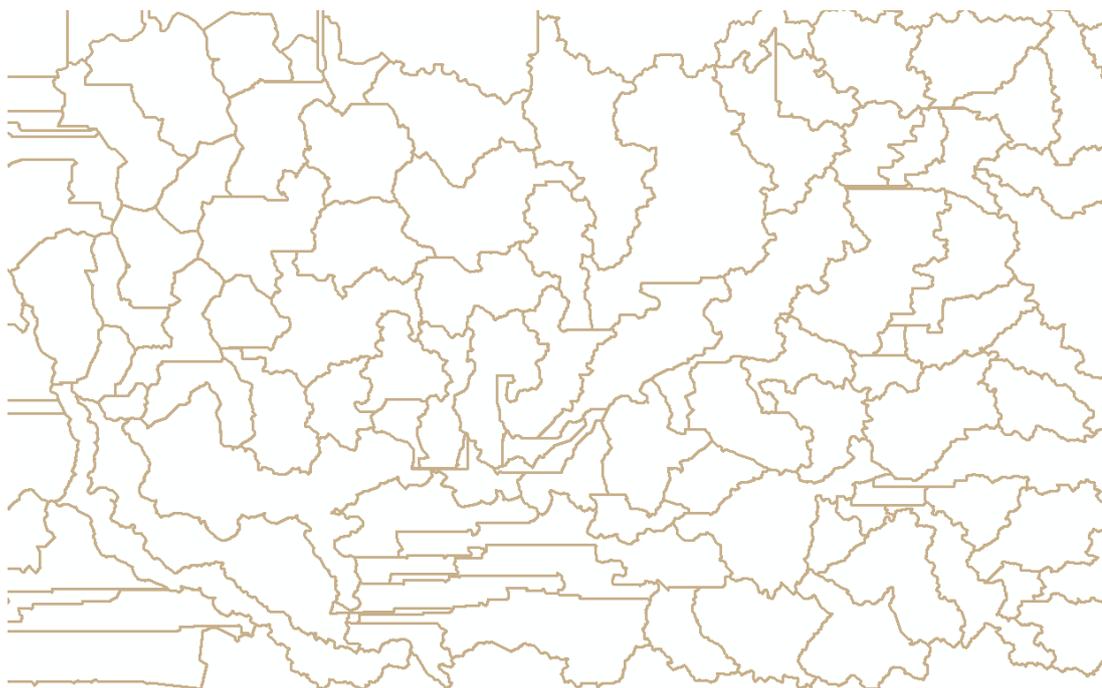


Imagen 27. Capa Catchment Grid Delineation. Elaborado por José Damián Tejena

7. Con la capa de subcuencas generada, la herramienta 'Catchment Polygon Processing' crea polígonos que delimitan las áreas de la red de subcuenca.

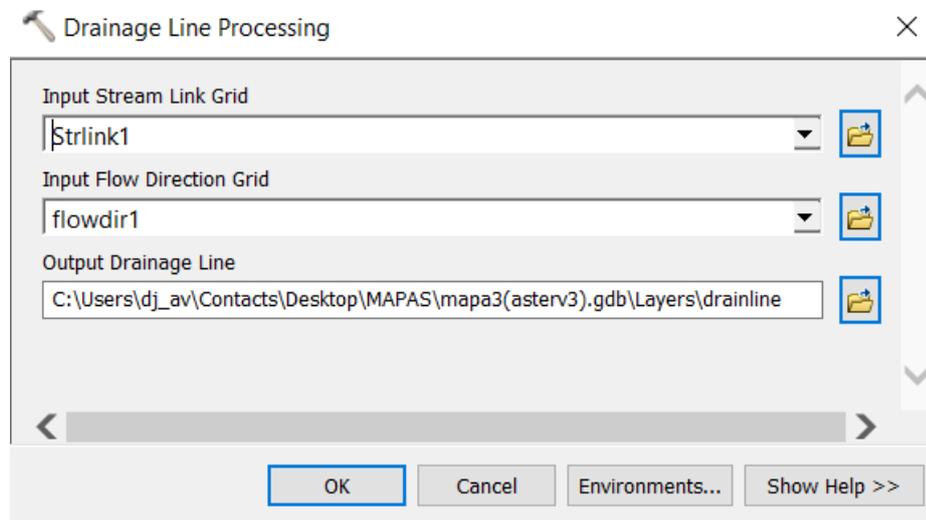


**Imagen 28. Ventana Catchment Polygon Processing. Extraído de ArcMap**



**Imagen 29. Capa Catchment Polygon Processing. Elaborado por José Damián Tejena**

8. La capa Drainage Line es la siguiente que se generó, y es en esta capa que la cuadrícula de la segmentación de corrientes es utilizada para crear una línea de drenaje con un identificador establecido que señala a que subcuenca pertenece cada segmento del río y como se conecta a la red de flujo principal.

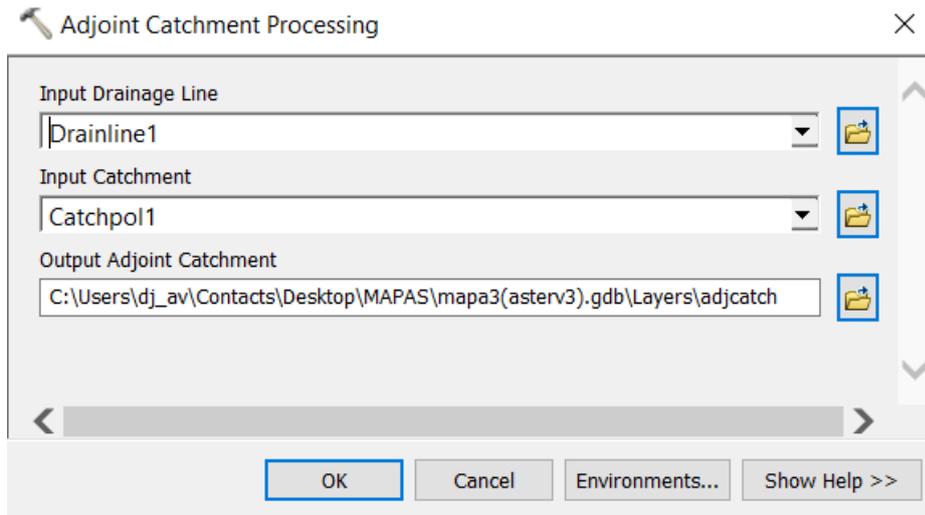


**Imagen 30. Ventana Drainage Line Processing. Extraído de ArcMap**



**Imagen 31. Línea de drenaje Río Milagro. Elaborado por José Damián Tejena**

9. La última capa del preprocesamiento del terreno corresponde a la de la Cuenca Adjunta. Adjoint Catchment Processing es la herramienta que genera la cuenca a partir de las subcuencas creadas anteriormente. Estas subcuencas se clasifican en principales y secundarias, donde las secundarias reconocen el punto de drenaje principal y se unen entre ellas delimitando la cuenca principal.



**Imagen 32. Ventana Adjoint Catchment Processing. Extraído de ArcMap**

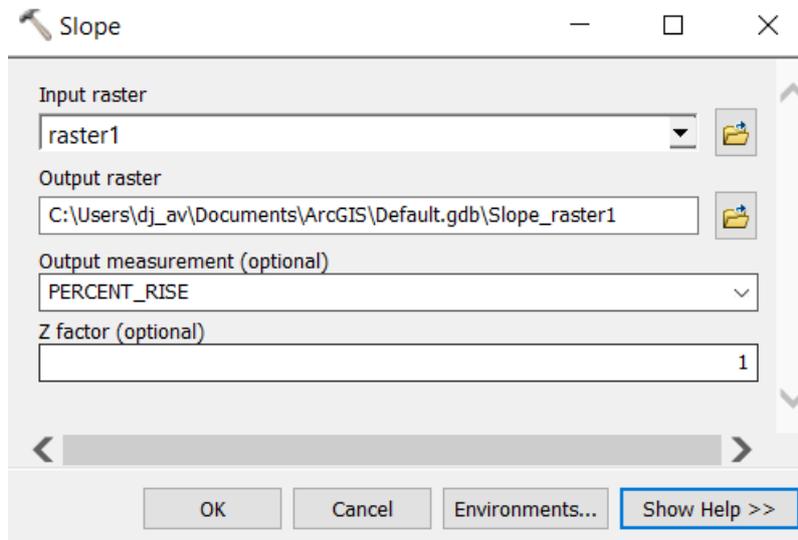


**Imagen 33. Capa Adjoint Catchment Processing. Elaborado por José Damián Tejena**

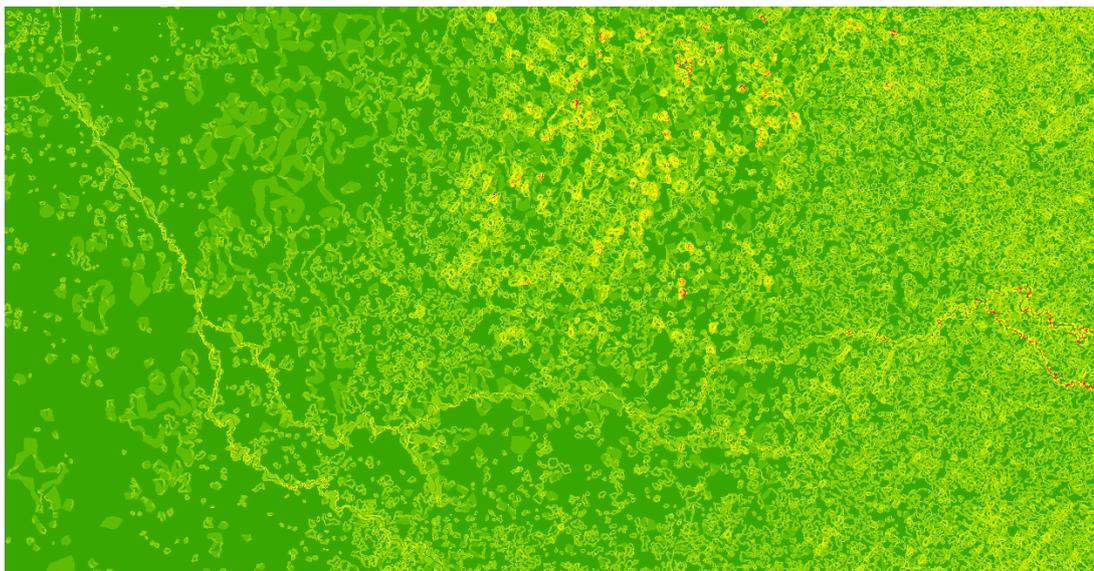
### **3.5. Índice de Stream Power (SPI) e índice Topográfico de Humedad (CTI)**

Para lograr obtener las capas ráster de cada uno de estos índices, primero se crean capas que permitan visualizar mejor la información ya obtenida, así como también se generaron unas capas de información adicional necesarias para el cálculo de los índices. Las capas generadas son las que se muestran a continuación.

1. La primera capa, y posiblemente la más importante, que se obtuvo fue la capa de pendientes del terreno. La caja de herramientas de ArcGIS tiene una función que permite representar las pendientes del terreno haciendo una recolección de información de cada celda del ráster de la superficie. Para usar esta herramienta se siguió estos pasos: Spatial Analyst Tools → Surface → Slope. La capa de pendiente depende únicamente del DEM y se seleccionó una representación en porcentajes.

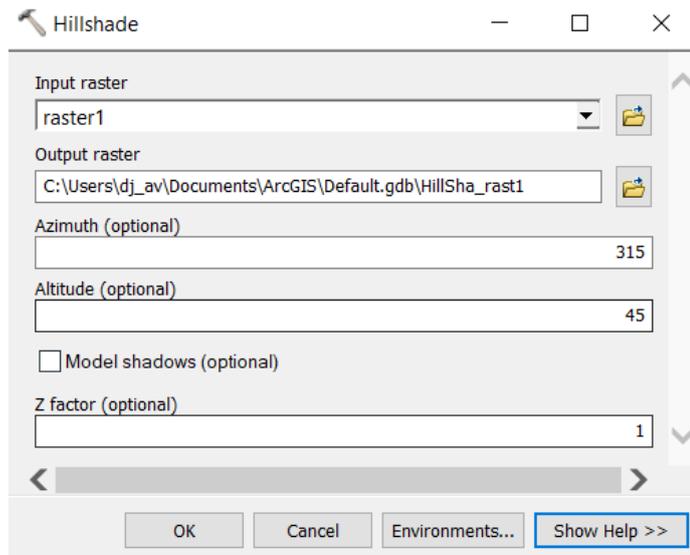


**Imagen 34. Ventana para la creación de la capa de pendientes.  
Extraído de ArcMap**



**Imagen 35. Capa de pendientes. Elaborado por José Damián Tejena**

2. Luego de haber obtenido la capa de pendientes, la siguiente capa permite una visualización del contorno de sombras del DEM inicial. El procedimiento es el siguiente: Spatial Analyst Tools → Surface → Hillshade. Las dos opciones para personalizar la forma en que será representada son, el ángulo con el que la luz va a proyectar las sombras, y la altura desde la cual se están proyectando. Con las preferencias de visualización por defecto, se obtuvo la siguiente capa.

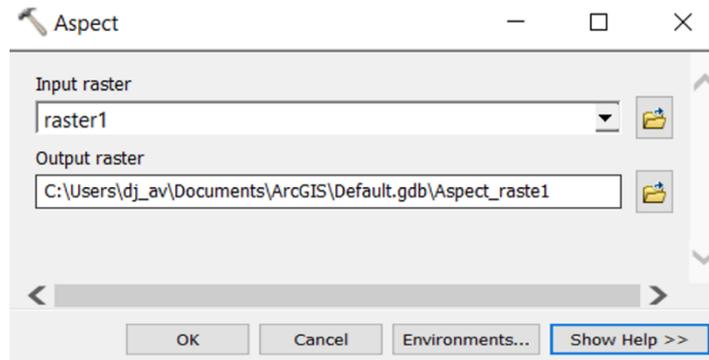


**Imagen 37. Ventana Hillshade. Extraído de ArcMap**

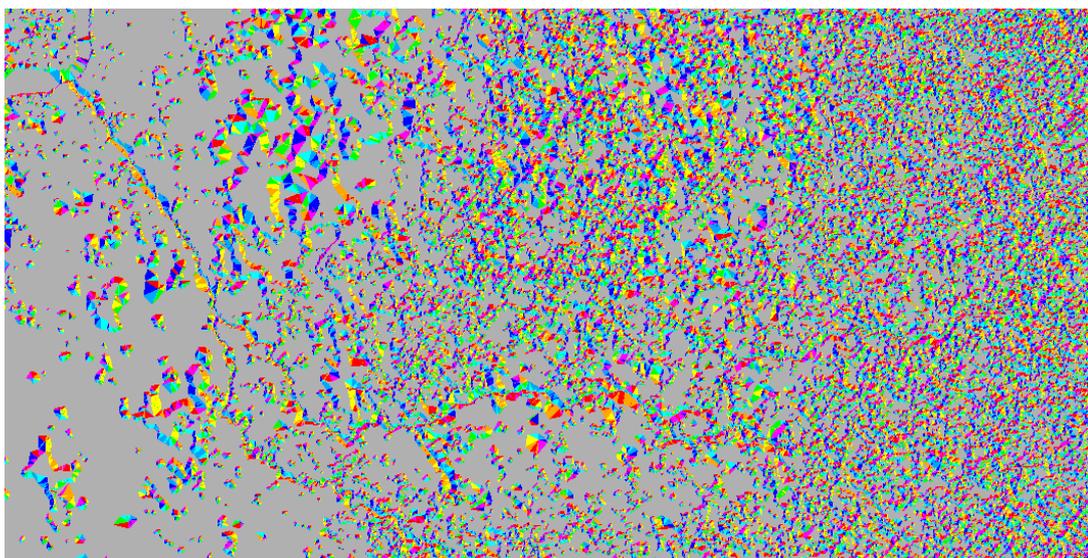


**Imagen 36. Capa Hillshade. Elaborado por José Damián Tejena**

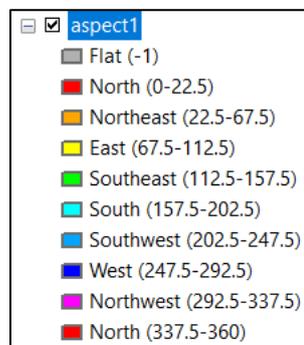
3. La capa Aspect permite interpretar la información del ráster y transformarla a una capa donde se muestra la dirección de las pendientes descendientes al hacer una comparación de cada celda con sus celdas vecinas. Cada color en la capa representa la dirección que sigue la pendiente Esta herramienta se encuentra: Spatial Analyst Tools → Surface → Aspect.



**Imagen 38. Ventana Aspect. Extraído de ArcMap**



**Imagen 39. Capa Aspect. Elaborado por José Damián Tejena**

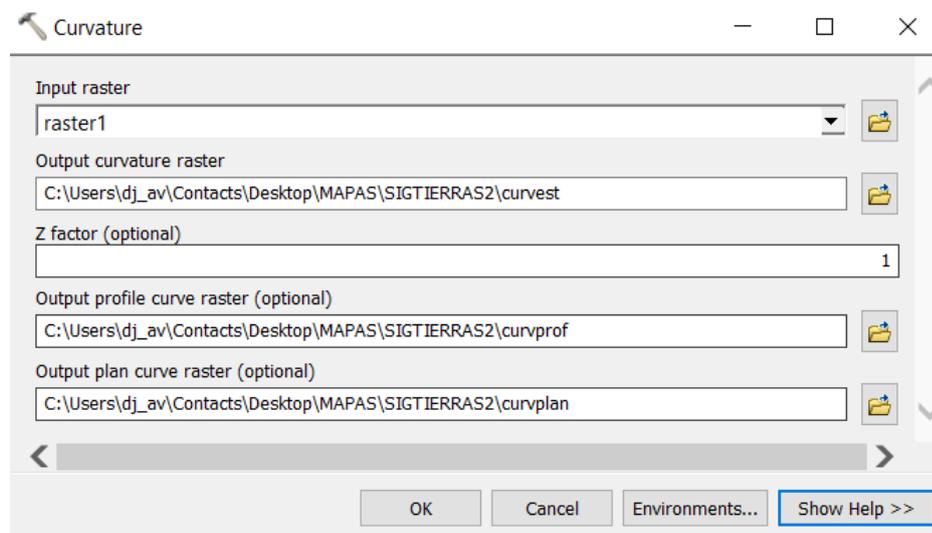


**Imagen 40. Valores de cada color de la capa Aspect. Extraído de ArcMap**

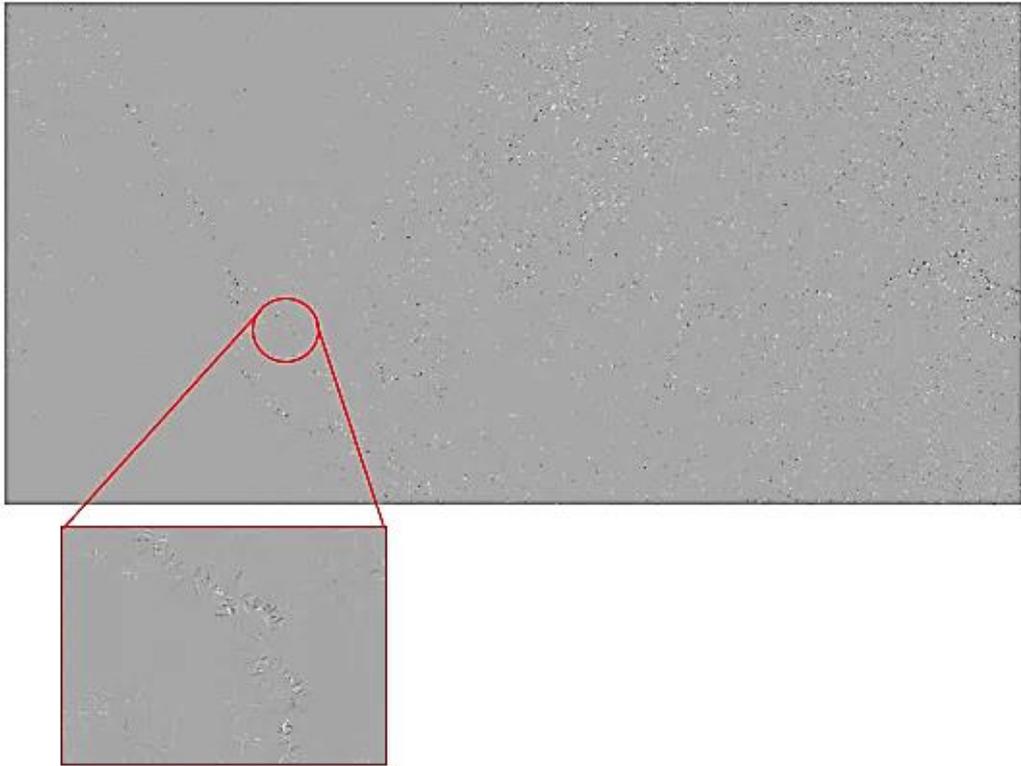
4. La siguiente capa es de curvaturas. Curvature es la herramienta que permite visualizar la curvatura de la superficie de la capa ráster y como esta se adecua al tamaño de celda que se le asignó. Los tipos de curvatura que mostraran son dos:

- la de perfil sigue la dirección de la pendiente máxima que circunda la celda, y cuyos valores positivos demuestran una curvatura cóncava hacia arriba, y los negativos convexos hacia arriba;
- y la curvatura en planta, la cual se muestra de forma perpendicular a la pendiente máxima y sus valores positivos muestra una superficie convexa hacia arriba en la celda, y los negativos cóncavos.

Esta herramienta se encuentra en: Spatial Analyst Tools → Surface → Curvature. Las representaciones visuales son las que se muestran a continuación.



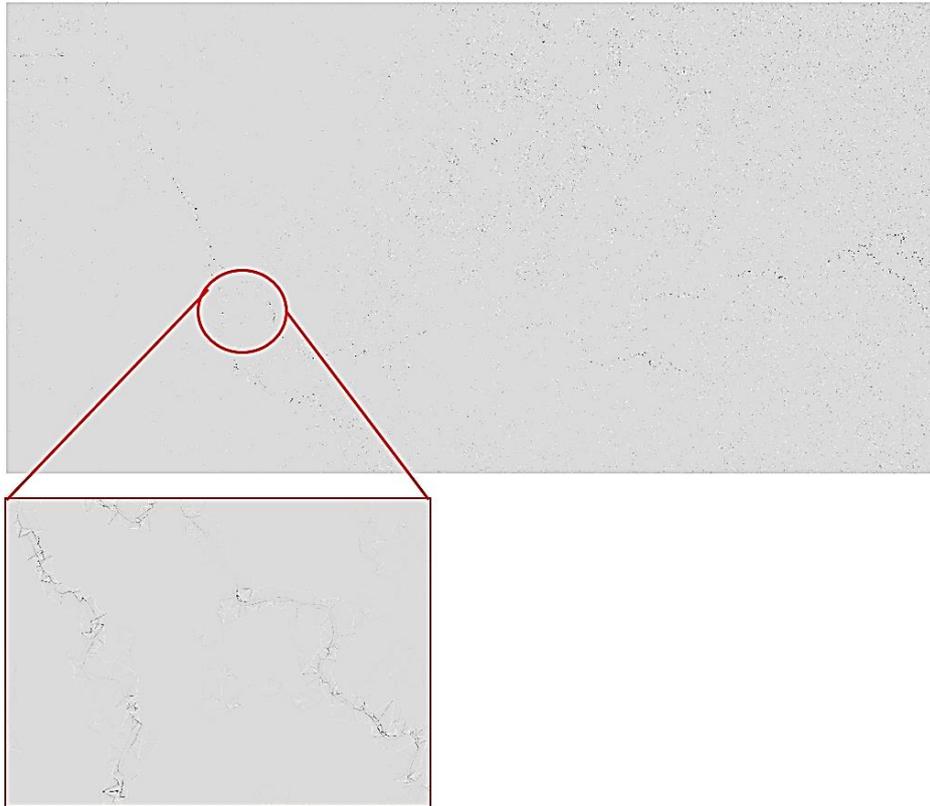
**Imagen 41. Ventana Curvature. Extraído de ArcMap**



**Imagen 42. Capa CurvPlan con acercamiento al detalle. Elaborado por José Damián Tejena**

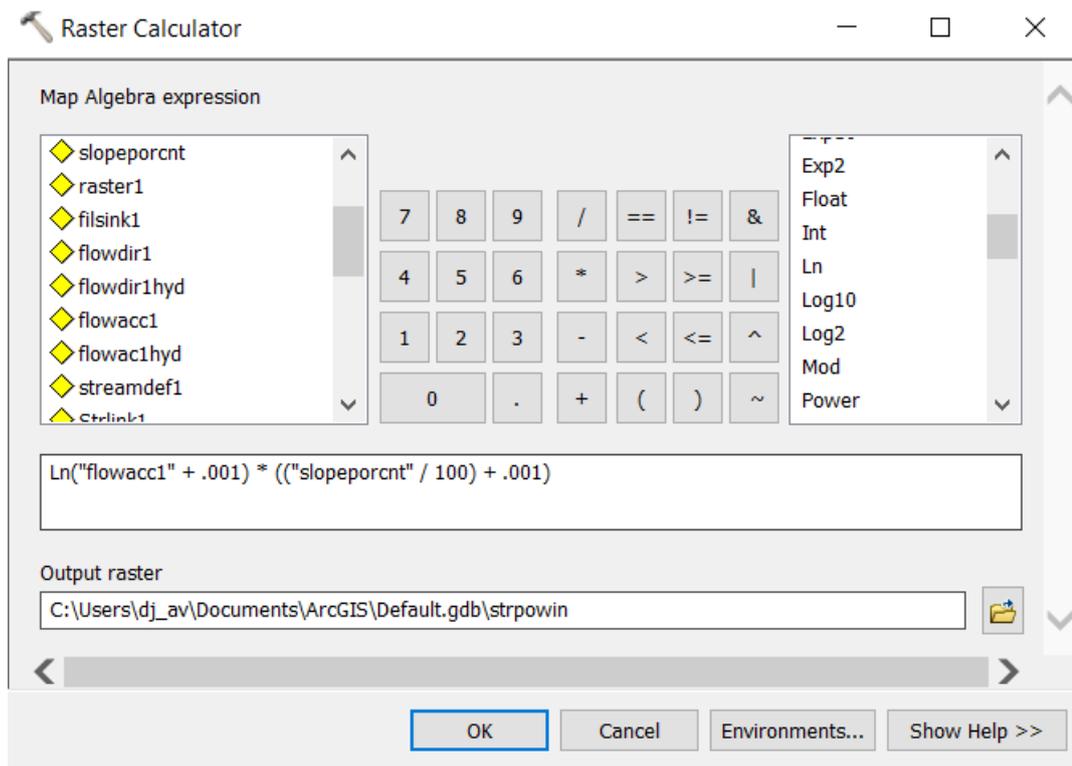


**Imagen 43. Capa CurvProf con acercamiento al detalle. Elaborado por José Damián Tejena**



**Imagen 44. Capa CurvEst, capa de curvas que incluye la curvas en planta y las de perfil.  
Elaborado por José Damián Tejena**

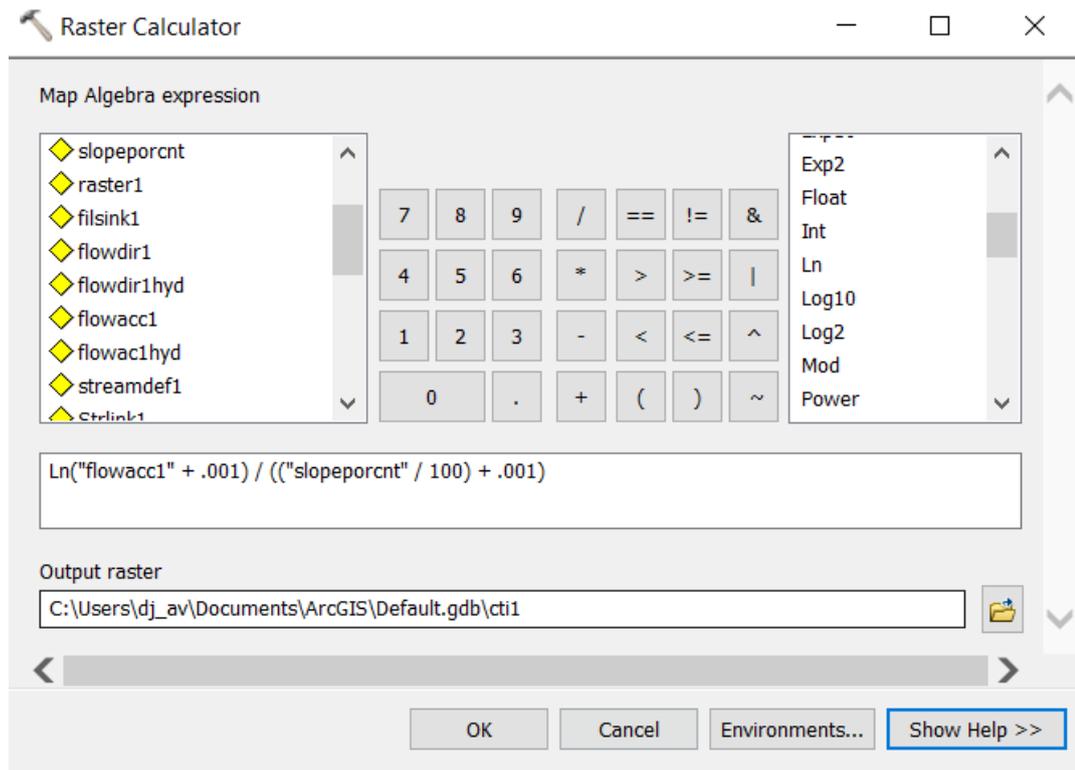
5. Una vez que se crean las capas que se mostraron, se puede calcular el índice de Stream Power. La forma en que se calcula este valor es por medio de la calculadora de capas ráster, en la que se deberá escribir una fórmula que relacione la acumulación de flujo con la pendiente. Dependiendo de cómo se haya trabajado las capas anteriores la formula puede cambiar levemente, pero sigue considerando las mismas capas. Para esta ecuación hay que tener en cuenta que la capa de pendientes se la trabajó en porcentajes y que la acumulación de flujo tiene un tamaño de celda de 1x1. Esta herramienta se encuentra: Spatial Analyst Tools → Map Algebra → Raster Calculator.



**Imagen 45. Ventana de la calculadora de capas ráster, fórmula para creación de SPI. Extraído de ArcMap**

En la ecuación se puede observar como el índice de Stream Power será producto de la relación entre el logaritmo natural de la acumulación de flujo y la pendiente. La pendiente se encuentra dividida entre 100 ya que como se mencionó anteriormente, la capa muestra valores porcentuales. La suma de 0.001 a cada capa se realiza para evitar que existan valores de 0, y se les otorga un pequeño valor previniendo así que los valores nulos impidan la ejecución del cálculo.

6. Para calcular el índice topográfico de humedad se hace un procedimiento similar al anterior. En la calculadora de capas ráster, la diferencia será principalmente en la ecuación que se ejecuta, ya que el resultado es el cociente de la relación de las capas de acumulación de flujo y de pendiente. Esta ecuación demuestra que se toma en cuenta la ecuación propuesta por Beven y Kirby para el cálculo de CTI.



**Imagen 46. Ventana de la calculadora de capas ráster, fórmula para creación de CTI.**  
Extraído de ArcMap

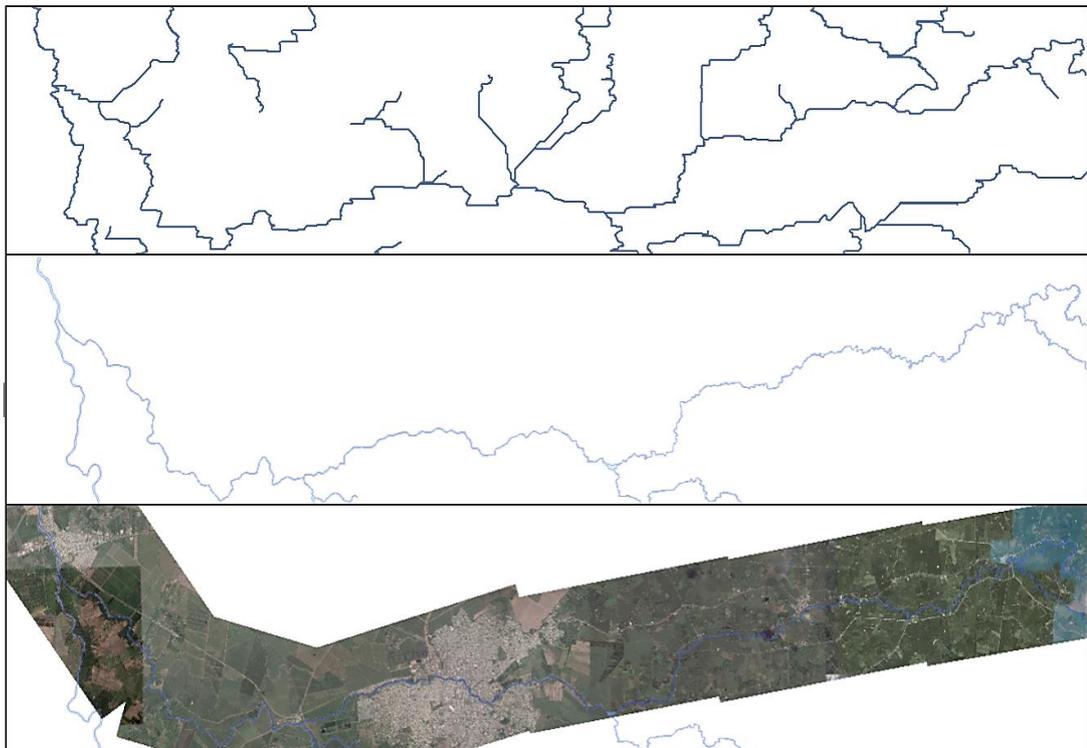
## CAPITULO IV

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados que se obtienen por medio del preprocesamiento de datos del terreno son valores, rangos, y representaciones visuales de parámetros relacionados al río milagro que ayudaran a entender mejor su comportamiento, y delimitar aspectos importantes para poder llevar a cabo una correcta gestión de este recurso hídrico. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de las capas creadas.

#### 4.1. Comparación de Líneas de drenaje

La línea de drenaje obtenida puede ser comparada con la capa obtenida de fuentes nacionales de información y por medio de sensores remotos para verificar su parentesco.



**Imagen 47. Comparación de línea de drenaje generada, la capa obtenida del IGM, y la vista Satelital del río Milagro. Elaborado por José Damián Tejena**

Como se logra observar, la línea de drenaje generada no tiene una precisión de 100% con relación a la capa del río real, sin embargo, se considera una aproximación bastante buena teniendo en cuenta la información base que se pudo obtener.

#### 4.2. Comparación de la obtención de datos por medio de sensores remotos vs trabajos de campo para la elaboración de un modelo digital

El sector en el que se encuentra ubicado el río tiene un relieve muy plano, y los datos que ofrecen las fuentes nacionales de información es de muy poca calidad para la definición de curvas de nivel de tan pequeña elevación.

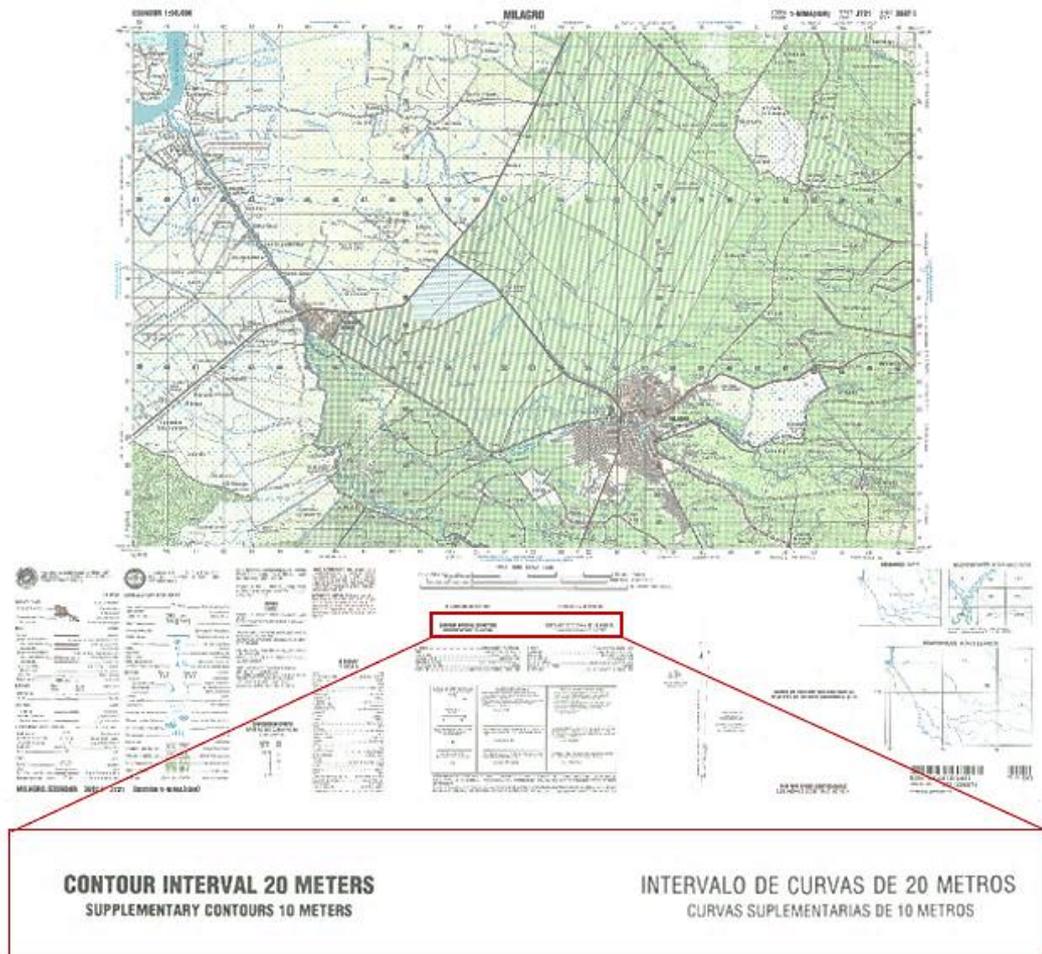
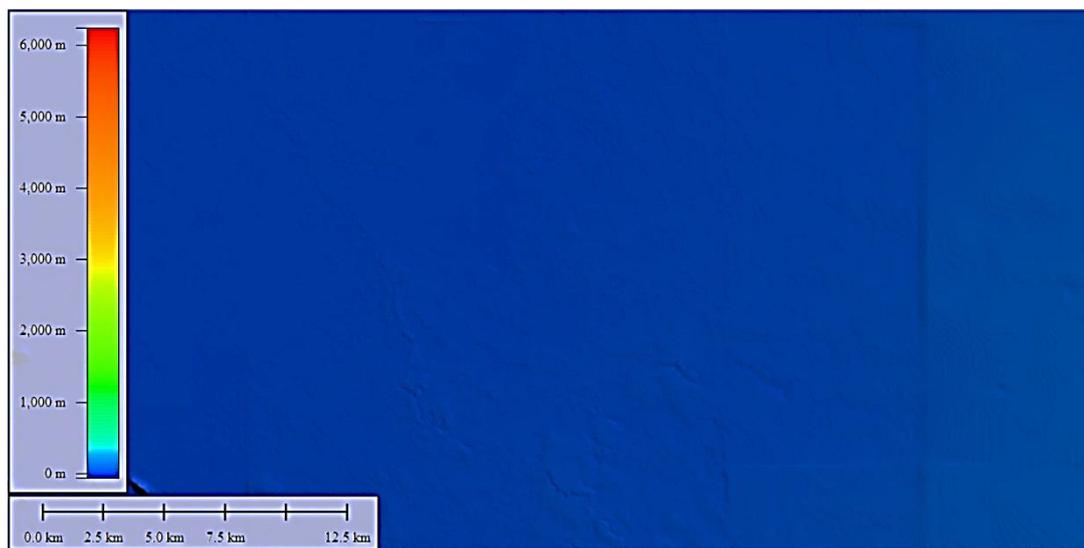
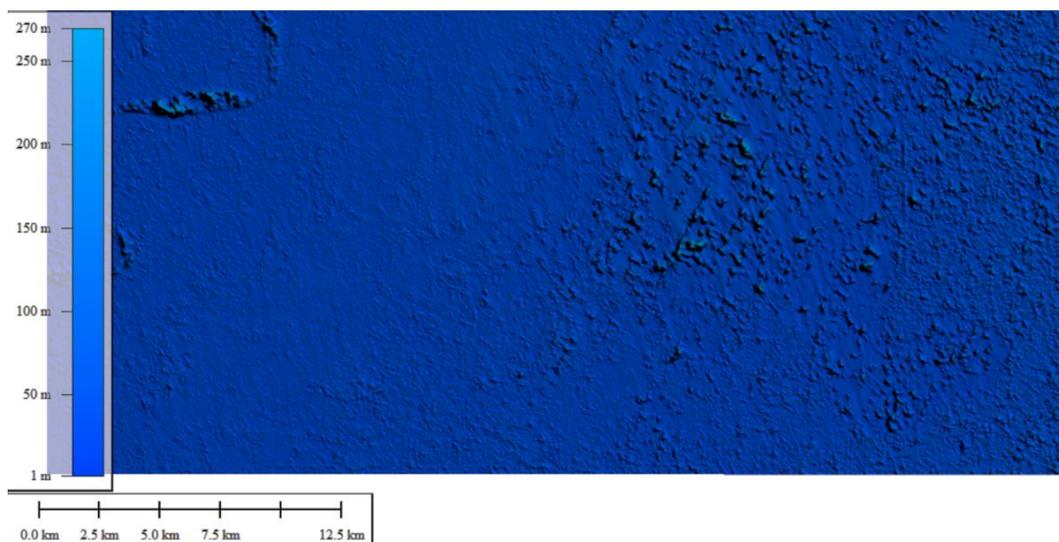


Imagen 48. Precisión de las curvas de nivel de carta topográfica. Extraído del portal IGM.

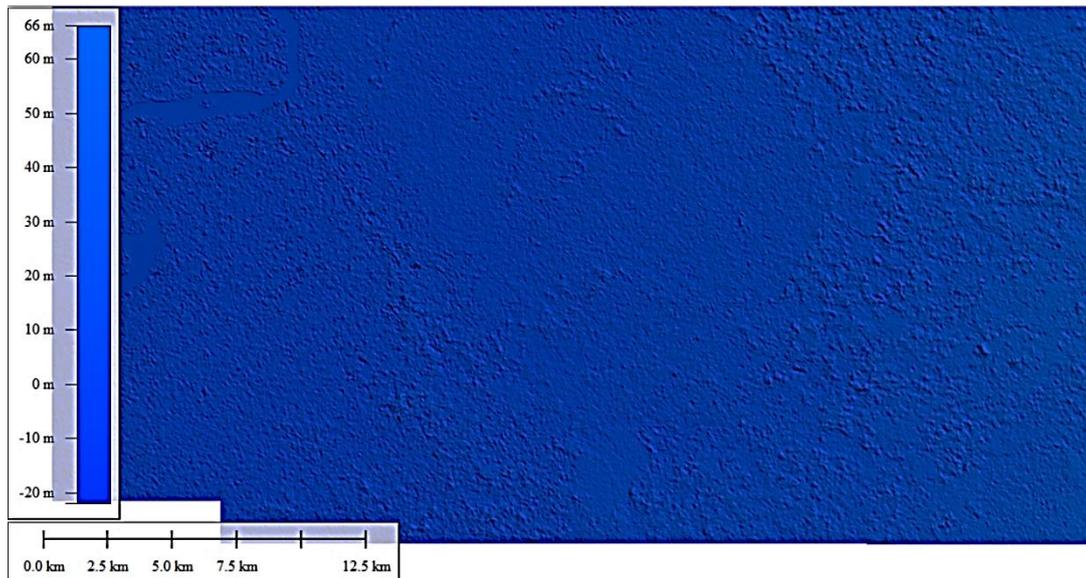
El mejor resultado se obtuvo al crear curvas de nivel por medio de un programa de procesamiento de datos espaciales, Global Mapper, el cual cuenta con una gran variedad de fuentes para la obtención de modelos digitales. Los datos con los que se procesó la línea de drenaje obtenida fueron tomados del satélite de Aster. v3 ya que es el que presenta la mayor cantidad de curvas de nivel acentuadas que coinciden con la capa de curvas ofrecida por el IGM. A pesar de esto, se tuvo que destacar la presencia del río por medio de la unión de una capa de río obtenida del IGM con la herramienta 'Merge' de ArcGIS. A continuación, la comparación de los relieves obtenidos de distintas fuentes.



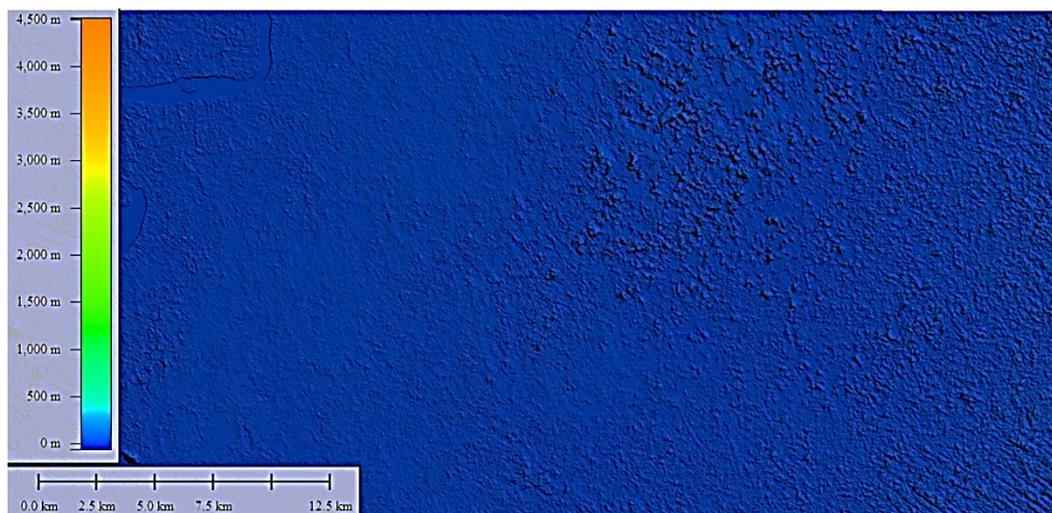
**Imagen 49. DEM SIGTIERRAS. Extraído de Global Mapper.**



**Imagen 50. DEM ASTER.V2. Extraído de Global Mapper**



**Imagen 51. DEM SRTM.V3. Extraído de Global Mapper**



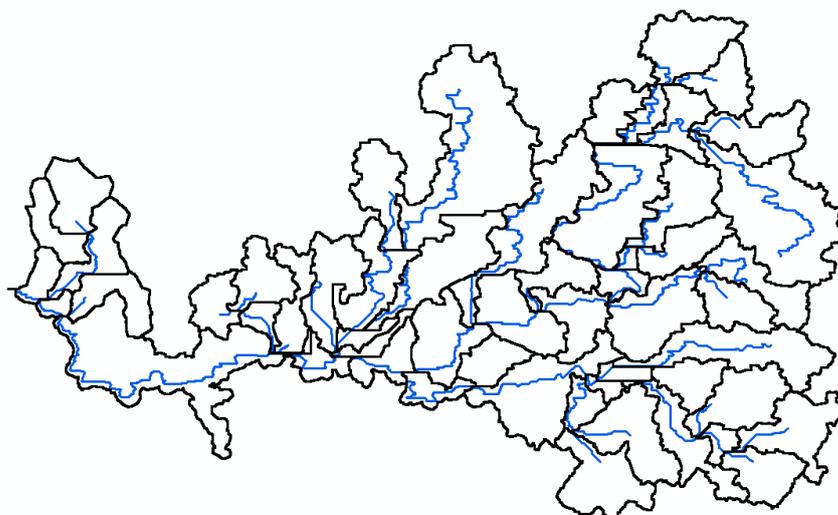
**Imagen 52. DEM ASTER.V3. Extraído de Global Mapper**

Como se puede observar, los medios digitales ofrecen una gamma mucho mayor de información que la que se puede recopilar en campo. A pesar de que las cartas topográficas de la región también fueron obtenidas por medio de teledetección, su bajo nivel de detalle hace necesaria la realización de trabajos adicionales para tener la información que se necesita a nivel del río; por este lado, los sensores remotos permiten que se pueda elaborar un modelo de buena calidad sin tener que realizar necesariamente estos trabajos. Un trabajo en campo para la recolección de datos en una zona de

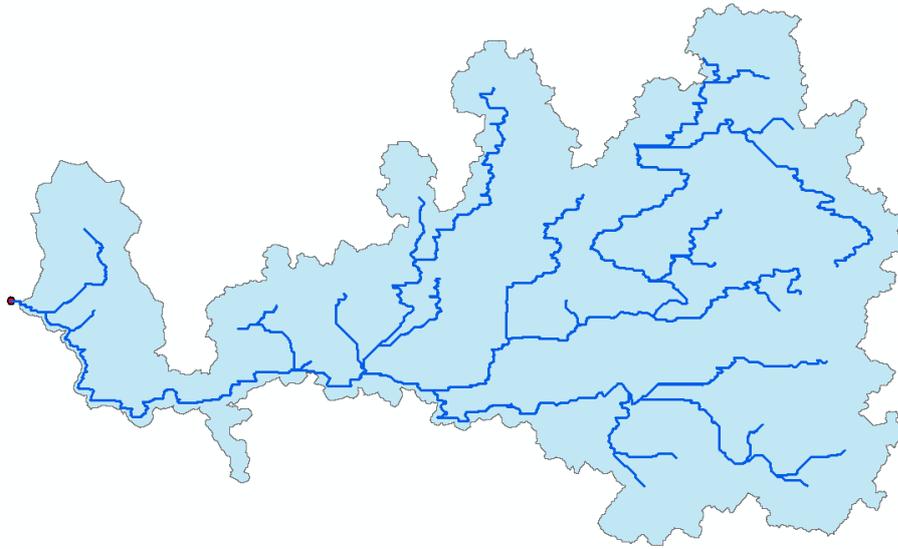
esta extensión puede tomar meses en realizar, sin contar que se requeriría de la cantidad de un gran número de personal trabajando en el proyecto. Se necesitaría de un gran esfuerzo por parte de ingenieros, personal de apoyo, sin mencionar el tiempo y costo que llevaría realizarlo. Sin embargo, los trabajos de campo ofrecen la ventaja de que al terminar este gran esfuerzo, se contaría con información de muy alta calidad ya que se basaría en un enfoque personalizado a la región que se trabaja; esto es algo que los sensores remotos pueden lograr pero que con lo que no se cuenta para su obtención de forma pública, por esta razón para este tipo de trabajo se tuvo que hacer uso de fuentes de varios tipos para la generación de los datos necesarios para la elaboración del modelo digital.

### **4.3. Capa creada por GeoHMS**

Los siguientes resultados se pueden obtener mediante las herramientas de HEC-GeoHMS, permiten elaborar una capa donde se muestre el área de la cuenca, la extensión del río, las subcuencas, y las capas previas, pero incluyendo los límites de la cuenca para poder visualizar mejor sus características. Al haber realizado el trabajo en conjunto con capas de información de distintas fuentes, la precisión de la cuenca generada no es total, sin embargo, se pudo notar que la extensión del río milagro corresponde a la real con una precisión adecuada de sus curvas en el curso del río.



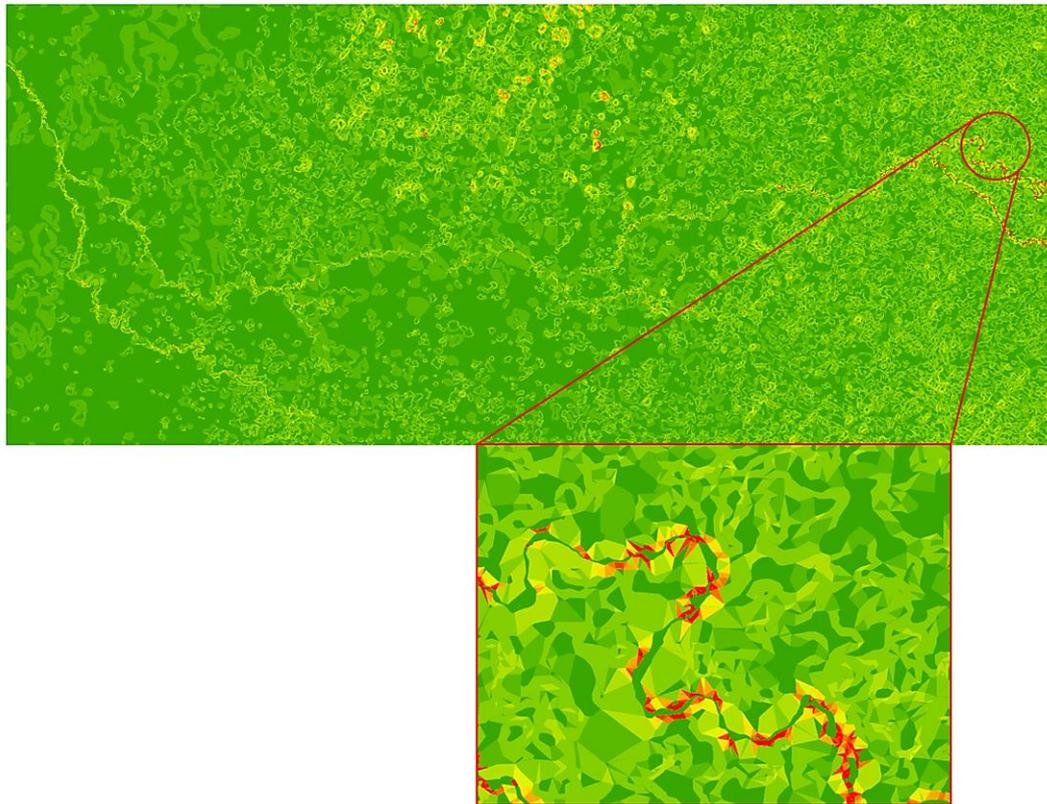
**Imagen 53. Representación de subcuencas de la cuenca generada del río Milagro. Elaborado por José Damián Tejena**



**Imagen 54. Representación del área de la cuenca y el río generado. Elaborado por José Damián Tejena**

#### **4.4. Posibles predicciones del comportamiento del río**

Los resultados de la capa Slope se ajustaron para poder tener mejor una interpretación visual de los resultados. Se redujeron los valores límites que se tenía para poder visualizar solo los de la zona correspondiente al río, y remover ciertos de los valores globales que correspondían a zonas en distintas partes de la región. En este nuevo ajuste, se puede notar como las secciones de color amarillo y rojo son las que corresponden a tener una mayor pendiente las cuales coinciden con la zona que cruza el río; las zonas verdes corresponden a los niveles del terreno que en general no cuenta con un nivel de pendiente tan alto llegando hasta 7% como valores máximos a excepción de pequeñas elevaciones existentes en la región. La pendiente es mayor en la zona donde la elevación empieza a aumentar.



**Imagen 55. Acercamiento a capa de pendientes para visualización del detalle.**  
Elaborado por José Damián Tejena.

A partir de Slope se generó uno de los resultados más importante, la capa creada a partir de la calculadora de capas ráster, el índice de Stream Power. En esta capa se aprecia de forma visual la acción del transporte de sedimentos sobre el terreno. Las zonas más erosionables serán aquellas en donde existe mayor índice de Stream Power, y se puede notar que coinciden con las zonas por donde fluye la corriente del río. Tanto en el río como en la superficie existen valores que provienen de zonas más elevadas que también demuestran mayor posibilidad de erosión, sin embargo, cabe recalcar que en general los valores mostrados son muy bajos, indicando que la erosión no se considera un gran problema en la región. A continuación, se muestran las zonas con menor (rojo) a mayor (azul) índice de Stream Power.

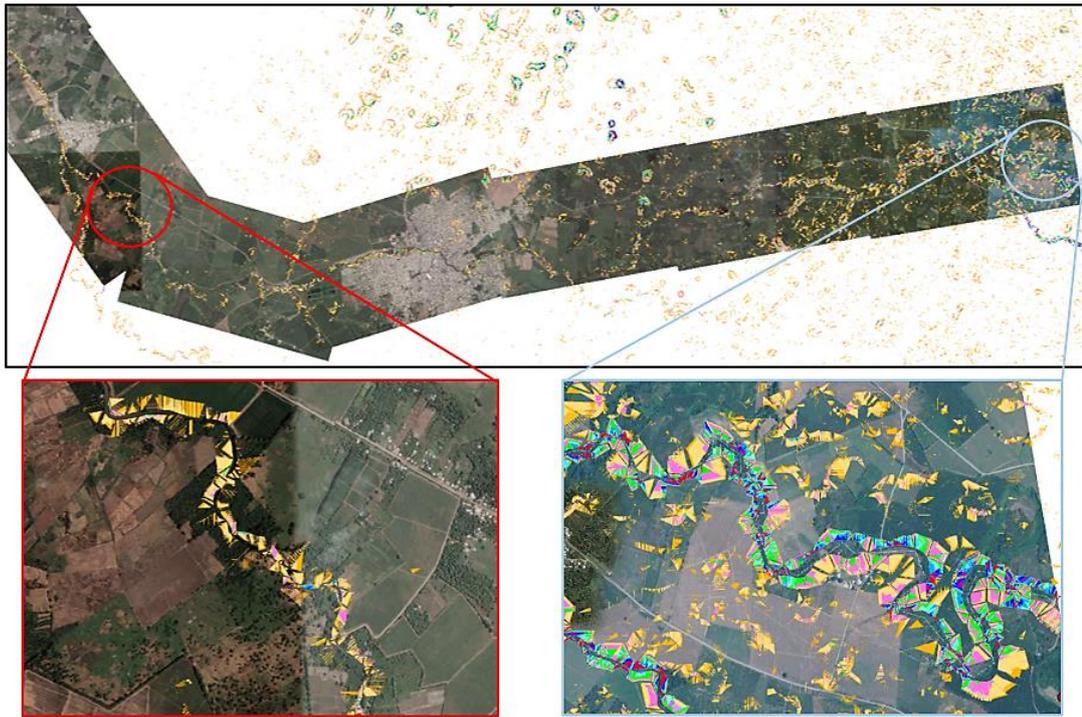


Imagen 56. Comparación de zonas SPI. Elaborado por José Damián Tejen

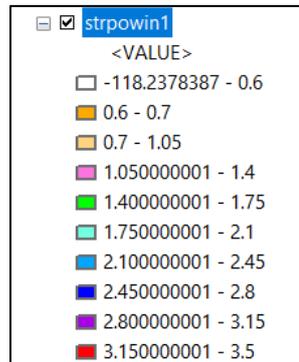


Imagen 57. Rango de valores de cada color en capa SPI. Extraído de ArcMap

Una vez que se tiene esta capa, se puede comparar con imágenes satélites a lo largo de los años y tratar de predecir cuáles serán los tramos de río que podrían sufrir mayores cambios. Según los valores de SPI, los tramos de río en los que se predice mayor cambio son los que tienen valores más altos, y estos valores se principalmente en la zona derecha de la región. Para este enfoque se consideran solo valores mayores a 1. A continuación, se muestran las regiones analizadas, y su comparación con fotos a lo largo de los años para tratar de confirmar la posibilidad de que ocurran cambios.

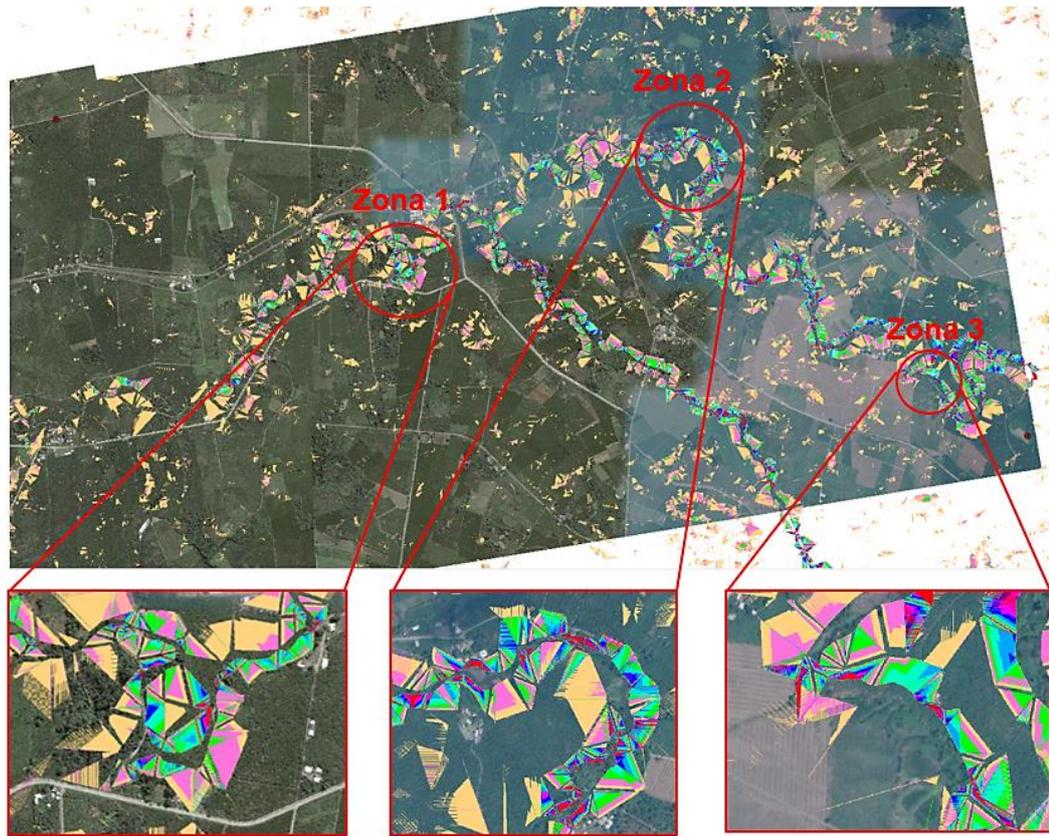


Imagen 58. Zonas con SPI más alto en la región. Elaborado por José Damián Tejena

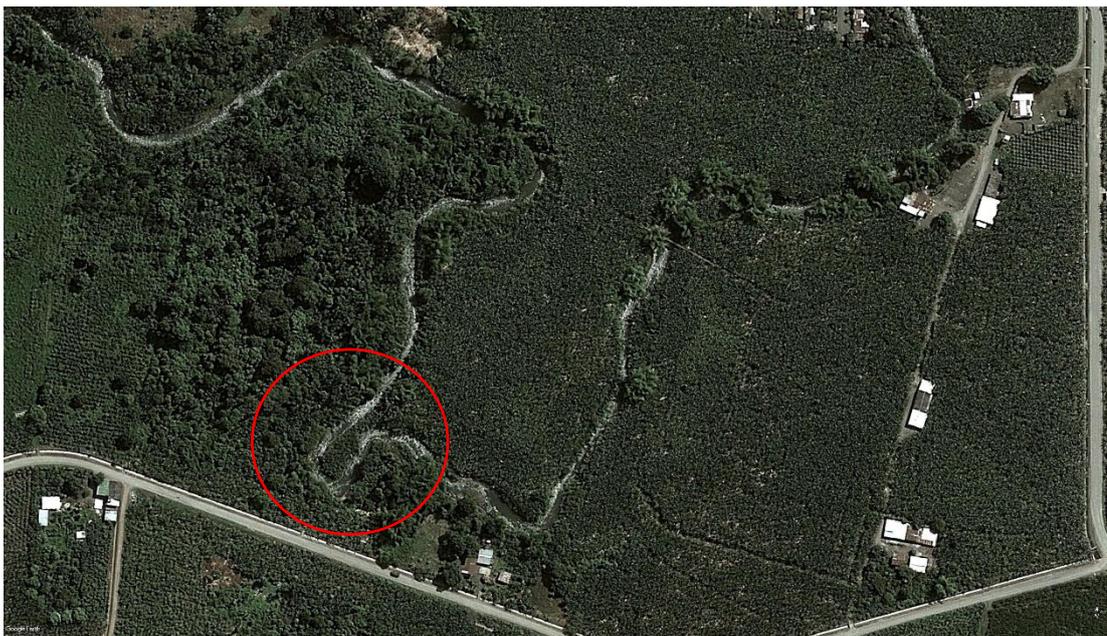
Zona 1



Imagen 59. Comparación a través de los años de Zona 1. Extraído desde Google Earth



**Imagen 60. Foto Ampliada Zona 1 (2002). Extraído desde Google Earth**



**Imagen 61. Foto Ampliada Zona 1 (2011). Extraído desde Google Earth**

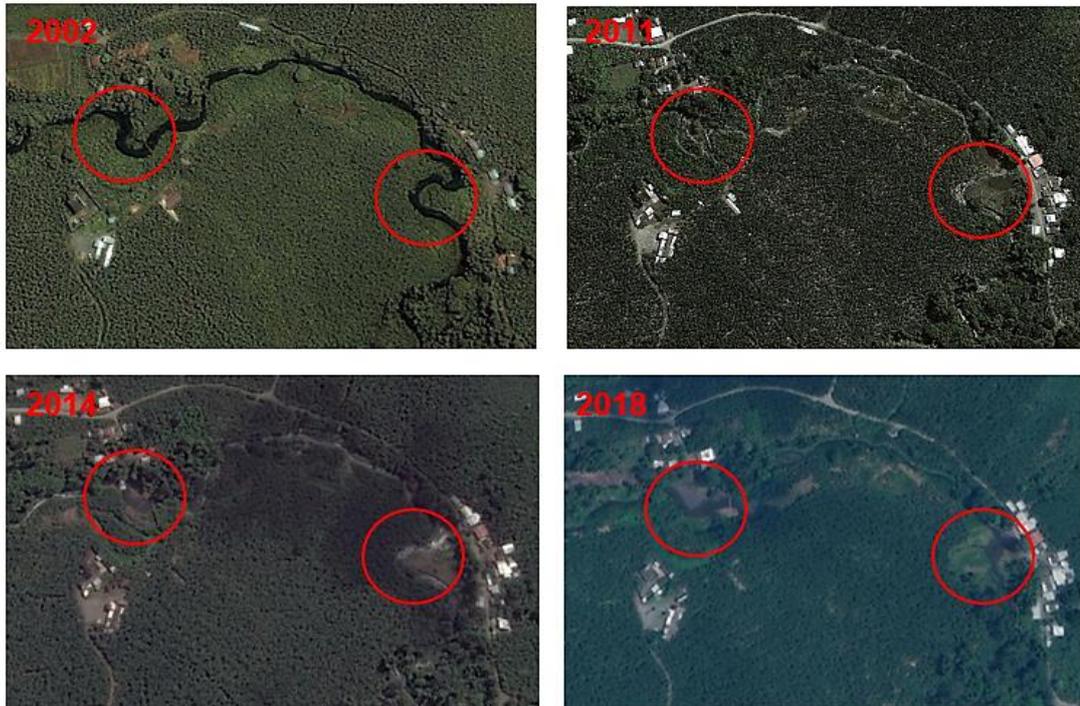


**Imagen 62. Foto Ampliada Zona 1 (2014). Extraído desde Google Earth**

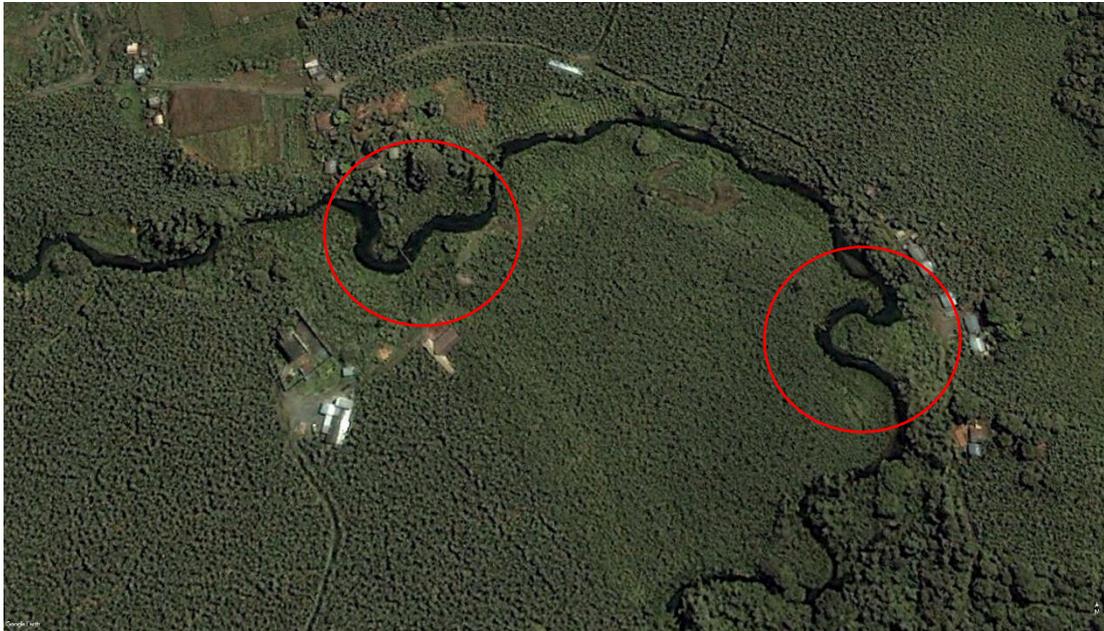


**Imagen 63. Foto Ampliada Zona 1 (2018). Extraído desde Google Earth**

Zona 2



**Imagen 64. Comparación a través de los años de Zona 2. Extraído desde Google Earth**



**Imagen 65. Foto Ampliada Zona 2 (2002). Extraído desde Google Earth**



**Imagen 66. Foto Ampliada Zona 2 (2011). Extraído desde Google Earth**



**Imagen 67. Foto Ampliada Zona 2 (2014). Extraído desde Google Earth**



Imagen 68. Foto Ampliada Zona 2 (2018). Extraído desde Google Earth

Zona 3

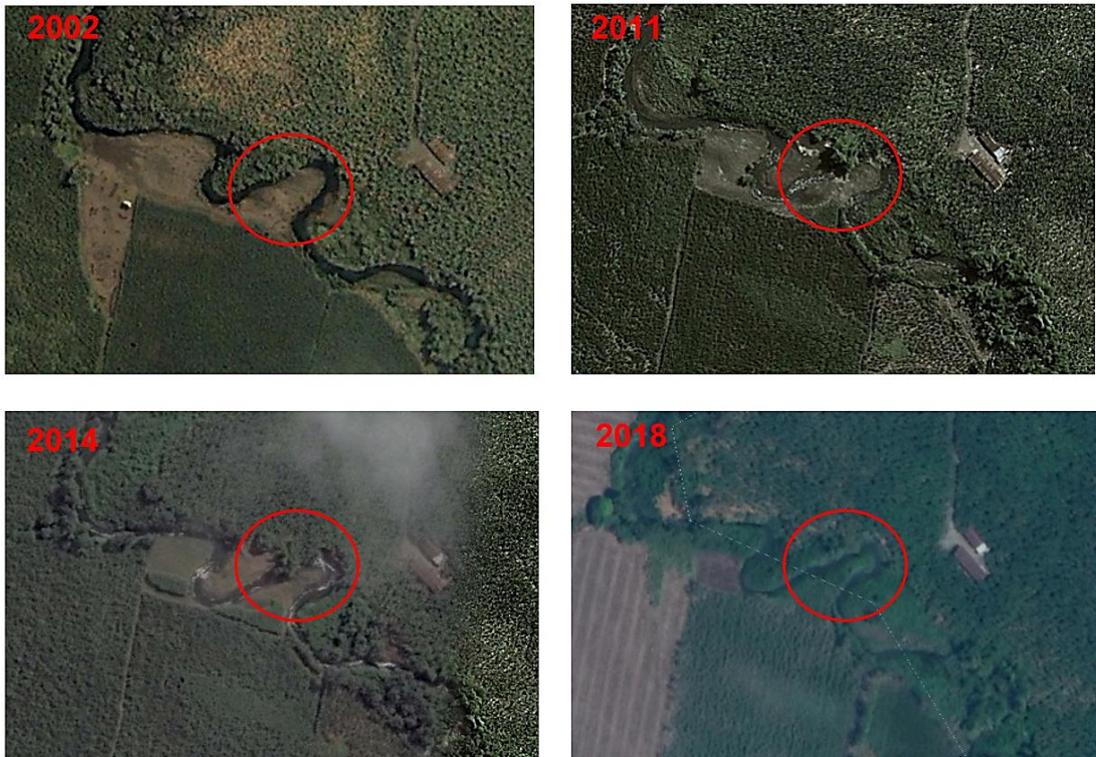


Imagen 69. Comparación a través de los años de Zona 3. Extraído desde Google Earth



**Imagen 70. Foto Ampliada Zona 3 (2002). Extraído desde Google Earth**



**Imagen 71. Foto Ampliada Zona 3 (2011). Extraído desde Google Earth**



**Imagen 72. Foto Ampliada Zona 3 (2014). Extraído desde Google Earth**



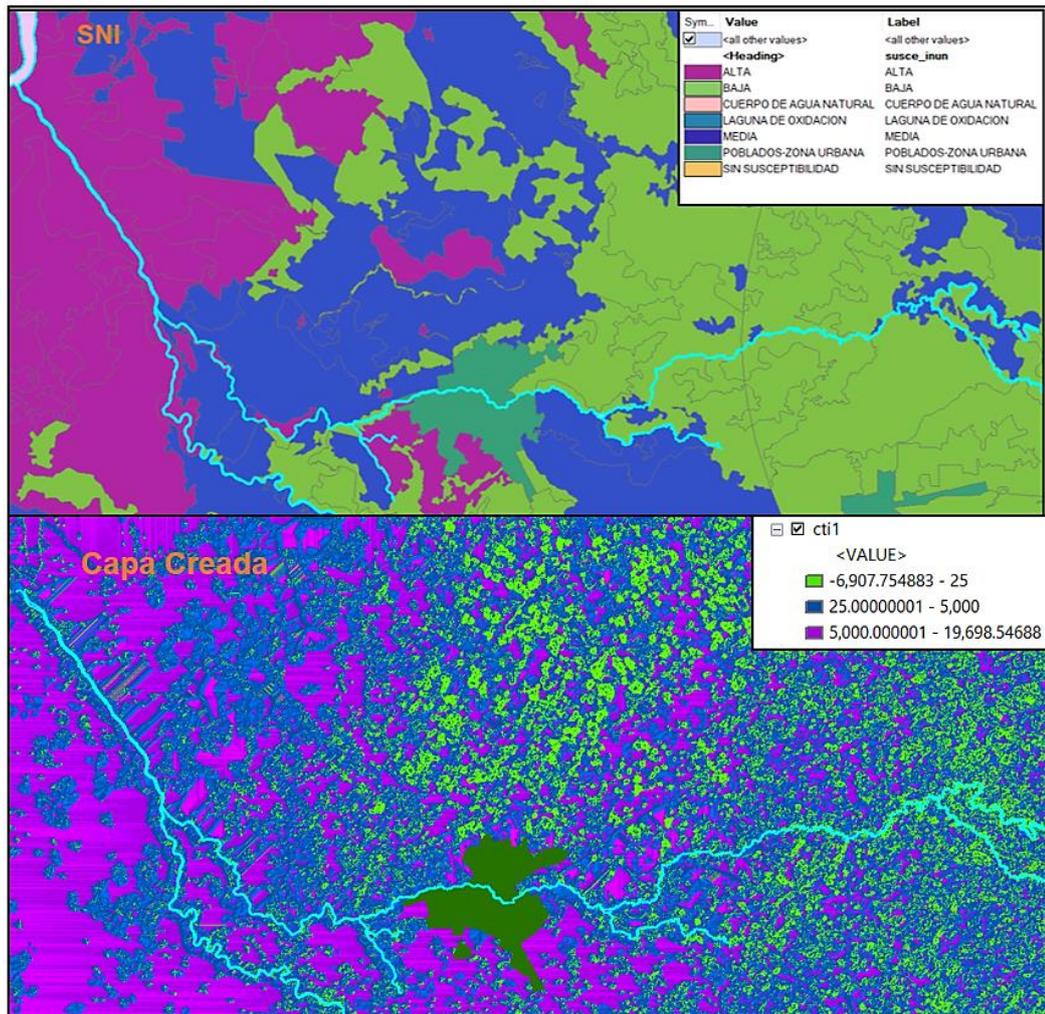
**Imagen 73. Foto Ampliada Zona 3 (2018). Extraído desde Google Earth**

Como se puede observar, existen ligeros cambios en la zona 3 donde solo se redujo un poco el área de terreno comprendida entre la curva que forma el río, pero cambios mayores como se observa en la zona 1 y 2 donde el río modifica la forma del terreno. La zona 3 podría seguir disminuyendo de área hasta que ocurra algo similar a lo de las zonas anteriores. Es en zonas como las mostradas donde se espera cambios de la sección lateral del río en el futuro.

Así mismo, a pesar de que los valores en general son muy bajos, los valores más altos dentro de estos rangos coinciden con tramos donde han ocurrido cambios de la sección lateral del río, sin embargo, no representan cambios tan grandes a nivel espacial. El resto de los valores más bajos, presentan cambios muy poco notorios a lo largo de los años. Con esta comparación se tiene que los valores del índice de Stream Power son de gran ayuda al momento de intentar predecir cambios en el análisis de los ríos ya que enfatizan los tramos donde es más probable que pueda ocurrir cambios, ya sea por erosión del terreno, o por deposición de sedimentos.

#### **4.5. Índice Topográfico de Humedad y la geomorfología**

El resultado de la ecuación para el cálculo del índice de humedad topográfica tiene como resultado una capa en la que se puede observar las zonas con mayor, medio, y bajo riesgo a inundaciones. Esta capa puede ser comparada con capas obtenidas del SNI (Sistema Nacional de Información) en donde se muestra de igual manera un estudio realizado para destacar las zonas de posible inundación. Para hacer que la comparación sea mejor apreciada, los colores en ambas corresponden a la misma información donde el área verde será donde exista menor riesgo de inundación, azul para un rango intermedio, y morado para el mayor riesgo de inundación.



**Imagen 74. Comparación de capa del SNI y la capa generada de CTI. Elaborado por José Damián Tejena**

Con estas comparaciones se puede también hacer una correlación con las distintas geformas en el terreno. La tabla de atributos de la capa del SNI contiene valores para cada tipo de relieve y al observar los atributos, se puede notar que los valores de sus geformas se encuentran directamente relacionados con los valores de susceptibilidad de inundación antes mencionados y a su vez con los de las pendientes. Por lo que se tendría que las zonas aledañas al río de mediana susceptibilidad a inundación en la capa creada corresponden por lo general a llanuras aluviales, y por sus pendientes suaves y curvaturas se puede definir como un terreno ligeramente ondulado. Las zonas con alta susceptibilidad a inundación también corresponden a llanuras aluviales, pero esta vez se trataría de diques aluviales, los cuales

tienen pendiente de casi 0%; estos son zonas del río que tienen menor elevación. Para mejorar la visualización del parámetro de susceptibilidad intermedia y alta se deshabilitó la capa de susceptibilidad baja y se cambiaron los colores para que se equipare a la capa obtenida por el SNI. Como se puede observar, las zonas de alta y media susceptibilidad coinciden con las de diques aluviales y terreno ligeramente ondulado respectivamente. Por otro lado, la capa del SNI presenta una zona de superficie de cono de esparcimiento que no llega a coincidir con las zonas de baja susceptibilidad de inundación en su mayoría; este es un error que se le podría atribuir a la falta de una capa de niveles de elevación de la calidad necesaria.

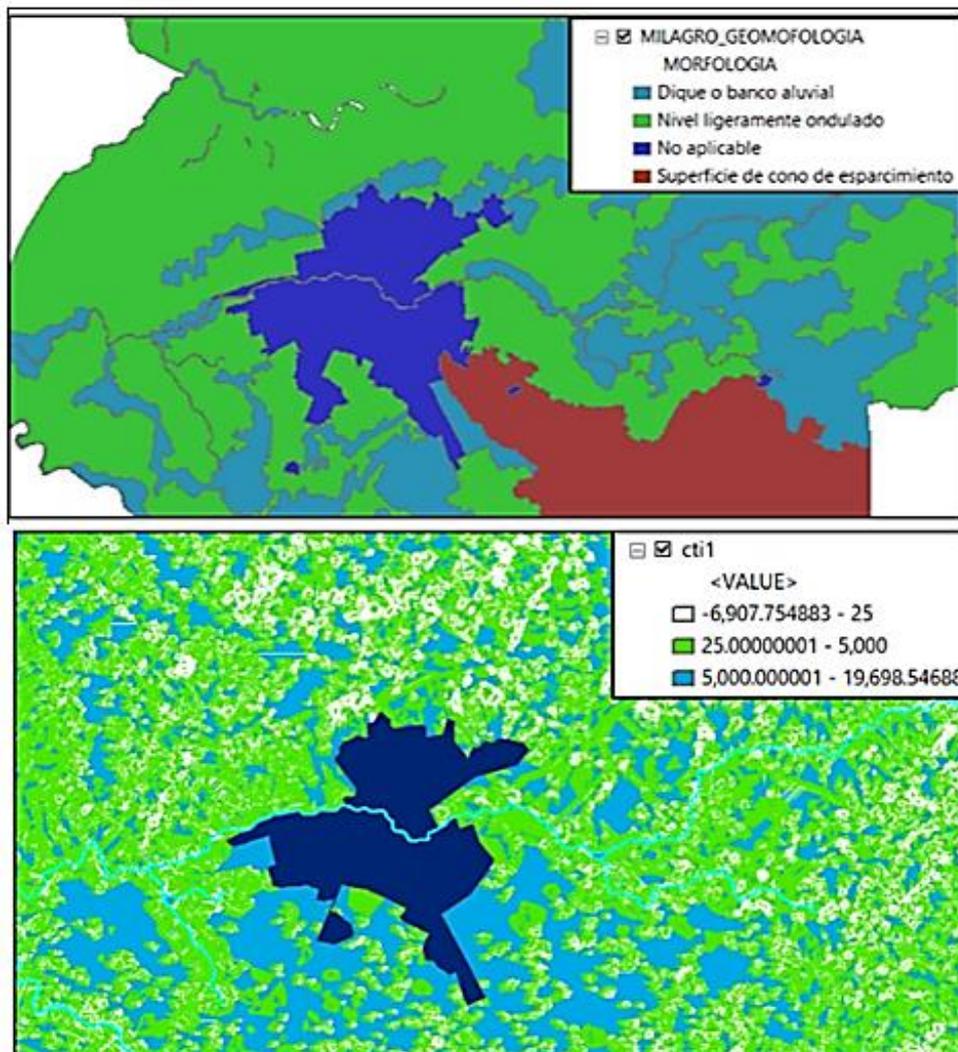


Imagen 75. Comparación entre zonas de susceptibilidad de inundación y morfología del cantón. Elaborado por José Damián Tejena Tapia

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- Tomando en cuenta que, al tener información poco detallada en la región, existirán capas cuya precisión va a tener limitaciones, o van a estar incompleta. Las capas con esta información incompleta no presentan resultados donde se puede apreciar visualmente los valores que le corresponderían a la corriente del río o a terrenos aledaños. Sin embargo, esto no quiere decir que no se pueda realizar el modelamiento preciso. La información espacial existe, solo no se encuentra disponible para el acceso al público, y la que brindan corresponde a información de menor resolución, pero que igual permite el análisis general de parámetros de un río.
- Las capas generadas tuvieron la calidad suficiente para producir un modelo digital de buena calidad del cual se pudieron apreciar parámetros geomorfológicos, y otra variedad de capas que se utilizan para poder tener un mejor entendimiento del comportamiento del río como la del índice de humedad topográfica y el índice de Stream Power. No obstante, existe espacio para mejorar el modelo y conseguir más parámetros para la gestión de este recurso hídrico.
- Los valores obtenidos con el índice de Stream Power (SPI) son bajos en términos generales, y una razón de esto se debe al relieve del terreno, ya que el río Milagro se encuentra en una casi plana a nivel global y que cuenta con pequeñas elevaciones poco comunes. Sin embargo, es en los valores más altos dentro de este rango en donde existe mayor posibilidad de erosión en el río, y guardan relación con la elevación ya que se puede notar como aumentan los valores a medida que la elevación del terreno aumenta, donde la más alta elevación es donde existe mayor velocidad en el flujo de agua y pendientes más pronunciadas.
- La comparación fotográfica de zonas más susceptibles a la erosión muestra como los cambios generados por la erosión son ligeros y se pueden

desarrollar a lo largo de muchos años, sin embargo, confirma las teorías de autores como Chang, Nanson, Crooke y Bull, que explican como el SPI se ve relacionado al cambio de la sección lateral de los ríos, y a la degradación de los canales.

- El índice topográfico de humedad fue un parámetro con muy buenos resultados al momento de compararlos con información ya existente del río. Las zonas donde existe mayor probabilidad de inundación coinciden con las zonas en donde se acumula más el agua según el índice de humedad, y una vez más, la elevación del terreno y su relieve están directamente relacionados. Mientras más baja la elevación y un relieve más plano, se tuvo mayores zonas susceptibles a inundación, lo cual coincide con la información brindada por el Sistema Nacional de Información.
- La capa de CTI se usó también para hacer la comparación y relación entre las geoformas del terreno y la capacidad que poseen de acumular más humedad. Un gran porcentaje del terreno mostrado correspondiente a llanuras aluviales coincide con las zonas de mayor acumulación de humedad, y el índice muestra, por otro lado, que las zonas donde existe menor acumulación de humedad coincide con las zonas donde empieza a existir mayor elevación y relieve. Es esta información comparada la que demuestra la veracidad de la realización de modelos fluviales haciendo uso de Sistemas de Información Geográfica y Sensores Remotos.
- Al analizar los mismos tramos de río, se puede notar que el CTI y SPI se encuentran inversamente relacionados, teniendo que las zonas en donde el SPI tiene mayores valores, corresponden a las zonas donde menor acumulación de agua existe según el CTI.
- La ventaja más notable de hacer uso de Sistemas de Información Geográfica para la realización de modelos fluviales viene a ser la capacidad de generar información precisa a partir de medios digitales sin la necesidad de grandes esfuerzos. El trabajo puede ser realizado por una o un par de persona en caso de ser extenso, y a pesar de eso se sigue reduciendo bastante el personal que se involucra en comparación con los trabajos en campo. La desventaja más grande sería la insuficiencia de información digital, lo cual ocasionaría que se deba necesariamente realizar trabajos de campo para poder realizar un modelo fiable.

## 5.2. Recomendaciones

- En el proceso del preprocesamiento del terreno, se debe considerar el tamaño de celdas como un factor importante para la calidad de las capas que se van a generar, e incluso más importante en zonas como la que corresponde al río Milagro ya que por sus bajos niveles de elevación, se precisa de un DEM de muy buena calidad para poder generar los datos siguientes.
- Al momento de definir la corriente del río con Stream Definition, se recomienda tener en cuenta que mientras mayor sea la definición que se busca, aumenta también la posibilidad que el programa reconozca como corriente a secciones que no cuentan con la presencia corriente de agua.
- Las tablas de atributos de diversas capas cuentan muchas veces con más información de la que se puede observar en primera instancia, por lo que se recomienda explorar bien todos los valores de los diversos atributos que pueden tener los ShapeFiles, y también probar con distintas formas para agrupar los datos y visualizarlos.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aswathy, M. V., Vijith, H., & Satheesh, R. (2008). Factors influencing the sinuosity of Pannagon River, Kottayam, Kerala, India: An assessment using remote sensing and GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 138(1–3), 173–180. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9755-6>
- Bagnold, R. A. (1966). *An approach to the sediment transport problem from general physics*. <https://doi.org/10.3133/pp422i>
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Buill, F., Núñez, M. A., & Rodríguez, J. J. (2003). *Fotogrametría analítica*. UPC.
- Gartner, J. (2016). Stream Power: Origins, Geomorphic Applications, and GIS Procedures. *Water Publications*. [https://scholarworks.umass.edu/water\\_publications/1](https://scholarworks.umass.edu/water_publications/1)
- Gessler, P. E., Moore, I. D., McKENZIE, N. J., & Ryan, P. J. (1995). Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(4), 421–432. <https://doi.org/10.1080/02693799508902047>
- Gibson, P. J., & Power, C. H. (2000). *Introductory remote sensing: Principles and concepts*. Routledge.
- Grabowski, R. C., Surian, N., & Gurnell, A. M. (2014). Characterizing geomorphological change to support sustainable river restoration and management: Characterizing geomorphological change in rivers. *Wiley*

*Interdisciplinary Reviews: Water*, 1(5), 483–512.  
<https://doi.org/10.1002/wat2.1037>

Heywood, D. I., Cornelius, S., & Carver, S. (2006). *An introduction to geographical information systems* (3rd ed). Pearson Prentice Hall.

Hinderer, M., Kastowski, M., Kamelger, A., Bartolini, C., & Schlunegger, F. (2013). River loads and modern denudation of the Alps—A review. *Earth-Science Reviews*, 118, 11–44.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.01.001>

Hirt, C. (2014). Digital Terrain Models. In E. Grafarend (Ed.), *Encyclopedia of Geodesy* (pp. 1–6). Springer International Publishing.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0\\_31-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0_31-1)

Huggett, R. J. (2011). *Fundamentals of geomorphology* (3. ed). Routledge.

Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2005). *Digital terrain modeling principles and methodology*. CRC Press.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (Seventh edition). John Wiley & Sons, Inc.

Olaya, V. (2016). *Sistemas de información geográfica*.

Pareta, D. K., & Pareta, U. (2012). *Quantitative Geomorphological Analysis of a Watershed of Ravi River Basin, H.P. India*. 1(1), 16.

¿Qué son los datos ráster?—Ayuda | ArcGIS for Desktop. (2018).  
<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>

Rao, D. P. (2002). *Remote Sensing Application in Geomorphology*. 11.

Schiff, R., & Milone & MacBroom. (2014). *Vermont River Sensitivity Coarse Screen*.  
<http://extension.umass.edu/riversmart/sites/extension.umass.edu.river-smart/files/pdf-doc-ppt/MA%20FGM%20Coarse%20Screen%202014.pdf>

- Schmidt, F., & Persson, A. (2003). Comparison of DEM Data Capture and Topographic Wetness Indices. *Precision Agriculture*, 4(2), 179–192. <https://doi.org/10.1023/A:1024509322709>
- Srivastava, P. K., & Bhattacharya, A. K. (2000). Delineation of ground water potential zones in a hard Rock Terrain of Bargarh District, Orissa using IRS data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 28(2–3), 129–140. <https://doi.org/10.1007/BF02989897>
- Tang, Q., Gao, H., Lu, H., & Lettenmaier, D. P. (2009). Remote sensing: Hydrology. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 33(4), 490–509. <https://doi.org/10.1177/0309133309346650>
- Thalacker, R. (2014). *Mapping Techniques For Soil Erosion: Modeling Stream Power Index In Eastern North Dakota*. 104.
- Verstappen, H. T. (1977). *Remote sensing in geomorphology*. Elsevier Scientific Pub. Co.; distributors for the United States and Canada, Elsevier/North-Holland.
- Yang, Chapman, G. A., Young, M. A., & Gray, J. M. (2005). *Using Compound Topographic Index to Delineate Soil Landscape Facets from Digital Elevation Models for Comprehensive Coastal Assessment*.
- Zinck, J. A. (2012). *Geopedologia: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. ITC.

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Tejena Tapia, José Damián**, con C.C: # 0925398489 autor del trabajo de titulación: **Modelado digital geomorfológico fluvial del río Milagro ubicado en la provincia de Guayas mediante el uso de Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG)** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **26 de febrero de 2020**

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **Tejena Tapia, José Damián**

C.C: **0925398489**



## REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

### FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

<b>TEMA Y SUBTEMA:</b>	Modelado digital geomorfológico fluvial del río Milagro ubicado en la provincia de Guayas mediante el uso de Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG)		
<b>AUTOR</b>	Tejena Tapia, José Damián		
<b>REVISOR/TUTOR</b>	Castro Beltrán, Andrés		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Ingeniería		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería Civil		
<b>TITULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero Civil		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	26 de febrero de 2020	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	86
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Hidrología, Sistemas de Información Geográfica, Geomorfología		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Sistema de Información Geográfica, Sensores Remotos, Río, Milagro, Modelo, Geomorfológico		
<b>RESUMEN/ABSTRACT:</b>	<p>La ciudad Milagro se encuentra en una región que presenta un nivel de terreno casi constante en toda su expansión y experimenta fenómenos climatológicos como las inundaciones, las cuales causan daños que pueden ser muy severos si no se toman las medidas necesarias. El río que cruza la ciudad es de gran extensión y su estudio debe ser de principal importancia para la planificación de obras civiles que lo circunden. Por esta razón existen varios métodos para realizar estudios de río que involucran estudios de campo, distintos equipos, y grandes esfuerzos por parte de los ingenieros que los realizan. El propósito de este trabajo es presentar una alternativa a la ejecución de trabajos de campo a través de la implementación de sensores remotos y sistema de información geográfica para la elaboración del modelo geomorfológico del río, y de esta forma evitar la necesidad de un numeroso personal, largos periodos de tiempo, y gastos elevados. El modelo digital nos podrá dar datos relevantes para la planificación de una obra civil, y nos ayudará a entender mejor el comportamiento del río y las zonas aledañas a este. Es preciso destacar que la información fue obtenida a través de medios gratuitos o de muy bajo costo, y el modelo generado es relativo a la calidad de la información obtenida.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-994543936	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:damiantejena@yahoo.com">damiantejena@yahoo.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b>	<b>Nombre:</b> Glas Cevallos, Clara		
	<b>Teléfono:</b> +593-461-6792		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:clara.glas@cu.ucsg.edu.ec">clara.glas@cu.ucsg.edu.ec</a>		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			