

**CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS, EN LOS
BLOQUES CAÑO SUR, CPO 16, CPO 17, RÍO ARIARI, EN LA ZONA LLANOS
SUR DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES, MEDIANTE LA
TÉCNICA DE MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL DEMS.**

**LAURA CRISTINA DÍAZ RIVERA
DIANA MARCELA CONTRERAS SARMIENTO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2015

**CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS, EN LOS
BLOQUES CAÑO SUR, CPO 16, CPO 17, RÍO ARIARI, EN LA ZONA LLANOS
SUR DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES, MEDIANTE LA
TÉCNICA DE MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL DEMS**

**LAURA CRISTINA DÍAZ RIVERA
DIANA MARCELA CONTRERAS SARMIENTO**

Trabajo de grado para optar el título de Geólogo

**Director:
LILIANA MARÍA PLATA SARMIENTO
Geóloga**

**Codirector:
JORGE EDUARDO PINTO VALDERRAMA
Geólogo Msc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía, mi fuerza y luz de mi camino...

A mis padres, por su incalculable amor, por su comprensión, por creer y apoyar mis sueños.

Si encuentras un camino sin obstáculos, probablemente no te lleva a ninguna parte. – LucilleBall.-

Laura

A Dios, por regalarme la vida, su infinita bondad y amor y haberme permitido llegar hasta este punto.

A mis padres, por apoyarme incondicionalmente y haber sacrificado muchas cosas para mi bienestar.

Reconócelo en todos tus caminos y el enderezará tus sendas. – Proverbios 3:6

Diana

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme culminar esta etapa tan importante en mi vida, a mis padres que siempre me apoyaron en todas y cada una de las etapas de mi vida, que siempre fueron mi fuerza y ganas de seguir adelante, a mis hermanos, a mis primos y tíos por brindarme su apoyo.

Hay muchas personas valiosas a las que quiero expresar mi más profundo agradecimiento, que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo y que de una u otra forma aportaron a lo largo de este proceso de formación y en mi trayecto por la Universidad:

Al profesor Jorge Eduardo Pinto Valderrama, por convertirse en una guía para el desarrollo de mi tesis y a lo largo de mi carrera siendo un gran apoyo en la parte académica y personal, por brindarme su conocimiento, ayuda y una mano amiga en cualquier momento, al profesor Ricardo Mier por sus valiosas enseñanzas, su apoyo, y conocimiento. Al Ingeniero Francisco Javier Pérez por haber hecho parte de mi crecimiento profesional y personal, al profesor Joaquín Andrés Valencia por su asesoría y apoyo. Mis más sinceros agradecimientos y aprecio por su altruismo y su aporte al progreso de la sociedad.

A aquellas personas que me brindaron su ayuda y contribución para llevar a cabo este trabajo, a Liliana María Plata por su colaboración, a Manuel y Yesid Goyes por su paciencia, colaboración y préstamo de equipos.

A mi selección de taekwondo, que durante tantos años se convirtió en mi segundo hogar, en el cual al lado de la mano de nuestro entrenador y profesor William García, aprendí a integrar aquellos principios de *“cortesía, integridad, perseverancia, autocontrol, espíritu indomable, ciencia y amor”* no solo en el deporte, sino también en mi vida, donde aprendí a levantarme después de una caída en el “Dojang”, y en la vida, agradezco el placer tan inmenso de haber hecho parte de esta selección, en donde me llevo grandes recuerdos, experiencias y amigos, al profesor William, a Toñito, Jose, Jhonatan, Dani, Silvi, Saydi, Angélica, Merce, Sergín, y a todos los que llamamos “guardia vieja” que me brindaron en algún momento su apoyo, su alegría, sus abrazos y con los que compartimos diferentes momentos en esta etapa, muchas gracias por dejarme aprender de ustedes.

A aquellas personas que me acompañaron en múltiples travesías a Isaí por su paciencia, amor y compañía, a mis grandes amigos Andrés Camilo y a Edgar por su amistad eterna y apoyo incondicional, ustedes son una parte fundamental en este ciclo de mi vida, y sin su ayuda no sería igual.

También quiero agradecer a las personas del área administrativa, a Sonita, Luz Dary, por su colaboración. A la universidad Industrial de Santander, y a la Escuela de Geología que me dio la oportunidad de formarme como una persona con calidad ética y profesional, a Bienestar Universitario que me brindó su ayuda cuando más la necesité.

A todos muchas gracias.

Laura Díaz

Gracias a esas personas importantes en mi vida que de una u otra manera me motivaron a seguir adelante con este proyecto, a mis maestros y amigos que siempre estuvieron listos para brindarme toda su ayuda y comprensión, a mi mamá que siempre he contado con su apoyo incondicional y ha sido un pilar muy importante en mi vida, a mi esposo con el que decidí emprender nuevos retos y a la universidad industrial de Santander por formarme como persona y profesional. Con todo mi amor esta tesis va dedicada a ustedes.

Diana Contreras

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. GENERALIDADES	19
1.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	19
2. OBJETIVOS.....	21
2.1 OBJETIVO GENERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3. MARCO TEÓRICO	22
4. METODOLOGÍA	31
4.1 ETAPAS DE LA METODOLOGÍA.....	31
4.1.1 Revisión y análisis de la información bibliográfica	31
4.1.2 Adquisición de las fuentes de datos.....	38
4.1.3 Procedimiento y herramientas.	42
4.2 INTERPOLADORES.....	48
4.2.1 Modelos mediante Retícula rectangular.....	49
4.2.2 Metodología para el control de calidad de los interpoladores	58
4.2.3 Pruebas del control de calidad.....	65
4.2.4 Procesamiento de todas las planchas.	69
5. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS.....	75
5.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES MORFOMÉTRICAS.....	78
5.1.1 Pendiente.....	80

5.1.2 Orientación.....	81
5.2 PROCESAMIENTO DE LAS VARIABLES MORFOMÉTRICAS	83
5.2.1 Metodología para generar el mapa de pendientes.....	85
5.2.2 Generación mapa orientaciones (“aspect”, en inglés).....	92
6. ETAPA DE INTEGRACIÓN	95
6.1 CONVERSIÓN DE VECTORIAL A RASTER.....	99
7. GEOLOGÍA.....	102
7.1 ESTRATIGRAFÍA	104
7.1.1 Serranía de la macarena.....	105
7.1.2 Planicie oriental.....	107
8. MATRIZ DE CORRELACIÓN Y RESULTADOS.....	110
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	120
9.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN PROCESADO	120
9.2. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE PENDIENTES Y ORIENTACIÓN DE PENDIENTES	123
9.3. RELACIÓN CON LA FRECUENCIA DE REZUMADEROS	125
9.4. RELACIÓN CON LA ESTRATIGRAFÍA.....	129
10. DISCUSIÓN, ALCANCES Y LIMITACIONES	131
11. CONCLUSIONES	133
BIBLIOGRAFÍA.....	135

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización regional del área de estudio, departamento del Meta.	19
Figura 2. Mapa depósitos de arenas bituminosas en Colombia.	23
Figura 3. La geomorfometría y su relación con otras disciplinas.	24
Figura 4. Centro operacional de la geomorfometría es la extracción de parámetros de la superficie del relieve y objetos a partir del DEM.	26
Figura 5. Sistema de radar de la misión SRTM, espacialmente	39
Figura 6. Localización del cuadrángulo SRTM-22-12.	43
Figura 7. Modelo de superficie generada por una grid rectangular.	50
Figura 8. El valor de la cota (+) obtenido a partir de los 4 vecinos muestreados más próximos (*).	51
Figura 9. Ejemplo del resultado del DEM, para el interpolador Media Simple,	52
Figura 10. Media Ponderada por cuadrantes.	54
Figura 11. El valor de la cota se obtiene por la Media Ponderada de cotas de las isolíneas (naranjas) del cuadrante.	55
Figura 12. El valor de cota (+) equivale al valor muestreado más próximo (*).	56
Figura 13. Ejemplos Splines.	57
Figura 14. Comparación de modelos procesados en SPRING, interpolador tipo Spline Mitasova, con variaciones de Tensión, Suavisación y Mínimo de puntos	58
Figura 15. Esquema aproximado de cómo se obtuvo el Corte para exportar una muestra de los datos numéricos para el Control de Calidad.	59
Figura 16. Muestra de la recopilación de los datos para el control de calidad.	61
Figura 17. Gráfica logarítmica, del Error promedio de los interpoladores.	63
Figura 18. Ejemplo de modelos mediante algunos interpoladores.	64
Figura 19. Esquema de las pruebas realizadas, para la Plancha 305exp.	66

Figura 20. Pruebas realizadas método de la 1° derivada (pendientes), para los diferentes interpoladores.	68
Figura 21. Ejemplo del DEM Plancha 306, por el interpolador elegido y los datos utilizados para todas las planchas son los mismos.....	70
Figura 22. Esquema general de los DEM obtenidos, mediante el método Spline Mitasova	71
Figura 23. Mapa general de unidades geológicas en el área total, y rezumaderos de interés.	71
Figura 24. Formas del relieve Figura A:.....	76
Figura 25. Figura modificada de Diukau (1989). Clasificación de las formas de elementos basados en el perfil y curvatura tangencial (slopeacross). Los elementos se han clasificado como positivo o negativo en relación al radio de curvatura (>600 o <600).....	77
Figura 26. Ilustraciones para la definición de algunas variables morfométricas: (a) Inclinação de la pendiente, (b) Aspecto pendiente, (c) Curvatura vertical, (d) Curvatura Horizontal, (e) Áreas de captación y dispersivas. (Florinsky, 2010, Fig. 1.2)	79
Figura 27. Ejemplo Parámetro pendientes.....	81
Figura 28. Ejemplo del mapa de orientaciones. El rango de variación va desde el 0 ° (negro) hasta los 360° (blanco).	83
Figura 29. Esquema general del procedimiento de las etapas iniciales hasta esta etapa.....	84
Figura 30. Procedimiento general para la obtención de los parámetros morfométricos	85
Figura 31. Opciones ingresadas para obtener el mapa, el valor de la pendiente se expresa en grados de 0° a 90°.	86
Figura 32. Clases temáticas del mapa pendientes (TEM).	87
Figura 33. Continuación del procedimiento, ingreso de los intervalos de pendientes en SPRING.....	88

Figura 34. Continuación del procedimiento y revisión de los valores de intervalos asignados para el mapa de pendientes.	89
Figura 35. Resultado Mapa de Pendientes.	91
Figura 36. Procedimiento para obtener mapas tipo Imagen.	92
Figura 37. Opciones y resultado mapa de orientaciones tipo MNT.	93
Figura 38. A) Valores orientaciones (TEM). B) Resultado del Mapa de Orientaciones de tipo TEM.	94
Figura 39. Procedimiento conversión del archivo ASCII a SPRING	96
Figura 40. Ejemplo procedimiento conversión de vectorial a ráster en Spring.	99
Figura 41. Opción limpiar vectores SPRING.	100
Figura 42. Información usada para la correlación Muestras (rezumaderos), Orientaciones (aspect) y Pendientes.	101
Figura 43. Captura pantalla Servicio Geológico colombiano-SGC. Se muestra en el círculo color rojo la zona de mayor interés y se puede evidenciar la falta de información.	103
Figura 44. Gráfica resultados de la matriz Rezumaderos VS Pendiente- Plancha 305.	115
Figura 45. Mapa de pendientes Plancha 305exp.	115
Figura 46. Mapa de geología Plancha 305exp. (Modificado Gómez, et al. 2007 INGEOMINAS), Rezumaderos (ANH).	116
Figura 47. Resultado matriz de Rezumaderos Vs Geología Plancha 305exp.	117
Figura 48. Resultado de matriz Rezumaderos Vs Orientación. Plancha 305exp.	119
Figura 49. Mapa de Orientaciones. Plancha 305exp.	119
Figura 50. Resolución de los datos originales y procesados del DEM, para un segmento Plancha 305exp.	121
Figura 51. Zoom a escala 1/10.000, de la misma zona mostrada en el modelo inicial (SRTM) sin procesar y el modelo final procesado.	122

Figura 52. Mapa de pendientes para el área total de estudio, en color rojo son las divisiones de las planchas.	123
Figura 53. Mapa de pendientes para la plancha 305exp. Es la plancha que presenta mayores alturas.	124
Figura 54. Mapa geomorfológico de todas las planchas.	125
Figura 55. Modelo de sombras, se muestra en color verde el área que se tomó para mirar la relación con la frecuencia de rezumaderos presentados en la zona planchas 305exp y 316exp, en color rosado corresponde a los puntos de los rezumaderos en la zona.	126
Figura 56. Gráfica de Frecuencia de rezumaderos-Pendientes para las planchas 305exp y 326exp.	127
Figura 57. Modelo de elevación con el parámetro Orientaciones o facetas, presenta una exageración vertical de 3, para visualizar mejor su relieve. Puntos localizados son los rezumaderos presentes en la plancha 305exp.	128
Figura 58. Gráfica de Frecuencia de Orientación de pendientes para los rezumaderos en la plancha 305exp y 326exp.	129
Figura 59. Mapa geológico, localización de los rezumaderos (color rosado).	130
Figura 60. Gráfica frecuencia de rezumaderos Vs Geología.	130

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Muestra los resultados obtenidos del perfil por los diferentes métodos de interpolación para la Plancha 305exp.	60
Tabla 2. Procesamiento de datos SRTM plancha 305exp	61
Tabla 3. Valores resultantes del control de calidad realizado para todos los métodos.	63
Tabla 4. Valores de las pendientes.....	90
Tabla 5. Comparación de la frecuencia de la cantidad de rezumaderos para cada una de las variables, para el área de las planchas 305exp y 326exp	111
Tabla 6. Matriz de correlación. Rezumaderos vs pendiente. Plancha 305exp....	114
Tabla 7. Matriz de correlación. Rezumaderos vs geología. Plancha 305exp.....	117
Tabla 8. Matriz de correlación de rezumaderos Vs Orientación. Plancha 305exp	119
Tabla 9. Frecuencia de rezumaderos Vs Pendientes	126
Tabla 10. Frecuencia de Rezumaderos-Orientación.....	128

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS, EN LOS BLOQUES CAÑO SUR, CPO 16, CPO 17, RÍO ARIARI, EN LA ZONA LLANOS SUR DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES, MEDIANTE LA TÉCNICA DE MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL DEMS*

AUTORES: DÍAZ RIVERA, Laura Cristina **
CONTRERAS SARMIENTO, Diana Marcela **.

PALABRAS CLAVE: Morfometría, Modelos de Elevación Digital, DEM, Llanos Sur, Río Ariari, Caño Sur.

DESCRIPCIÓN

El uso de Modelos de Elevación Digital (DEM) para el análisis visual y matemático de la topografía, paisaje y geoformas se ha incrementado en los últimos tiempos como una fuente para la generación de otros modelos total o parcialmente dependientes de la topografía. El DEM junto a la generación de Modelos Digitales del Terreno (DTM) para las medidas de morfometría en geomorfología, proporcionan la parametrización de las variables que toman lugar en la descripción del relieve y se han convertido en una herramienta fundamental en el estudio de aspectos cuantitativos.

Se determinó la correlación entre zonas potencialmente generadoras de hidrocarburos asociadas a arenas bituminosas y un conjunto de parámetros geomorfológicos cuantificables para un área de interés que comprende los bloques CPO 16, CPO 17, Caño Sur y Río Ariari de ECOPETROL, en la región de la cuenca de los llanos sur, departamento del Meta, como una herramienta para mejorar el conocimiento de la geología de la zona.

Se realizó la revisión y análisis de información bibliográfica, la generación de un Modelo de Elevación digital a partir de datos del SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) sometiendo a prueba varios algoritmos de interpolación, a este se le realizó un control de calidad temático en cual permitió elegir un interpolador de tipo SplineMitasova. Partiendo de este modelo se obtuvieron los parámetros morfométricos descriptivos como pendiente y orientación, a analizar para posteriormente determinar la correlación existente de estos parámetros geomorfológicos cuantificables con las zonas donde se han encontrado manifestaciones superficiales de hidrocarburos asociados a arenas bituminosas.

*Trabajo de grado

**Facultad Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de geología. Director, Liliana María Plata, Geóloga; Co-Director, Jorge Eduardo Pinto Valderrama, Geólogo, Msc

ABSTRACT

TITLE: CHARACTERIZATION OF THE MORPHOMETRIC PARAMETERS IN THE CAÑO SUR, 16 CPO, CPO 17, RIO ARIARI BLOCKS IN THE LLANOS BASIN AREA SOUTH OF THE EASTERN PLAINS, THROUGH THE TECHNIQUE OF DIGITAL ELEVATION MODELS DEMS.*

AUTHORS: DÍAZ RIVERA, Laura Cristina ** ; CONTRERAS SARMIENTO, Diana Marcela. **

KEYWORDS: Morphometry, Digital Elevation Models, DEM, Llanos Sur, Río Ariari, Caño Sur.

DESCRIPTION

Using Digital Elevation Models (DEM) for visual and mathematical analysis of the topography, landscape and landforms has increased in recent times as a source for generating other wholly or partly dependent on the topography models. The DEM and generation of Digital Terrain Models (DTM) for morphometry and geomorphology measurements, provide the parameterization of the variables that take place in the relief description and have become an essential tool in the study of quantitative aspects.

This study aims to propose the correlation between potentially generating hydrocarbon zones associated with oil sands and a set of geomorphological parameters quantifiables for an area of interest which comprise the 16 CPO, CPO 17, Caño Sur and Río Ariari Ecopetrol blocks in the region of Southern Llanos Basin of the southern plains, Meta department, as a tool to improve knowledge of the geology of the area.

The methodology used initially consisted in the review and analysis of bibliographic information, the generation of a digital elevation model data from SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) by testing various interpolation algorithms, to which was performed thematic quality control which allowed to choose a Mitsou spline interpolator type. Based on these model descriptive morphometric parameters such as slope and aspect were obtained to subsequently determine the correlation between these quantifiable geomorphological parameters with the areas where have been found surface manifestations of hydrocarbons associated with oil sands.

* Bachelor Thesis

** Facultad Ingenierías físicoquímicas. Escuela de geología. Director, Liliana María Plata, Geóloga; Co-Director, Jorge Eduardo Pinto Valderrama, Geólogo, Msc.

INTRODUCCIÓN

El presente documento es producto del convenio de cooperación tecnológica N°. 002 de 2012 entre la Universidad Industrial de Santander y Ecopetrol, para la realización de prácticas empresariales como modalidad de proyecto de grado. Para las estudiantes Laura Cristina Díaz Rivera y Diana Marcela Contreras Sarmiento. Se trabajó un área en el departamento del Meta que cubre las planchas geológicas 305, 306, 307, 326, 327, 328, 349 y 350.

Este trabajo propone la creación de un Modelo de Elevación digital, sometido a un control de calidad temático, a partir del cual se define, establecen y se calculan las variables morfométricas asociadas a aspectos estratigráficos que permiten establecer una posible correlación con dichos parámetros y zonas donde se han encontrado manifestaciones de hidrocarburos asociados a arenas bituminosas. Para la región de la cuenca de los llanos sur y los bloques CPO de ECOPETROL, que son las áreas de interés del presente proyecto. Esta región se caracteriza por tener un modelado aluvial con pocas elevaciones, donde la altura relativa es muy baja y las variaciones en el relieve poco importantes, este ejercicio permitió llegar a conclusiones sobre el uso de estas técnicas, y su posible validación como elemento de análisis preliminar en una fase pre-campo, de tal manera que futuras investigaciones se pueda ampliar el conocimiento desarrollando este ejercicio con su verificación en terreno.

En la construcción del presente documento se tomó la base de datos suministrada por la ANH que contaba entre otros campos con los siguientes autor, escala, coordenadas, tipo de impregnación, formación (pero una descripción litológica referida de manera general a la escala 1/500.000) y cuenca geológica. Con esta

información se prepararon las variables que se utilizaron en el software de uso libre Spring 5.2.3.

Los resultados expuestos en este informe son consecuencia del trabajo con los niveles de información suministrados tanto en las escalas geológicas como en la base de datos. Se recalca que debido a la confidencialidad de la información no fue posible trabajar con un volumen de datos más robusto.

Un modelo digital de elevaciones (DEM por sus siglas en inglés) es una estructura discreta de datos que representa una variable distribuida en el espacio. La variable representada puede ser cualquiera que cumpla con el requisito fundamental de la misma, es decir, que se pueda representar espacialmente (*Felícísimo, 1994*).

La finalidad del DEM es modelar una variable distribuida y continua en el espacio mediante un arreglo de valores discretos que permitan el tratamiento numérico de los datos a través de algoritmos matemáticos y lo hagan útil para representar la superficie del terreno.

La actual facilidad para la obtención, uso y aplicaciones de DEM basados en datos e imágenes satelitales está siendo liderada por el uso de datos del SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), considerado como el mapeo tridimensional más preciso y extenso de la superficie terrestre, el cual puede obtenerse gratuitamente a través de algunos portales como NASA, USGS, GLCF (*Global LandCoverFacility, 2006*). (Roa, L y Ulrich, K., 2008). Este modelo digital de elevación es la pieza clave para trabajar en el área de la geomorfometría que es una ciencia multidisciplinar con base en la geología, geomorfología, topografía, la matemática y otras muy diversas ramas de conocimiento.

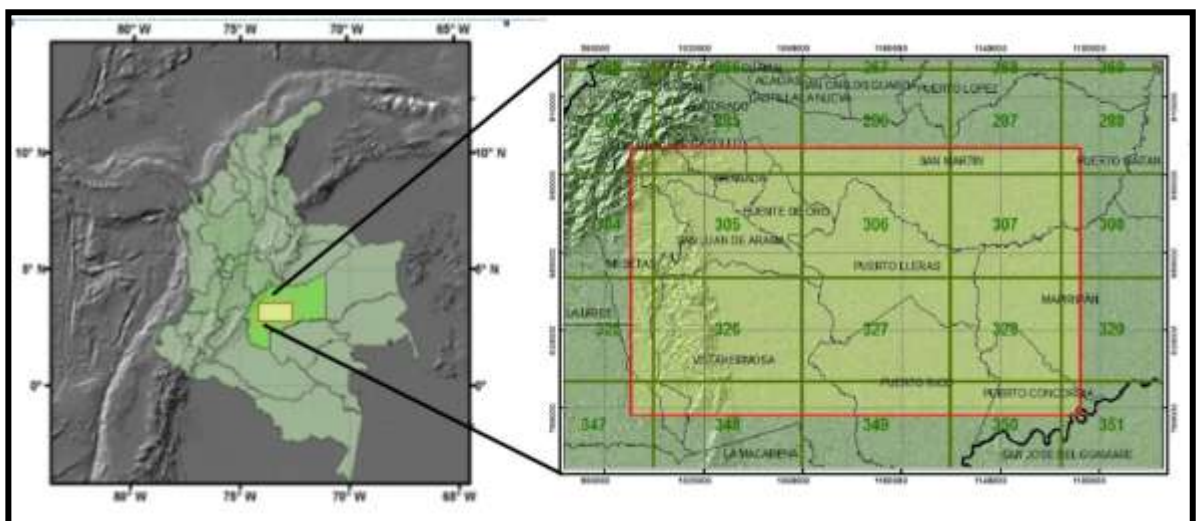
1. GENERALIDADES

1.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La Cuenca de los Llanos es una depresión desarrollada en el flanco occidental del Escudo de Guyana que se extiende hacia el Oriente de la Cordillera Oriental y se conoce geográficamente como la Orinoquía Colombiana. La conforman los departamentos de meta, Casanare, Vichada, Arauca y Guaviare.

El área estudio se encuentra ubicado en el sector oriental de la cordillera oriental, en el Departamento del Meta, en la zona Llanos Sur en la cuenca de los Llanos Orientales.

Figura1. Localización regional del área de estudio, departamento del Meta.



El área de interés regional está constituida por la zona conformada por el cuadrángulo color Rojo mostrado en la **Figura 1**. Localizadas principalmente en los Municipios de Puerto Lleras, Puerto Rico, Vista Hermosa, San Juan de Arama, Fuente de oro, San Martín, Mapiripán y Granada del Departamento del Meta. En donde se encuentran los **Bloques CPO16, COP17, Caño Sur y Río Aríari** de ECOPETROL, correspondientes a las planchas 327, 326, 325, 307, 306 y 305 del IGAC a escala 1:100.000.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer la correlación entre zonas potencialmente generadoras de hidrocarburos asociadas a arenas bituminosas y parámetros geomorfológicos cuantificables mediante el uso de DEM en los bloques Caño Sur, CPO16, COP17, Río Aríari (Cuenca de los Llanos Orientales).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar el modelo de elevación digital de alta resolución espacial (5m) con la mayor cantidad de restricciones geográficas posibles y someterlo a un control de calidad de exactitud temática.
- Establecer, definir y calcular las variables morfométricas a cuantificar asociadas a aspectos estratigráficos del área de estudio a partir de un DEM con alta resolución espacial.
- Determinar la correlación existente entre cada uno de estos parámetros morfométricos y las zonas en donde se han encontrado manifestaciones superficiales de hidrocarburos asociados a arenas bituminosas en el área de estudio.

3. MARCO TEÓRICO

A través de los tiempos ha ido aumentando el uso de nuevas tecnologías y herramientas que brinden un apoyo hacia el estudio y exploración de nuevos recursos energéticos

Nuestras cuencas en Colombia ofrecen buenas condiciones aunque muy complejas para definir oportunidades de producción de crudos, por esto toma gran importancia el estudio de los hidrocarburos no convencionales, como las arenas bituminosas.

Las arenas bituminosas, también llamadas arenas de alquitrán y arenas petrolíferas, son arenas impregnadas de petróleo compuestas por arena, arcilla, agua y bitumen, son consideradas una fuente de energía no renovable y no convencional [Chilingarian, 1978]. Estas arenas son depósitos de betún, un pesado, negro y viscoso aceite que debe ser tratado rigurosamente para convertirlo en un crudo mejorado antes de que pueda ser utilizado por las refinerías para producir gasolina [OCDE/AIE, 2007].ⁱ

Los estudios sobre la presencia de arenas bituminosas en el país son recientes, no se tienen cifras exactas de la cantidad de estas reservas pero sí la ubicación y la estimación de las minas. La **Figura 2** muestra los depósitos de arenas bituminosas en Colombia, indicados por los círculos rojos. Las mayores reservas se encuentran en el departamento de Caquetá en las regiones de San Vicente y Florencia. En el departamento del Meta se encuentra otro depósito junto al Río

ⁱ OCDE/AIE. (2007), Manual de Estadísticas energéticas. Recuperado 25 Enero de 2015 en: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/statistics_manual_spanish.pdf

Guejar y hacia al centro del país están los depósitos de Sogamoso y Río Nare en los departamentos de Boyacá y Santander respectivamente [Guzmán, 2008].ⁱⁱ

Figura2. Mapa depósitos de arenas bituminosas en Colombia.



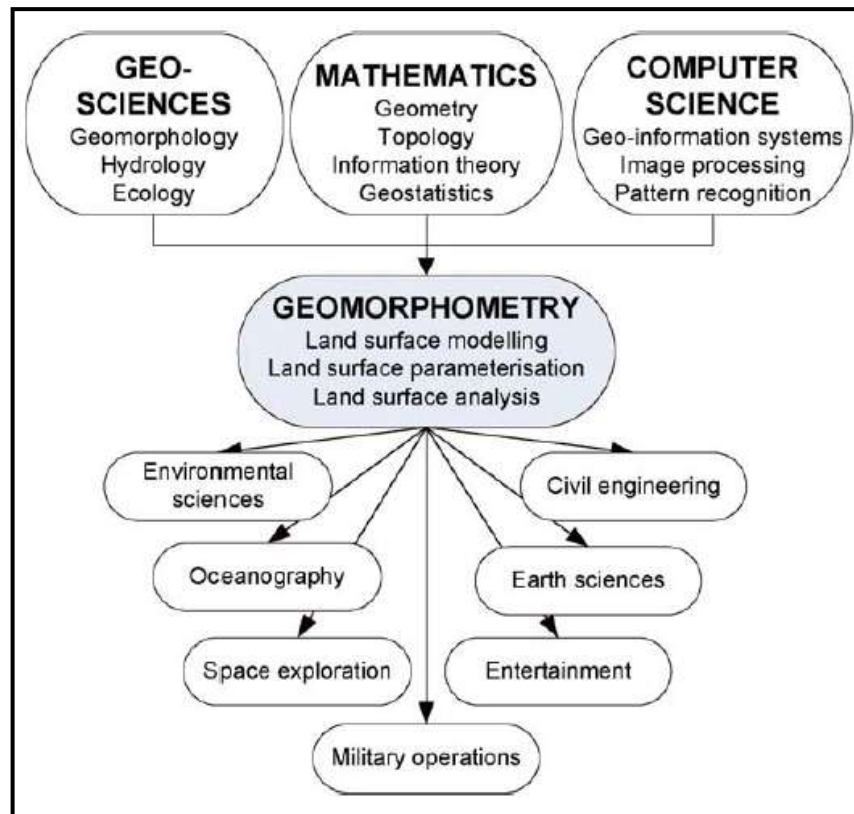
Fuente: ANH –Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2008

Mapa depósitos El interés de este proyecto es brindar un aporte y herramientas que pueden servir como complemento junto con otros estudios a los estudios realizados por ECOPETROL en la zona del Río Guejar en la cuenca de los llanos sur, sin embargo para comprender mejor el análisis morfométrico del presente trabajo, se ve la necesidad de comprender más a fondo lo que es la geomorfometría y algunos conceptos tratados en el presente trabajo.

ⁱⁱ GUZMAN, R. (2008), Opportunities and Challenges for the Development of Unconventional Hydrocarbon Resources in Colombia. ANH

El estudio del terreno y la parametrización de sus características es, por tanto, pieza fundamental del análisis geográfico. La disciplina encargada de llevar a cabo este análisis es la *geomorfometría*, la cual se define como la *ciencia del análisis cuantitativo del relieve* (Pike, R. 1995, S; Rasemann, et al. 2004). La geomorfometría es una ciencia multidisciplinar con base en la geología, la geomorfología, la topografía, la matemática y otras muy diversas ramas de conocimiento. Esto no es de extrañar considerando lo anteriormente mencionado, ya que son muchas las disciplinas que han dedicado sus esfuerzos al análisis del relieve y el estudio de sus implicaciones sobre los distintos procesos (**Figura 3**).

Figura3. La geomorfometría y su relación con otras disciplinas.



Fuente: Modificado por Pike, 1995 (Hengl, T and Reuter, H., 2009)

Resumiendo el conjunto de análisis geomorfométricos, la aplicación de estos puede estructurarse en las siguientes etapas (Hengl, T and Reuter, H., 2009) **(Figura 4)**:

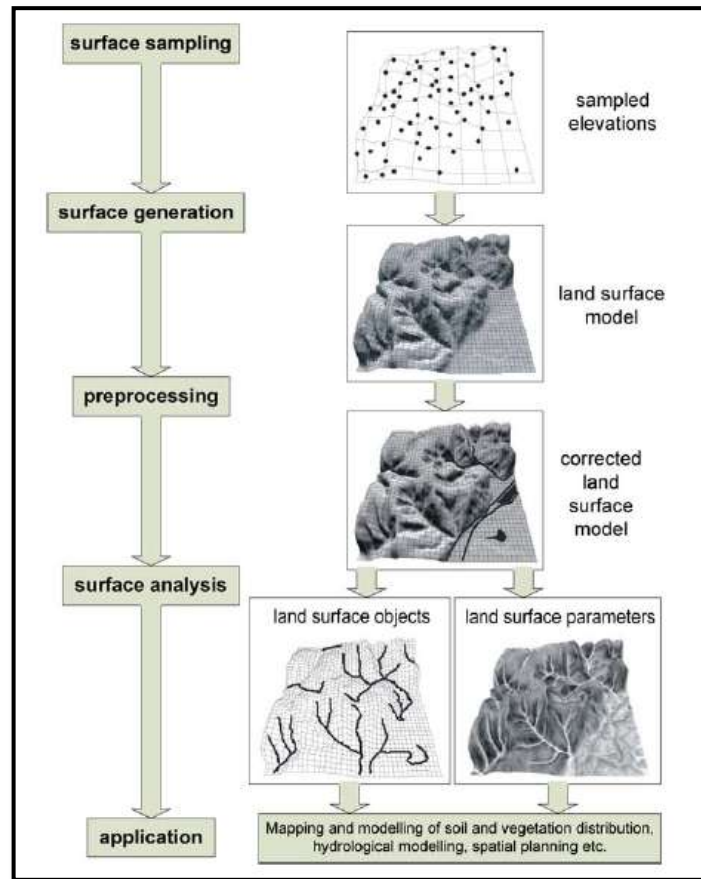
- Toma de datos de elevación en puntos establecidos (muestreo).
- Generación de un modelo de la superficie a partir de los anteriores.
- Corrección de errores y eliminación de elementos erróneos.
- Cálculo de parámetros y elementos derivados.
- Empleo de los parámetros y elementos anteriores.

Parámetros y objetos de la superficie terrestre se pueden agrupar de acuerdo a varios criterios. Parámetros comúnmente se distinguen como primaria o secundaria, dependiendo de si se derivan directamente de un DEM o procesamiento adicional donde se requieren de pasos o insumos (Wilson y Galán, 2000).

Tres grupos principales de parámetros y objetos de la superficie terrestre se identifican:

- Parámetros morfométricos básicos y objetos.
- Parámetros y objetos específicos de la hidrología.
- Parámetros y objetos específicos para el clima y la meteorología.

Figura4. Centro operacional de la geomorfometría es la extracción de parámetros de la superficie del relieve y objetos a partir del DEM.



Fuente: Hengl, T and Reuter, H., 2009. pag. 7

El procesamiento del DEM implica en la mayoría de casos la utilización de métodos de interpolación. Un caso muy habitual es la creación a partir de curvas de nivel, con cuyos valores puede obtenerse una capa continua de elevaciones. También puede obtenerse a partir de datos puntuales tomados en campo, caso que es frecuente para estudios donde es necesaria una gran precisión, y en los que la cartografía existente no es suficiente, debiendo elaborarse esta.

La naturaleza de la información que se recoge en el DEM y el análisis a efectuar posteriormente con él hacen interesantes los siguientes comentarios sobre los distintos métodos de interpolación.

- **Distancia inversa.** El método de distancia inversa no es adecuado para la interpolación de DEM, pues genera abundantes depresiones de carácter artificial y elementos no naturales en el relieve.
- **Kriging.** Pese a ser un interpolador de calidad para el caso de datos de elevación, las superficies generadas son excesivamente suaves. Aunque la precisión del método es alta en términos cuantitativos, no refleja con precisión la configuración del relieve y sus accidentes, lo cual se hará notar en los análisis posteriores sobre dicho DEM.

Otro problema del kriging es su excesiva sensibilidad a valores extremos estadísticamente diferentes del resto, ya que producen un número elevado de elementos morfológicos erróneos (Hengl, T and Reuter, H., 2009), dificultando la aplicación posterior de ciertos algoritmos.

- **Splines.** Los splines representan una de las mejores alternativas para la creación de DEM. Frente a las restantes metodologías, autores como (Mitasova, H; Hofierka, J., 1993) recomiendan el uso de splines para la obtención de DEM idóneos para el análisis.
- **Ajuste de funciones.** Como métodos globales, ajustar una función de tipo polinómico a los puntos de datos y asemejar el relieve a esta no es adecuado, ya que el relieve es altamente más complejo. El uso de funciones de grado superior y mayor complejidad, por otra parte, hace que puedan aparecer valores extremos irreales que desvirtúen por completo la superficie interpolada. Aplicados como métodos locales, no obstante, veremos más adelante que este tipo de ajustes se utilizan no para la creación del DEM sino para el análisis de

las propiedades de este, ajustando localmente funciones con los valores de un entorno definido de celdas.

Las variables topográficas

La descripción del relieve a partir del DEM se realiza mediante un conjunto de medidas que definen características geométricas del terreno a diferentes escalas. Este proceso se conoce como parametrización del relieve: generación un conjunto de medidas que describen las formas topográficas permitiendo distinguir diferentes tipos de relieve o, en resumen, la descripción numérica de formas topográficas. Los parámetros pueden ser descriptores globales o locales pero los primeros informan únicamente sobre el conjunto del DEM por lo que son más útiles para la comparación de modelos de diferentes zonas. Los descriptores locales aportan un conjunto de datos que puede ser analizado con el mismo nivel de resolución que el DEM original.

La parametrización del relieve debe cumplir algunas condiciones para ser útil:

- Los parámetros deben tener relación con los procesos geomorfológicos que modelan el relieve.
- El conjunto de parámetros no debe proporcionar información redundante, es decir, deben medir características distintas.
- La parametrización debe incluir información sobre la influencia de la escala ya que existen parámetros cuya magnitud depende de la resolución del muestreo y, por tanto, de la escala de trabajo

Existen varias propuestas sobre las variables que deben incluirse en la parametrización del relieve. Entre ellas, la menos discutida es la pendiente, aunque también son usadas con frecuencia en geomorfología la orientación y la curvatura (Weibel, R.; Heller, M. (1991)). Franklin, Steven E.; Peddle, Derek R. (1987) mencionan cinco parámetros básicos en este contexto: elevación, pendiente, orientación, convexidad y relieve. El relieve, definido en este caso

como la variabilidad de la superficie, es lo que otros autores denominan rugosidad. En Mark, David M. (1975) puede encontrarse una revisión del estado del tema en los momentos previos al tratamiento informático, donde se analizan las relaciones entre diversos parámetros mediante análisis de correlación.

Todas estas variables pueden ser representadas como modelos digitales derivados con la misma resolución que el DEM original. Como veremos, esta circunstancia permitirá posteriormente el análisis multivariable del relieve, teniendo en cuenta simultáneamente la totalidad de los descriptores topográficos. (Felicísimo, A. 1994)

Análisis morfométrico

El análisis morfométrico del DEM estudia el relieve y la orografía de la superficie por la cual está definida, caracterizándolo a través de parámetros adicionales. Recurriendo una vez más a los conceptos del álgebra de mapas, estos parámetros se basan en su gran mayoría en un análisis focal. Este análisis emplea una caracterización matemática, así como formulaciones estadísticas sencillas. En función de ello se distinguen dos grupos principales:

- Medidas geométricas
- Medidas estadísticas

Puesto que la mayoría de análisis son de tipo focal, se necesita definir una ventana de análisis. El tamaño de esta ventana depende del tipo de medida a calcular. En el caso de medidas estadísticas, esta puede escogerse libremente, así como su forma. En el caso de las medidas geométricas, estas requieren de un modelo matemático del terreno, por lo que la ventana de análisis viene condicionada al modelo escogido. En realidad, una vez establecida la función que define localmente la superficie del DEM, se hace uso directo de su expresión,

motivo por el cual, según sea el modelo, se usa uno u otros valor de los pertenecientes al análisis. (Olaya, V, 2009, modificado por el autor)

4. METODOLOGÍA

4.1 ETAPAS DE LA METODOLOGÍA

4.1.1 Revisión y análisis de la información bibliográfica. Los trabajos descritos se enmarcan básicamente en los elementos que han trabajado durante el desarrollo de las primeras fases, que es la recopilación de bibliografía e información guía sobre DEM obtenidos mediante diversas fuentes de datos, técnicas y métodos aplicados al análisis geomorfométrico, otros con relación al tratamiento de los datos y métodos de interpolación, y asimismo en especial los DEM obtenidos mediante SRTM.

Jarvis, A., et al. (2004). Realizaron una investigación sobre el uso práctico de los datos SRTM en el trópico, comparados con DEM generados mediante datos cartográficos a diferentes escalas y conjuntos.

Estas comparaciones son realizadas con las diferencias de altitud simples, así como para derivados topográficos de primer orden, tales como pendiente y aspecto, finalmente derivados topográficos más complejos calculados a través del modelado hidrológico simple. Donde los autores estudiaron cinco casos que ofrecen una amplia gama de análisis sobre la calidad, exactitud y usabilidad de los datos SRTM. Que son: **(1)** DEM SRTM ecuador Vs GROPO30, **(2)** DEM SRTM Honduras Vs DEM derivado de cartografía 1:50.000, **(3)** Estudio caso Dapa: Diferencias absolutas y relativas entre DEM en la escala de subcuenca. **(4)** Estudio caso Tambito: Evaluación de un algoritmo de llenado de huecos. **(5)** Diferencias hidrológicas significativas entre SRTM y DEMs generados cartográficamente.

(1) En primer lugar, demostraron que el DEM SRTM es una gran mejora sobre los productos DEM mundiales anteriores (en este caso utilizando GTOPO30), y muestra que los estudios previos basados en GTOPO30 pueden tener errores significativos en algunas partes. Una consecuencia importante de esto es que se debe tener cuidado al usar GTOPO30 como co-variable en la interpolación para el llenado en las regiones sin datos.

(2) En segundo lugar, una evaluación de la escala nacional la precisión de los datos SRTM en los trópicos se realiza con los datos del GPS, también evalúan DEM TOPO proporcionan una mejor o peor información de elevación. El DEM SRTM se encuentra más preciso (error promedio de sólo 8 m en lugar de 20 m para el DEM TOPO), y encontraron que el error no es aleatorio, sino sistemático relacionado con el aspecto. En este caso, las pendientes del noreste presentaron mayor error debido al ángulo de incidencia de las imágenes de radar originales. El ángulo en sí es probable que sea diferente para las diferentes regiones, pero es un factor importante para tener en cuenta cuando se utilizan datos SRTM para análisis precisos.

(3) Un análisis similar a escala más pequeña, comparo los datos del GPS con la elevación SRTM para una sola cuenca, y hace algunas comparaciones básicas de derivados hidrológicos para un DEM SRTM totalmente sin perder datos de huecos. En la escala de captación se encuentra una alta calidad en mapas cartográficos 1:10.000 donde producen un DEM más detallado que el DEM SRTM de 92 m, a pesar de los errores verticales es muy similares (20 m para el DEM SRTM y 21 m para el DEM TOPO). Sin embargo, los errores mayores están en los datos SRTM donde se encontraron crestas y picos, en los que subestimaron sistemáticamente la elevación. Esto se explica en parte por el tamaño de la celda bastante gruesa para el grado de variación topográfica presente en el sitio. A pesar del mayor detalle en el DEM TOPO, encontraron pocas diferencias hidrológicas entre SRTM y TOPO, como la red de arroyos, límites de la cuenca, y el índice de humedad.

(4) El cuarto estudio examinó el problema asociado con los huecos o vacíos de datos faltantes, y proporciona un análisis detallado de los errores inducidos a

través de una técnica de interpolación para rellenar los agujeros SRTM. A pesar de 43% de la superficie que no contiene datos, había un error promedio de sólo 5 m entre el DEM TOPO (sin la falta de datos) y los valores de elevación interpolados del DEM SRTM. Sin embargo, algunos detalles se pierden en la topografía y las primeras derivadas de orden tales como pendiente y aspecto muestran errores significativos en las áreas de datos que faltan.

(5) El análisis hidrológico detallado de la misma región muestra la técnica de interpolación para rellenar agujeros de datos faltantes se desempeña muy bien en términos de representación de las características hidrológicas de una cuenca en su conjunto. En este caso, el tamaño de celda mostró que hace una diferencia con los mapas cartográficos (escala 1: 25.000) que proporcionan mayor detalle topográfico y causando diferencias significativas en las características hidrológicas de la cuenca.

La importancia de los resultados de esta investigación radica que los DEM derivados de SRTM proporcionan una mayor precisión que los TOPO DEMs, pero no contienen necesariamente más detalle. Cartografía a escalas de 1: 25.000 y por debajo (es decir, 1:10.000) contiene las características topográficas no capturadas con los DEM SRTM de 3-arco segundos. Sin embargo, si sólo la cartografía con las escalas por encima de 1:25.000 (es decir, 1:50.000 y 1:100.000) están disponibles, es mejor utilizar los DEMs SRTM. Esto es válido para el uso de DEM SRTM para derivados del relieve (pendiente, aspecto, clasificaciones paisaje, etc.), así como la elevación pura. Para la modelización hidrológica, SRTM 3-arco segundo DEM funcionan bien, pero están en el margen de utilidad. Si buena calidad cartográfica de escala 1: 25.000 y por debajo está disponible, mejores resultados se pueden obtener a través de la digitalización y la interpolación de los datos cartográficos.

Gonzalo, W. y Osorio, R. (2005) Realizaron un Modelo Digital de Elevación para la cuenca del Río de Oro. Se basó en la creación y validación de un DEM para el área metropolitana de Bucaramanga y para la cuenca del río de Oro teniendo como base planchas cartográficas obtenidas mediante restitución fotogramétrica.

Con base en esta información buscaron el mejor método de interpolación que proporcionará un mayor grado de ajuste a los datos de entrada. Donde valoraron el error medio cuadrático RMSE utilizando validación cruzada de los datos muestrales de la cuenca del río de oro y para Bucaramanga datos muestrales de 10 áreas piloto. Y como resultado del análisis encontraron el mejor ajuste para el modelo lo proporcionó la función de base radial multicuadrática no solo desde el punto de vista estadístico sino también visual, superando a otros métodos considerados como el krigado, la triangulación, o el vecino más cercano. Analizaron la selección de los parámetros óptimos en la función de base radial multicuadrática, el efecto del tamaño de la celda para la grilla, el tiempo de cálculo del modelo y el número de puntos tomados en la validación cruzada. Y la comparación de estos con los datos de elevación del modelo de puntos tomados con GPS, dentro del área metropolitana.

Reuter, H. et al. (2007). Estudiaron la versión de grado "terminado" de los datos SRTM (también denominados versión 2) que presentaba el problema de contener vacíos de algunos datos (algunos 836.000 km²) - y otras anomalías - que impiden su uso inmediato de estas en muchas aplicaciones. Estos huecos pueden ser llenados utilizando una variedad de algoritmos de interpolación en conjunción con otras fuentes de datos de elevación, pero hay poca orientación sobre el método de llenado de vacío más apropiada. En este trabajo se describe: **(i)** Un método para llenar los huecos usando una variedad de interpoladores, **(ii)** Un método para determinar los algoritmos de llenado de huecos más apropiadas utilizando una clasificación de los huecos en función de su tamaño y una tipología del terreno circundante; y **(iii)** la clasificación del algoritmo más adecuado para cada uno de los 3.339.913 vacíos en los datos SRTM. Basado en una muestra de 1.304 huecos artificiales pero realistas a través de seis tipos de terreno y ocho clases de tamaño de vacíos, encontraron que la elección del algoritmo de relleno vacío depende tanto del tamaño y tipo de terreno vacío. Contrario a algunos hallazgos anteriores, los mejores métodos se pueden generalizar como: Kriging o interpolación de la

ponderación de la distancia inversa, para huecos pequeños y medianos en zonas bajas relativamente planas; Interpolación Spline para huecos pequeños y medianos en zonas de gran altitud y el terrenos disectados; Red Irregular Triangular o interpolación de ponderación distancia para grandes huecos en zonas muy planas, y un método Spline avanzada (ANUDEM) para grandes huecos en otros terrenos.

Grohmann et al. (2007). Llevaron a cabo una evaluación de la utilización de modelos SRTM en geomorfología y morfotectónica, en el área del Macizo alcalino en “*Poços de Caldas*” (MG) Brasil. Fueron considerados los parámetros de pendiente, orientación de vertientes, rugosidad del relieve, bases de las superficies. Como conclusión general encontraron que los modelos SRTM tienen un nivel de detalle suficiente para trabajar en las zonas con escalas hasta de 1: 50000, y en este caso se debe volver a re-muestrear los datos para que coincida con la resolución de la escala semi-detalle. Entre los productos derivados del modelo de elevación, se destaca la derivación directa de la red de drenaje, con muy buenos resultados comparados con los obtenidos con mapas topográficos. Para los análisis a escalas de 1: 100.000 o menos, hasta 1: 500 000, no se requiere de remuestreo de los datos de forma explícita, además para estudios regionales para el volumen de los datos se torna demasiado denso para el detalle requerido, siendo recomendable el remuestreo para la escala trabajo.

AndradesFilho, C, O. (2010). Realizó una investigación en Brasil, que tuvo como objetivo el análisis morfoestructural de la parte central de la Cuenca Paraíba (BP) mediante la integración de la información cualitativa (densidad y lineamientos morfoestructurales; patrones y anomalías del drenaje) y cuantitativa (índices morfométricos), con el fin de comprobar si la evolución del drenaje y el relieve ocurrieron bajo influencia tectónica. La investigación incluye datos de sensores remotos derivados de MDE (*modelos de elevación digital*) - SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) y del sistema de radar ALOS

(*AdvancedLandObservingSatellite*) -PALSAR (*PhasedArraytype L-band SyntheticAperture*), además de la base digital de drenaje extraída de mapas topográficos DSG (*Diretoria de Serviço Geográfico*). Adicionalmente ayuda en la extracción de lineamientos morfoestructurales. El MDE-SRTM también sirvió para apoyar el análisis de la red de drenaje y la aplicación de los índices morfométricos. Los resultados revelaron que MDE-SRTM fue más eficiente para resaltar rasgos morfoestructurales que el PALSAR. Las características geométricas obtenidas de las imágenes PALSAR y la interferencia de la cobertura del suelo contribuían a ocultar o suavizar las morfoestructuras de este producto. Los lineamientos morfoestructurales extraídos del MDE-SRTM tuvieron una buena correspondencia con las estructuras tectónicas registradas en el área de estudio. Otra evidencia de influencias tectónicas incluye la elevada frecuencia de patrones de drenaje tipo Trellis (y sus variaciones); ocurrencia de patrones rectangulares angulares; y la abundancia de anomalías en el drenaje, especialmente en las zonas dominadas por la cobertura sedimentaria. Además, los índices morfométricos mostraron generalmente valores consistentes con la influencia tectónica. Los índices también indicaron que la parte noreste de la zona con el área de la cobertura sedimentaria y el sector norte de la zona del área con dominio del basamento cristalino fueron los que registraron mayor intensidad en la actividad tectónica en tiempos geológicos recientes. Los datos cualitativos y cuantitativos derivados de SRTM DEM-aportaron pruebas de apoyo sobre la influencia tectónica en el área de estudio. Deformación frágil y dúctil recurrente como resultado de la reactivación de las fallas tectónicas del Precámbrico durante el Mesozoico y Cenozoico y la generación de nuevas estructuras durante estos periodos, fueron fundamentales en la formación del paisaje y el control de los patrones de sedimentación en la parte central de la cuenca del Paraíba, Brasil.

Prasannakuma, V. Et al. (2011). Realizó un estudio que examina el uso y aplicabilidad de la fuente de datos de elevación, de libre disposición (3 segundos de arco SRTM) en la caracterización de relieve, geomorfometría, estudios de

cuencas hidrográficas y otras aplicaciones científicas aliadas en comparación con los datos de elevación del contorno derivados del análisis topográfico. Los datos de relieve extraídos de la forma convencional digitalizando información geológica con el conjunto de datos de contornos topográficos (1: 50.000) son comparados con SRTM-DEM y analizaron sus variaciones. La automatización de los parámetros geomorfométricos derivados del contorno DEM contorno y las propiedades estadísticas calculadas de los parámetros tienen un acuerdo sustancial con los mismos parámetros derivados del SRTM-DEM. Al mismo tiempo, también existen variaciones localizadas en los mismos dominios espaciales. Derivados del análisis del relieve obtenido del SRTM DEM sugieren la amplia aceptación y aplicabilidad de la fuente de datos SRTM de libre acceso, especialmente en las aplicaciones a escala regional relativas a la modelación hidrológica, caracterización del relieve, la gestión de desastres y estudios de degradación de tierras.

En general, el SRTM-DEM ofrece una representación coherente de la topografía en una amplia gama de escalas y proporciona una mayor rapidez y nuevos medios prometedores para obtener parámetros del relieve importantes que son relevantes en geomorfología e investigaciones en geociencias.

Silva, I. et al. (2013). Realizaron un trabajo que tuvo como objetivo elaborar un mapa pedológico preliminar de la cuenca hidrográfica del Rio Passaúna (Paraná), a partir del análisis de variables morfométricas extraídas del procesamiento digital de imágenes de radar interferométricas SRTM. La metodología objetiva es de orientar trabajos de campo transformándose en investigaciones más rápidas de bajo costo. El MDT (Modelo Digital del Terreno) fue elaborado con una resolución espacial de 30 metros disponibles para remuestreo por el TOPODATA. A partir de este, obtuvieron las variables morfométricas para ser utilizadas en composiciones de colores RGB, con el objetivo de identificar tipos de suelo, las variables utilizadas son: Inclinación, Aspecto, y área de contribución, los resultados fueron comparados con el mapa de suelos elaborado por EMBRAPA donde observaron

semejanzas y diferencias en relación a la extensión u distribución de las clases de suelo de la cuenca.

Grohmann et al. (2007). Llevaron a cabo una evaluación de la utilización de modelos SRTM en geomorfología y morfotectónica, en el área del Macizo alcalino en “*Poços de Caldas*” (MG) Brasil. Fueron considerados los parámetros de pendiente, orientación de vertientes, rugosidad del relieve, bases de las superficies. Como conclusión general encontraron que los modelos SRTM tienen un nivel de detalle suficiente para trabajar en las zonas con escalas hasta de 1: 50000, y en este caso se debe volver a re-muestrear los datos para que coincida con la resolución de la escala semi-detalle. Entre los productos derivados de la modelo de elevación, se destaca la derivación directa de la red de drenaje, con muy buenos resultados comparados con los obtenidos con mapas topográficos. Para los análisis a escalas de 1: 100.000 o menos, hasta 1: 500 000, no se requiere de remuestreo de los datos de forma explícita, además para estudios regionales para el volumen de los datos se torna demasiado denso para el detalle requerido, siendo recomendable el remuestreo para la escala trabajo.

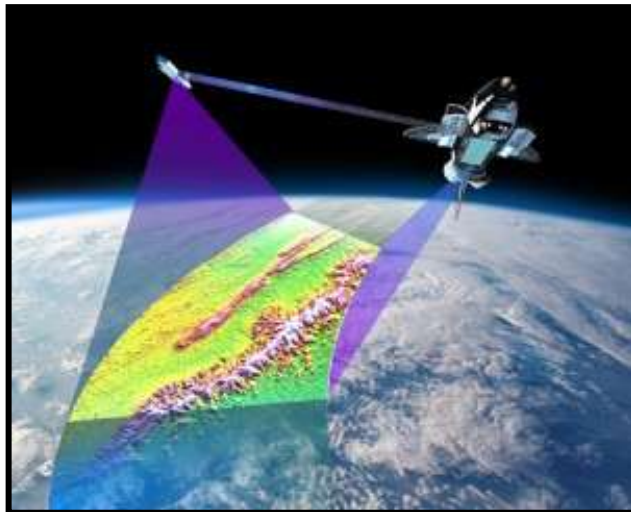
4.1.2 Adquisición de las fuentes de datos. Uno de los insumos fundamentales para las primeras etapas del trabajo es la adquisición del modelo de elevaciones SRTM (Shuttle Radar Topographic), que se elaboró a partir del radar Topography Mission, para luego obtener el primer modelo de elevación digital de los objetivos del proyecto.

Los datos SRTM, producidos originalmente por la NASA y posteriormente procesados por el CIAT (International Center for Tropical Agriculture) son un gran avance en la cartografía digital mundial, siendo posible acceder de manera gratuita a datos de elevación de alta calidad para gran parte de los trópicos y otras regiones del mundo en desarrollo.

La misión Shuttle Radar Topographic (SRTM) de la NASA, del transbordador espacial Endeavour fue una misión para obtener Modelos Digitales de Elevación Mundial entre los 56°S y 60°N, generando una completa base de datos de elevación digital (DEM) de más del 80% de la superficie terrestre.

Esta misión es el resultado de un esfuerzo conjunto de la Administración Aeronáutica y Espacial Nacional (NASA) y la Agencia Nacional Geospatial-Intelligence (NGA - antes conocida como la NationalImageryMapping Agency, o NIMA), así como la participación de la agencias espaciales de Alemania e Italia, para generar un modelo digital de elevación casi global (DEM) de la Tierra mediante interferometría radar. El instrumento SRTM consistió en el SpaceborneImaging Radar-C (SIR-C) (**Figura 5**) conjunto de hardware modificada con un mástil derivados de la estación espacial y antenas adicionales para formar un interferómetro con una larga línea de base 60 metros.

Figura5. Sistema de radar de la misión SRTM, espacialmente



Modificado para adquirir los datos de elevación. CIAT-DAPA. Recuperado 25 de enero de 2015.

Los datos son distribuidos de forma gratuita y se encuentran disponibles al público a una resolución de 90m con un error vertical menor a los 16m. La resolución espacial de estos datos es de 1 arc-seg (30m) sobre los Estados Unidos y 3 arc-seg (90m) para el resto del mundo.

Como se pudo apreciar en la revisión bibliográfica uno de los problemas más comunes en este tipo de datos, es que el DEM contiene áreas sin información que representan menos del 0.2% del área explorada, principalmente en zonas con cuerpos de agua y/o en áreas con insuficiente detalle textural en las imágenes de radar originales como para producir datos de elevación en tres dimensiones. Como en el caso de regiones montañosas como los Andes y el Himalaya y regiones desérticas como el Sahara.

Estas áreas sin datos en el DEM original causan problemas en aplicaciones como la modelación hidrológica donde se requieren superficies de flujo continuo. Es por esto que el CIAT realizó un procesamiento adicional de los datos aplicando algoritmos de llenado de vacíos con el fin de proporcionar superficies continuas de elevación.

Versiones del CIAT:

- **Cambio de la versión 3 a la versión 4:** La versión 4 utiliza una serie de técnicas de interpolación, descrito por Reuter et al. (2007). Usa DEM auxiliar para llenar vacíos de información y SRTM30 para grandes espacios vacíos.
- **Cambio de la versión 2 a la versión 3:** La versión 3 incluye acabados en los datos SRTM, utiliza la base de datos SWBD para cortar las líneas de costa y cuerpos de agua, DEM auxiliar para llenar los vacíos.
- **Cambio de la versión 1 a la versión 2:** La versión 2 incluye datos DEM para Australia y las pequeñas islas en los océanos Atlántico, Índico y Pacífico.

Llenado de vacíos:

Los datos digitales de elevación SRTM fueron procesados solucionando los problemas, llenando los vacíos de información facilitando su uso a un amplio grupo de usuarios potenciales. En un esfuerzo por promover el uso de la ciencia geoespacial y sus aplicaciones en la conservación de los recursos naturales del mundo.

En su versión original, los datos de SRTM contienen regiones sin datos en:

- Cuerpos de agua (lagos y ríos)
- Áreas con insuficiente detalle textural en las imágenes de radar originales como para producir datos de elevación en tres dimensiones, como por ejemplo: regiones montañosas como los andes y el Himalaya y regiones desérticas como el Sahara.

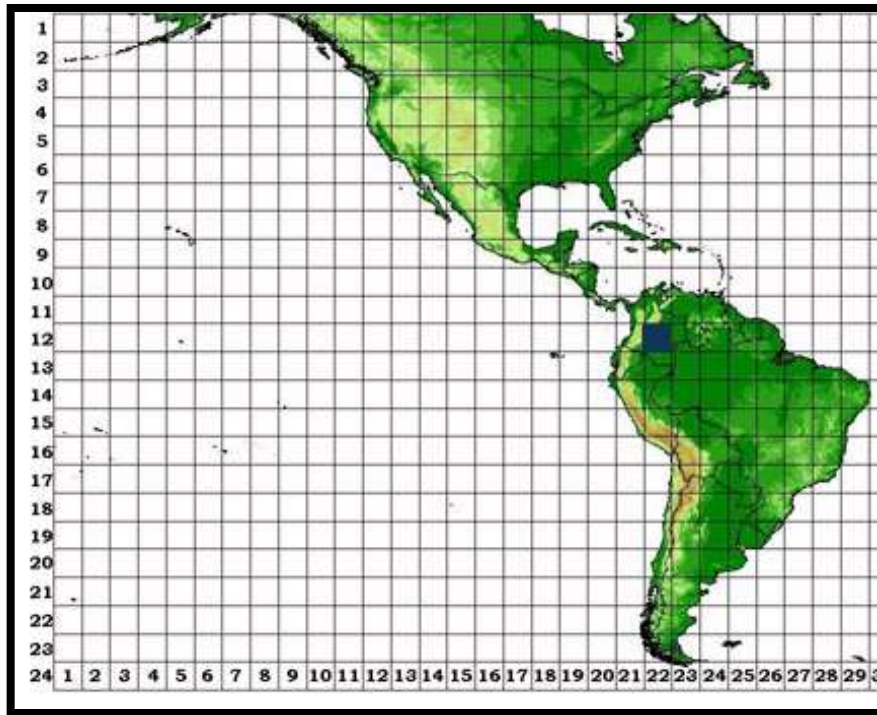
El CIAT tiene estos datos disponibles a través del portal su CGIAR-CSI (<http://srtm.csi.cgiar.org/>) para el mundo (desde los 56°S a los 60 °N) en tiles de 5×5 grados, en el sistema de coordenadas geográficas – datum WGS84, en los formatos Arc-Info ASCII, y GeoTiff, para facilitar su uso en los software de SIG y Teledetección, además, de un archivo de datos binario de la máscara usada para permitir a los usuarios identificar las áreas dentro de cada DEM que han sido interpoladas.

4.1.3 Procedimiento y herramientas. Para la generación del DEM, inicialmente se utilizó la base de datos, obtenida de puntos STRM (Shuttle Radar Topography Mission) conseguida a través de Ftp de la NASA (NationalAeronautics and SpaceAdministration), en el geoportal CGIAR-CSI (ConsortiumforSpatialInformation – USA), mediante la página: <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>, los datos utilizados se localizan entre las coordenadas Latitud min: 0 S, Max: 5N; Longitud min: 75 W, Max: 70 W.

Y el punto central: Latitud: 250N, Longitud: 72,50W. Del cuadrángulo **SRTM_22_12 (Figura 6)**, de 90 m DEM Versión 4, procesados por el CIAT, se encuentran en el sistema de coordenadas geográficas – datum WGS84, en los formatos Arc-Info ASCII, y GeoTiff.

Los puntos de campo del cuadrángulo SRTM_22_12, tienen un espaciamiento de 90 m, pero serán interpolados a 5m para una escala 1:25.000.

Figura6. Localización del cuadrángulo SRTM-22-12.



Fuente: CGIAR-CSI (2004) Consortium for Spatial Information

La descarga de los datos fue realizada en el formato **ASCII**, siendo necesaria el uso del programa LANDSERF para Mac, para la división de la información en el área de interés, debido que este archivo presentaba un tamaño muy grande, lo que se hizo fue dividirlo en varios segmentos mediante el programa NOTEPADD+ que es un programa para trabajar documentos en el formato **.txt** y **.spr** que es el formato compatible en SPRING 5.2.3, para hacer la división de los datos un total de 12 partes, y así proceder a hacer el procesamiento de una forma más fácil.

A partir de estos 12 archivos en el formato **.spr**, con una resolución de 90m se encontraban en coordenadas geográficas Magna, y se procedió a hacer la respectiva transformación a coordenadas Planas Magna en SPRING, la importación de las muestras para cada una de las planchas subdivididas,

posteriormente se dividieron para mayor comodidad en 6 cuadrángulos agrupados por planchas.

Teniendo en cuenta que la importancia de la Norma Internacional para los DEM exige que el tamaño de un punto mínimo de un pixel representado en un papel debe medir 0,25 mm, para obtener la escala deseada que es **1:25.000** (la equivalencia es 1mm-25m en el terreno), y que cumpla con las normas internacionales de 0,25mm, para esta escala deseada corresponde un valor de 6,25m el tamaño mínimo de cada pixel. Entonces para el procesamiento se trabajó con un valor de 5m para cada pixel.

Con el software **ArcGIS 10.1**, se realizó lo siguiente:

Se cargaron los datos de los puntos de muestreo y la información entregada por Ecopetrol (confidencial), está en formato SHP de puntos, se encuentra en el sistema de coordenadas proyectadas Magna Colombia Bogotá, localizados en diferentes regiones de la Cuenca llanos sur y Rio Ariari, se delimitó un área rectangular, de tal forma que incluyera las áreas de interés la cuenca llano sur y Rio Ariari, junto con los puntos de muestreo, este perímetro está en formato SHP y se relacionó con un SHP de las Planchas del IGAC 1:100.000, y los municipios correspondientes en esa área, para así tener una mejor facilidad en la búsqueda de información bibliográfica secundaria en especial para el área de interés.

Con el software **LANDSERF para Mac** fue realizado lo siguiente:

Partiendo de los datos del cuadrángulo SRTM_22_12, en formato ASCII, se procedió a importarlos para ser recortados en un cuadrángulo más pequeño correspondiente a un área total que reuniera las diferentes áreas de interés para Ecopetrol y así sea más fácil el procesamiento con un archivo menos pesado.

Esta área recortada presenta las siguientes coordenadas: **X1:989.329; X2:1'174.056; Y1:786.457; Y2:890.957**, posteriormente se proceden a exportar

en el Formato “*Raster as genericpoint file*”, que es un formato en donde los datos están en X, Y, Z, se almacenan en una tabla de atributos por separado con un ID de punto calculado automáticamente. Este formato presenta una extensión **.txt**

En el software **NOTEPADD+**, se realizó:

Luego del paso anterior y tener los datos recortados en un cuadrángulo más pequeño, se procedió a hacer la división y edición de este archivo de extensión .txt, en Notepad+, se dividió en un total de 12 partes iguales, y se le adicionó a cada uno el encabezado que era generado de la creación de un punto en Spring presentado de la siguiente forma:

- SAMPLE
- INFO
- //Muestras de Modelación Numérica
- //Archivo ASCII generado para el sistema SPRING
- //Proyecto: Colombia_GeograficasMagna - Plano de información: COL - PRUEBA
- //Categoría: Altimetría_Relieve - Modelo: DIGITALMODEL
- PROJECTION LATLONG, HEMIS -1, ORIG.LAT n 0 0 0.00000000, ORIG.LONG e 0 0 0.00000000, LAT1 n 0 0 0.00000000, LAT2 n 0 0 0.00000000
- DATUM Datum->SIRGAS2000, Prd 6378137.000000, Pfl1t 0.003352810700, Pdx 0.00000000, Pdy 0.00000000, Pdz 0.00000000
- OFFSETX 0.000000 OFFSETY 0.000000 SCALEFACTOR 1.000000
- BOX -85.333336, -5.000000, -66.465836, 17.000000
- UNITS Geográficas DEG
- SCALE 1000000.000000
- INFO_END
- POINT3D

Y luego de pegar los datos de los puntos X, Y, Z, divididos en partes iguales se finaliza con END, END. Para que luego pueda correr los datos en otro software, y puedan ser reconocidos y procesados. La división de estos datos como se hizo en partes iguales desde el archivo de texto, queda en segmentos rectangulares horizontales.

En el software **SPRING 5.2.3** (software libre), se realizó la mayor parte del trabajo, se trabajaron las siguientes etapas:

- **Conversión de coordenadas:** Fueron importados los 12 archivos que estaban .txt y se cambiaron de formato a .spr se incorporaron al geodatabase que se tenía inicialmente, se creó respectivamente un Banco de datos, y un proyecto llamado “*LlanosSur_PlanasMagna*” con una proyección: GAUSS - TM/Datum→ITRF(WGS84), para realizar la importación y transformación de las coordenadas ya que los datos de los archivos se encontraban inicialmente en Geográficas Magna de proyección: LatLong/Datum→SIRGAS2000. Se creó en una Categoría de tipo MNT (Modelo Numérico del Terreno), llamada “*Altimetria_relieve*” y dentro de esta el PI (Plano de Información) llamado “Llanos sur- Hipsografía” que es el archivo con las coordenadas planas.
- **División de la información agrupada por Planchas:** Luego de tener todos los datos con la transformación de las coordenadas a Planas, se procedió a crear dentro de la categoría, nuevos PI en donde se divide el archivo “Llanos sur – Hipsografía”, y es agrupado por Planchas (correspondientes a planchas 1:100.000 del IGAC) en 6 cuadrángulos en total para trabajarlas con mayor comodidad y orden, fueron nombradas de la siguiente forma, con el nombre de la Plancha principal + exp (expandida), porque corresponde a un conjunto de planchas la principal y unos pequeños segmentos de las otras planchas:

***Plancha 305exp** (ocupa toda la plancha 305, y unas pequeñas secciones en la parte inferior de la 285, y al lado izquierdo 304). Con las siguientes coordenadas: X1:989.329, X2:1'060.000, Y1:840.000, Y2:890.957.

***Plancha 306exp** (toda la plancha 306 + una parte inferior de la 286). Con las siguientes coordenadas: X1:1'060.000, X2:1'120.000, Y1:840.000, Y2:890.957.

***Plancha 307exp** (toda la plancha 307 + una parte inferior de la 287). Con las coordenadas: X1:1'120.000, X2:1'172.716, Y1:840.000, Y2:890.957.

***Plancha 326exp** (toda la 326, y un segmento del lado izquierdo de la plancha 325 y en la parte inferior toma un segmento de la parte superior de la 348, y 347). Coordenadas: X1:989.329, X2:1'060.000, Y1:786.457, Y2:840.000.

***Plancha 327exp** (toda la 327, y la una parte superior de 349) Coordenadas: X1:1'060.000, X2:1'120.000, Y1:786.457, Y2:840.000.

***Plancha 328exp** (toda la 328 y la parte superior de la 350, y un segmento de la 329 y 351). X1:1'120.000, X2:1'174.056, Y1:786.457, Y2:840.000.

- **Interpolación por los diferentes métodos:** Debido a que los archivos son bastante grandes, se tomó una plancha representativa que es la Plancha 305exp, para luego interpolarlos mediante la creación de una retícula rectangular y por los diferentes métodos de interpolación que ofrece SPRING que son en total 8, que más adelante se explicarán en detalle (Ver Interpoladores), estos fueron realizados de modo que la resolución espacial resultante fuese de 20 m.
- **Elaboración del corte en el DEM:** El corte se realizó para tomar un segmento de datos y poder hacer un control de calidad de los diferentes métodos de interpolación. El corte fue realizado inicialmente mediante la creación de un nuevo PI dentro de la misma categoría MNT, en donde se toma un rectángulo pequeño del DEM y por la opción en SRING → *MNT/Perfil/Líneas: Crear (y se selecciona la trayectoria a gusto del perfil)/Ejecutar.*

Me genera el perfil para el DEM del interpolador, que luego aparece en una nueva ventana, y en la opción localizada en la parte superior derecha se exporta como tipo ASCII, se le asigna un nombre y se guarda, quedando en formato **.txt**. Y se repite el mismo procedimiento para todos los DEM generados por los diferentes interpoladores en la Plancha 305exp.

Estos datos en formato **.txt** posteriormente fueron tomados y trabajados en EXCEL, en donde se le hizo un Control de Calidad detallado por medios estadísticos (Ver Control de Calidad), se tomó la Desviación media de cada uno de los datos, y luego el promedio acumulado de cada uno. El método que presentara el menor % Error fue el método elegido para luego interpolar las siguientes planchas por el mismo interpolador.

- **Pruebas del Control de Calidad:** Luego de realizar diversas pruebas en SPRING, para los interpoladores de menor error y se comparó estadísticamente con los otros que presentaban un mayor error, por el método de la 1 derivada que en este caso corresponde a un mapa de pendientes realizado para la Plancha 305exp.
- **Interpolación por el interpolador elegido:** El total de los archivos los 6 cuadrángulos fueron interpolados por el método “*Spline Mitasova*” con una **Tensión: 30; Suavización: 0,05; Mínimo de puntos: 70**, debido que este fue el que presentó un mejor mapa de pendientes (método 1 derivada), para finalmente obtener un DEM de 10m, por un método confiable (Ver sección de resultados).

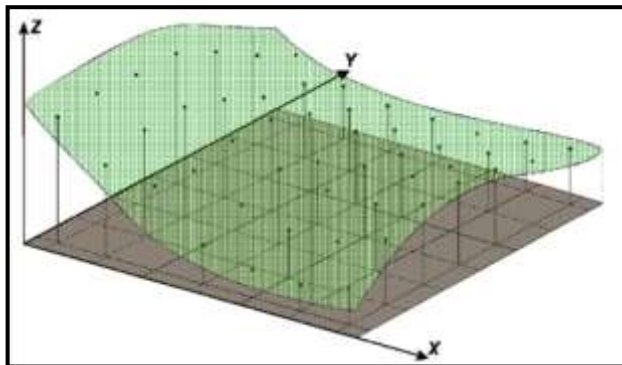
4.2 INTERPOLADORES

Los interpoladores que ofrece el software SPRING mediante la creación de una retícula (grid) rectangular son los siguientes: **1)** Media Simple, **2)** Media Ponderada, **3)** Media ponderada por cuadrante, **4)** Media ponderada por cota y por cuadrante **5)** Vecino más próximo, **6)** Spline Bilineal, **7)** Spline Bicúbica, **8)** Spline Mitasova. Se trabajó con un tamaño de Pixel de 5(m) en X, Y, y un tipo de imagen de 32 bits para todos los métodos.

Estos métodos fueron aplicados solo a la **plancha 305exp**, a continuación se describirá los resultados de cada uno de los métodos y una breve explicación del método de interpolación.

4.2.1 Modelos mediante Retícula rectangular. La grid rectangular o regular es un modelo digital que aproxima superficies a través de un poliedro de caras rectangulares (**Figura 7**). Los vértices de esos poliedros pueden ser los propios puntos muestreados, en el caso que estos hayan sido adquiridos en las mismas localizaciones y que definen la grid deseada.

Figura7. Modelo de superficie generada por una grid rectangular



Fuente: Câmara G. et al., 1996

La generación de **grid regular** o **rectangular** debe efectuarse cuando los datos muestreados en la superficie no se obtienen con espaciado regular. Así, a partir de las informaciones contenidas en las isolíneas o en los puntos muestreados, se genera una grid que representa, de la manera lo más fiel posible, a la superficie. Los valores iniciales que han de determinarse son los espaciados en las direcciones x, y, de modo que puedan representar los valores próximos a los puntos de la grid en regiones con gran variación. Al mismo tiempo, deben reducir redundancias en regiones casi planas.

Una vez definida la resolución y consecuentemente las coordenadas de cada punto de la grid, puede aplicarse uno de los dos métodos de interpolación para calcular el valor aproximado de la elevación.

En SPRING la grid rectangular se puede generar a partir de muestras, o sea, puntos y líneas, para nuestro caso disponemos de muestras de puntos, entonces se utilizaron los siguientes interpoladores:

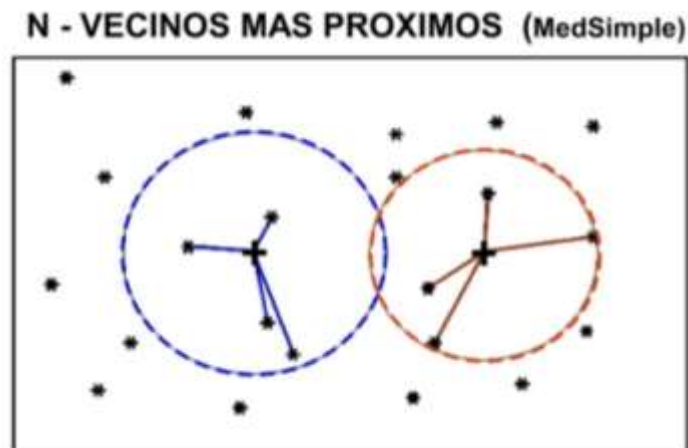
4.2.1.1 Media Simple: Para este interpolador se usó un valor de radio de 200, y no tiene la opción de Potencia. Este método consiste en el valor de la cota de cada punto de la grid es estimado a partir de la media simple de las cotas de los 8 vecinos más próximos de ese punto. Este interpolador se utiliza por lo general cuando se requiere mayor rapidez en la generación de la grid, para evaluar errores groseros en la digitalización.

$$f(x,y) = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n z_i \right)$$

Donde: n = número de vecinos; z = valor de cota de los n vecinos; $i=1$; $f(x,y)$ = función interpoladora. (Figura 8)

Ejemplo:

Figura8. El valor de la cota (+) obtenido a partir de los 4 vecinos muestreados más próximos (*).



Fuente: Câmara G. et al., 1996

Figura9. Ejemplo del resultado del DEM, para el interpolador Media Simple,



La **Figura 9** es un ejemplo de cómo se aprecia, el DEM para la **Plancha 305exp**, por el método Media Simple. Para los siguientes métodos no se adjuntará la Figura del resultado ya que a simple vista no se alcanzan a percibir las diferencias del DEM generado entre un método y otro. Y son iguales físicamente ya que las diferencias son numéricas, por consecuencia solo se indicaran los datos usados para cada método.

4.2.1.2 Media Ponderada: En este método el valor de cota de cada punto de la grid se calcula a partir de la media ponderada de las cotas de los 8 vecinos más próximos a este punto, pero se atribuyen pesos variados para cada punto muestreado, mediante una función que considera la distancia del punto acotado al punto de la grid, se representa mediante la siguiente fórmula:

$d = ((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)^{1/2}$, donde d = distancia euclidiana del punto interpolador al vecino $lw(x,y) = (1/d)^{u-1}u = 1$ = exponente de la función de ponderación

$$f(x,y) = \frac{\left(\sum_1^8 W(x,y)\right) * z}{\left(\sum_1^8 W(x,y)\right)}$$

donde: **w(x,y)**= *función de ponderación*; **f(x,y)**- *función de interpolación*

Este interpolador produce resultados intermedios entre el interpolador de media simple y los otros interpoladores más sofisticados, con tiempo de procesamiento menor.

Para los datos utilizados con el interpolador Media Ponderada, se realizó con una Potencia de 2, un radio de 200, y tamaño de pixel de 5(m).

4.2.1.3 Media Ponderada por Cuadrante: Para este interpolador se procesaron 2 con el mismo método para posteriormente comparar los resultados, se realizó uno con Potencia 2, y otro con Potencia 8. Y los otros valores son iguales a los métodos anteriores.

Este interpolador consiste en calcular la media ponderada utilizando la función de interpolación anterior. Se considera una muestra por cuadrante (total de 4 muestras) y el número de puntos muestreados es igual para cada uno de los cuadrantes (**Figura 10**). Se sugiere la utilización de este interpolador cuando las muestras son todas del tipo punto, como las que se usaron en nuestro caso.

Ejemplo:

Figura10. Media Ponderada por cuadrantes.



Fuente: Cámara G.et al., 1996

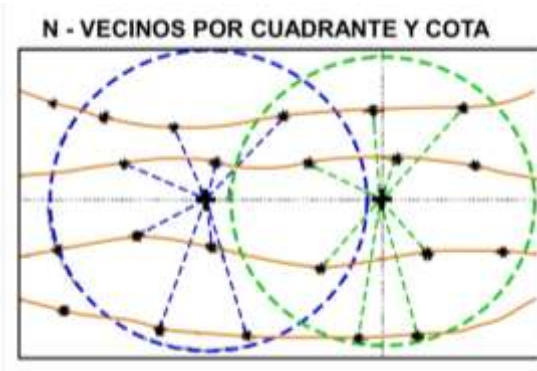
El valor de cota por cuadrante con peso, es proporcional a la inversa de la distancia de los valores muestreados.

4.2.1.4 Media Ponderada por Cota y por Cuadrante: Para este método al igual que el anterior se realizaron 2 modelos, uno con Potencia 2 y otro con Potencia 4, los otros datos se mantienen iguales a los anteriores.

Este interpolador también realiza la misma función de interpolación vista anteriormente, pero utiliza la cota de la isolínea más próxima. Además de la restricción de cuadrante del método anterior, existe la restricción de número limitado de muestras por valor de elevación, no permite muestras con cotas repetidas. Este método es recomendado en especial cuando las muestras son del tipo isolíneas (**Figura 11**).

Ejemplo:

Figura11. El valor de la cota se obtiene por la Media Ponderada de cotas de las isolíneas (naranjas) del cuadrante.

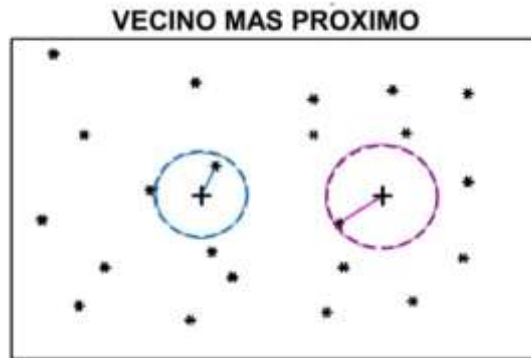


Fuente: Cámara g. et al., 1996

4.2.1.5 Vecino más Próximo: Para este método se usaron los mismos datos de los métodos anteriores y no requiere Potencia. Este interpolador consiste en que cada punto (x,y) de la grid, el sistema le atribuye la cota de la muestra más próxima al punto (**Figura 12**). Este interpolador debe ser usado cuando se desea mantener los valores de cotas de las muestras en la grid, sin generar valores intermedios.

Ejemplo:

Figura12. El valor de cota (+) equivale al valor muestreado más próximo (*).



Fuente: Cámara G. et al. 1996

4.2.1.6 Splines: Un spline de grado “m” o de m-ésimo grado es un pedazo polinomial de grado “m” que posee continuidad de derivadas de orden “m1” en cada nodo.

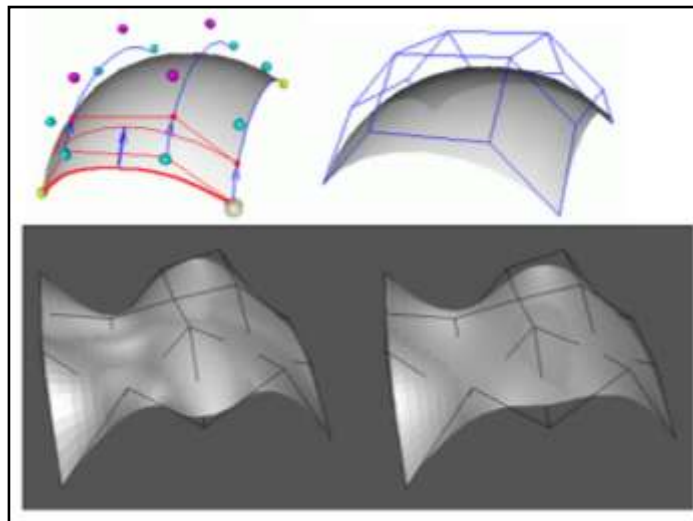
La ecuación $y = A1.x^3 + B1.x^2 + C1.x + D1$ es un ejemplo de una función spline cúbica de y en función de x. Matemáticamente, esta función también es un pedazo de polinomio, que consiste en la unión de pedazos de otros polinomios, limitado en un determinado intervalo, en que la continuidad de la curva resultante de esta función es satisfecha en los puntos de unión.

Las propias splines pueden utilizarse para definir una curva. Las Curvas Spline son una mezcla de vectores que utilizan pedazos de polinomios, siendo continua en sus nodos. Las splines constituidas por polinomios de grado bajo son útiles para el completamiento de curvas por la reducción del tiempo de procesamiento de los cálculos y la inestabilidad numérica presente en curvas de alto grado. Como los polinomios de grado bajo no pueden conectar determinados puntos, cuando se

desea que la curva pase por determinados puntos en una interpolación, se utiliza una técnica que consiste en unir una serie de segmentos de spline (generalmente spline cúbica) con cada segmento, conectando solamente dos puntos (**Figura 13**).

Ejemplos de superficies SPLINES:

Figura13. Ejemplos Splines.



Fuente: Cámara G. et al., 1996

De los métodos por SPLINES, solo se realizó el con el interpolador **Spline Mitasova**, ya que los otros Splines (Bilineal y Bicúbico) no se realizaron ya que son utilizados para cuando se trabajan inicialmente con un TIN, y no con muestras de punto como las que tenemos.

4.2.1.7 Spline Mitasova (Interpolation by Regularized Spline with Tension): El parámetro Tensión ajusta el resultado de la superficie. Los altos valores de Tensión reducen las acciones cuando en la superficie tiene lugar un cambio rápido del gradiente. El parámetro Suavización suaviza datos con ruidos; la Suavización

con valor cero significa la no suavización, o sea, la superficie resultante pasa exactamente sobre los puntos de la muestra.

Mínimo de Puntos, informa la cantidad mínima de puntos necesaria para calcular la Grid.

Para este interpolador se realizaron 3 modelos inicialmente, en donde se utilizaron varios valores al azar, para luego ser comparados en donde se puede apreciar en estos modelos una diferencia grande entre uno y otros a simple vista (**Figura 14**).

Figura14. Comparación de modelos procesados en SPRING, interpolador tipo Spline Mitasova, con variaciones de Tensión, Suavización y Mínimo de puntos



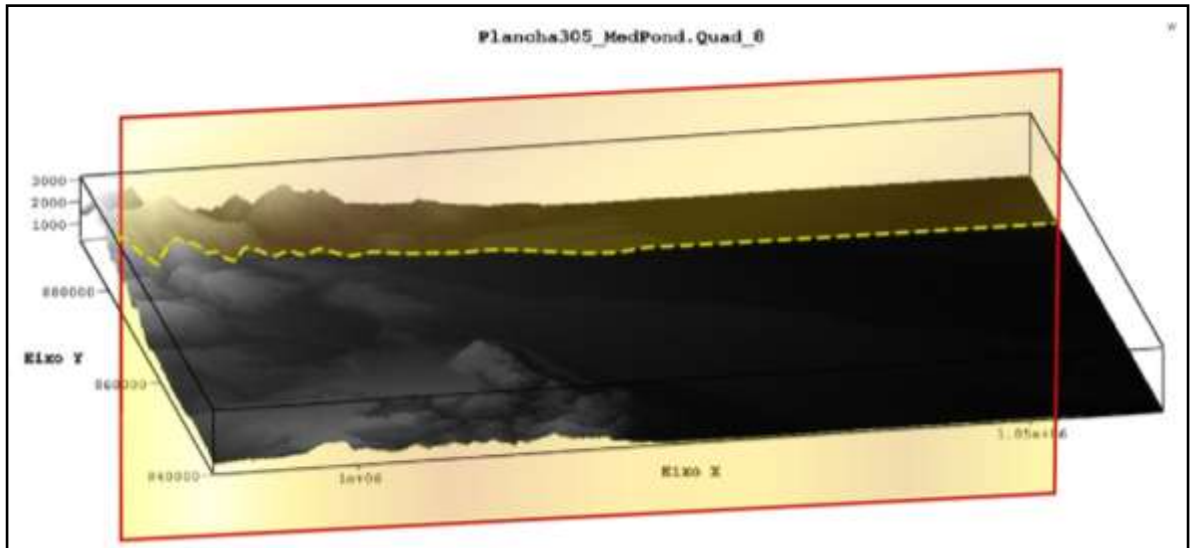
4.2.2 Metodología para el control de calidad de los interpoladores

El control de calidad fue realizado mediante las siguientes etapas:

Se elaboró un corte o perfil para cada DEM procesado por diferentes métodos para la **plancha 305exp**, se eligió esta plancha en especial porque es el área más cercana a la cordillera oriental y presenta mayor diversidad de alturas comparadas con las otras planchas, esta es una forma que me permite tener una muestra de

una serie de datos de forma numérica de una región representativa de la plancha, como se muestra en la siguiente imagen.

Figura15. Esquema aproximado de cómo se obtuvo el Corte para exportar una muestra de los datos numéricos para el Control de Calidad



Este corte al exportarlo en SPRING (**Figura 15**), queda en formato de extensión **.txt**, estos me representan una serie de datos en 2 columnas, donde tengo el # cota, con el valor de la distancia Z, el tamaño del corte es el mismo utilizado para todas las planchas, por esto el valor del # es igual para todos los métodos, estos datos se recopilaron en EXCEL por columnas para luego en unirlos (**tabla 1**).

De los **cortes o perfiles** salieron en **total 14.116 datos**, en donde el valor del # es el mismo para todos los métodos en donde inicia en 0, y terminó en 70.553, 84, y la **Z** presenta variaciones de un método a otro.

Tabla 1. Muestra los resultados obtenidos del perfil por los diferentes métodos de interpolación para la Plancha 305exp.

DATOS DE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN, OBTENIDOS DEL CORTE EN SPRING									
Media Ponderada2		Media PonderadaCotaQuad		Media PonderadaCotaQua		MEDIA SIMPLE		Media Ponderada Cuadrad2	
#	Z	#	Z	#	Z	#	Z	#	Z
0	2537.04	0	2537	0	2537.05	0	2551.67	0	2537.05
1.12	2537.06	1.12	2537	1.12	2537.08	1.12	2551.67	1.12	2537.08
6.12	2537.38	6.12	2537	6.12	2537.52	6.12	2549.65	6.12	2537.52
11.12	2537.79	11.12	2537.03	11.12	2538.52	11.12	2547.73	11.12	2538.52
16.12	2538.6	16.12	2537.11	16.12	2539.95	16.12	2548.3	16.12	2539.95
21.12	2539.54	21.12	2537.31	21.12	2541.6	21.12	2548.76	21.12	2541.6
26.12	2540.43	26.12	2537.69	26.12	2543.31	26.12	2548.92	26.12	2543.31
31.12	2541.23	31.12	2538.31	31.12	2544.88	31.12	2549.08	31.12	2544.88
36.12	2541.86	36.12	2539.22	36.12	2546.14	36.12	2549.08	36.12	2546.14
41.12	2542.33	41.12	2540.29	41.12	2546.99	41.12	2549.08	41.12	2546.99
46.12	2542.66	46.12	2541.35	46.12	2547.53	46.12	2549.08	46.12	2547.53
51.12	2542.84	51.12	2542.19	51.12	2547.87	51.12	2549.08	51.12	2547.87
56.12	2542.91	56.12	2542.56	56.12	2547.86	56.12	2549.08	56.12	2547.86
61.12	2542.87	61.12	2542.54	61.12	2547.37	61.12	2549.08	61.12	2547.37
66.12	2542.74	66.12	2542.36	66.12	2546.51	66.12	2548.92	66.12	2546.51
71.12	2542.55	71.12	2542.19	71.12	2545.4	71.12	2548.76	71.12	2545.4
76.12	2542.26	76.12	2542.08	76.12	2544.23	76.12	2546.65	76.12	2544.23
81.12	2542.04	81.12	2542.02	81.12	2543.17	81.12	2544.53	81.12	2543.17
86.12	2542.02	86.12	2542	86.12	2542.41	86.12	2544.56	86.12	2542.41
91.12	2542	91.12	2542	91.12	2542.06	91.12	2544.58	91.12	2542.06

Posteriormente se seleccionaron estos datos y se reunieron en una nueva hoja de cálculo en donde se les sacó la Desviación media para calcular el %Error de cada método y estas columnas que reunieron junto con los valores originales X, Y y Z, de la Plancha 305exp que eran los datos iniciales SRTM, sin procesar, salieron un total de **1526 datos** para los **datos SRTM**, en donde fue necesario obtener un Delta X y un Delta Y para obtener el valor de la “Distancia” se utilizó la raíz de la suma de los 2 valores (**tabla 2**). Y luego la Distancia acumulada que es la posteriormente se comparaba con los valores que le correspondían a cada uno de los métodos, la Distancia acumulada dio un valor final de **211.661,52**. (Se trabajaron todos los valores con 6 cifras significativas).

Tabla 2. Procesamiento de datos SRTM plancha 305exp

Datos SRTM sin procesar (Corte de la plancha 305)		Datos procesados por interpolación (Muestra del Corte de la Plancha 305)	
# Total de datos	1.516	# Total datos obtenidos	14.116
Valor inicial			
Distancia	0	Valor inicial Distancia	0
acumulada			
Valor final			
Distancia	211.661	Valor Final Distancia	70.553,84
Acumulada			

Un ejemplo de cómo se organizaron los datos en la hoja de cálculo para obtener los resultados, se puede ver en la **Figura 16**.

Figura16. Muestra de la recopilación de los datos para el control de calidad.

DATOS SRTM, Originales sin procesar, para la Plancha 305.				DELTAS OBTENIDOS DE LOS DATOS INICIALES PARA CALCULAR LA DISTANCIA Y LA DISTANCIA ACUMULADA				DISTANCIA OBTENIDA DE LOS PERFILES.		DATOS DEL Z Y %ERROR, PARA CADA UNO DE LOS MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN (Perfiles)			
# DATOS	X	Y	Z	delta x	delta y	Distancia	Distancia acumulada	DISTANCIA	Media Ponderada	ERROR	Media Ponderada CotaQuada	ERROR	Media Ponderada CotaQuada
1	809190,804226	883630,623079	2617,080000				0,000000	0	2617,08	0,0000000000	2617,08	0	2617,08
2	809190,203047	883630,548868	2645,080000	56,2786	-0,000801	56,278613	56,278613	56,27	2652,77	0,0000000000	2652,77	0	2652,77
3	809192,503059	883630,540098	2671,080000	56,2786	-0,000770	56,278612	112,557225	112,56	2690,57	0,0000000000	2690,57	0	2690,57
4	809195,279009	883630,530858	2594,080000	56,2786	-0,000942	56,278610	168,835835	168,84	2595,13	0,0000000000	2595,13	0	2595,13
5	809188,480780	883630,528853	2610,080000	56,2786	-0,000800	56,278611	225,114446	225,11	2615,98	0,0000000000	2615,98	0	2615,98
6	809188,820766	883630,531422	2686,080000	56,2786	-0,000820	56,278614	281,393060	281,39	2686,18	0,0000000000	2686,18	0	2686,18
7	809193,805047	883630,533039	2637,080000	56,2786	-0,000900	56,278613	337,671673	337,67	2637,04	0,0000000000	2637,04	0	2637,04
8	809195,824948	883630,494378	2430,080000	56,2786	-0,000955	56,278609	393,950282	393,95	2430,05	0,0000000000	2430,05	0	2430,05
9	809195,155729	883630,495298	2362,080000	56,2786	-0,000979	56,278609	450,228891	450,23	2362,02	0,0000000000	2362,02	0	2362,02
10	809201,215025	883630,476180	2359,080000	56,2786	-0,000786	56,278610	506,507501	506,51	2359,08	0,0000000000	2359,08	0	2359,08
11	809203,816320	883630,447804	2303,080000	56,2786	-0,000706	56,278611	562,786112	562,79	2303,08	0,0000000000	2303,08	0	2303,08
12	809205,878700	883630,495209	2279,080000	56,2786	-0,000823	56,278610	619,064721	619,06	2279,04	0,0000000000	2279,04	0	2279,04
13	809205,478296	883630,450768	2232,080000	56,2786	-0,000900	56,278611	675,343332	675,34	2232,11	0,0000000000	2232,11	0	2232,11
14	809205,365173	883630,432769	2239,080000	56,2786	-0,000820	56,278611	731,621943	731,62	2239,10	0,0000000000	2239,10	0	2239,10
15	809196,167891	883630,432769	2183,080000	56,2786	-0,000426	56,278612	787,900554	787,90	2183,08	0,0000000000	2183,08	0	2183,08
16	809196,876426	883630,429436	2163,080000	56,2786	-0,000340	56,278612	844,179165	844,18	2163,07	0,0000000000	2163,07	0	2163,07
17	809195,156289	883630,417208	2140,080000	56,2786	-0,000308	56,278612	900,457776	900,46	2140,12	0,0000000000	2140,12	0	2140,12
18	809192,467071	883630,493905	2100,080000	56,2786	-0,000323	56,278612	956,736387	956,74	2100,18	0,0000000000	2100,18	0	2100,18
19	809194,304880	883630,493913	2089,080000	56,2786	-0,000462	56,278612	1013,014998	1013,01	2089,28	0,0000000000	2089,28	0	2089,28
20	809198,368277	883630,587884	2089,080000	56,2786	-0,000788	56,278612	1069,293609	1069,29	2089,37	0,0000000000	2089,37	0	2089,37
21	809205,156480	883630,505007	2105,080000	56,2786	-0,000777	56,278612	1125,572220	1125,57	2105,05	0,0000000000	2105,05	0	2105,05
22	809204,708688	883630,577275	2105,080000	56,2786	-0,000631	56,278612	1181,850831	1181,85	2104,49	0,0000000000	2104,49	0	2104,49
23	809194,817038	883630,587884	2089,080000	56,2786	-0,000788	56,278612	1238,129442	1238,13	2089,11	0,0000000000	2089,11	0	2089,11
24	809201,452039	883630,507885	2083,080000	56,2786	-0,000870	56,278612	1294,408053	1294,41	2083,08	0,0000000000	2083,08	0	2083,08

Los que se hizo fue tomar los valores obtenidos tanto del # (distancia) y el valor **Z**, de los datos procesados por los diferentes métodos de interpolación para la **Plancha 305exp**, y se comparan con los datos de la columna de la Distancia Acumulada de los datos SRTM originales sin procesar pero debido a que los datos procesados por interpolación son muchos más, solo se tomaron los que corresponden al valor numérico más cercano a la Distancia acumulada (SRTM), los restantes fueron eliminados.

El **% Error** de los datos obtenidos de los perfiles fueron sacados mediante la desviación Estándar en EXCEL, para todos los métodos. Luego se sacó el resultado del promedio de la desviación estándar y así determinar el que menor valor tenga en el Prom del % error, es el mejor de los interpoladores utilizados para nuestro caso. La desviación estándar está dada por la siguiente fórmula:

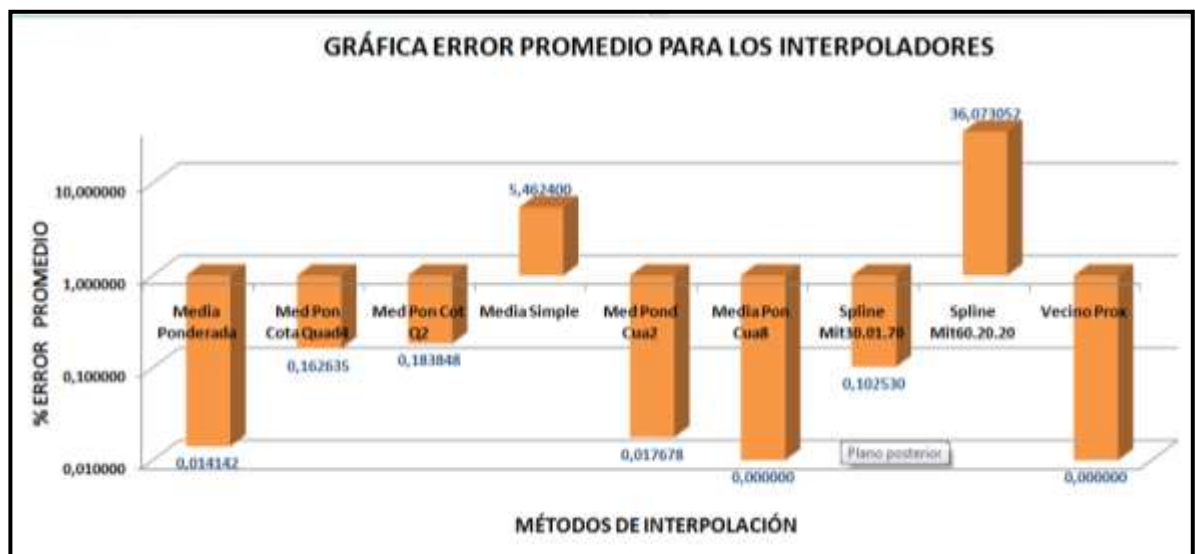
$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 n_i}{n}}$	Datos agrupados
$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}$	Datos simples o sin agrupar

Los datos obtenidos del Error promedio del control de calidad para cada método de interpolación están recopilados en la **tabla 3** y expresados en la gráfica logarítmica (**Figura 17**).

Tabla 3. Valores resultantes del control de calidad realizado para todos los métodos.

MÉTODO DE INTERPOLACIÓN	ERROR PROM
Media Ponderada (Potencia 2)	0,014142
Media Ponderada Cota por Cuadrantes (Potencia 4)	0,162635
Media Ponderada Cota por Cuadrantes (Potencia 2)	0,183848
Media Simple	5,462400
Media Ponderada por Cuadrantes (Potencia 2)	0,017678
Media Ponderada por Cuadrantes (Potencia 8)	0,000000
Spline Mitasova 30 – 01 – 70	0,102530
Spline Mitasova 60 – 20 – 20	36,073052
Vecino más Próximo	0,000000

Figura17. Gráfica logarítmica, del Error promedio de los interpoladores.

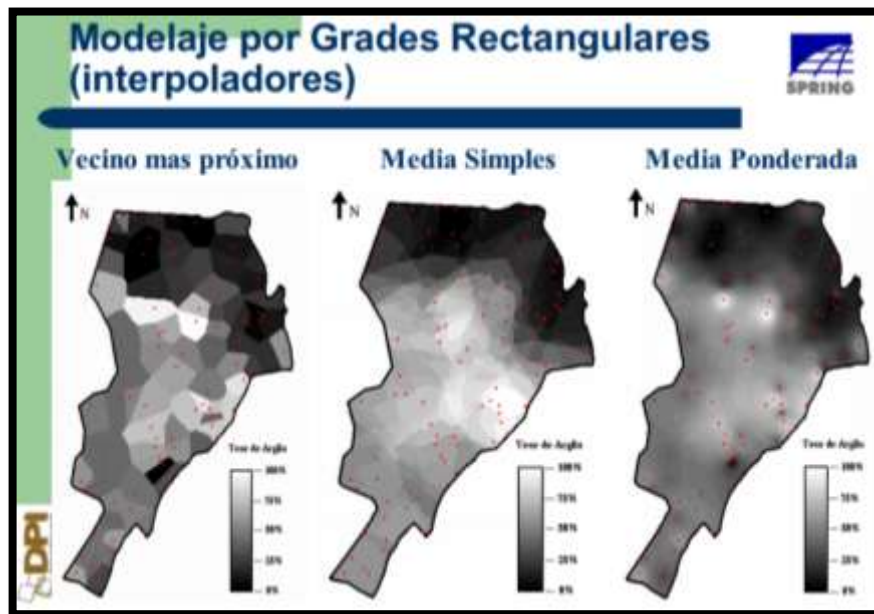


Como se puede apreciar en la **tabla 3** y en la **Figura 17** se encuentran 2 métodos con un valor de **0,000000**. Que son: **MEDIA PONDERADA POR CUADRANTES (potencia 8)**, y **VECINO MÁS PROXIMO**, donde más adelante se realizarán algunas pruebas para saber si sirven o no estos datos.

Debido a que las muestras que se trabajaron son muestras tipo punto, en donde son recomendables métodos como Media Ponderada, y de los resultados obtenidos los únicos que presentaron error de cero fueron los interpoladores ya mencionados. Se procedió a hacer la prueba del control de Calidad y que confiabilidad de los datos obtenidos.

En la **Figura18** se puede ver un ejemplo general de los modelos generados por una serie de puntos mediante algunos de los interpoladores usados y la calidad en general de estos, en donde se puede apreciar que el que menor resolución presenta de estos grandes grupos para la elaboración de un DEM, es el método de vecino más próximo.

Figura18. Ejemplo de modelos mediante algunos interpoladores.



Fuente: DRS- INPE. (2012)

4.2.3 Pruebas del control de calidad. En el proceso de la elaboración de un Modelo de Elevación digital es de gran importancia la revisión de la calidad de los datos obtenidos, en este caso corresponde a la primera fase del desarrollo del trabajo, en donde fue necesaria una mejoría en la resolución del DEM, para esto se aplicaron los métodos mencionados y ahora se le realizarán diversas pruebas que permitirá corroborar los datos obtenidos. Esto es realizado debido a que este DEM procesado, es el insumo principal para la determinación de los posibles parámetros geomorfológicos que estén asociados a arenas bituminosas utilizados para el análisis morfométrico.

Se procedió a hacer una serie de pruebas del Control de Calidad, en donde se trabajó mediante el **método de la 1ra Derivada**, para corroborar los datos obtenidos.

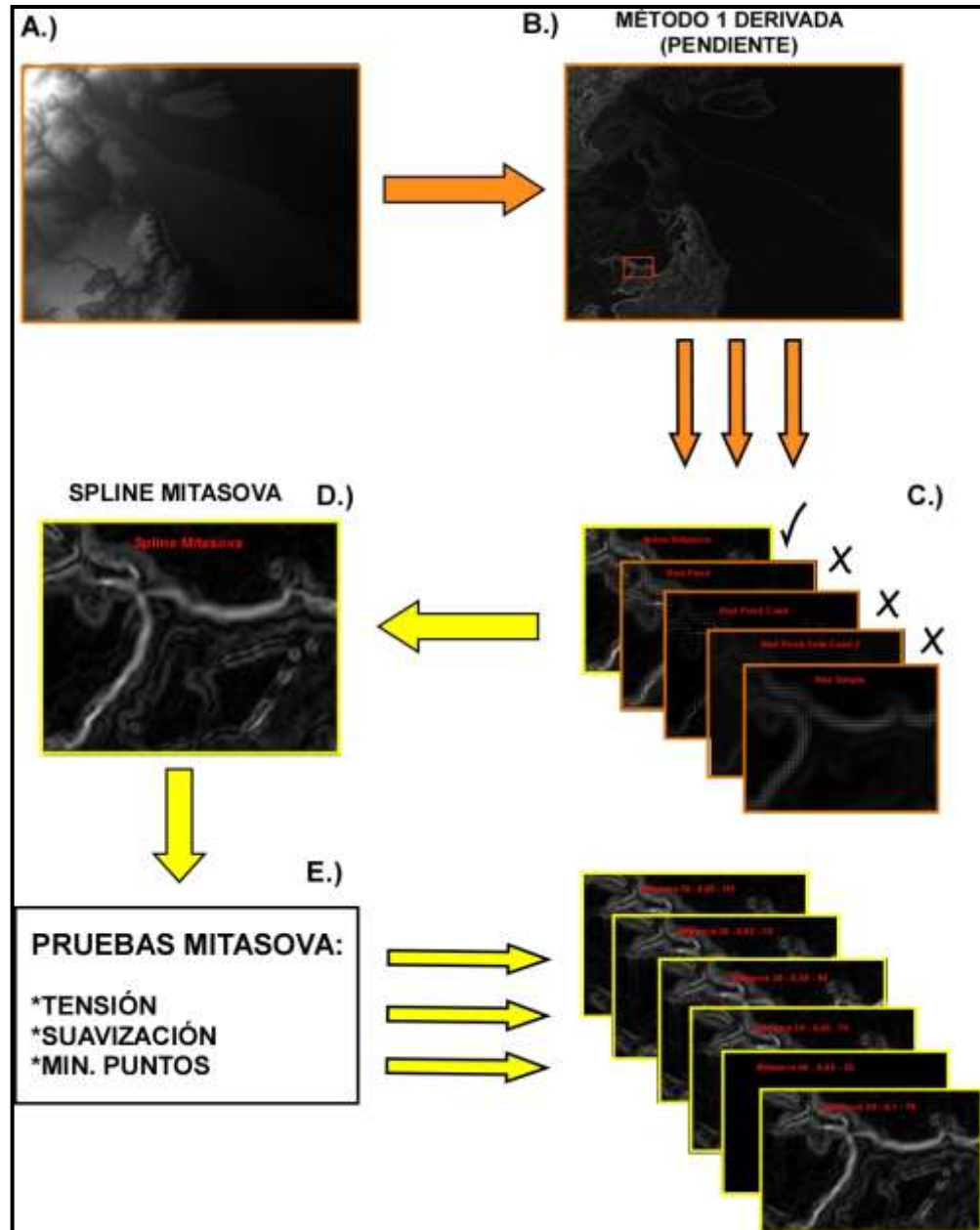
La pendiente representa la tasa de cambio de elevación para cada celda de modelo digital de elevación (DEM). Es la primera derivada de un DEM.

El error observado en los MDE permite llamar la atención sobre la incertidumbre en la determinación de parámetros derivados. El caso de la pendiente es especialmente llamativo debido a su dependencia directa de los valores de altitud y a la existencia de modelos donde la división en clases se realiza de forma excesivamente pretenciosa. (Felicísimo, Á.M., 1994)

De forma predeterminada, la pendiente aparece como una imagen en escala de grises inicialmente al procesar los datos, que luego se puede agregar la función Mapa de color, para especificar una combinación de colores determinada o permitir a la persona que visualiza el mosaico que modifique la simbología con su propio esquema de colores, inicialmente se mostrará en escala de grises que es el valor predeterminado al obtener el mapa de pendientes.

En la **Figura 19** se puede apreciar las diferentes pruebas que se realizaron para verificar la calidad y confiabilidad de los datos obtenidos para posteriormente continuar con los diversos parámetros obtenidos a través de estos datos.

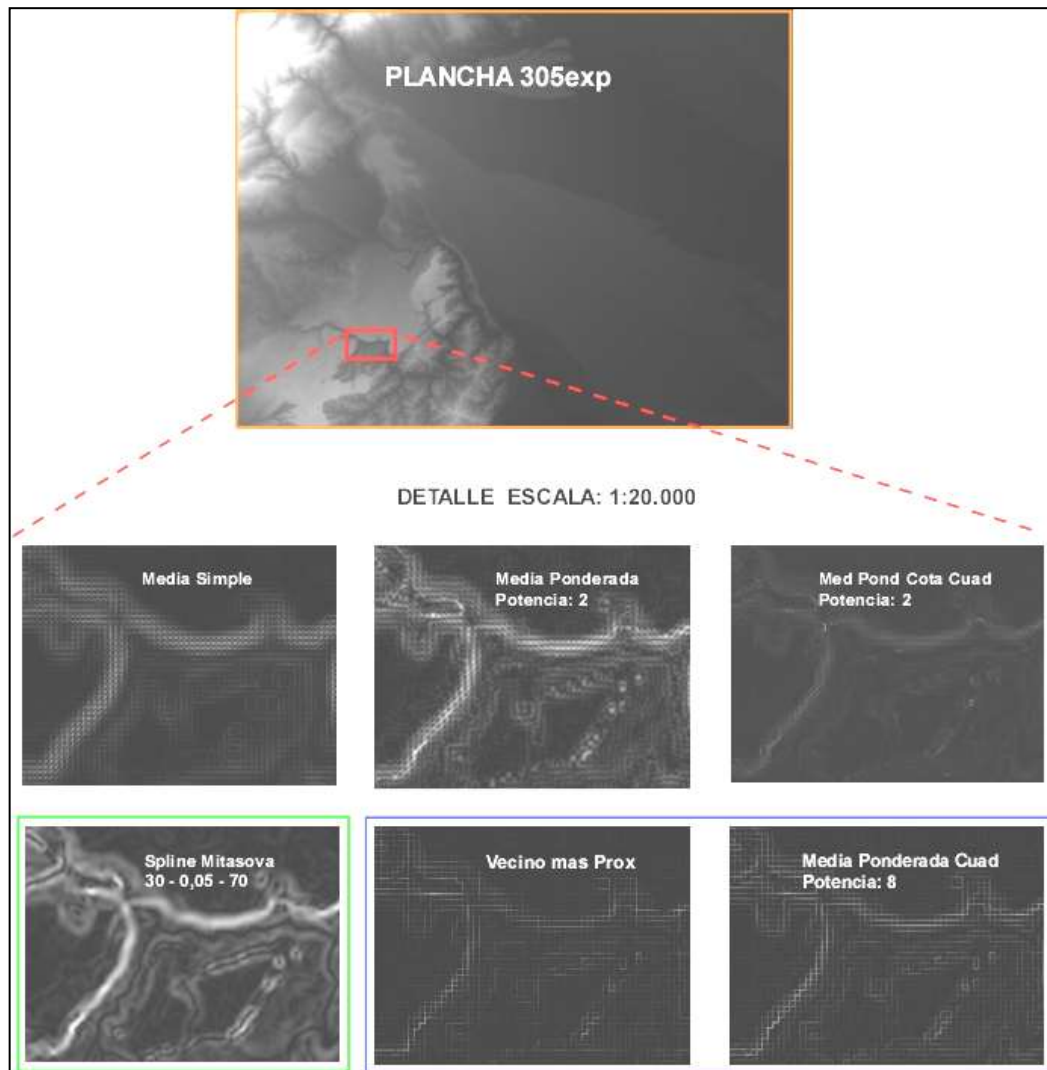
Figura19. Esquema de las pruebas realizadas, para la Plancha 305exp.



Partiendo del DEM de la **Plancha 305exp**, se procedió a obtener un mapa de pendientes para cada uno de los métodos de interpolación utilizados (parte a y b, **Figura 19**), luego de tener los mapas para cada uno, se realizó la comparación del resultado de la pendiente, esta comparación al presentar unas grandes diferencias físicas se eligió el que mejor representaba un mapa de pendientes para la zona (parte c, Figura), el interpolador que mejor representación tenía de todos era el del método del interpolador **SPLINE MITASOVA** que fue el que se eligió (parte d, **Figura 19**), debido a que este interpolador se caracteriza por tener opciones de diferentes variables como lo son *–tensión*, *–suavización* y *–mínimo de puntos*, se realizaron también diferentes pruebas variando estos valores, para poder elegir entre el interpolador de tensión Mitasova el que mejor representara el mapa de pendientes.

En la primera parte de las pruebas fueron realizadas para todos los métodos de interpolación trabajados y poder compararlos mejor, en estos se puede apreciar claramente una gran diferencia en los mapas obtenidos, la mayoría presentan unos patrones lineales y rectangulares que no corresponden a lo que podría ser un mapa de pendientes y el único que presentó una mejor resolución en el mapa de pendientes fue el interpolador de tensión SPLINE MITASOVA (color verde, **Figura 20**), y asimismo se puede descartar los 2 métodos que en la prueba del control de calidad anterior de la Desviación estándar presentaron un error de 0,000000 (color azul), se puede ver un patrón rectangular. En la Figura siguiente se muestra solo algunos de los ejemplos más representativos para los métodos de interpolación y se le realizó un zoom a una escala de 1:20.000 para observar más claramente la diferencia, y el rectángulo de color rojo es la región de donde se tomó la imagen en la Plancha 305exp.

Figura20. Pruebas realizadas método de la 1° derivada (pendientes), para los diferentes interpoladores.

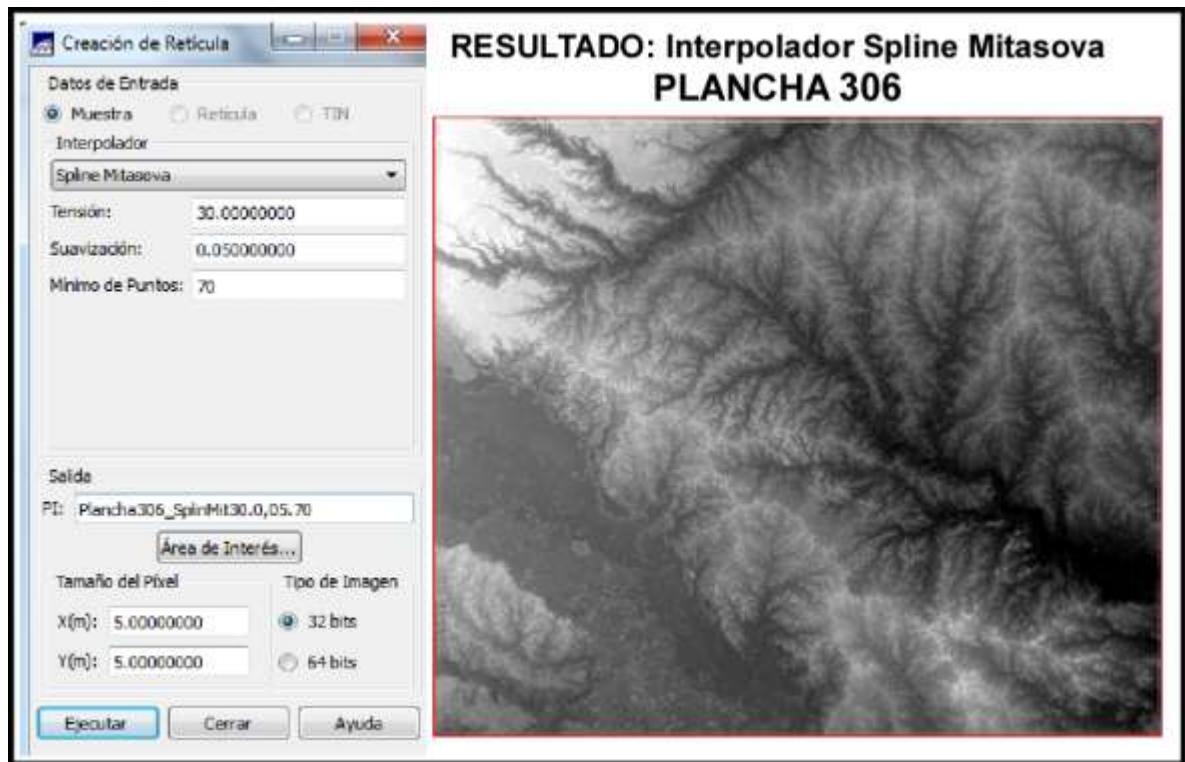


Se observa un zoom a una escala de 1:20.000. (Color Azul son los métodos que presentaban estadísticamente menor error y fueron descartados físicamente por el resultado obtenido y el del Color Verde es el que mejor resultado presentó).

La siguiente parte se procedió a realizar las pruebas de las diferentes variables con el interpolador elegido que es el **SPLINE MITASOVA**, en donde se realizaron diferentes pruebas con variaciones tanto de Tensión, suavización y mínimo de puntos, se pudo observar en el DEM que con valores de Tensión superiores a 30, se perdía resolución hasta tal punto que solo quedaba unos rectángulos pixelados, y en la pendiente habían regiones en donde no se puede ver nada, solo un color negro. Modificando valores como suavización presentaba una mejor resolución disminuyéndola hasta 0,05, y con las pruebas realizadas para el mínimo de puntos se observó que a medida que tomaba mayor cantidad de puntos la resolución era mejor, se hizo la prueba con diferentes variaciones desde 20 hasta 110, en donde se puede concluir que los valores inferiores a 20 se ven muy pixelados, y los de 110 presentaban una buena resolución pero su procesamiento era muy exigente y demoraba mucho tiempo en procesar, finalmente se escogió un valor de 70 para el mínimo de puntos que cumplía con presentar buena resolución en el DEM y en el mapa de pendientes también presenta una buena calidad a la escala que se va a trabajar que es 1:25.000.

4.2.4 Procesamiento de todas las planchas. Luego de comprobar y realizar diversas pruebas que corroboran que el método más apropiado para este caso es el del interpolador SPLINE MITASOVA, el siguiente paso fue realizar el mismo procesamiento para todas las planchas: 305ext, 306ext, 307ext, 326ext, 327ext y 328ext, pero solo por este método de interpolación SplineMitasova, con los valores ya mencionados (**Figura 21**).

Figura21. Ejemplo del DEM Plancha 306, por el interpolador elegido y los datos utilizados para todas las planchas son los mismos



Las siguientes planchas fueron elaboradas con el interpolador **SPLINE MITASOVA**. En la **Figura 22** se puede ver el resultado de todas las planchas recopiladas, para cada cuadrángulo se le modificó de acuerdo al resultado un poco el contraste para resaltar algunas zonas que inicialmente no se veían.

Figura22. Esquema general de los DEM obtenidos, mediante el método Spline Mitasova

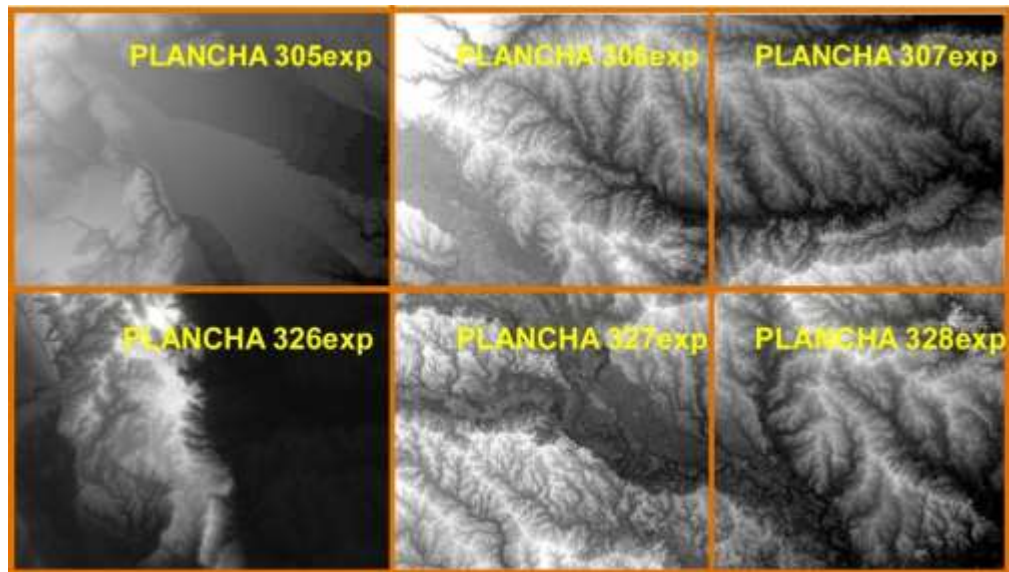
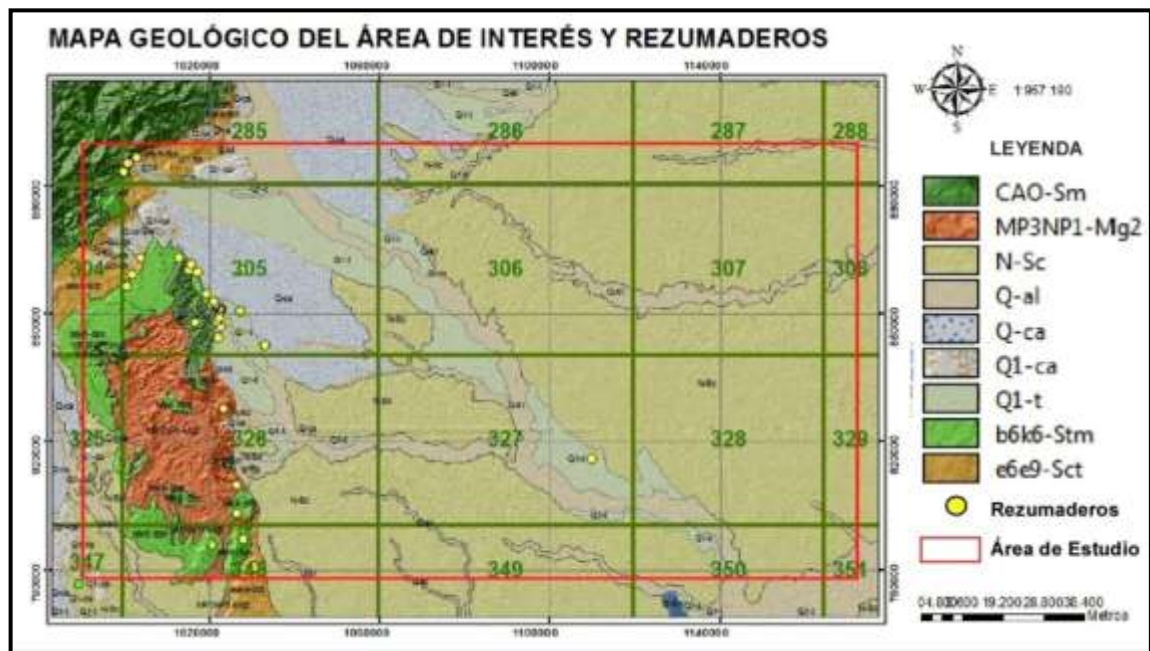


Figura23. Mapa general de unidades geológicas en el área total, y rezumaderos de interés.



Modificado Gómez, et al. Plancha 5-14. Escala 1:500.000, Ingeominas

PLANCHA 305exp: Este cuadrángulo se caracteriza por ser el que presenta la mayor altura de las 6 planchas, y este fue el cuadrángulo guía para elaborar el procesamiento por los diferentes métodos y luego el corte de donde se obtuvo los datos y posteriormente se procedió a realizar las pruebas y el control de calidad mencionados, esta región se caracteriza a rasgos generales por la presencia de un gran abanico aluvial con formado por depósitos cuaternarios, se aprecia un patrón de drenaje de tipo rectangular a contorsionado en la zona medial a distal del abanico, donde se puede ver la disección activa de una antigua terraza aluvial, y presenta patrones hídricos característicos que profundizan los valles se encuentra localizada en la parte inferior del cuadrángulo de la plancha mencionada, Presenta una cota con un valor Máximo: 3143, 0403; Valor Mínimo: 223,7243

PLANCHA 306exp: Se caracteriza por presentar patrones de drenajes dendríticos, con una gran bifurcación, característicos de unidades del Neógeno en el municipio de San Martín y Puerto Lleras, y una zona de llanura aluvial, conformadas por diferentes unidades cuaternarias localizadas en la parte inferior de la plancha.

Valor Máximo: 329,8620; **Valor Mínimo:** 178,0850

PLANCHA 307exp: Esta región correspondiente en la parte superior al municipio de San Martín, con patrones de drenajes dendríticos que continúan hasta la plancha anterior 306exp, estas son unidades sedimentarias del Neógeno compuestas principalmente por conglomerados y areniscas poco consolidadas. Y presentan en menor cantidad unidades de aluviales cuaternarias provenientes principalmente del Río Manacacías.

Valor cota Máxima: 290,5854; **Valor Mínimo:** 159,2370

PLANCHA 326exp: En esta región del municipio de Vista Hermosa, se puede ver una diferenciación de unidades con lineamientos marcados y patrones de drenaje que varían entre contorsionado, rectangular y unas pequeñas regiones presenta tipo trellis y meandriforme, esta región está conformada por unidades metamórficas de tipo Neis cuarzo feldespáticos, migmatitas, granulitas, cuarcitas y mármoles y en la parte inferior del cuadrángulo esta conformadas por unidades sedimentarias tipo shale, calizas.

Valor Máximo: 1605,0114; **Valor Mínimo:** 213,0782

PLANCHA 327exp: Esta región corresponde en la mayor parte al municipio de Puerto Rico, caracterizada por presentar una gran llanura aluvial, con terrazas aluviales conformada por depósitos cuaternarios del Río Ariari, en donde se ven drenajes de tipo anastomosados principalmente.

Estas geoformas están limitadas a sectores donde los canales de los ríos y caños presentan un comportamiento meandriforme, estas regiones corresponden a unidades Cuaternarias. Y presentan una serie de meandros abandonados, en algunos sectores se pueden diferenciar lóbulos por desborde de canal y llanuras de inundación. Las unidades Neógenas son las que presentan patrones drenajes dendríticos.

En esta plancha junto con la 305exp, son las zonas de mayor interés para ECP, pero de esta plancha no se consiguió un registro de los rezumaderos, porque es de carácter confidencial. **Valor Máximo:** 309,5863; **Valor Mínimo:** 192,9895

PLANCHA 328exp: En esta área se encuentran los municipios Puerto Concordia, Mapiripán y Puerto Rico, donde está compuesta principalmente por unidades Neógenas con patrones dendríticos con diferente densidad, se aprecian algunos lineamientos y algunos patrones contorsionados, también está una llanura aluvial continua a la plancha 327exp en la región del Río Ariari, en donde se encuentran

drenajes tipo meandrico, pero con menor cantidad de meandros abandonados que la plancha anterior, localizadas en la región inferior de la plancha .

Valor Máximo: 314,0857; **Valor Mínimo:** 159,0599

5. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

Gran parte de los análisis que vamos a realizar a partir del DEM tienen una base matemática. Conceptos tales como la pendiente o la orientación de una superficie en un punto dado pertenecen al ámbito de la geometría diferencial, y la aplicación de estos a la superficie recogida en un DEM requiere una caracterización matemática del mismo.

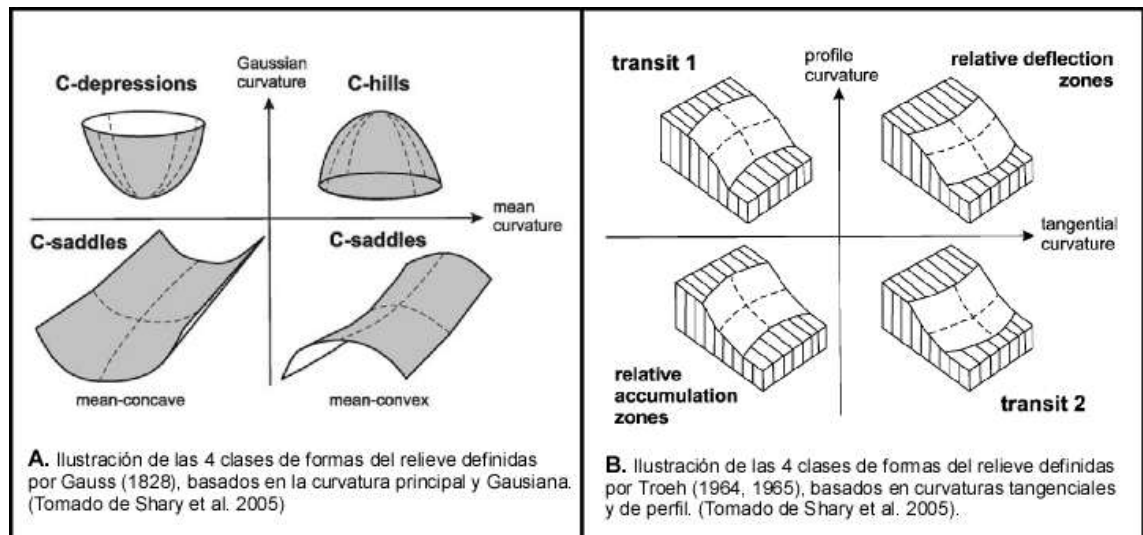
Debido a esto fue necesaria la preparación del DEM, (como se pudo apreciar anteriormente), como lo es una mejora de resolución, y un control de calidad, que ayuda a solventar problemas en morfometría que se presentan a la hora de delimitar ciertos parámetros.

Principios básicos de reconocimiento automatizado de elementos del relieve.

Muchos de los primeros esfuerzos para particionar las formas del relieve, en elementos de estos, obtenidos del DEM se basaron exclusivamente en el análisis de la forma de la superficie local. Reconocimiento automatizado de los puntos específicos de la superficie (Peucker y Douglas, 1975; Collins, 1975) se utilizó para diferenciar celdas de la cuadrícula en pozos (pits) (todos los vecinos más altos), los picos (todos los vecinos inferiores), canales (vecinos en dos lados superiores opuestos), crestas (vecinos en dos lados inferiores opuestos), passes (Vecinos en dos lados opuestos mayores y en los lados ortogonales inferiores) y llanuras (sin curvaturas prominentes definir formas distintas). Las capacidades de este enfoque se ilustran mejor por Wood (1996), quienes demostraron cómo podrían aplicarse los procedimientos para extraer y clasificar estos objetos morfológicos a través de una jerarquía de escalas aplicándolas dentro de las ventanas de cálculo de cada vez mayores dimensiones. Herrington y Pellegrini

(2000) aplicaron procedimientos similares con resultados similares. (Hengl, T and Reuter, H., 2009).

Figura24. Formas del relieve:



Fuente: Hengl, T and Reuter, H., 2009.

Valores de curvatura son normalmente calculados en una ventana 3×3, pero autores como Dikau (1989), de wood (1996) y MP Smith et al. (2006) han demostrado claras ventajas para curvaturas de computación dentro de una serie de grandes ventanas de análisis de vecindad. Shary et al. (2005) cito y reviso el uso muy temprano de las curvaturas propuestas por Gauss (1828) y mucho más tarde por Troeh (1965) para clasificar los elementos de formulario (**Figura 24**). Los conceptos iniciales de Richter (1962) y Troeh (1964, 1965) han sido adaptadas y aplicadas por otros, incluyendo Huggett (1975) y Dikau (1989) (**Figura 25**).

Figura25. Figura modificada de Diukau (1989). Clasificación de las formas de elementos basados en el perfil y curvatura tangencial (slope across). Los elementos se han clasificado como positivo o negativo en relación al radio de curvatura (>600 o <600).

		profile curvature		
		convex	profile-straight	concave
tangential curvature	convex	 X/X	 SF/X	 V/X
	tangential-straight	 X/SL	 SF/SL	 V/SL
	concave	 X/V	 SF/V	 V/V

Fuente: Hengl, T and Reuter, H., 2009.

En este punto, cabe considerar la influencia de la escala de trabajo en los resultados de la caracterización. Como indica Wood (1996, Ap. 5.3), la caracterización a una única escala no es suficiente para describir la forma topográfica. Por este motivo, una clasificación basada en reglas debe incluir criterios multiescala. Una solución a este planteamiento consiste en generalizar el MDE mediante filtrados sucesivos y aplicar las reglas de decisión a cada nivel de generalización. El tipo de elemento puede variar con la escala: un canal a gran resolución puede formar parte de una ladera a resolución media y de una cresta a una escala de análisis global. (Felicísimo, A. 1994).

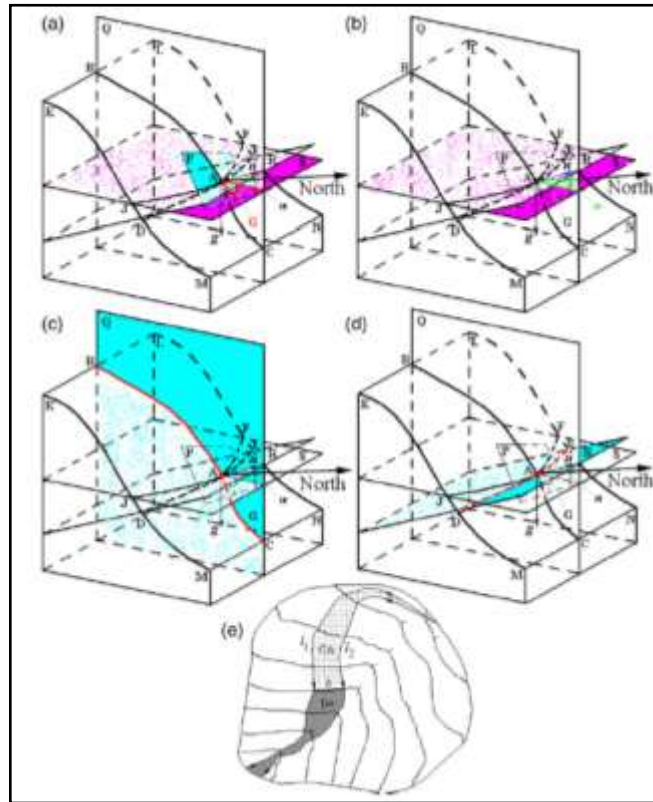
5.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES MORFOMÉTRICAS

Variables morfométricas locales describen la geometría de la superficie topográfica en la proximidad de cada punto de la superficie (Speight, 1974), a lo largo de direcciones determinadas por dos pares de mutuamente perpendiculares secciones normales.

Dos clases de atributos morfométricos las variables de forma local y flujo-son atributos relacionados con los dos pares de secciones normales (Shary, 1995; Shary et al, 2002b.). Atributos de formulario se asocian con las secciones principales. Son invariantes campo gravitatorio; es decir, que no dependen de la dirección del vector aceleración de la gravedad. Entre estos son curvatura mínima (k_{min}), la curvatura máxima (k_{max}), curvatura media (H), la curvatura gaussiana (K), y la curvatura unsphericity (M).

Atributos de flujo son las variables específicas del campo de gravedad, ya que dependen de la dirección del vector de aceleración de la gravedad. Entre ellas se encuentran gradiente de pendiente (G), aspecto pendiente (A), la curvatura horizontal (KH), 6 curvatura vertical (kv), 7 diferencia de curvatura (E), la curvatura de acumulación (Ka), la curvatura del anillo (Kr), el exceso de curvatura vertical, (og), el exceso de curvatura horizontal (khe), generando función (T), y algunos otros (**Figura 26**).

Figura26. Ilustraciones para la definición de algunas variables morfométricas: (a) Inclinación de la pendiente, (b) Aspecto pendiente, (c) Curvatura vertical, (d) Curvatura Horizontal, (e) Áreas de captación y dispersivas. (Florinsky, 2010)



Fuente: Florinsky, I. V. 2010.

Variables topográficas locales son funciones de derivadas parciales de elevación:

$$g = \frac{\partial^3 z}{\partial x^3}, h = \frac{\partial^3 z}{\partial y^3}, k = \frac{\partial^3 z}{\partial x^2 \partial y}, m = \frac{\partial^3 z}{\partial x \partial y^2}, r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2},$$

$$t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}, s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y}.$$

5.1.1 Pendiente. Los términos que pretendemos calcular, a los que denotaremos como p y q respectivamente y de aquí en adelante, por mera simplicidad en la exposición de sucesivas formulas se expresan de la siguiente forma.

$$p = \frac{\partial z}{\partial x} \quad y \quad q = \frac{\partial z}{\partial y}$$

Estas son, definitivamente, las expresiones de las derivadas dentro de las submallas 3×3 para analizar alrededor de un punto dado del MDT. El gradiente de la superficie, es decir, el vector perpendicular a la misma, tiene la forma:

$$\nabla \bar{f} = \left(\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y} \right) = (p, q)$$

La pendiente que buscamos obtener no es sino el ángulo entre dicho vector gradiente y la vertical, el cual, haciendo uso de conceptos básicos de cálculo de ángulos entre vectores, se obtiene según la expresión A.

Expresión A

$$\gamma = \arctan \sqrt{d^2 + e^2}$$

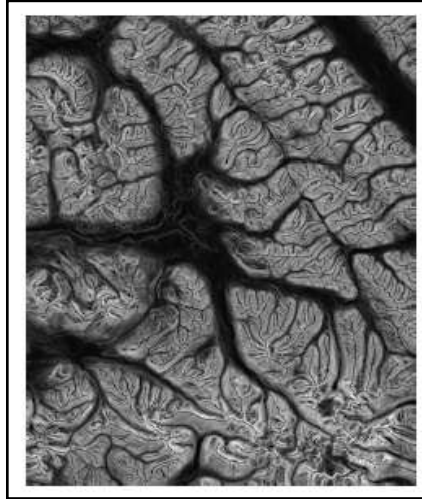
Expresión B

$$\gamma = \arctan \frac{dz}{dxy} = \arctan \sqrt{d^2 + e^2}$$

Desde otro punto de vista, puede obtenerse la pendiente combinando las dos derivadas parciales según la expresión B.

Alcanzando, lógicamente, un resultado similar al de la **Figura 27**. (Olaya, V. 2004).

Figura27. Ejemplo Parámetro pendientes.



Fuente: Olaya, V. 2004

5.1.2 Orientación. El aspecto (aspect) es el ángulo polar descrito por las dos derivadas parciales ortogonales obtenidas de las ecuaciones (1) y (2):

$$AT = 270 - \frac{360}{2\pi} \operatorname{atan}^2\left(\frac{\partial z}{\partial y}, \frac{\partial z}{\partial x}\right) \quad (1)$$

$$AT = 270 - \frac{360}{2\pi} \operatorname{atan}^2\left(\frac{Z_N - Z_S}{2\Delta y}, \frac{Z_E - Z_W}{2\Delta x}\right) \quad (2)$$

Y se obtiene:

$$\text{aspect} = \arctan(e/d)$$

La orientación de pendiente (aspect en inglés), o facetas. El aspecto representa la dirección de la brújula asociada con la máxima tasa de cambio de la altitud (pendiente) en un punto ó celda del grid. La pendiente se toma en el sentido descendente ó dirección del buzamiento (Robinson et al, 1995). Corresponde a la dirección perpendicular a la línea de contorno sobre la superficie y se opone a la dirección del gradiente. Los valores de aspecto del terreno son reportados en azimut. (*Fuente: Vélez R, M. 2006*)

Para este estudio se enfatizan los siguientes valores:

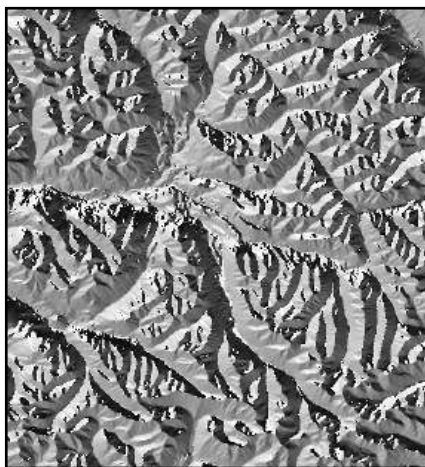
- El aspecto se dirige pendiente abajo.
- Los valores del aspecto aumentan en sentido contrario a las manecillas del reloj.
- Presenta valores 0 para áreas planas (pendientes $< 0,1\%$)
- El aspecto tiene valor 90 hacia el Norte.
- Un valor de 180 hacia el oeste.
- Un valor de 270 hacia el sur.
- Y tiene valor de 360 hacia el este.

Es otra de las variables de interés con la que debe comenzarse el estudio de las características fisiográficas de territorio sobre la base del Modelo Digital del Terreno es la orientación. (Olaya, V. 2004).

Dicha orientación de una celda debe considerarse como un parámetro de relevancia en los aspectos hidrológicos a través de su influencia en la propia caracterización morfológica del terreno. El aumento de resolución que nos posibilita el empleo de Modelos Digitales del terreno en el ámbito de aplicación de las formulaciones de tipo hidrológico, hace interesante el considerar la magnitud de ciertas variables y su estrecha relación con los valores de orientación, de cara a la elaboración de modelos más precisos y detallados.

Este parámetro de orientación, al igual que sucede con la pendiente en su concepción de elemento caracterizador de la tasa de variación de la variable representada en la malla analizada, puede ser utilizada en mallas distintas de las de elevaciones. Un ejemplo del resultado para este parámetro se ilustra en la **Figura 28** (Olaya,V. 2004):

Figura28. Ejemplo del mapa de orientaciones. El rango de variación va desde el 0 ° (negro) hasta los 360° (blanco).



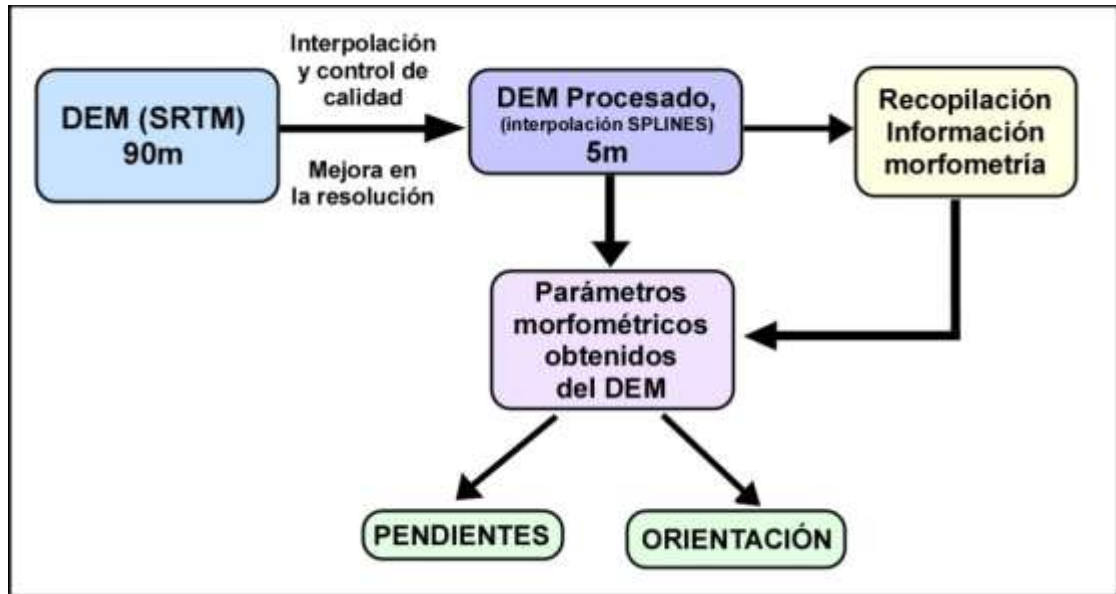
Fuente: Olaya, V. 2004.

5.2 PROCESAMIENTO DE LAS VARIABLES MORFOMÉTRICAS

El procedimiento llevado a cabo en este capítulo corresponde a la continuación de la metodología mostrada en los capítulos anteriores, en donde se obtuvo un DEM de resolución de 5m, a partir de otro DEM de (90m) de datos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), mediante métodos de interpolación a los que se le realizaron varias pruebas y se sometió a un control de calidad temático dando como resultado el interpolador más apropiado de tipo SPLINE MITASOVA, luego se procedió a hacer una revisión bibliográfica de los diversos parámetros

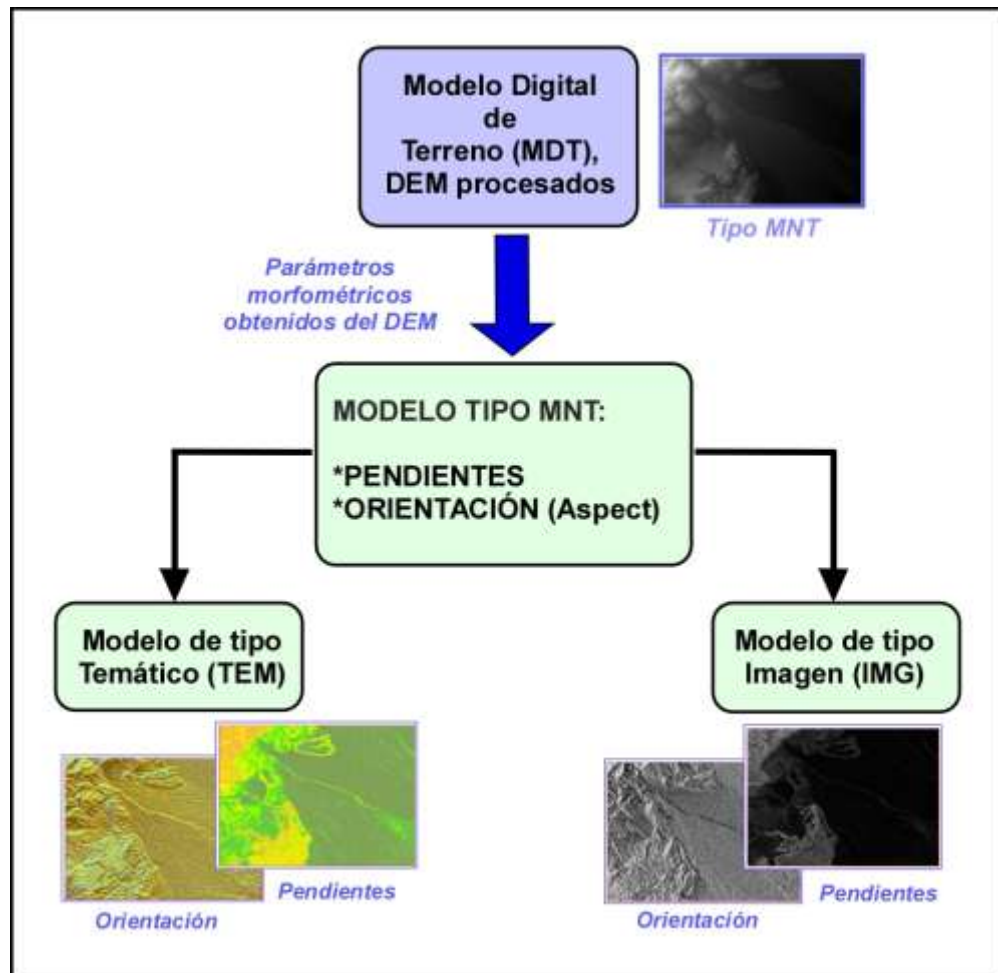
morfométricos que existen y en qué consiste cada uno para poder aplicarlos posteriormente a los DEM obtenidos, en el área de geomorfología (**Figura 29**).

Figura29. Esquema general del procedimiento de las etapas iniciales hasta esta etapa.



Partiendo del modelo de tipo MNT del DEM procesado, para cada cuadrángulo se obtienen los mapas de pendientes y orientación en el programa SPRING -5.2.3, se dejaron en los dos formatos de TIPO TEMÁTICO (TEM) y de TIPO IMAGEN (IMG) (**Figura 30**).

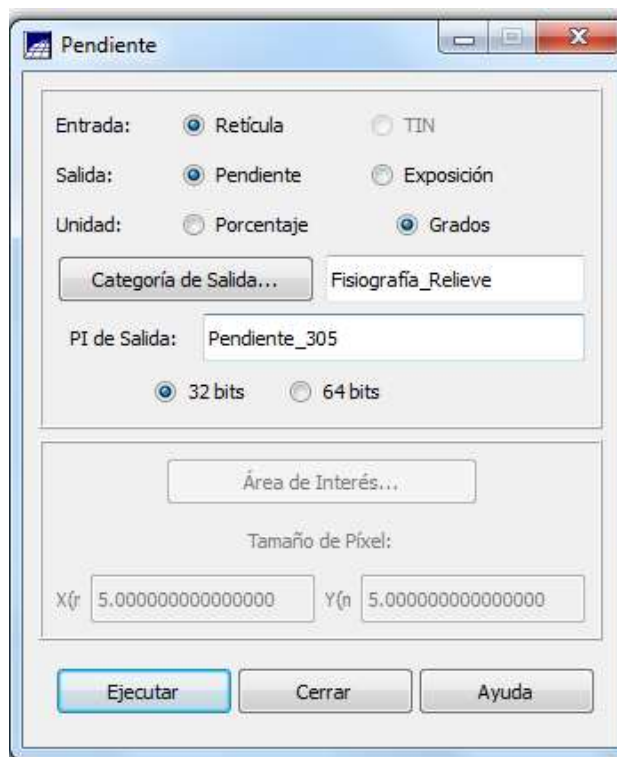
Figura30. Procedimiento general para la obtención de los parámetros morfométricos



5.2.1 Metodología para generar el mapa de pendientes. La pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal. Su valor se expresa en grados de 0° a 90°. A continuación se muestra el proceso para la determinación del atributo Pendiente mediante el software SPRING y el comando “Pendiente”.

Por el siguiente procedimiento, dejando seleccionado el modelo a procesar tipo MNT (Numérico), vamos a la pestaña superior donde esta MNT> Pendiente> (Entrada: Tipo Retícula; Salida: Pendiente; Unidad: Grados). Luego se selecciona la categoría de salida para este caso todos los mapas de pendientes se dejarán en una categoría llamada: “Fisiografía_relieve” (también es de tipo MNT), se le asigna un nombre al PI de salida, se deja de 32 Bits > Ejecutar (**Figura 31**).

Figura31. Opciones ingresadas para obtener el mapa, el valor de la pendiente se expresa en grados de 0° a 90°.

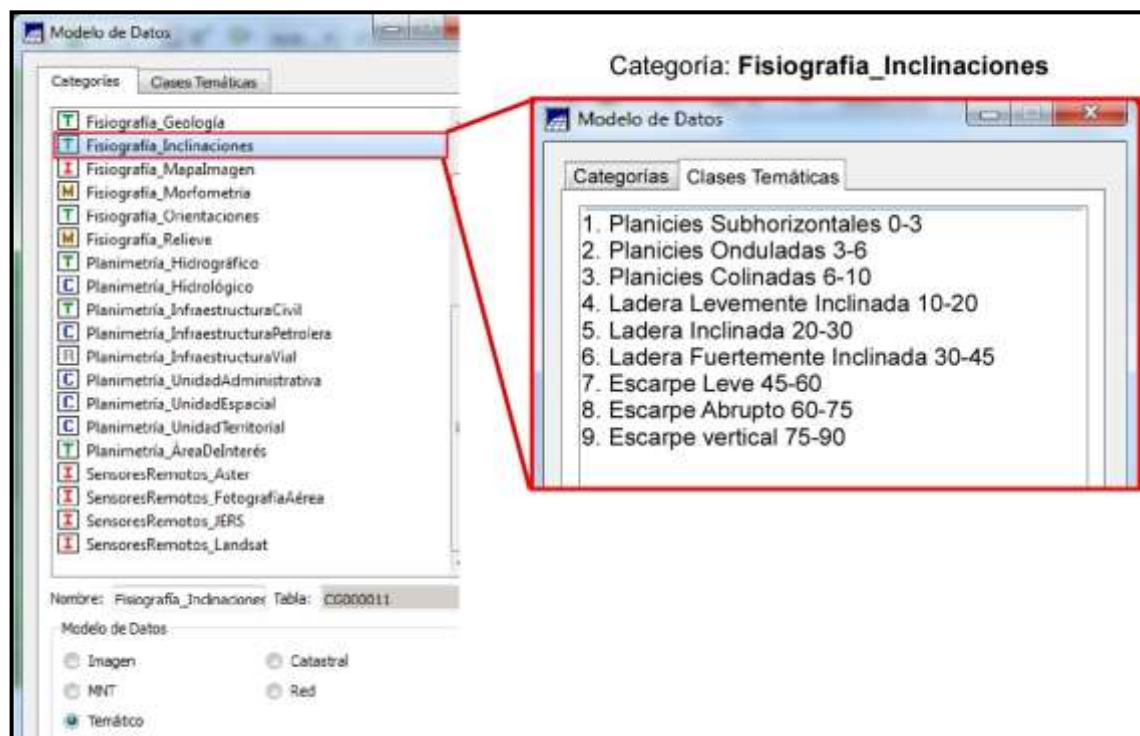


Ahora es necesario pasar cada uno de los mapas de los parámetros al formato IMG (Imagen) y TEM (Temático).

Procedimiento para pasar del MNT (Modelo numérico) a Temático:

Teniendo en cuenta las clases temáticas que se asignaron anteriormente para cada una de las categorías, todos los mapas de tipo TEM (Temático), se dejaron en la Categoría llamada: “Fisiografía_inclinaciones”. Donde se puede apreciar en la **Figura 32**, sus correspondientes valores.

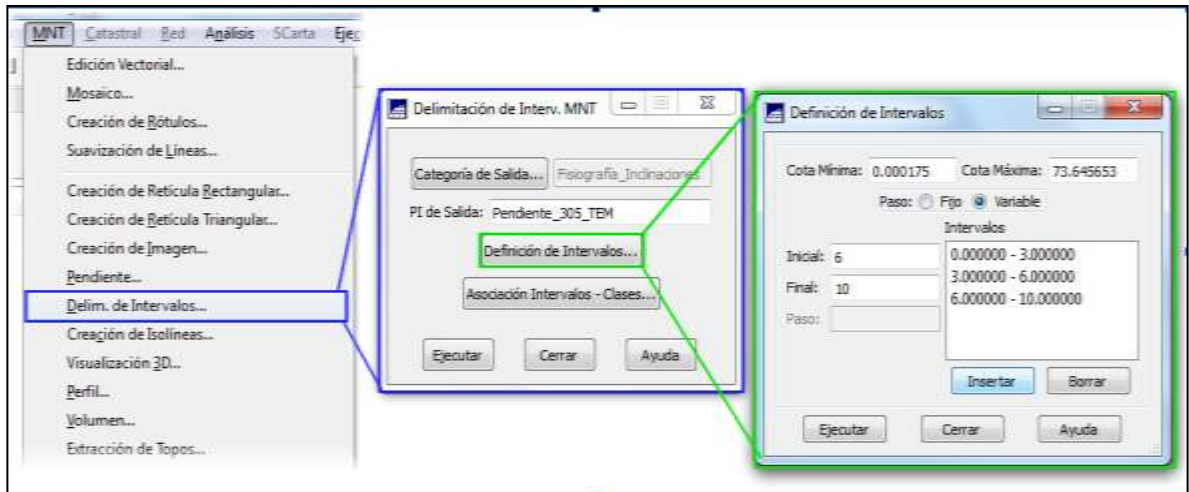
Figura32. Clases temáticas del mapa pendientes (TEM).



Luego se procede a MNT> Delimitación de intervalos> *Categoría de Salida: “Fisiografía_Inclinaciones”; *PI de Salida (se le asigna un nombre al nuevo mapa tipo TEM), *Definición de intervalos> Cota Min y Max se dejan igual (los valores varían de acuerdo al mapa), Paso: seleccionamos Variable, Intervalos → Se procede a ingresar manualmente cada uno de los valores que tiene la categoría,

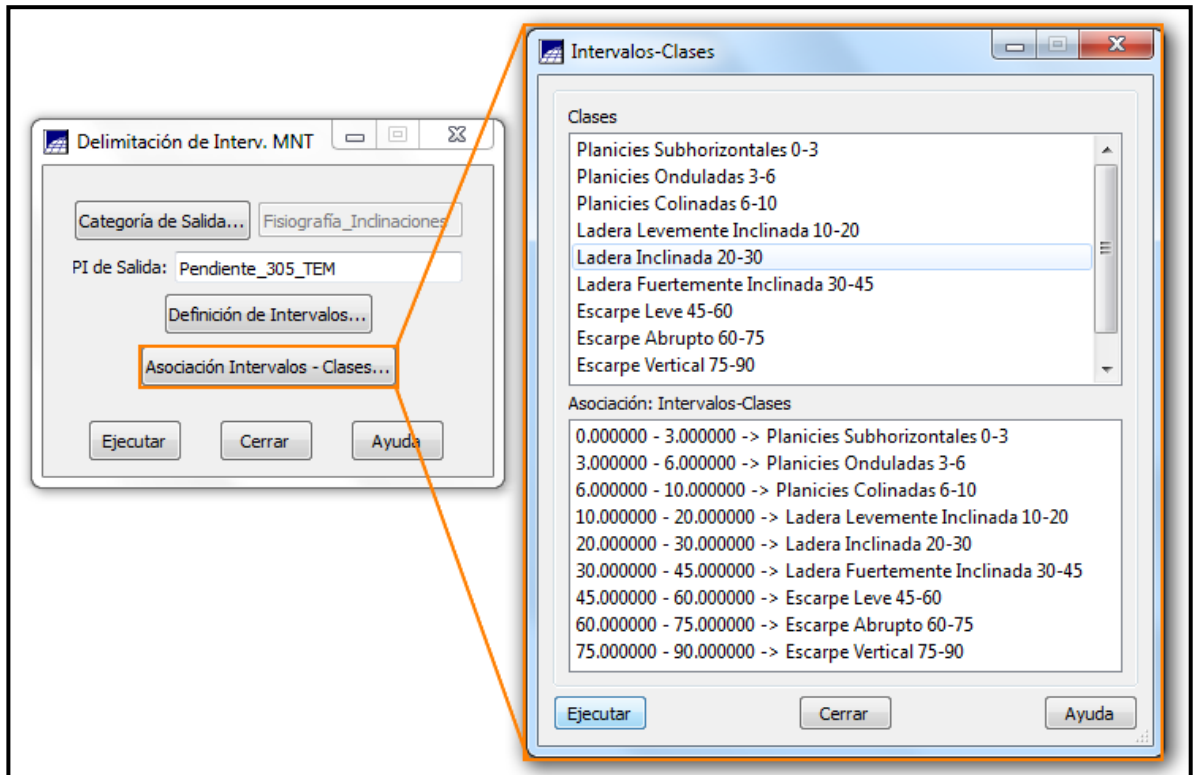
es el mismo procedimiento para cada mapa> Insertar> **(Figura 33)** Cuando ya están todos los valores >Ejecutar **(Figura 34)**.

Figura33. Continuación del procedimiento, ingreso de los intervalos de pendientes en SPRING.



Así quedan definidos finalmente la asociación de los intervalos para procesar cada mapa. (se usaron los mismos valores para todos los mapas de pendiente).

Figura34. Continuación del procedimiento y revisión de los valores de intervalos asignados para el mapa de pendientes.



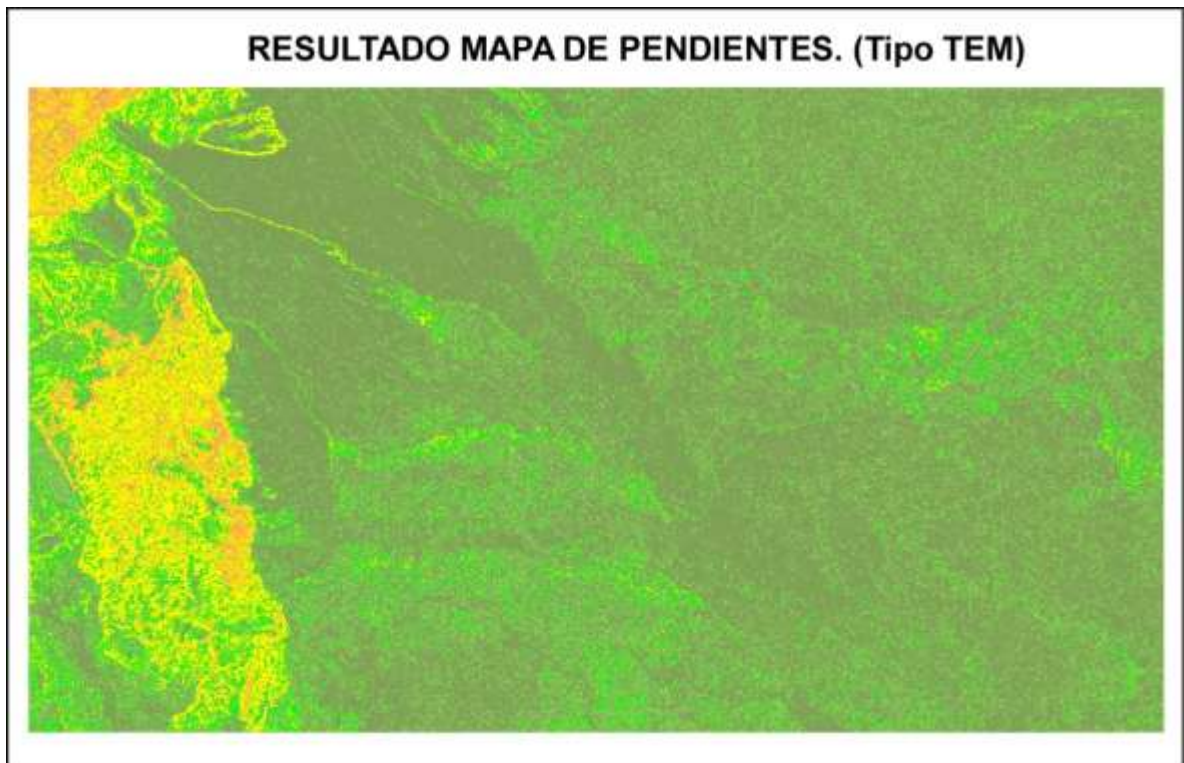
Como resultado se obtiene el mapa de la **Figura35**, que es uno de los parámetros elegidos PENDIENTE, con los valores mostrados en el procedimiento de la **tabla 4**, que son los siguientes expresados en grados de 0° a 90°:

Tabla 4. Valores de las pendientes

VALORES DE PENDIENTES

1. Planicies Subhorizontales 0-3°
2. Planicies Onduladas 3-6°
3. Planicies Colinadas 6-10°
4. Ladera Levemente Inclinada 10-20°
5. Ladera Inclinada 20-30°
6. Ladera Fuertemente Inclinada 30-45°
7. Escarpe Leve 45-60°
8. Escarpe Abrupto 60-75°
9. Escarpe vertical 75-90°

Figura35. Resultado Mapa de Pendientes.

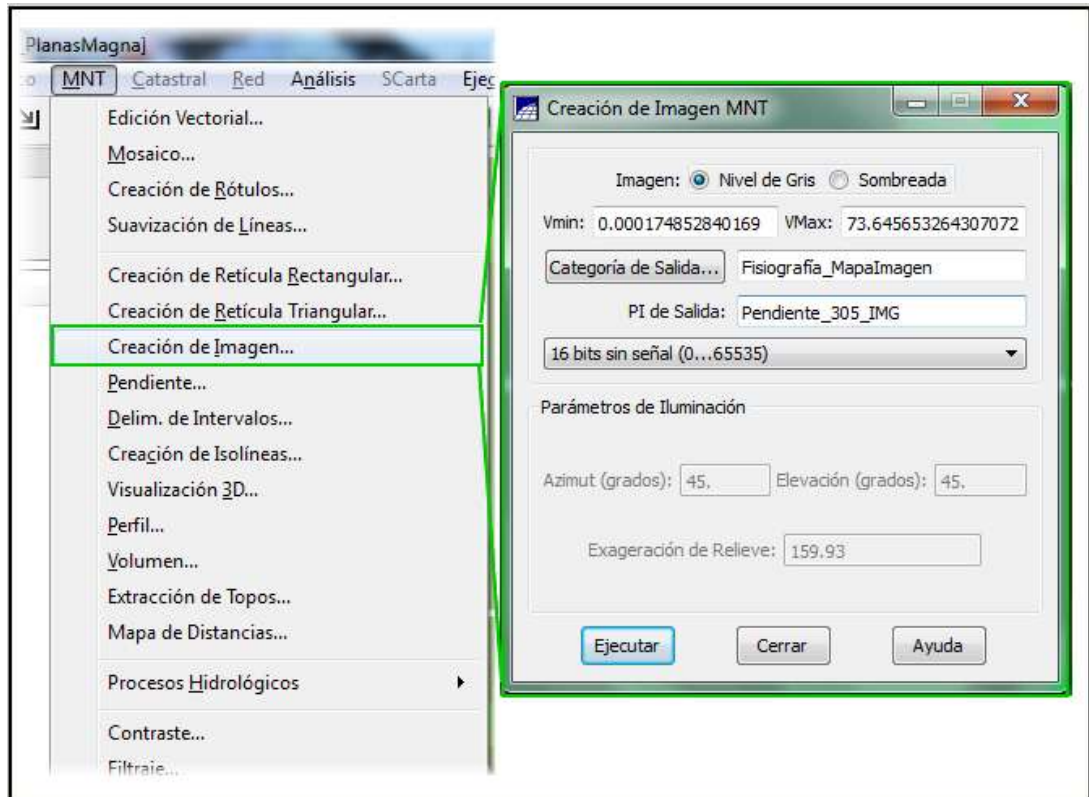


El procedimiento para pasar del MNT (Modelo numérico) al formato de tipo IMG (Imagen):

Se deja seleccionado el mapa para convertir, y como se muestra en la **Figura 36** vamos a la pestaña superior que dice MNT> Creación de Imagen> *Imagen: Nivel de Gris, *Los valores Min y Max se dejan igual, *Categoría de Salida: "Fisiografía_Mapaimagen" (esta categoría debe ser de tipo IMG), *PI de salida: se le asigna un nombre al nuevo mapa tipo IMG, *16 Bits sin señal > Ejecutar.

Este procedimiento es realizado de la misma forma para todos los mapas y para los parámetros elegidos que son Pendiente y Orientación, el resultado de este formato se puede exportar en .JPG, .Tiff, Raw, y ASCII.

Figura36. Procedimiento para obtener mapas tipo Imagen.



5.2.2 Generación mapa orientaciones (“aspect”, en inglés). El procedimiento es similar a los anteriores, se genera primero en formato tipo MNT y luego IMG.

Orientaciones, modelo MNT (Numérico):

Para generar el modelo tipo MNT, dejamos seleccionado el DEM a partir del cual se va a generar los otros mapas, vamos a la pestaña superior >MNT>Pendiente: *Entrada→Retícula, *Salida→Exposición. >Categoría de salida: Fisiografía_Relieve (categoria tipo MNT), PI: Le asignamos un nombre al nuevo mapa. 32 Bits. > Ejecutar (**Figura 37**).

Figura37. Opciones y resultado mapa de orientaciones tipo MNT.



Orientaciones, modelo TEM (Temático):

Se dejaron los siguientes rangos para Orientaciones de tipo Temático, **Figura 38A**. Luego de generar el mapa con estos valores el resultado se puede ver en la **Figura 38B**.

Figura38. A) Valores orientaciones (TEM). B) Resultado del Mapa de Orientaciones de tipo TEM.

VALORES MAPA ORIENTACIONES (TEM)	
N	(0 -11,25)
NNE	(11,25 - 33,75)
NE	(33,75 - 56,25)
ENE	(56,25 - 78,75)
E	(78,75 - 101,25)
ESE	(101,25 - 123,75)
SE	(123,75 - 146,25)
SSE	(146,25 - 168,75)
S	(168,75 - 191,25)
SSW	(191,25 - 213,75)
SW	(213,75 - 236,25)
WSW	(236,25 - 258,75)
W	(258,75 - 281,25)
WNW	(281,25 - 303,75)
NW	(303,75 - 326,25)
NNW	(326,25 - 348,75)
N	(348,75 - 360)



6. ETAPA DE INTEGRACIÓN

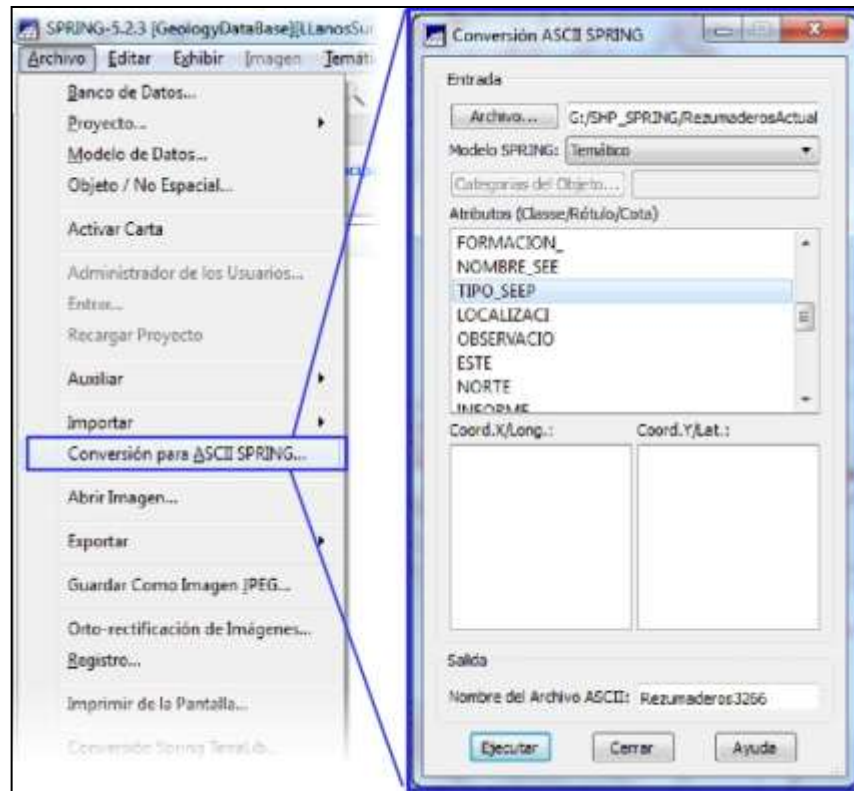
Luego de tener los parámetros definidos (Pendiente y Orientación) y los mapas procesados, el siguiente paso es realizar la importación de la información de la geología obtenida del mapa geológico de la zona a escala 1/500.000 del SERVICIO GEOLÓGICO, y los resumaderos en formato SHP obtenidos del banco de información petrolera EPIS de la página de la Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH.

Para esto se debe crear para cada una, nuevas categorías de tipo temático (TEM), mediante el siguiente procedimiento:

Modelo de datos > Categorías: *Nombre: se asigna el nuevo nombre de la categoría (Resumaderos), *Modelo de datos: Temático, > Crear. Luego se crea los nuevos PI: Se selecciona la categoría que se creó, *Nombre: Nombre del PI (Resumadero305), *Área de interés: el área del cuadrángulo que vamos a trabajar, *Tamaño Pixel X y Y: 5, *Escala: 25.000, *Tipo de imagen: 16 Bits sin señal.> Crear.

Después de tener los PI ya creados, es necesario convertir los archivos que se van a ingresar al programa porque están en formato SHP (shape). Mediante el siguiente procedimiento mostrado en la **Figura39**:

Figura39. Procedimiento conversión del archivo ASCII a SPRING



Dejando seleccionado el archivo de la categoría recién creada, voy a la 1ª pestaña superior del lado izquierdo: Archivo > Conversión de ASCII a SPRING > Entrada: *Archivo→ Busco el archivo en formato “shape” y lo selecciono, *Modelo Spring: Temático, *Atributos: TIPO_SEEP (Selecciono el atributo de interés del archivo de tipo shape, para este caso como son rezumaderos se escogió este). *Salida. Nombre del archivo ASCII: Se le asigna un nombre al archivo. > Ejecutar.

Esta parte del proceso me genera un archivo en formato .spr, y queda de la siguiente forma: “nombre_P2D.spr” el programa le agrega **2D**, es un archivo que contiene la información y coordenadas del atributo escogido correspondiente a cada uno de los puntos, presenta la siguiente forma:

Para el SHP de Rezumaderos:

- INFO
- //Archivo ASCII-SPR generado por el conversor
- //Archivo Convertido -
G:/SHP_SPRING\RezumaderosActuales.shp
- BOX 999806.665000, 783384.061000, 1131281.595000,
886470.564500
- SEPARATOR ;
- //Formatocoordx ; coordy ; class_name
- INFO_END
- 1128223.836000 ; 783717.901000 ; ASFALTO ;
- 1030626.765000 ; 790644.962000 ; ASFALTO ;
- 1000570.619600 ; 856299.335900 ; INDEFINIDO ;
- 1110013.042000 ; 816018.837000 ; ASFALTO ;
- 1021972.346000 ; 844426.394000 ; IMPREGNACIÓN EN ROCA ;

Para el SHP de geología:

- LINES
- INFO
- //Archivo ASCII-SPR generado por el conversor
- //ArchivoConvertido - F:/SHP_SPRING\geoRECORTE.shp
- BOX -74.404150, 2.363420, -72.221266, 4.036650
- INFO_END
- -72.225696 3.178307
- -72.225732 3.171434
- -72.229050 3.170520
- -72.233620 3.167280

Para el SHP de geología crea dos tipos de archivos uno del tipo 2D.spr ya mencionado anteriormente, y otro LAB.spr, que contiene la siguiente información:

- POINTS
- INFO
- //Archivo ASCII-SPR generado por el conversor
- //ArchivoConvertido - F:/SHP_SPRING\geORECORTE.shp
- BOX -74.404150, 2.363420, -72.221266, 4.036650
- SEPARATOR ;
- //Formatocoordx ; coordy ; class_name
- INFO_END
- -72.241474 ; 3.171654 ; Q-a1 ;
- -74.272408 ; 3.875449 ; k1k6-Stm ;
- -72.528219 ; 4.028376 ; N-Sc ;
- -73.971963 ; 3.927793 ; NP?CA?-Mev2 ;
- -74.048895 ; 4.032358 ; DC-Sctm ;
- -74.382610 ; 3.973603 ; k6E1-Stm ;
- -73.447172 ; 4.031922 ; Q-ca ;

Luego se procede a hacer la importación de este nuevo archivo al programa SPRING, vamos a Archivo > Importar datos vectoriales y matriciales > Datos: *Archivo (Busco el archivo en el nuevo formato 2D.spr), *Entidad: (para el caso de rezumaderos selecciono Punto 2D), *Unid: m, *Escala: 1/25000, *Proyección: Se selecciona la proyección que tiene el archivo SHP de origen (para este caso LAT/LONG/Datum:Sirgas2000); Salida: *Proyecto: LlanosSur_PlanasMagna, *Categoría: La categoría nueva creada, *PI: se le asigna un nombre.

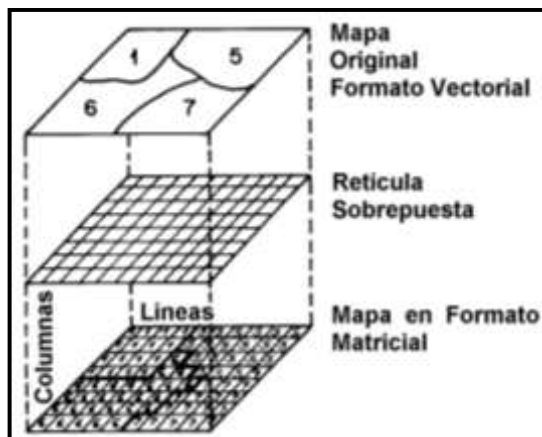
6.1 CONVERSIÓN DE VECTORIAL A RASTER

La conversión Vectorial - Ráster crea la representación **Imagen Temática** a partir de las clases presentes en el Plano de Información. Un PI podrá contener solamente una Imagen Temática.

Para un elemento lineal la conversión puede ser esquematizada sobreponiéndose el vector o elemento lineal, a una matriz ráster. Esa conversión identifica cuales elementos de la matriz están cruzando la línea y los codifica con atributos o valores de la clase asociada a la línea.

La **Figura40**. Ilustra el procedimiento de la conversión vectorial - ráster.

Figura40. Ejemplo procedimiento conversión de vectorial a ráster en Spring.



La conversión de la representación vectorial a ráster introduce distorsiones en la geometría original de los datos. Estas distorsiones aumentan con el tamaño del "**pixel**" y con la complejidad de las fronteras entre polígonos. "Pixels" localizados sobre una frontera ("**pixels**" mixtos) serán mapeados para la clase del polígono más próximo.

A menor tamaño de célula ("**pixel**"), mayor es la fidelidad de la imagen convertida, sin embargo también requiere más espacio para almacenar la imagen temática.

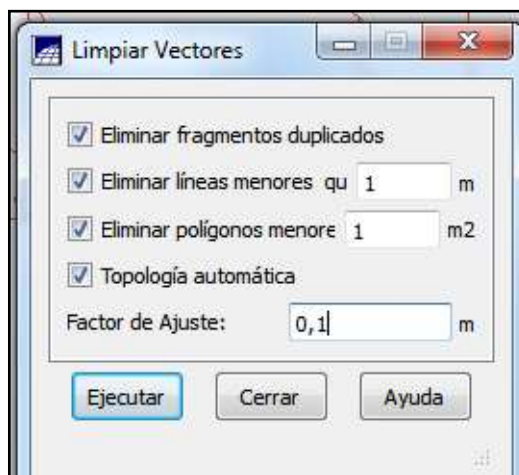
Esta es una de las etapas finales importantes en los datos, ya que todos los PI deben estar en el mismo formato para poder ser cruzados posteriormente.

El procedimiento es el siguiente, se deja seleccionado el PI de la categoría **Temática** que tendrá sus clases representadas en formato ráster; Luego se va a la pestaña superior Temático >Vector Ráster... en el menú principal; >Panel de Control > Resolución de la Imagen de Salida: 16 bits sin señal. Ejecutar para efectuar la conversión;

Limpieza de Vectores

Es necesaria para asegurar que no se filtre datos que no corresponden a los que se van a usar, se le asigna lo siguientes valores (**Figura 41**)

Figura41. Opción limpiar vectores SPRING.



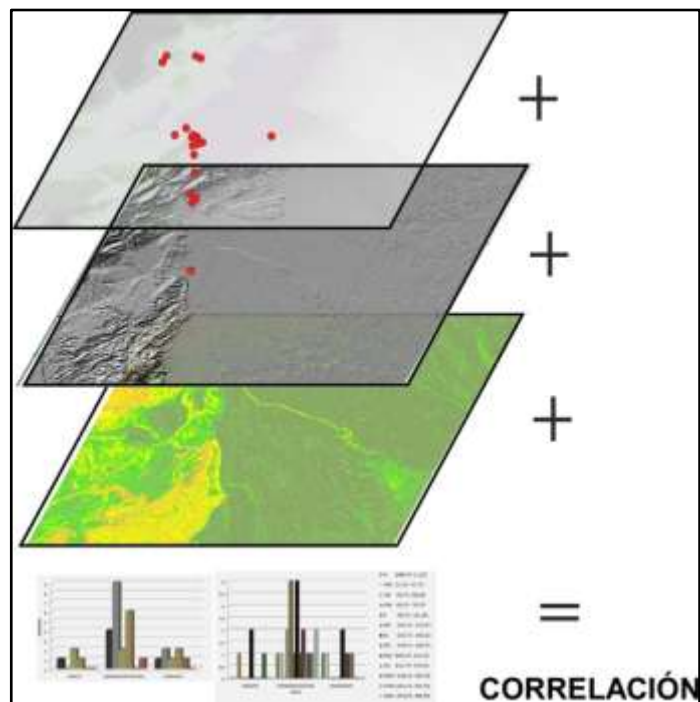
Ajuste de Nodos

Se realizó para el archivo de Geología en especial el ajuste de los nodos, ya que garantiza la coincidencia de los nodos en el extremo de las líneas. El algoritmo utiliza una **tolerancia** a la cual se le asignó un valor de **0,25** que corresponde a un valor de distancia centrado en cada nodo.

Mientras menor sea el factor de tolerancia, menor la posibilidad de errores y mayor la posibilidad de no incluir todos los nodos vecinos.

Luego de este procedimiento y en formato ráster todos y cada uno de los mapas se procede a hacer la integración para obtener la correlación.

Figura42. Información usada para la correlación Muestras (rezumaderos), Orientaciones (aspect) y Pendientes.



7. GEOLOGÍA

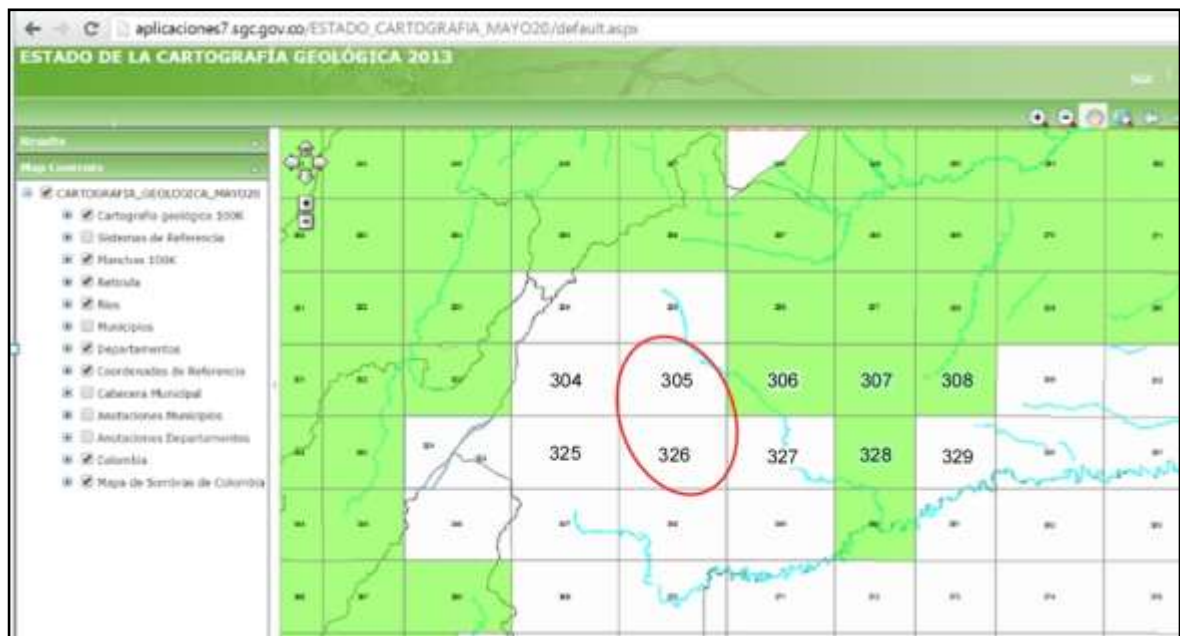
La cuenca de los Llanos está limitada por el sistema de fallas de Guaicaramo al oeste y por el Escudo de Guyana al Este (COOPER et al. 1995). La geometría de la cuenca y las relaciones de traslape de los estratos del Cenozoico sobre las rocas más antiguas, indican que la cuenca de los Llanos constituye un sistema de antepaís adyacente a un Orógeno, que corresponde a la Cordillera Oriental. Las fases de deformación y la configuración de las cargas tectónicas a lo largo de la Cordillera Oriental han cambiado durante el Maastrichtiano (Cenozoico). (BAYONA et al. 2008). Los estratos del Maastrichtiano al Eoceno son registrados en la parte más occidental de la cuenca de los Llanos y en el piedemonte llanero (BAYONA et al. 2008).

Durante el Oligoceno y Mioceno, el relleno de la cuenca flexural y el levantamiento continuo de la Cordillera Oriental generó espacio de acomodación en la parte distal de la cuenca de antepaís, reactivación de fallas y la migración hacia el este del alto flexural (BAYONA et al. 2008). La migración hacia el este de la ondulación flexural generó las condiciones para la depositación de las areniscas cuarzosas basales, uno de los reservorios más importantes en el área. La parte proximal de la cuenca fue rellenada con areniscas fluvio-deltáicas y lodolitas de la Formación Carbonera, provenientes del oeste (Cordillera Oriental) y del este (Escudo de la Guyana). La reactivación de las fallas pre-Cenozoicas en la parte distal de la cuenca de antepaís, controló localmente la distribución de los ambientes de depósito y la arquitectura de los estratos de los depósitos continentales. Durante el Mioceno Medio un incremento abrupto en el espacio de acomodación controló la depositación de los estratos fino granulares de la Formación León. Análisis bioestratigráficos recientes en las cuencas de los Llanos y Amazonas han indicado que la cuenca fue inundada por un sistema de aguas frescas con incursiones

menores de aguas salobres. (Fuente: BAYONA et al. 2008, modificado por los autores).

La siguiente **Figura 43**, se muestra una captura de pantalla del portal de información geológica del Servicio Geológico Colombiano (SGC). En él se evidencia la falta de información oficial en la zona de interés en la escala 1/100.000.

Figura43. Captura pantalla Servicio Geológico colombiano-SGC. Se muestra en el círculo color rojo la zona de mayor interés y se puede evidenciar la falta de información.



Fuente: SGC. Servicio Geológico Colombiano

La estratigrafía aquí referida fue tomada de la información disponible en escalas 1/500.000. y 1/1'000.000 cuya fuente es principalmente el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

7.1 ESTRATIGRAFÍA

En las zonas cercanas de la cordillera y de la serranía de La Macarena, los materiales se depositaron de tal manera que semejan grandes y extendidos abanicos recostados en la cordillera, terminados en terrenos largos en una serie de colinas, este tipo de ambiente característico fue llamado piedemonte y altillanura. El Escudo Guayanés (Precámbrico), conforme la base para soportar la acumulación de esta gran cantidad de sedimentos, los cuales rellenaron sus principales depresiones dando origen a la llanura. Estas geoformas hacen parte del departamento de Meta y principalmente del área de estudio donde se observan unidades estratigráficas de edad Precámbrico y Paleozoico datados en rocas metamórficas, edades del Devónico, Jurásico, Cretácico, Paleógeno y Neógeno datados en rocas sedimentarias (sedimentitas) y Cuaternarios o recientes datados por sedimentos no consolidados. *(Rodriguez, A. 2011, modificado por los autores).*

En datos bibliográficos mostrados en el Mapa geológico del meta (escala 1:500.000) la zona de estudio está formado por seis unidades estratigráficas representadas de acuerdo con la división de las áreas fisiográficas: Serranía de La Macarena y Planicie Oriental. *(Fuente: Rodriguez, A. 2011)*

7.1.1 Serranía de la macarena. La Serranía de La Macarena es una posible extensión del Macizo de Garzón (memorias del Atlas geológico Digital de Colombia, 1997), constituye el límite sur oeste de la cuenca de los Llanos Orientales y de acuerdo con los trabajos exploratorios de algunas compañías petroleras, está constituida estratigráficamente de más antiguo a más reciente por el basamento precámbrico o zócalo metamórfico, dentro del cual afloran unas ventanas de plutonitas constituidas por granitos similares al Granito de Parguaza o los de El Remanso o San Felipe (Bruneton, et al, 1982), la Serie Güejar de edad Cámbrico-Silúrico, la Formación Macarena del Cretácico Superior, la Formación Guayabero del Paleoceno, la Formación Losada del Eoceno Inferior y la Formación San Fernando del Oligoceno (Suárez, M., et al, 1984).*(Modificado de: Rodriguez, A. 2011)*

- **Basamento Precámbrico (NPtg y MPtg):** El basamento cristalino Precámbrico está constituido por rocas ígneo-metamórficas que conforman el núcleo del bloque tectónico levantado, conocido como La Sierra de La Macarena. Por simple correlación estratigráfica con el basamento de otras zonas de la cuenca de los Llanos orientales, se considera que está constituido por rocas intrusivas graníticas tales como el Granito de Parguaza el cual presenta algunas facies Rapakivi, sienitas, pórfidos, diabasas o metamórficas de tipo neis y migmatitas tales como las que conforman el Complejo Migmatítico de Mitú.

Unidad (MPtg) - MP3NP1-Mg2: Corresponde a la unidad del Mesoproterozoico tardío superior al Neoproterozoico temprano inferior. Compuesta por una secuencia bandeadada de rocas metamórficas cuarzo feldespáticas, facies granulítica y anfibolita con intercalaciones máficas, Neises cuarzo feldespáticos, migmatitas, orteneises, cuarcitas y mármoles.

- **b6k6-stm:** corresponde al grupo Guadalupe compuesta por areniscas cuarzosas, areniscas fosfáticas y niveles de lodolitas grises a negras. A la base del intervalo descrito, se encuentran depósitos arenosos agradacionales de canales y de estuarios, suprayacidos por depósitos progradacionales de frente de costa y que terminan en una superficie de inconformidad.
- **CAO-sm:** Unidad del Paleozoico inferior, Cámbrico. Corresponde a la serie del grupo Guejar, Sobre el basamento cristalino descansa discordantemente una secuencia detrítica metamorfoseada constituida por arcillolitas grises y cuarzo arenitas localmente metamorfoseadas, similares a las que se ha denominado en la Orinoquía como la Serie Güejar, a la cual se le ha asignado una edad de Cámbrico. La Serie Güejar podría equivaler cronológicamente con los esquistos de Quetame.
- **e6e9-sct:** Unidad del Paleógeno, corresponde a la formación carbonera, compuesta por arcillas blandas grises claras, arcillas arenosas grises a grises verdosas claras que se meteorizan, dando suelos de colores moteados rojos oscuros. Areniscas de grano fino a conglomeráticas, interestratificadas con arcillolitas y limolitas. Ocasionales lentes de hierro oolítico y carbón.
- **Formación Macarena (Kisi):** Suprayaciendo también de manera discordante a la Serie Güejar se encuentra una sucesión de rocas sedimentarias indiferenciadas cartográficamente, constituidas por una alternancia de estratos de arenitas masivas ocasionalmente calcáreas, intercaladas con arenitas lodosas glauconíticas, finamente estratificadas, con intercalaciones de conglomerados y shales carbonoso-micáceos, muy similares a los estratos que constituyen la Formación La Macarena. La información del subsuelo obtenida mediante perforaciones, reporta secuencias de areniscas, lutitas oscuras y localmente capas de calizas. Según Pérez y Bolívar (1985), la sedimentación de estas rocas estuvo controlada por un paleo-relieve originado después del

Paleozoico Inferior. Se le ha asignado a la Formación Macarena una edad del Cretácico Superior (Santoniano – Campaniano-Maastrichtiano Inferior), Pérez y Bolívar (1985). (*Fuente: Rodriguez, A. 2011*)

7.1.2 Planicie oriental. Corresponde a la zona plana donde se han venido acumulando los productos de los procesos denudativos que de manera incesante, han actuado sobre la cordillera oriental desde su emersión como cadena montañosa u orógeno, hasta modelar su actual morfología y relieve. El gran solevantamiento de la cordillera oriental durante el Cuaternario causó una tremenda erosión en ella, cuyos productos fueron transportados hacia los llanos y depositados allí formando los grandes depósitos del Pleistoceno y Reciente. (*Modificado de Rodriguez, A. 2011*).

- **Neógeno indiferenciado (Ngc):** Consisten en sedimentitas de edad Mio-Plioceno, de claro origen continental, conformadas por areniscas con intercalaciones de arcillolitas, conglomerados y localmente calizas. La escasez de afloramientos ha impedido su descripción y clasificación estratigráfica más completa y detallada. Es de anotar que los mismos registros geofísicos no presentan diferencias importantes que permitan diferenciarlas en unidades.

N-sc: Unidad Neógenas, del Plioceno medio, corresponde a la formación Guayabo (formación caja según Bayona, 2008) compuesta por una sucesión homogénea de lodolitas macizas caoliníticas blancas, rojas y amarillas, ocasionalmente grises y lodolitas arenosas y areniscas lodosas macizas caoliníticas.

- **Depósitos Cuaternarios (Qal, Qt):** Depósitos pobremente consolidados, correspondientes a abanicos aluviales, terrazas aluviales en varios niveles y aluviones recientes.

Depósitos aluviales recientes (Qal): Se expone en las actuales llanuras aluviales de los ríos Ariari, en amplias superficies planas paralelas a los cauces principales y constituidos por gravas, arenas y arcillas. Durante el período Cuaternario-Reciente, los cauces de la mayoría de corrientes actuales han depositado espesos coluviones, al pasar de la zona montañosa a la parte plana tanto en las llanuras aluviales o de inundación, como en los abanicos de las desembocaduras. Los mejores depósitos aluviales recientes están restringidos a los cauces de los ríos mayores. El retrabajamiento continuo de las orillas, producido por los constantes cambios entre aguas altas y bajas, ha producido las llanuras aluviales de desborde, los diques y los bancos, que se elevan unos pocos metros por encima del nivel de la llanura.

Depósitos de Ladera (Qt): Terraza subrecientes, estos depósitos están compuestos por limo arenoso cuarzosa. Se localizan en la zona más occidental de la zona, en las cercanías al río Guamal. Por acción de la gravedad y dadas las condiciones de topografía, morfología y denudación, ocurre con mucha frecuencia la caída y arrastre de bloques y masas de materiales hacia el piedemonte, los cuales en general se conocen como depósitos de ladera y están conformados por bloques angulares de gran tamaño mezclados desordenadamente con fragmentos de menor tamaño hasta finos, sin ninguna cohesión o cementación entre ellos. Dentro de esta clase de depósitos se encuentran los abanicos aluviales e incluso algunos flujos de lodo que normalmente se presentan en el piedemonte.

Depósitos Coluvio-aluvial recientes y antiguos (Q-ca): Esta unidad está compuesta por depósitos coluviales y flujos aluviales, formada por bloques, cantos y gravas de areniscas, limolitas y areniscas calcáreas.

Depósitos de abanico coluvio-aluvial antiguo (Q1-ca): Estos depósitos están compuestos por arenas gravosas que varían de gránulos a guijas subangulares a subredondeadas y subelongadas, compuestas principalmente por cuarzoarenitas, limolitas, líticos sedimentarios y líticos metamórficos.

8.MATRIZ DE CORRELACIÓN Y RESULTADOS

Esta matriz se realizó mediante el método de tabulación cruzada en SPRING, que es el proceso de creación de una tabla de contingencia desde la distribución de frecuencias multivariada de las variables estadísticas.

El procedimiento de Tabulación Cruzada está diseñado para resumir dos columnas de datos. Esta construye una tabla de dos-caminos mostrando las frecuencias de ocurrencia de cada uno de los pares formados de las dos columnas. Estadísticas son construidas para cuantificar el grado de asociación entre las columnas, y pruebas son corridas para determinar si hay dependencia estadísticamente significativa entre las columnas o no. ⁱⁱⁱ

Entrada de datos: Se deja seleccionado la variable a ingresar debe ser de tipo Temático y tener previamente la transformación a matriz.

*PI Activo: Rezumaderos305. *PI de intersección: Se selecciona la nueva variable a cruzar Geología. > Ejecutar.

- **Variable Renglón:** Columna numérica o no numérica que contiene el atributo usado para definir los renglones de la tabla.
- **Variable Columna:** Columna numérica o no numérica que contiene el atributo usado para definir las columnas de la tabla.

Asimismo se realizó una comparación con la Frecuencia de la cantidad de rezumaderos encontrados para cada una de las variables, tomadas solo para el área de las planchas 305exp, y 326exp, que son las planchas en donde se

ⁱⁱⁱ STATGRAPHICS – Rev. 9/14/2006, Recuperado el 20 enero 2015 en: <http://www.statgraphics.net/wp-content/uploads/2011/12/tutoriales/Tabulacion%20Cruzada.pdf>

encontraban mayor número de rezumaderos, para un total de 39, tabulados de la siguiente forma:

Tabla 5. Comparación de la frecuencia de la cantidad de rezumaderos para cada una de las variables, para el área de las planchas 305exp y 326exp

PUNTOS REZUMADEROS		PENDIENTE	GEOLOGÍA	ORIENTACION	TIPO REZUMADERO
X	Y				
1030626,765	790644,962	PLANICIES ONDULADAS (3 - 6°)	e6e9-Sct	SW-S (180 - 270°)	ASFALTO
1020443,873	795692,424	LADERAS LEVEMENTE INCLINADAS (10 -20°)	b6k6-Stm	N-NW (90 - 120°)	ASFALTO
1027902,173	796977,488	LADERAS LEVEMENTE INCLINADAS (10 -20°)	b6k6-Stm	N-NW (90 - 120°)	ASFALTO
1026405,358	802985,257	PLANICIES ONDULADAS (3 - 6°)	b6k6-Stm	NW - W (120 - 180°)	ASFALTO
1026352,216	809784,745	LADERA INCLINADA (20 - 30°)	MP3NP1-Mg2	NW - W (120 - 180°)	ASFALTO
1023424,069	827708,871	ESCARPE LEVE (45 - 60°)	MP3NP1-Mg2	S-SE (270 - 315°)	ASFALTO
1033227,557	842595,14	PLANICIES ONDULADAS (3 - 6°)	Q-Ca	S-SE (270 - 315°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1021972,346	844426,394	PLANICIES SUBHORIZONTALES (0 - 3°)	Q1-t	SW-S (180 - 270°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1022492,535	846874,969	PLANICIES SUBHORIZONTALES (0 - 3°)	Q1-t	NE-N (45 -90°)	ASFALTO
1016623,506	847984,352	LADERAS LEVEMENTE INCLINADAS (10 -20°)	CAO-Sm	NE-N (45 -90°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1021908,892	848079,054	PLANICIES SUBHORIZONTALES (0 - 3°)	Q1-t	NW - W (120 - 180°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1022259,798	848864,162	PLANICIES COLINADAS (6 - 10°)	Q1-t	NW - W (120 - 180°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA

Tabla 5. Comparación de la frecuencia de la cantidad de rezumaderos para cada una de las variables, para el área de las planchas 305exp y 326exp (Continuación)

PUNTOS REZUMADEROS		PENDIENTE	GEOLOGÍA	ORIENTACION	TIPO REZUMADERO
X	Y				
1027326,88	850389,643	PLANICIES SUBHORIZONTALES (0 - 3°)	Q1-t	S-SE (270 - 315°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1022855,5	850924,362	PLANICIES ONDULADAS (3 - 6°)	Q-al	NW - W (120 - 180°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1022566,328	851028,415	PLANICIES SUBHORIZONTALES (0 - 3°)	Q-al	NE-N (45 - 90°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1022375,479	851332,011	PLANICIES COLINADAS (6 - 10°)	Q-al	NE-N (45 - 90°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1021300,03	851535,6891	LADERAS LEVEMENTE INCLINADAS (10 - 20°)	CAO-Sm	N-NW (90 - 120°)	INDEFINIDO
1020666,498	851660,5243	PLANICIES ONDULADAS (3 - 6°)	CAO-Sm	S-SE (270 - 315°)	INDEFINIDO
1021619,869	851794,287	PLANICIES SUBHORIZONTALES (0 - 3°)	Q-al	N-NW (90 - 120°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1021557,915	852077,371	PLANICIES ONDULADAS (3 - 6°)	Q-al	NE-N (45 - 90°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1021230,573	852271,77	PLANICIES ONDULADAS (3 - 6°)	Q-al	SE-E (315 - 360°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1021093,948	852833,797	PLANICIES COLINADAS (6 - 10°)	Q-al	NW - W (120 - 180°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1019281,602	854623,397	PLANICIES COLINADAS (6 - 10°)	Q-Ca	NW - W (120 - 180°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1000570,578	856288,634	PLANICIES COLINADAS (6 - 10°)	b6k6-Stm	E-NE (0 - 45°)	ASFALTO
1000570,62	856299,3359	PLANICIES COLINADAS (6 - 10°)	b6k6-Stm	E-NE (0 - 45°)	INDEFINIDO
1001982,39	859299,5732	PLANICIES COLINADAS (6 - 10°)	e6e9-Sct	SW-S (180 - 270°)	INDEFINIDO
1017275,494	859584,972	LADERAS LEVEMENTE INCLINADAS (10 - 20°)	Q-Ca	NW - W (120 - 180°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA

Tabla 5. Comparación de la frecuencia de la cantidad de rezumaderos para cada una de las variables, para el área de las planchas 305exp y 326exp (Continuación)

PUNTOS REZUMADEROS		PENDIENTE	GEOLOGÍA	ORIENTACION	TIPO REZUMADERO
X	Y				
1015254,074	860083,24	LADERA INCLINADA (20 - 30°)	CAO-Sm	E-NE (0 - 45°)	ASFALTO
1027851,854	860179,258	PLANICIES SUBHORIZONTALES (0 - 3°)	Q-Ca	NW - W (120 - 180°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1015636,259	861541,22	LADERAS LEVEMENTE INCLINADAS (10 -20°)	b6k6-Stm	S-SE (270 - 315°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1012874,575	863103,37	LADERAS LEVEMENTE INCLINADAS (10 -20°)	b6k6-Stm	S-SE (270 - 315°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1003861,055	863114,566	PLANICIES COLINADAS (6 - 10°)	e6e9-Sct	S-SE (270 - 315°)	ASFALTO
1000173,715	882920,893	LADERA INCLINADA (20 - 30°)	b6k6-Stm	NW - W (120 - 180°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1000173,634	882929,6038	LADERA INCLINADA (20 - 30°)	b6k6-Stm	NW - W (120 - 180°)	INDEFINIDO
999806,665	883362,859	LADERA INCLINADA (20 - 30°)	b6k6-Stm	NE-N (45 -90°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1000924,751	885242,482	PLANICIES COLINADAS (6 - 10°)	b6k6-Stm	W-SW (180 - 225°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1000924,857	885251,0151	PLANICIES COLINADAS (6 - 10°)	b6k6-Stm	W-SW (180 - 225°)	INDEFINIDO
1002974,39	886462,12	LADERAS LEVEMENTE INCLINADAS (10 -20°)	e6e9-Sct	S-SE (270 - 315°)	IMPREGNACIÓN EN ROCA
1002974,532	886470,5645	LADERAS LEVEMENTE INCLINADAS (10 -20°)	e6e9-Sct	S-SE (270 - 315°)	INDEFINIDO

Debido a que los rezumaderos es la variable de interés, y en las otras planchas no se encontraban rezumaderos solo se tomaron en total 3 planchas en su totalidad la plancha **305exp**, **326exp** y **327exp**, para la matriz de correlación.

El Resumen del Análisis abre un documento de texto, donde muestra el número de valores únicos en las variables renglón y columna, tan bien como el número de observaciones (renglones y columnas sin datos perdidos).

Resultado matriz Rezumaderos Vs Pendiente, (Plancha 305):

Plano-1: Rezumaderos305	Plano-2: Pendiente_305_TEM
# líneas 10192	# líneas 10192
# columnas 14134	# columnas 14134
# pixels 144053728	# pixels 144053728
Resolución h 5.000000	Resolución h 5.000000
Resolución v 5.000000	Resolución v 5.000000

Tabla cruzada de áreas (en pixels):

Plano-1 (en las líneas) : Rezumaderos305

Plano-2 (en las columnas): Pendiente_305_TEM.

Tabla 6. Matriz de correlación. Rezumaderos vs pendiente. Plancha 305exp

Plancha 305 REZUMADEROS / PENDIENTE - 305exp (PIXELS)	1. Planicies Subhorizontales 0-3	2. Planicies Onduladas 3-6	3. Planicies Colinadas 6-10	4. Ladera Levemente Inclinada 10-20	5. Ladera Inclinada 20-30	6. Ladera Fuertemente Inclinada 30-45	7. Escarp e Leve 45-60	8. Escarp e Abrupto 60-75	9. Escarp e vertical 75-90
ASFALTO	1	0	2	1	0	0			
IMPREGNACIÓN EN ROCA	4	9	2	6	0	1			
INDEFINIDO	1	2	1	2	1	0			

Figura44. Gráfica resultados de la matriz Rezumaderos VS Pendiente-Plancha 305.

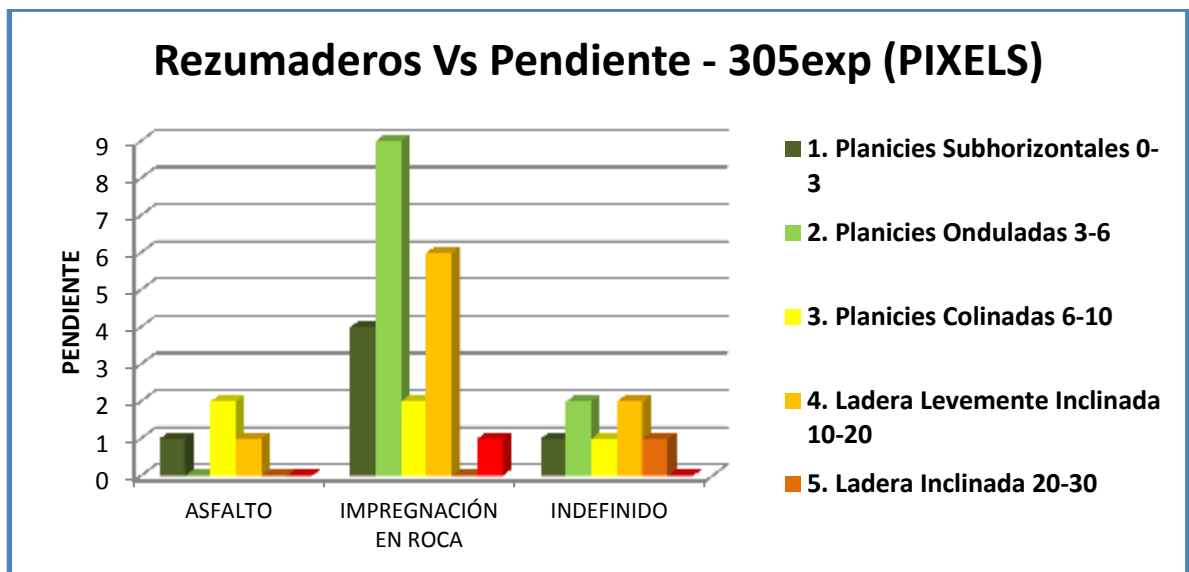
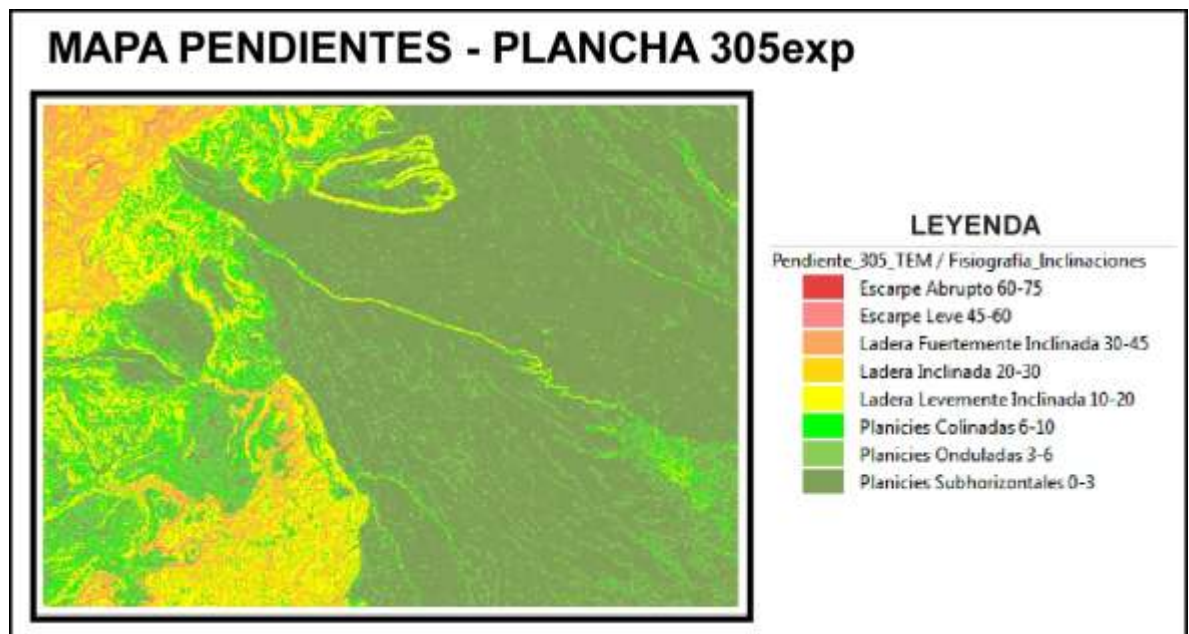
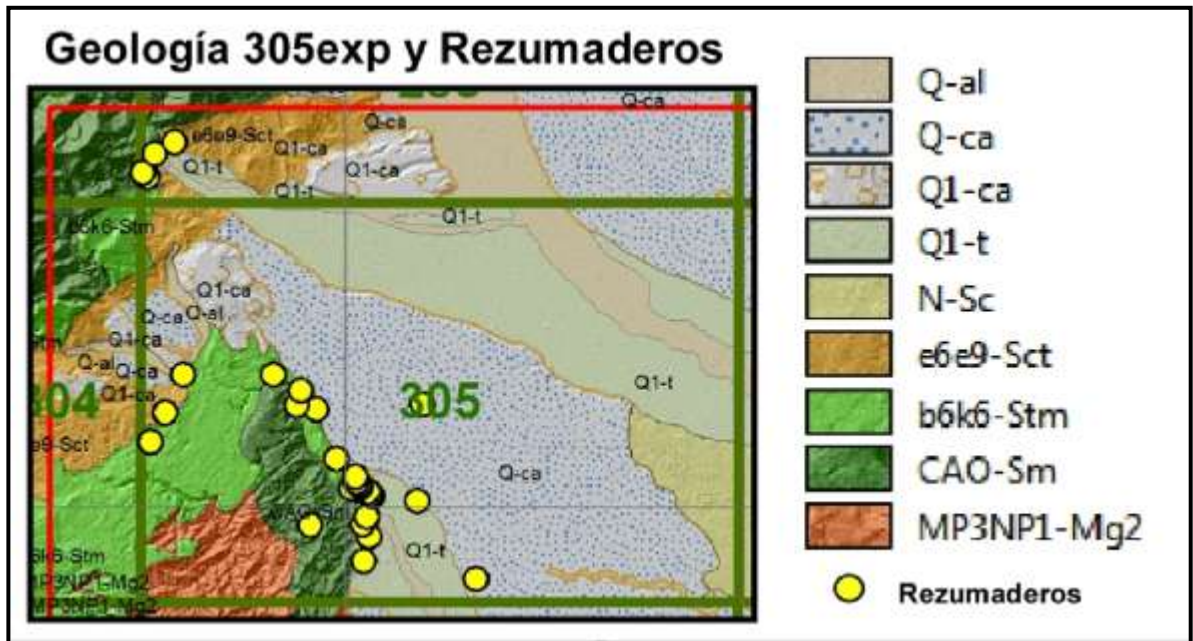


Figura45. Mapa de pendientes Plancha 305exp



Resultado matriz Rezumaderos Vs Geología, (Plancha 305):

Figura46. Mapa de geología Plancha 305exp. Gómez, et al. 2007 (INGEOMINAS), junto con la localización de los rezumaderos (ANH).



Fuente: Gómez, J, 2007. INGEOMINAS (Modificado por los autores)

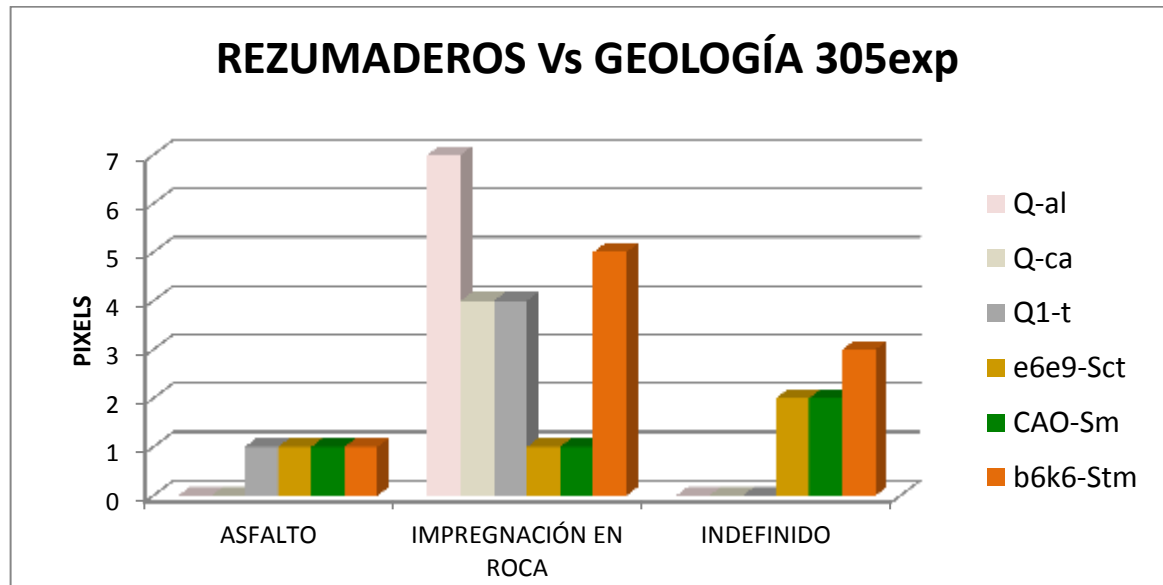
- Plano-1: Geología 305
- # líneas 10192
- # columnas 14134
- # pixels 144053728
- Resolución h 5.000000
- Resolución v 5.000000
- Plano-2: Rezumaderos305
- # líneas 10192
- # columnas 14134
- # pixels 144053728
- Resolución h 5.000000
- Resolución v 5.000000

- Tabla cruzada de áreas (en pixels):
- Plano-1 (en las líneas) : Copia de Geología 305
- Plano-2 (en las columnas): Rezumaderos305

Tabla 7. Matriz de correlación. Rezumaderos vs geología. Plancha 305exp

REZUMADEROS/ GEOLOGÍA - 305exp (PIXELES)	Q-al	Q-ca	Q1-t	e6e9-Sct	CAO-Sm	b6k6-Stm
ASFALTO	0	0	1	1	1	1
IMPREGNACIÓN EN ROCA	7	4	4	1	1	5
INDEFINIDO	0	0	0	2	2	3

Figura47. Resultado matriz de Rezumaderos Vs Geología Plancha 305exp.



Resultado matriz Rezumaderos Vs Orientaciones, (Plancha 305):

- Plano-1: Rezumaderos305

- # líneas 10192
- # columnas 14134
- # pixels 144053728
- Resolución h 5.000000
- Resolución v 5.000000
-
- Plano-2: 305AspecNew
- # líneas 10192
- # columnas 14134
- # pixels 144053728
- Resolución h 5.000000
- Resolución v 5.000000
-
-
- Tabla cruzada de áreas (en pixels):
- Plano-1 (en las líneas) : Rezumaderos305
- Plano-2 (en las columnas): 305AspecNew

Figura48. Resultado de matriz Rezumaderos Vs Orientación. Plancha 305exp.

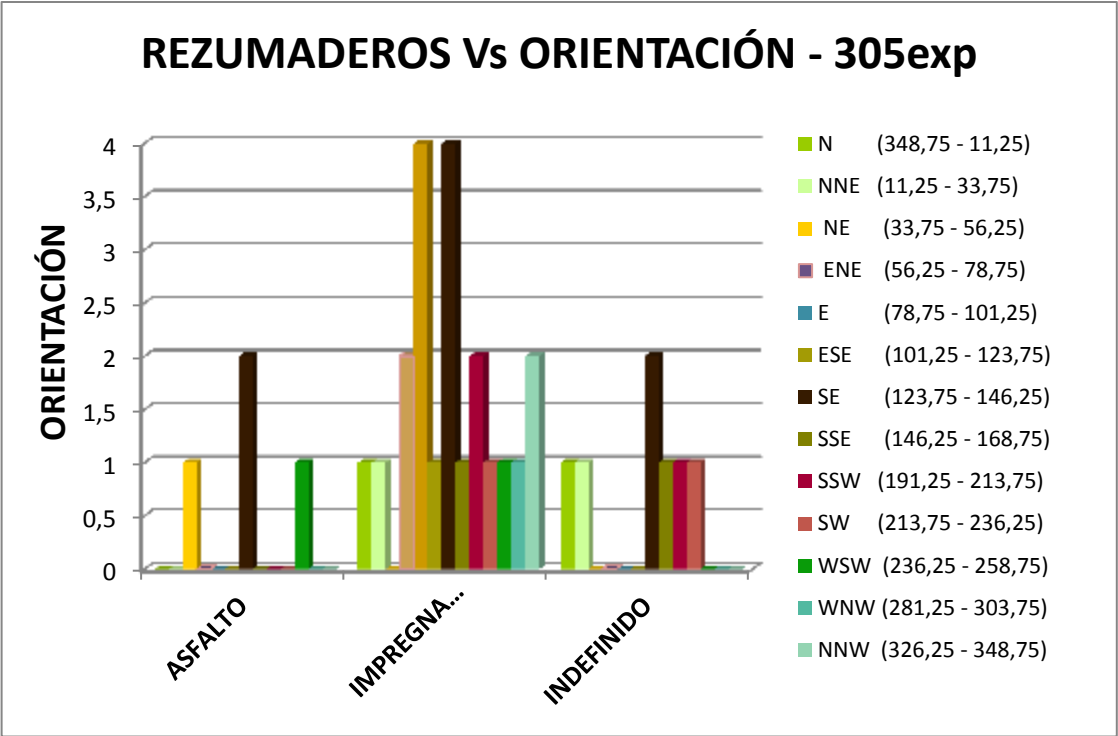
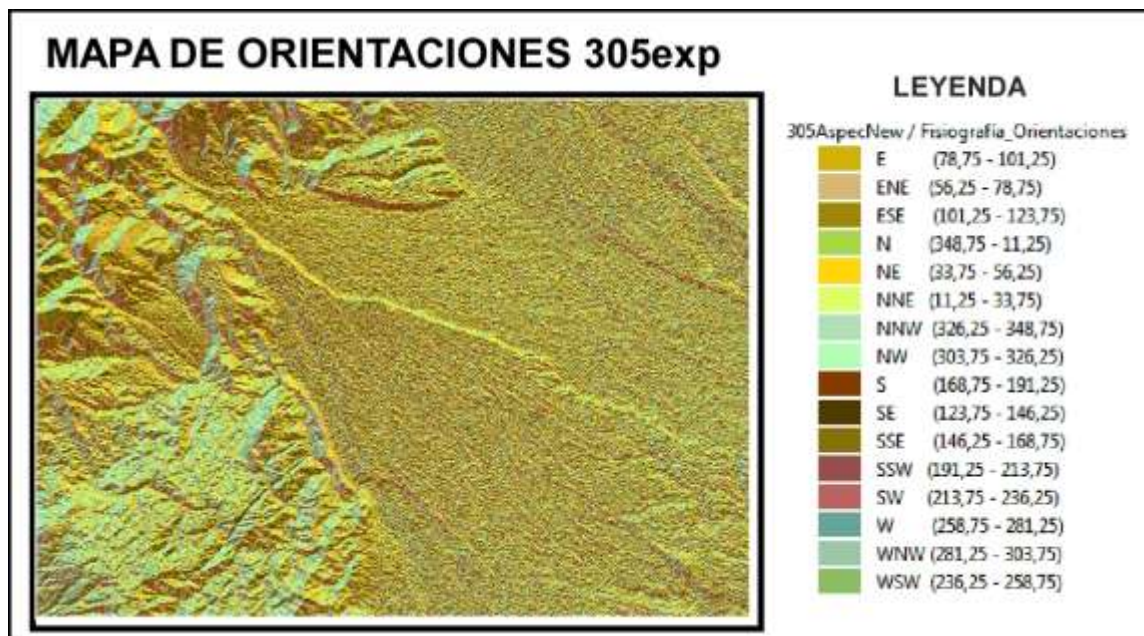


Tabla 8. Matriz de correlación de rezumaderos Vs Orientación. Plancha 305exp

REZUMADEROS/ ORIENTACIÓN - 305exp (PIXELS)	N (348,75 - 11,25)	NNE (11,25 - 33,75)	NE(33,75 - 56,25)	ENE (56,25 - 78,75)	E (78,75 - 101,25)	ESE (101,25 - 123,75)	SE (123,75 - 146,25)	SSE (146,25 - 168,75)	SSW(19 1,25 - 213,75)	SW (213,75 - 236,25)	WSW(236, 25 - 258,75)	WNW (281,25 - 303,75)	NNW (326,25 - 348,75)
ASFALTO	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0
IMPREGNACIÓN EN ROCA	1	1	0	2	4	1	4	1	2	1	1	1	2
INDEFINIDO	1	1	0	0	0	0	2	1	1	1	0	0	0

Figura49. Mapa de Orientaciones. Plancha 305exp.



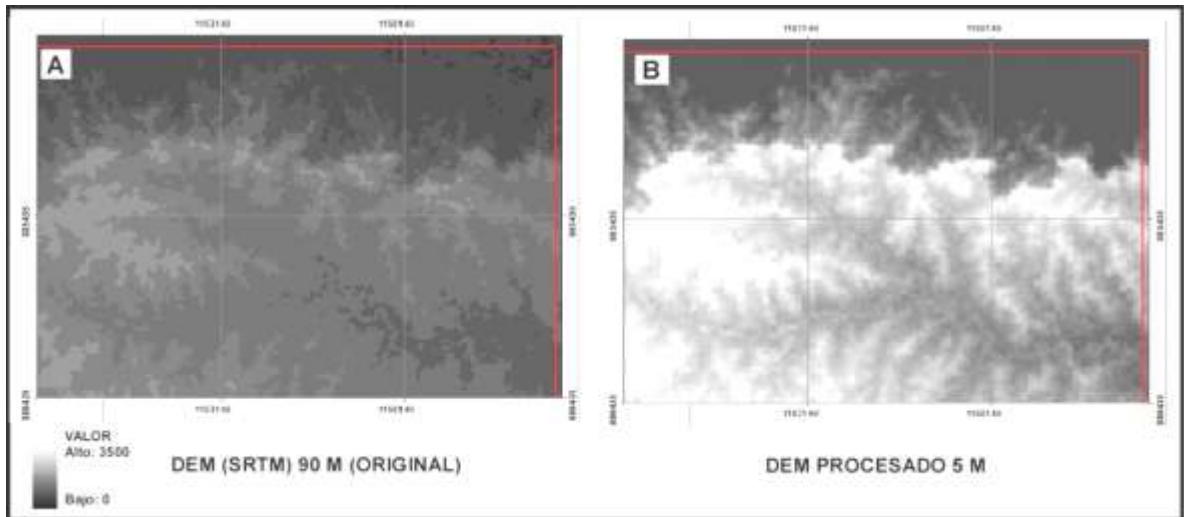
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN PROCESADO

Uno de los objetivos de la primera etapa, era obtener una mejoría en la resolución del DEM, para posteriormente conseguir una mayor confiabilidad en los parámetros sacados de este. Se trabajó con los datos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) en un formato inicial tipo ASCII. En donde se realizaron la serie de procesos mencionados anteriormente y se realizó un control de calidad para corroborar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

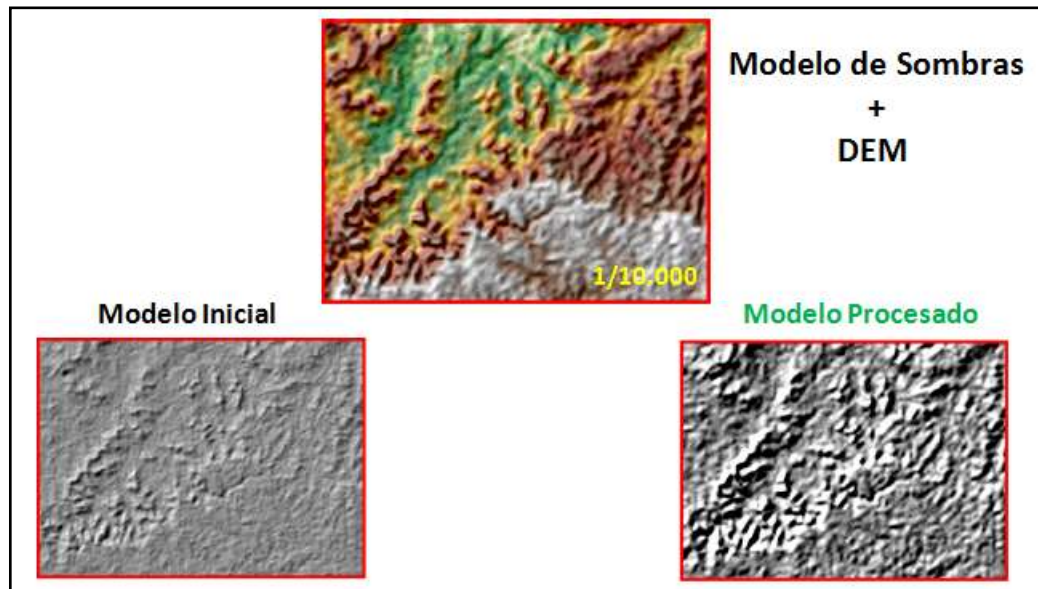
En la **Figura 50** se puede ver un esquema de un zoom en una región de la Plancha 305exp, a una escala de 1:50000, en donde se muestra la resolución presentada antes y después del procesamiento, se puede apreciar que la resolución mejoró notoriamente luego de ser procesado mediante los métodos de interpolación elegidos.

Figura50. Resolución de los datos originales y procesados del DEM, para un segmento Plancha 305exp.



A partir de este DEM procesado se elaboró también un modelo de sombras, para observar mejor el relieve en la interpretación geomorfológica, en este se observa una mejora muy notoria en la resolución del modelo de sombras final como se muestra en la **Figura 51**.

Figura51. Zoom a escala 1/10.000, de la misma zona mostrada en el modelo inicial (SRTM) sin procesar y el modelo final procesado.



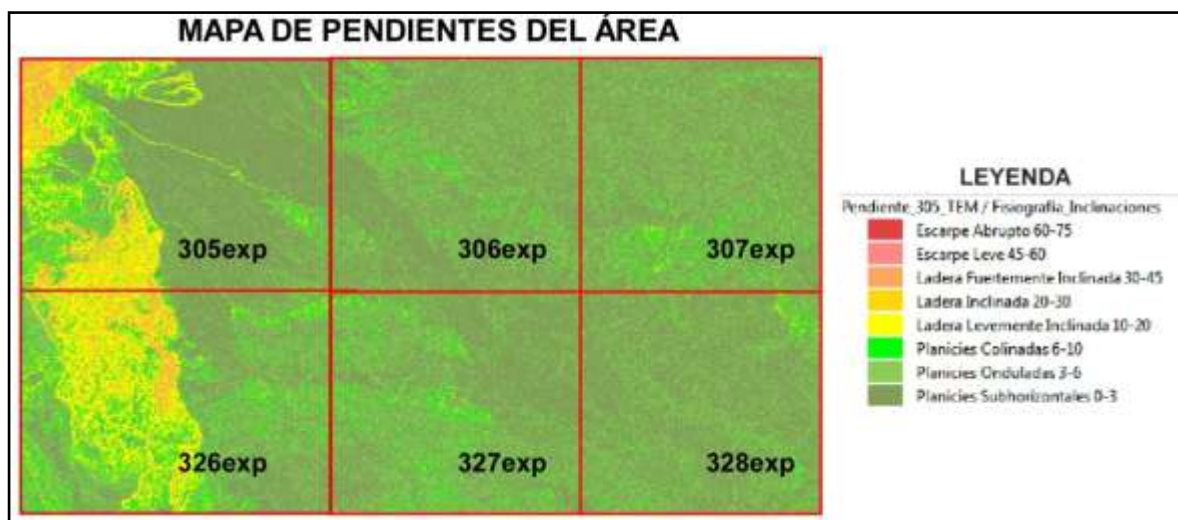
Luego del control de calidad realizado y las diferentes pruebas, los resultados obtenidos para cada método mostrando estadísticamente y gráficamente que el método de interpolación más confiable para este caso es el de **SPLINE MITASOVA**, de **Tensión: 30**, **Suavización: 0,05**, y **Mínimo Puntos: 70**, y pixel de 5(m). Con un Error de la Desv. Estándar acumulada de: 0,102530.

Descartándose los métodos que presentaron inicialmente con un **error de 0,000000**, que eran **Media Ponderada de Potencia 8**, y **Vecinos más próximos**, ya que para este método de media ponderada por ejemplo con un valor de polinomio grado 8, lo que hacía era obtener un resultado exactamente igual a los datos originales por esta razón no presentaban ningún error aún con 6 cifras significativas, y se corroboró con el método de la 1ra derivada que era el de la Pendiente.

9.2. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE PENDIENTES Y ORIENTACIÓN DE PENDIENTES

El modelo de pendientes fue fraccionado en ocho clases que permiten observar los cambios de pendiente en las diferentes áreas, las que presentan las pendientes más bajas corresponden a la región de la llanura aluvial y a la planicie oriental de los llanos se caracteriza por tener un relieve muy plano a ondulado, mientras que los valores más altos corresponden al contacto con el piedemonte de la cordillera oriental y valores intermedios a la región inferior izquierda del área de estudio que corresponde a uno de los flancos de influencia con la serranía de la macarena.

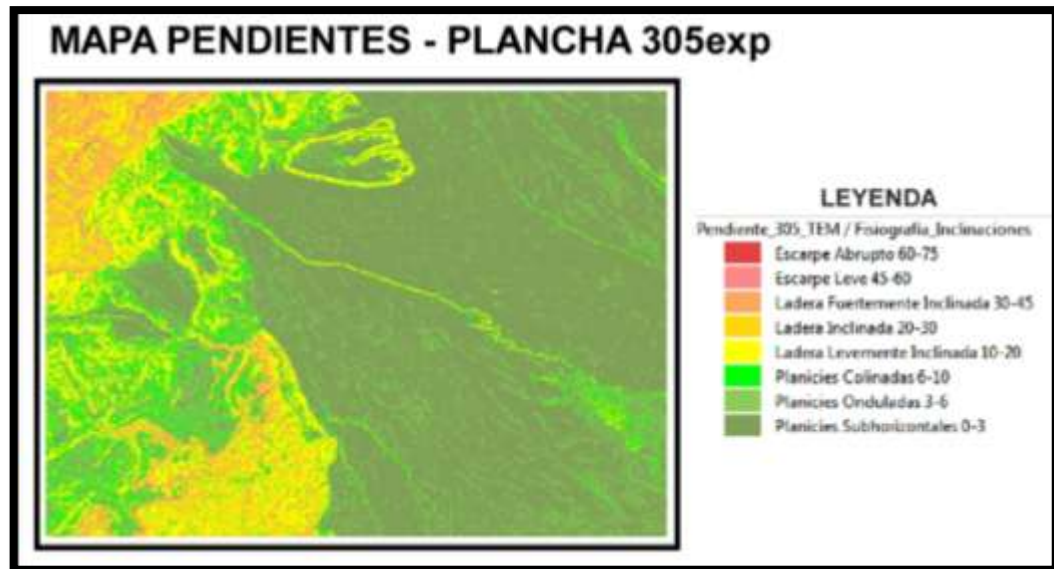
Figura52. Mapa de pendientes para el área total de estudio, en color rojo son las divisiones de las planchas.



La clase de pendientes de 0 a 3° se presenta en las diferentes unidades de planicies subhorizontales con menor relieve tales como los abanicos fluvio torrenciales, las llanura aluviales proximales que tienen formas aterrazadas en las

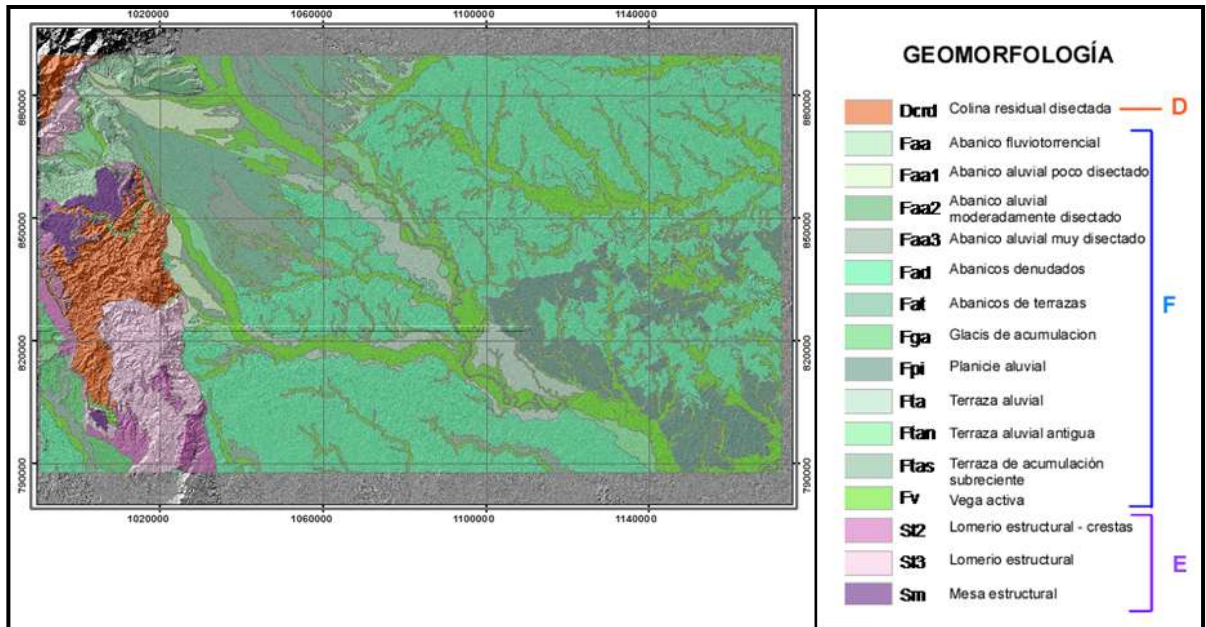
partes bajas, corresponden principalmente a la zonas de las unidades cuaternarias, Qal, Q1-t, y Q-Ca. La clase de Planicies onduladas de 3 a 6° corresponde a los depósitos de terrazas de las unidades cuaternarias aluviales, y a las unidades Neógenas de N-Sc. La clase de planicies colinadas de 6 a 10° junto con las Laderas levemente inclinadas de 10 – 20° corresponden principalmente a las unidades que hacen parte de la serranía de la Macarena y a la disección activa profundizando los valles, se aprecia en especial en las planchas 305exp y 326exp. La clase de laderas fuertemente inclinadas de 30 a 45° y escarpes leves de 45 a 60° se presentan en menor proporción casi nula se observa solo en la zona de la plancha 305exp corresponde al contacto con el piedemonte de la cordillera oriental con unidades cretácicas de la formación Guadalupe y eocenas de la formación carbonera.

Figura53. Mapa de pendientes para la plancha 305exp. Es la plancha que presenta mayores alturas.



Con la ayuda de los insumos obtenidos, mapa de pendientes, DEM procesado, modelo de sombras, junto con la geología se obtuvo el mapa geomorfológico de todas las planchas.

Figura54. Mapa geomorfológico obtenido para todas las planchas.



9.3. RELACIÓN CON LA FRECUENCIA DE REZUMADEROS

Para esta parte se estableció una región más pequeña mostrada en color verde, debido a que existe una ausencia de información de rezumaderos en las otras áreas solo se tomaron las que se encuentran en las planchas 305exp y 326exp, como se muestra en la **Figura 55**.

Figura55. Modelo de sombras, se muestra en color verde el área que se tomó para mirar la relación con la frecuencia de rezumaderos presentados en la zona planchas 305exp y 316exp, en color rosado corresponde a los puntos de los rezumaderos en la zona.

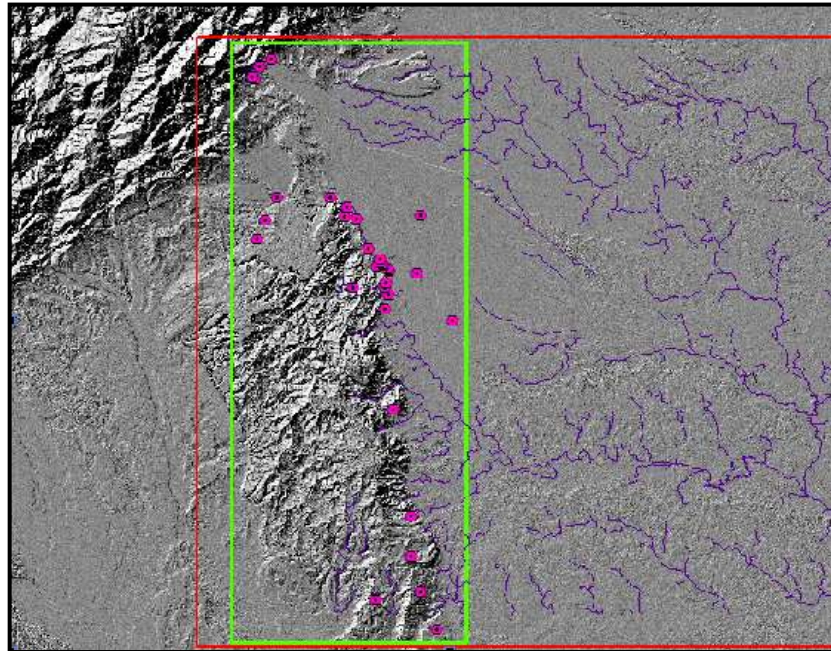


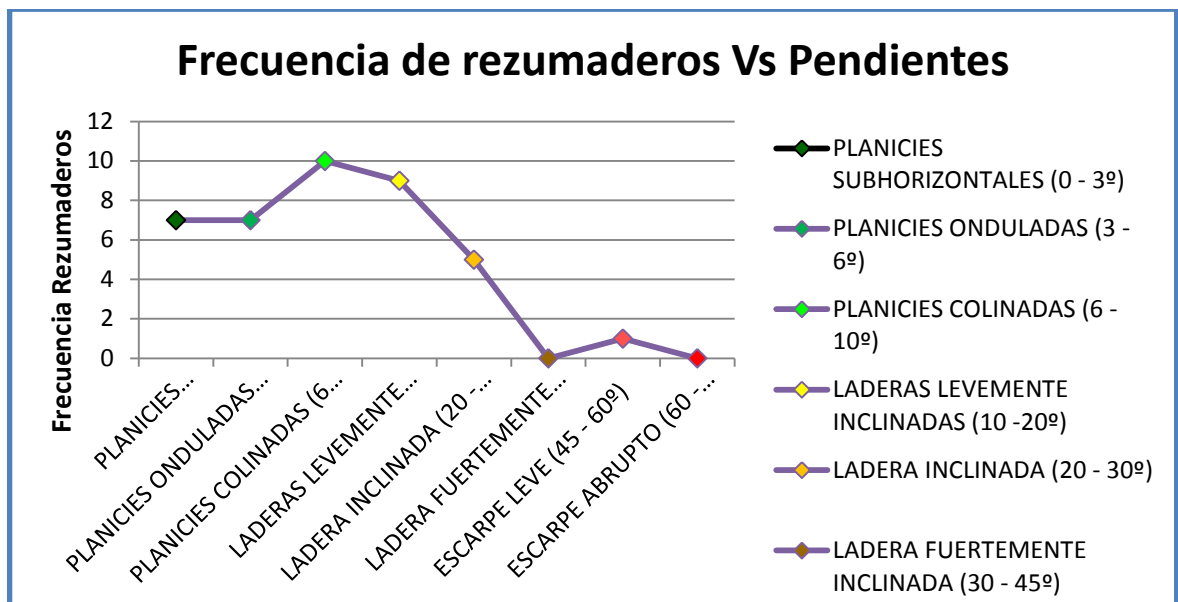
Tabla 9. Frecuencia de rezumaderos Vs Pendientes

COLOR	PENDIENTE	# REZUMADEROS
	PLANICIES SUBHORIZONTALES (0 - 3°)	7
	PLANICIES ONDULADAS (3 - 6°)	7
	PLANICIES COLINADAS (6 - 10°)	10
	LADERAS LEVEMENTE INCLINADAS (10 - 20°)	9
	LADERA INCLINADA (20 - 30°)	5
	LADERA FUERTEMENTE INCLINADA (30 - 45°)	0
	ESCARPE LEVE (45 - 60°)	1
	ESCARPE ABRUPTO (60 - 45°)	0

TOTAL REZUMADEROS

39

Figura56. Gráfica de Frecuencia de rezumaderos-Pendientes para las planchas 305exp y 326exp.



En la relación de pendientes con respecto a la frecuencia de rezumaderos, se puede apreciar que en su mayoría estos rezumaderos se encuentran en planicies colinadas entre 6 y 10°, y en Laderas levemente inclinadas de 10 a 20°.

El modelo de orientación de pendientes, o facetas, fue fraccionado en ocho clases correspondientes a los rumbos principales de la rosa de los vientos (**Figura 58**). Se observa que la frecuencia de los rezumaderos se encuentra en su mayoría expuesta hacia el NW y en segundo término hacia el S.

Tabla 10. Frecuencia de Rezumaderos-Orientación

COLOR	ORIENTACIÓN (ASPECT)	# REZUMADEROS
	E-NE (0 - 45º)	3
	NE-N (45 - 90º)	6
	N-NW (90 - 120º)	4
	NW - W (120 - 180º)	11
	W-SW (180 - 225º)	2
	SW-S (180 - 270º)	3
	S-SE (270 - 315º)	9
	SE-E (315 - 360º)	1
TOTAL REZUMADEROS		39

Figura57. Modelo de elevación con el parámetro Orientaciones o facetas, presenta una exageración vertical de 3, para visualizar mejor su relieve. Puntos localizados son los rezumaderos presentes en la plancha 305exp.

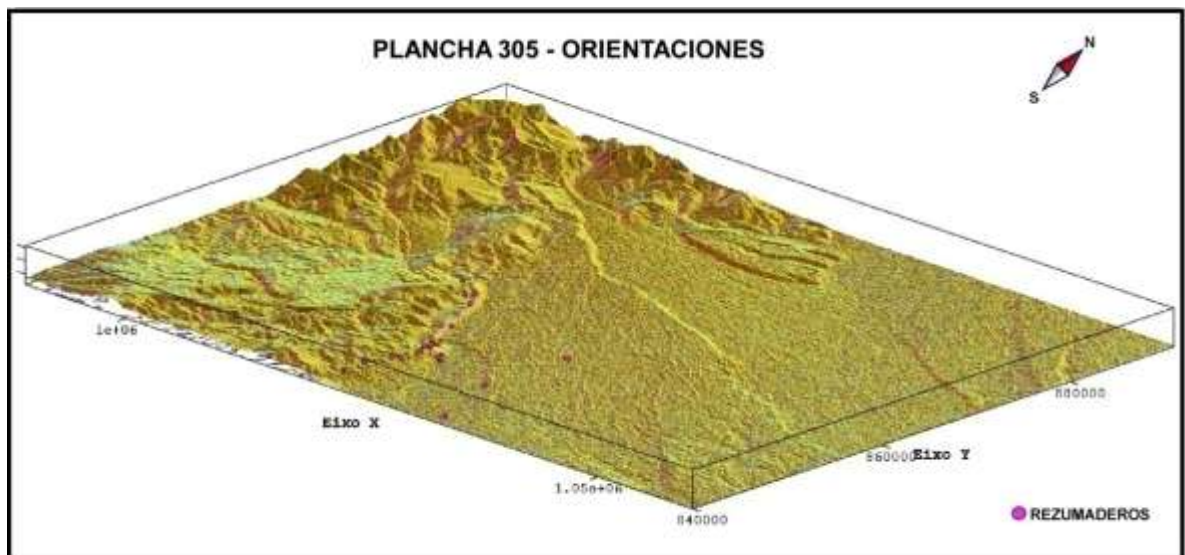
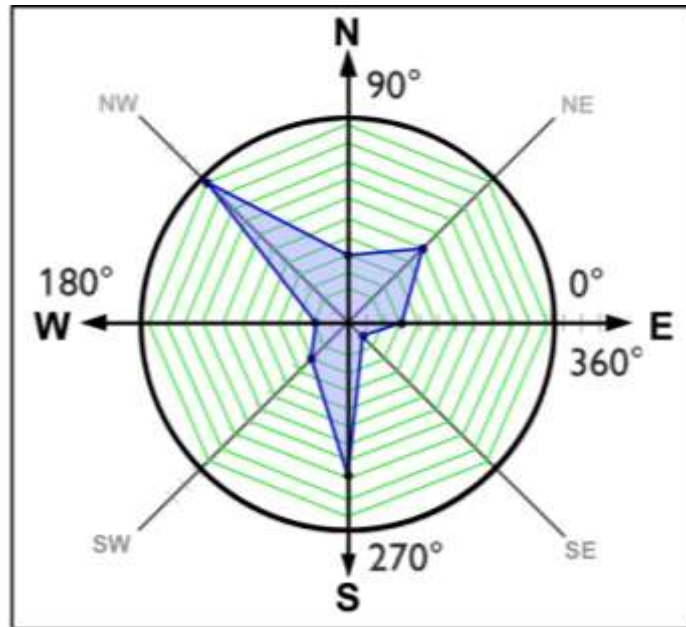


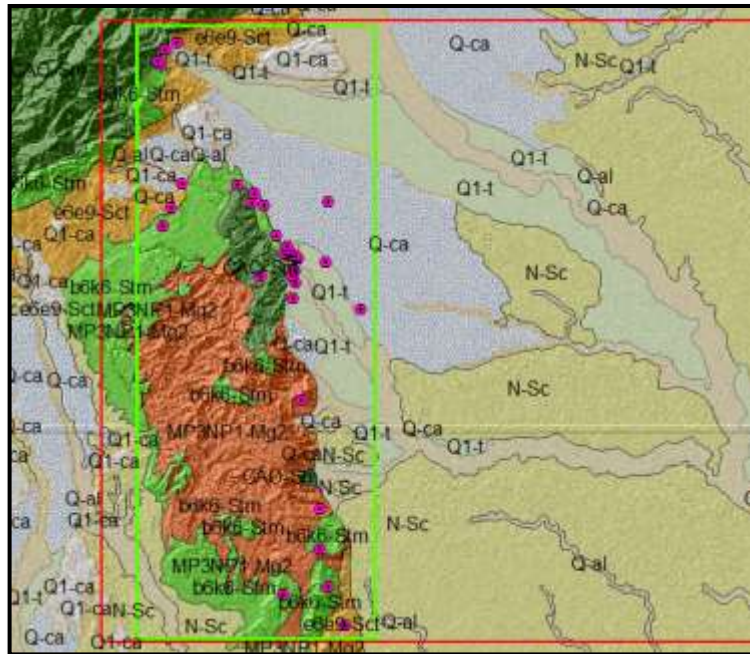
Figura58. Gráfica de Frecuencia de Orientación de pendientes para los rezumaderos en la plancha 305exp y 326exp.



9.4. RELACIÓN CON LA ESTRATIGRAFÍA

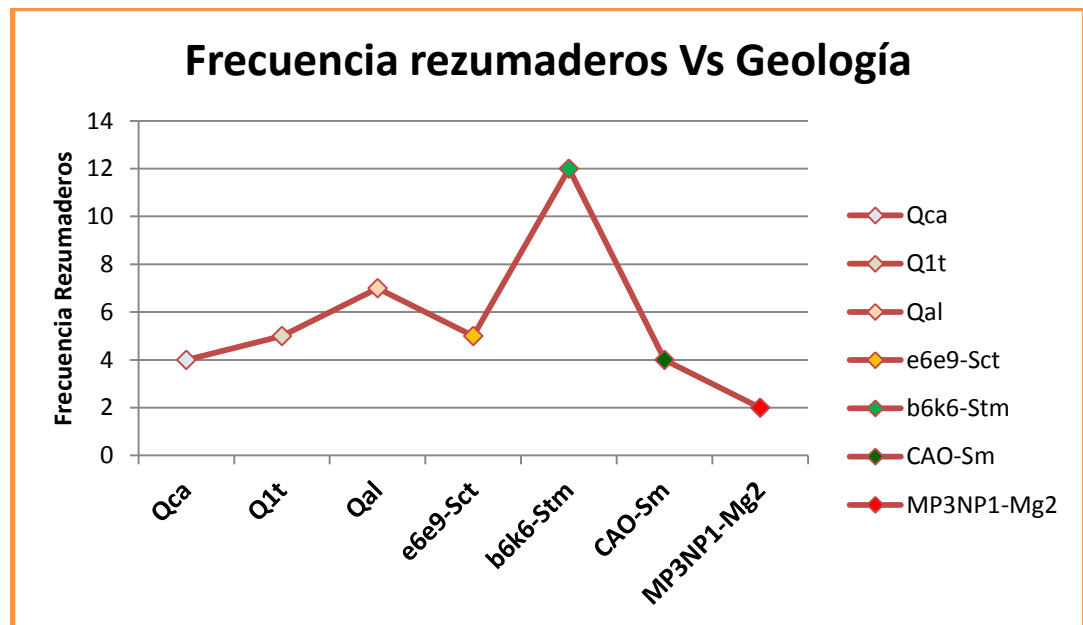
La mayor frecuencia de rezumaderos se encuentran principalmente en la unidad cretácica **b6k6-stm**, en la región de las estribaciones de la serranía de la Macarena, corresponde al grupo Guadalupe compuesta por areniscas cuarzosas, areniscas fosfáticas y niveles de lodolitas grises a negras. Y en menor proporción en los depósitos aluviales.

Figura59. Mapa geológico, localización de los rezumaderos (color rosado).



Fuente: Gómez, J, 2007. INGEOMINAS (Modificado por los autores)

Figura60. Gráfica frecuencia de resumaderos Vs Geología.



10. DISCUSIÓN, ALCANCES Y LIMITACIONES

Las características morfométricas pueden representar una fuente adicional de información muy útil para el análisis geomorfológico de las formas del relieve, sin embargo, su aplicación depende del criterio seleccionado, asimismo de las zonas elementales a la que las características son relacionadas.

Una de las limitaciones en los recursos necesarios fue la falta de equipos aptos para trabajar procesamientos de este tipo, en donde inicialmente se había establecido procesar más variables como Curvatura, rugosidad entre otras y no fue posible procesar estas variables por que los procesamientos exigían una demanda alta en la capacidad de los computadores.

Se presentó problemas en cuanto a la adquisición de la información de los rezumaderos por cuestiones de confidencialidad de ECOPETROL no fue posible tener acceso a los datos, ni a la información de estos, entonces se trabajó con la información disponible por la Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH, reduciendo las posibilidades de un buen resultado ya que estos datos tenían poca información y se encontraban concentrados en algunas zonas o no había información en otras que son de mayor interés actualmente para ECOPETROL.

Las dificultades en la información geológica fueron evidentes, el área de trabajo no cuenta con mapas geológicos a escalas adecuadas (el Servicio Geológico Colombiano - SGC no cuenta con estas planchas), de tal manera que los análisis se realizaron con la información disponible en escala 1/500.000, y 1/1'000.000, y la agregación de unidades por su nivel de generalización, dificultó las correlaciones estratigráficas que se esperaban realizar. Las planchas donde había más datos de rezumaderos 305 y 326 no tiene información cartográfica disponible,

y la presencia de la única fuente de información se encuentra de carácter confidencial dificultó los resultados.

11. CONCLUSIONES

- ❖ Se obtuvo una mejora en la resolución espacial del DEM, en donde se determinó que el método de interpolación más confiable en este caso para la elaboración del DEM es el interpolador **SPLINE MITASOVA**, con valores de **Tensión: 30, Suavización: 0,05, y Mínimo Puntos: 70**, y pixel de 5(m). Con un Error de la Desv. Estándar acumulada de: 0,102530.
- ❖ Se definieron y establecieron las dos variables **Pendiente**, y **Orientación** que fueron determinadas a partir del DEM procesado, brindaron una herramienta para determinar la geomorfología de la zona y una correlación con la información disponible
- ❖ La zona donde predominan los rezumaderos, son zonas que presentan su geomorfología asociada principalmente a ambientes de tipo estructural y denudacional.
- ❖ La comparación de parámetros de Pendiente, Orientación con rezumaderos y geología permiten definir una correlación más confiable siempre y cuando se cuente con una mayor densidad de datos, teniendo en cuenta que son parámetros que funcionan como un aporte para obtener un conocimiento superficial de la zona, los obtenidos no son lo suficientemente aptos para poder correlacionar las variables morfométricas con las zonas generadoras de hidrocarburos, ya que se cuentan únicamente con datos de rocas impregnadas y asfaltos.

- ❖ Con respecto a la cantidad de rezumaderos en los resultados obtenidos se observa una mayor frecuencia de los rezumaderos en las regiones con pendientes colinadas de 6 a 10° y en menor proporción en laderas levemente inclinadas de 10 a 20°. Y en la orientación de pendientes los rezumaderos presentan una tendencia NW principalmente y Sur en menor proporción, teniendo en cuenta que estos valores no son equiparables con otras áreas

- ❖ La unidad estratigráfica en donde presenta mayor frecuencia rezumaderos es la unidad cretácica b6k6-Stm, en especial la que aflora en la región correspondiente a las estribaciones de la serranía de la Macarena, esta unidad corresponde al grupo Guadalupe está compuesta por areniscas cuarzosas, areniscas fosfáticas y niveles de lodolitas grises a negras. Y en menor frecuencia se encontraron rezumaderos en los depósitos aluviales.

- ❖ Con respecto al tipo de rezumadero, se observo que las rocas impregnadas en el parámetro orientación presenta una tendencia E y SE, y las de tipo asfalto predominantemente SE.

- ❖ En la variable Pendiente el tipo de rezumadero con rocas impregnadas se presentaron en las planicies onduladas de 3 a 6°, y asfalto en las planicies colinadas de 6 a 10°

BIBLIOGRAFÍA

ANH. Mapa de rezumaderos de la Agencia Nacional de Hidrocarburos. Archivo formato tipo shape. Última modificación realizada el 01/11/2013. Consultado el 12 septiembre de 2014. Disponible en: <http://www.anh.gov.co/Banco%20de%20informacion%20petrolera/EPIS/Datos/Forms/DispForm.aspx?ID=3>

CÂMARA G, CARTAXO R, FREITAS U, GARRIDO J, & MITSUO li F., SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. 1996.

CARVALHO, T.M.; LATRUBESSE, E.M. 2004. Aplicação de modelo digitais do terreno (MDT) em análises macro geomorfológicas: o caso da bacia hidrográfica do Araguaia. Revista Brasileira de Geomorfologia, 5: 85-93. Brasil.

CHILINGARIAN, G. (1978), Developments in petroleum science 7. Elsevier scientific publishing company. Primera edición.

CIAT. Decision and Policy Analysis Program - DAPA. Recuperado 25 d enero de 2015 en: <http://dapa.ciat.cgiar.org/datos-de-elevacion-para-el-mundo>

CIAT. International Center for Tropical Agriculture (2004). SRTM 90 m elevation data for the department of Meta, Colombia. Raster digital data.V1. <http://gisweb.ciat.cgiar.org:8080/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=263&currTab=simple>

CSI-CGIAR. Consortium for Spatial Information. 2004. Consultado el 12 septiembre de 2014. Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org>

DRS- INPE. Divisão de Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2012. Consultado el 12 septiembre de 2014. Disponible en: http://www.dsr.inpe.br/panamazon/Panamazonia/Material/novas/SPRING_VisionGeneralPanamericano.pdf

FELICÍSIMO, A., "Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicación en las ciencias ambientales".1994. Recuperado 14 de enero de 2015. Consultado el 12 septiembre de 2014. Disponible en: <http://www6.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>

FELICÍSIMO, Á.M., Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. 1994. Consultado el 12 septiembre de 2014. Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/>. 127p.

FLORINSKY, I. V., Digital Terrain Analysis in soil science and geology. Institute of Mathematical Problems of Biology. Russian Academy of Sciences. Pushchino, Elsevier Science Publishing. Russia. 2010. 379p.

FLORINSKY, I.V; EILERS, R.G; MANNING, G.R; FULLER, L.G., Prediction of soil properties by digital terrain modeling. Environmental Modelling & Software 17. 2001. Elsevier 2002. 295–311

FRANKLIN, Steven E.; and PEDDLE, Derek R. "Texture analysis of digital image data using spatial occurrence". Computers & Geosciences, 1987. 13(3): 293-311.

GÓMEZ J, NIVIA A, MONTES N, JIMÉNEZ D, SEPÚLVEDA M, Gaona T, Osorio J, Diederix H, Mora M, & VELÁSQUEZ M., Plancha 5-14. Escala 1:500.000. Atlas Geológico de Colombia. Instituto colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS. Colombia. 2007.

GÓMEZ, J., NIVIA, A., MONTES, N.E., JIMÉNEZ, D.M., TEJADA, M.L., SEPÚLVEDA, M.J., OSORIO, J.A., GAONA, T., DIEDERIZ, H., URIBE, H. & MORA, M., compiladores. 2007. Mapa Geológico de Colombia. Escala 1:1'000.000. Instituto colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). Bogotá. Colombia.

GONZALO, W y OSORIO, R., Modelo Digital de Elevación para la Cuenca Río de Oro. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia. 2005. 107p.

GOOSEN, Doeko., Geomorfología de los llanos orientales. En revista de la Academia Colombiana de. Ciencias, Vol. XII. Nº 46. Bogotá Colombia. 1964. Editorial Voluntad. V. 12 (46).

GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C.; and ALVES, F.M. SRTM-based morphotectonic analysis of the Poços de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil. Computers & Geosciences, 2007. V.33, p.10-19

GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C.; STEINERET, S.S., Aplicações dos Modelos de Elevação SRTM em Geomorfologia. Rev. Geogr. Acadêmica 2008. V.2 n.2, p.73-83.

HENGL, T and REUTER, H., Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science. Elsevier.33:772, 2008. 2009.

HENGL, T. Geomorphometry. "The science of digital terrain analysis". 2007 – 2012. Consultado el 12 septiembre de 2014. Disponible en: En <http://geomorphometry.org/>

HUTCHINSON, M. Advances in locally adaptive interpolation of digital elevation models. En: DEMs and Geomorphology. Special publication of the Geography Information System Association (GISA).Tokyo – Japan. 2001.

JARVIS A., H.I. REUTER, A. NELSON, E. GUEVARA, Hole-filled seamless SRTM data V3, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from. 2006, Consultado el 12 septiembre de 2014. Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org>

JARVIS, A., J. RUBIANO, A. NELSON, A. and M. FARROW Mulligan. Practical use of SRTM data in the tropics: Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data. Working Document no. 198, 32 pp. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia. 2004.

JARVIS, A., J. RUBIANO, A. NELSON, A. Y M. FARROW Mulligan. Practical use of SRTM data in the tropics: Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data. Working Document no. 198, 32 pp. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia. 2004.

MARK, David M. "Geomorphometric parameters: a review and evaluation". Geografiska Annaler, 1975: 57A (3-4): 165-177.

MITASOVA, H., MITASL, Interpolation by Regularized Spline with Tension. Mathematical Geology. 1993. VOL. 25 N° 6 p. 641-655.

MITASOVA, H; HOFIERKA, J., Interpolation by regularized spline with tension, II Application to terrain modeling and surface geometry analysis. Mathematical Geology, 1993. 25:657-669.

OLAYA, V. Sistemas de Información Geográfica 10.1 documentation. Consultado el 12 septiembre de 2014. Disponible en: <http://volaya.github.io/librosig/Procesos/Geomorfometria/Geomorfometria.html>

OLAYA, V., Basic Land-Surface Parameters. Developments in Soil Science, Elsevier B.V. 2009. Vol. 33.

OLAYA, V., Hidrología computacional y Modelos Digitales del Terreno. Teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico. 2004. Consultado el 12 septiembre de 2014. Disponible en: www.creativecommons.org.

PIKE, R. Geomorphometry — progress, practice, and prospect. Zeitschrift für Geomorphologie, 1995., 101:221-238.

REUTER, H., NELSON, A., and JARVIS, A. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data. Institute for Environment and Sustainability – Land Management and Natural Hazards. 2007.

REUTER, H.I. et al. Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis. Cap 4. Developments in Soil Science, 2009. Vol. 33. Elsevier B.V.

ROA, L y ULRICH, K., Modelos de elevación digital (MED) a partir de sistemas satelitales. Una introducción y análisis comparativo en la cordillera de Mérida-Venezuela. Revista Geográfica Venezolana v.49 n.1 Mérida. Venezuela. 2008.

RODRÍGUEZ, A. Mapa Geológico del Departamento del Meta. Memoria explicativa. INGEOMINAS. Bogotá D.C. Colombia. 2011.

RODRÍGUEZ, G., RAMOS, K., ZAPATA, G., BERMÚDEZ, J., RAMÍREZ, C., ARANGO, M., Geología de la Plancha 328 San Jorge. Instituto colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). Medellín. Colombia. 2011.

SGC. Servicio Geológico Colombiano. Consultado el 12 septiembre de 2014. Disponible en: http://aplicaciones7.sgc.gov.co/ESTADO_CARTOGRAFIA_MAYO_20/default.aspx

SILVA, I; ALVES, R; RODRIGUES, T., Análise de variáveis morfométricas extraídas a partir de imagem SRTM para elaboração de mapa pedológico. Revista eletrônica do curso de geografia. Campus Jataí – UFG. Brasil. 2013.

SILVA, I; e FURRIER, M., Análise de parâmetros físicos, morfológicos e morfométricos para avaliação de influência neotectônica nas bacias dos riachos timbó e marmelada, afluentes do Rio Itapororoca – PB. Cadernos de Geociências, UFBA. Brasil. 2013. V. 10, N°.1.

SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object - oriented data modelling" Cámara G, Souza RCM, Freitas UM, Garrido J Computers & Graphics, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996.

SREEDEVI. P; SREEKANTH. P; KHAN.H and AHMED.S., Drainage morphometry and its influence on hydrology in a semiarid region: using SRTM data and GIS. Environmental Earth Sciences, 2013. 70(2), 839-848.

TRAVIS, M.R; ELSNER, G.H IVERSON, W.D. Johnson. C.G., VIEWIT: computation of seen areas, slope, and aspect for land-use planning. 1975.

VÉLEZ R, M., Caracterización de facetas en un sector del cañón del río Buey mediante un MDE. Universidad Nacional de Medellín. Colombia. 2006.

WEIBEL, R.; HELLER, M. "Digital terrain modelling". En Maguire et al. 1991, Vol. 1: 269-297.