

**ELABORACIÓN DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES Y
SUBDIVISIÓN DEL TIPO DE SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO DE ORO
PARTE ALTA.**

RAFAEL L. CASTELLANOS SANDOVAL

DISSON ANDRES TORRES HERRERA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2009

**ELABORACIÓN DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES Y
SUBDIVISIÓN DEL TIPO DE SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO DE ORO
PARTE ALTA.**

**RAFAEL L. CASTELLANOS SANDOVAL
DISSON ANDRES TORRES HERRERA**

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Civil**

**Director:
Sully Gómez Isidro
Ing. Civil, M.sc., PhD**

**Co-Director:
Jorge Eduardo Pinto Valderrama
Geólogo**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2009

*A DIOS por permitirme vivir esta etapa
de mi vida...*

*A mi madre Sara y a mi padre Yorguin
por haber depositado su confianza en mi
y haberme dado la oportunidad de lograr
esta meta...*

*A mis hermanos por que con ellos he
compartidos momentos que me han
ayudado a mi formación como persona...*

*A mis compañeros de carrera que de una
u otra forma ayudaron a alcanzar mis
objetivos...*

RAFAEL LEONARDO

*A DIOS Padre, por ser la esencia y luz
de mi vida. . . .*

*A mi madre Margarita y a mi padre
Nelson por su apoyo y esfuerzo a lo largo
de la carrera. . .*

*A Tatiana, por todo su amor y
comprensión. . . .*

*A Sofía, por ser la fuente de inspiración
de mi vida. . . .*

*A mis hermanos Yenny y Fabián, por
ayudarme en mi formación como
persona. . . .*

*A mis amigos, por respaldar y orientar mi
trabajo. . . .*

A Rafael, gracias amigo. . . .

DISSON ANDRES

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración recibida de todos aquellos que hicieron posible la realización de este proyecto y en especial:

A nuestra directora de proyecto, la I.C PhD Sully Gomez Isidro, por haber depositado su confianza en nosotros, por su apoyo y aportes durante el transcurso del presente proyecto.

A nuestro co-director el geólogo Jorge Eduardo Pinto, por su orientación, la colaboración desinteresada y por compartir sus conocimientos en Teledetección y en el Procesamiento Digital de las Imágenes de satélite.

A nuestros amigos, compañeros y profesores que de alguna u otra manera han hecho su aporte en nuestra formación como ingenieros.

CONTENIDO

INTRODUCCION.....	1
1. UBICACIÓN Y DESCRIPCION GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	3
1.1 LOCALIZACIÓN	3
1.1.1 Hidrografía.....	4
1.1.2 Relieve Clima Y Vegetación De Cuenca Del Río De Oro.....	4
1.2 GEOLOGIA.....	5
1.2.1 Geomorfología.....	5
1.2.2 Litoestratigrafía.....	6
1.2.2.1 Neis de Bucaramanga (pEb).....	6
1.2.2.2 Formación Silgará (pDs).....	7
1.2.2.3 Cuarzomonzonita de la Corcova (JTRcg).....	7
1.2.2.4 Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (Jcs).....	8
1.2.2.5 Formación Girón (Jg).....	8
1.2.2.6 Formación los Santos (Kils).....	8
1.2.2.7 Formación Rosablanca (Kir).....	8
1.2.2.8 Depósitos Coluviales o de ladera (Qd).....	9
2. RECOPIACIÓN Y ANALISIS DE LA INFORMACION SATELITAL Y DIGITAL UTILIZADA.....	10
2.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	10
2.1.1 ArcView GIS 3.x.....	13
2.1.1.1 Características del ArcView.....	13
2.1.2 Spring.....	14
2.1.2.1 Características del Spring.....	14
2.2 MODELOS DIGITALES DE ELEVACION.....	15
2.2.1 Información Vectorial (Cartografía Digital).....	16
2.2.2 Modelo Digital de Elevación (MDE) de la Misión Topográfica de Radar.....	17
2.3 TELEDETECCIÓN.....	19
2.3.1 Principios Físicos de la Teledetección.....	19
2.3.2 El Espectro Electromagnético.....	20

2.3.2.1 El espectro visible.....	20
2.3.2.2 El infrarrojo cercano.....	21
2.3.2.3 El infrarrojo medio.....	21
2.3.2.4 El infrarrojo térmico.....	21
2.3.2.5 Las microondas.....	21
2.3.3 Firma espectral.....	21
2.3.4 Imágenes Satelitales.....	22
2.4. DATOS DE CAMPO	24
3. MANEJO DE LA INFORMACION SATELITAL, DE RADAR Y DIGITAL.....	27
3.1. ELABORACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE) A PARTIR DE LA CARTOGRAFIA.	27
3.1.1 Red Irregular de Triángulos (TIN).	28
3.1.2. Peso proporcional al inverso de la distancia "Inverse Distance Weighting" IDW	29
3.1.3 Generación de Cuña "SPLINES".	30
3.1.4 Resolución Espacial del MDE.	32
3.2.MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN A PARTIR DE SRTM	34
3.3 CLASIFICACIÓN DEL SUELO	36
3.3.1 Generación de la Nueva Cartográfica de Suelos.	37
3.3.1.1 Cartografía de Suelos Empleada del POT.	37
3.3.1.2 Cartografía Geológica de la Zona.	38
3.3.1.3 Datos Obtenidos en Laboratorio.	39
3.3.1.4 Cartografía de Suelo Final.	40
3.3.2 Clasificación de Suelo a partir de Imágenes Satelitales.	42
3.3.2.1 Etapa de Clasificación Supervisada.....	44
I. Entrenamiento.....	46
II. Clasificación.....	46
III. Pos-clasificación.....	50
IV.Mapeo	50
4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	52
4.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN	52
4.1.1 MDE para la Cuenca Superior Rio De Oro Y Lato a partir de la Cartografía. ...	55

4.1.2 MDE para la Cuenca Superior Río de Oro y Lato a partir de la Misión Topográfica de Radar SRTM.....	56
4.2 CLASIFICACION SUPERVISADA	58
5. CONCLUSIONES	67
6. RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFIA.....	70
ANEXOS	73

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Funcionamiento de un SIG	11
<i>Figura 2.</i> Formato ráster y vector	12
<i>Figura 3.</i> Planchas digitales para la zona de estudio	16
<i>Figura 4.</i> Modelo digital de elevación del SRTM	18
<i>Figura 5.</i> División del espectro electromagnético	20
<i>Figura 6.</i> Firma espectral para distintos tipos de cubierta	22
<i>Figura 7.</i> Ejemplo de una imagen Landsat 7, San Francisco, California, USA	24
<i>Figura 8.</i> Puntos de muestreo sobre la zona de estudio	26
<i>Figura 9.</i> Red de triángulos irregulares	28
<i>Figura 10.</i> Interpolación IDW.	30
<i>Figura 11.</i> Interpolación Spline.	31
<i>Figura 12.</i> MDE generado a partir del TIN	33
<i>Figura 13.</i> MDE generado a partir del interpolador IDW.	33
<i>Figura 14.</i> MDE generado a partir del interpolador Spline.	33
<i>Figura 15.</i> MDE generado a partir de la misión topográfica de radar (SRTM).	36
<i>Figura 16.</i> Mapa de clasificación de suelos según el POT del municipio de Piedecuesta.	38
<i>Figura 17.</i> Mapa geológico elaborado por la UIS e Ingeominas.	39
<i>Figura 18.</i> Mapa de la nueva clasificación de suelos para la zona de estudio	41
<i>Figura 19.</i> Firma espectral de suelos.	43
<i>Figura 20.</i> Imagen Landsat en falso color y Georreferenciada	45
<i>Figura 21.</i> Fase de Entrenamiento	46
<i>Figura 22.</i> Análisis de muestras Maxver 100%	49
<i>Figura 23.</i> Cuenca Rio de Oro	52
<i>Figura 24.</i> MDE final de la CSRO y de la Cuenca del Lato a partir de la cartografía.	56
<i>Figura 25.</i> MDE de la CSRO y de la cuenca del Lato a partir de imagen SRTM	57
<i>Figura 26.</i> Diagrama de barras del área en km ² de los tipos de suelos	63

<i>Figura 27.</i> Diagrama circular % de area en Km ² de los tipos de suelo.	64
<i>Figura 28.</i> Resultado obtenido de la clasificación supervisada	65
<i>Figura 29.</i> Validación de los suelos.	66

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1.</i> Coordenadas de las planchas digitales del IGAC.	17
<i>Tabla 2.</i> Características de la imagen landsat utilizada.	22
<i>Tabla 3.</i> Características del Sensor Landsat 7 ETM+.	23
<i>Tabla 4.</i> Coordenadas de los puntos de muestreo en la zona de estudio.	26
<i>Tabla 5.</i> Parámetros para la definición de un sistema de coordenadas de proyección en ArcView GIS.	35
<i>Tabla 6.</i> Clasificación de las muestras de suelos.	40
<i>Tabla 7.</i> Evaluación cualitativa del comportamiento mecánico de los suelos según su clasificación.	40
<i>Tabla 8.</i> Nueva clasificación de suelos para la zona de estudio.	41
<i>Tabla 9.</i> Clima por fase.	42
<i>Tabla 10.</i> Características de la bandas de la imagen Landsat.	43
<i>Tabla 11.</i> Puntos georreferenciados provistos por la CDMB.	53
<i>Tabla 12.</i> EMC de los interpoladores.	54
<i>Tabla 13.</i> Matriz de confusión para la clasificación Maxver.	58
<i>Tabla 14.</i> Matriz de confusión para la clasificación Long. Euclidiana.	58
<i>Tabla 15.</i> Desempeño medio del método de clasificación Maxver.	59
<i>Tabla 16.</i> Desempeño medio del método de clasificación Long. Euclidiana.	59
<i>Tabla 17.</i> Matriz de confusión de las muestras SP-SM.	60
<i>Tabla 18.</i> Matriz de confusión de la muestras SP-SC.	60
<i>Tabla 19.</i> Matriz de confusión de la muestras SP.	60
<i>Tabla 20.</i> Matriz de confusión de las muestras Sc1.	61
<i>Tabla 21.</i> Matriz de confusión de las muestras Sc2	61
<i>Tabla 22.</i> Matriz de confusión de las muestras Sc3	61
<i>Tabla 23.</i> Matriz de confusión de las muestras Sc4.	62
<i>Tabla 24.</i> Matriz de confusión de las muestras Rig.	62
<i>Tabla 25.</i> Áreas de clasificación obtenidas de cada grupo.	62

RESUMEN

TITULO: “ELABORACIÓN DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES Y SUBDIVISIÓN DEL TIPO DE SUELOS DE LA CUENCA DEL RÍO DE ORO PARTE ALTA”.*

AUTORES: CASTELLANO SANDOVAL, Rafael Leonardo, TORRES HERRERA, Disson Andrés.**

PALABRAS CLAVES: Río de Oro, Modelo, Elevaciones, MDE, Suelos, Spring, ArcView.

DESCRIPCION

Los objetivos principales de este proyecto fueron la elaboración de un Modelo Digital de Elevaciones de la cuencas del Rio de Oro Parte Alta y Lato, a partir de la cartografía digital disponible en escala 1:25000 con curvas de nivel cada 50 metros e imágenes de la Misión Espacial Topográfica o SRTM con grillas de 90x90 metros, y la delimitación de los tipos de suelo presentes en la zona de estudio haciendo uso de imágenes Landsat 7 ETM+ obtenidas del Servicio Geológico de los Estados Unidos y de mapas digitales con la geología y delimitación de los tipos de suelos de la zona de estudio obtenidos del Plan de Ordenamiento Ambiental Territorial.

Para la generación de los Modelos Digitales de Elevación se emplearon los programas AutoCAD 2006 y ArcView 3.1, el primero facilito el análisis, la visualización, unión y comparación de la información utilizable, el segundo realizo la conversión y procesamientos necesarios para la obtención de un MDE.

En la delimitación de los tipos de suelos se tomaron muestras en campo para la validación de los resultados obtenidos de las imágenes Landsat, para el procesamiento de estas se empleo el software Spring 5.04 realizando la geo-referenciación, muestreo y clasificación de las imágenes con base en una nueva leyenda determinada a partir de los mapas de suelos, geología y de la categorización de las muestras de campo por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

* Proyecto de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora I.C. M.Sc. PhD GÓMEZ ISIDRO, Sully Codirector Geólogo PINTO VALDERRAMA, Jorge Eduardo.

ABSTRACT

TITLE: "DEVELOPMENT OF A DIGITAL ELEVATION MODEL AND SUBDIVIDE OF SOIL TYPES OF PART UP RIO DE ORO BASINS ".

AUTHORS: CASTELLANOS SANDOVAL, Rafael Leonardo, TORRES HERRERA, Disson Andrés.**

KEY WORDS: Río De Oro, Model, Elevations, MDE, Soils, Sprong, ArcView

DESCRIPTION

The main objectives of this project were the development of a Digital Elevation Model of the Upper Río de Oro and Lato basins, from the available digital maps with scale 1:25000, elevation curves each 50 meters and images of the Topographic Space Mission or SRTM with 90x90 meters grids, and the delineation of soil types present in the study area using Landsat 7 ETM + images obtained from the Geological Survey of the United States and digital maps with geology and delineation of soil types in the study area obtained from the Environmental Land Management Plan.

For the generation of Digital Elevation Models the programs ArcView 3.1 and AutoCAD 2006 were used, the first one provides the analysis, visualization, union and comparison of usable information, the second one carries out the conversion and processing needed to obtain an MDE.

In the demarcation of the soil types, field-samples were taken to validate the results obtained from the Landsat images, for the processing of these, the Spring 5.04 software was used performing the geo-referencing, sampling and classification of images based in a new legend determined from the soil and geology maps and from the categorization of field samples by the Unified System of Soil Classification.

* Undergraduate Thesis

**Physis-Mecanic Sciences Faculty. Department of Civil Engineering. Director I.C. M.Sc. PhD GÓMEZ ISIDRO, Sully Codirector Geólogo PINTO VALDERRAMA, Jorge Eduardo.

INTRODUCCION

La modelación hidrológica simula los procesos físicos que ocurren en un sistema hidrológico. Estos modelos necesitan información fisiográfica, la cual era obtenida tradicionalmente de mapas elaborados a través de procedimientos gráficos o de mediciones de campo, en la actualidad debido al avance tecnológico, esta información ha comenzado a extraerse de Modelos Digitales de Elevación e Imágenes Satelitales.

Los Sistemas de Información Geográfica juegan un papel fundamental en este sentido, ya que tienen la capacidad para extraer automáticamente los parámetros necesarios para la modelación hidrológica.

El presente trabajo tuvo como objetivo principal la elaboración del Modelo Digital de Elevaciones y clasificar los diferentes tipos de suelo pertenecientes a la cuenca Superior del Rio de Oro y a la cuenca del Lato, como insumo para el desarrollo de modelos hidrogeológicos.

Para alcanzar este objetivo se realizaron las siguientes actividades principales:

- Desarrollo de dos Modelos Digitales de Elevación de la superficie de la cuenca, uno a partir de cartografía digital y otro a partir de imágenes de la Misión Topográfica de Radar.
- Clasificación del tipo de suelo a partir de imágenes satelitales del sensor Landsat 7 ETM+.

Para una mejor comprensión del presente documento a continuación describimos su estructura y la idea de los aspectos fundamentales que lo componen. En el capítulo uno se centra sobre las Cuenca Superior del Rio de Oro y del Lato, sus generalidades, superficie, climatología, hidrología y geología local. El capítulo dos se centra sobre la recopilación y el análisis de la información necesaria para el desarrollo del proyecto, cartografía digital, imágenes de radar y satelitales. El capítulo tres describe los procedimientos llevados a cabo sobre la información recopilada para el alcance de los objetivos. El capítulo cuatro presenta el análisis de los Modelos Digitales de Elevación y de la clasificación del tipo de suelo obtenido. Las conclusiones y recomendaciones se presentan al final del documento al igual que una guía para el manejo de los software empleados en este proyecto.

1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

La Cuenca Superior del Río de Oro (CSRO) forma parte de la Cuenca del Río de Oro y se encuentra enmarcada hidrológicamente por la Cuenca Superior del Río Lebrija (CSRL), se encuentra localizada sobre el Macizo de Santander, conformado por rocas ígneas metamórficas, preferencialmente por el Neis de Bucaramanga, el cual se encuentra altamente meteorizado por los efectos del sistema de la Falla de Bucaramanga – Santa Marta.

1.1 LOCALIZACIÓN

La CSRO se localiza en el extremo norte del departamento de Santander, sobre la vertiente occidental de la cordillera oriental, al sur del Área Metropolitana de Bucaramanga y al oriente del municipio de Piedecuesta, entre las coordenadas Gausianas 1'115.000 a 1'125.281 Este y 1'262.761 a 1'278.305 Norte con origen en Bogotá , (ver figura 1.1). Posee alturas sobre el nivel del mar que van desde los 3500 m.s.n.m. en el alto el Picacho hasta los 1100 m.s.n.m en la estación Conquistador sobre el Río de Oro. Limita al norte con la micro cuenca del Río Tona, al nororiente con la mesa de Berlin y el Río Manco, al sur occidente con la subcuenca del Río Oro Medio y al occidente con las micro cuencas de Río Frio y Lato. La micro cuenca tiene un área aproximada de 80 km² y constituye la base principal de suministro de agua para el municipio de Piedecuesta junto con el Río Lato.

1.1.1 Hidrografía.

El Río de Oro nace a una altura de 3500 m.s.n.m con aportes de las micro cuencas de la Quebrada Santa Rita, Colepato, Rasgon y Sevilla. Sobresale como punto de referencia (divisoria de aguas) el sitio conocido como El Picacho, localizado en el km. 50 de la vía Bucaramanga – Pamplona. El Río de Oro corre inicialmente al sur, gira en forma de U cambiando su dirección al norte, aguas abajo del área urbana del municipio de Piedecuesta, el río recibe a la quebrada Grande, Sorata y el río Lato. En la zona del municipio de Girón recibe las aguas del río Frio, quebrada la Iglesia, Chimita y las corrientes de la escarpa de la meseta de Bucaramanga; para luego unirse con el Río Suratá para formar el Río Lebrija.

1.1.2 Relieve Clima Y Vegetación de Cuenca del Río de Oro.

El relieve presenta un sector nororiental montañoso con paisaje de cordillera y fuerte pendiente, separado por la falla de Bucaramanga, de una zona suroccidental conformada por plataformas con topografías suave y ondulado en estado avanzado de erosión. Este relieve montañoso y variado crea una gran cantidad de microclimas, siendo la altura promedio 1735 m.s.n.m., la temperatura media es de 18°C, y la precipitación media multianual; de acuerdo a la distribución de isoyetas de 1475 mm. El 50 % del área se encuentra dentro del piso pre montano o clima medio, el 35 % se ubica dentro de la vida del bosque húmedo pre montano, y el 15 % dentro de la zona de vida de bosque húmedo montano bajo.

En la zona se presenta un sistema bimodal de lluvia con dos periodos secos y dos periodos húmedos, intercalados durante el año, fuertemente influenciado por el movimiento de la zona de convergencia intertropical. El periodo seco inicia a finales de Diciembre y finaliza a finales de Marzo, mientras el segundo inicia a finales de Junio y finaliza a mediados de Septiembre. La precipitación es de tipo

orográfica y convectivo. Las masas de nubes viajan desde el valle del Magdalena Medio hacia el oriente donde la mesa de Lebrija (1100 m.s.n.m) actúa a manera de cortina ocasionando que únicamente las masas altas de nubes saturadas logren superarlo. Estas masas de nubes al encontrarse con la cordillera oriental, producen mayor pluviosidad, mientras que la zona inferior del Río de Oro permanece seca.

1.2 GEOLOGIA

Para el modelo hidrogeológico se requiere identificar todos los aspectos geológicos, estructurales y morfológicos que actúan en la región y que son indispensables para la identificación y ubicación de acuíferos y zonas de recarga que condicionan el modelo hidrológico.

1.2.1 Geomorfología

La geomorfología representa las características más generales del área estudiada y su análisis puede revelar rasgos sobre el patrón de escorrentía, los ámbitos morfológicos relacionados con áreas dispuestas para la recarga, tránsito y descarga del agua subterránea.

Dentro de nuestra zona de estudio encontramos en la zona de El Picacho la depresión sinclinal de El Picacho, que es un pliegue muy amplio cuyo eje tiene una dirección NW-SE y el núcleo lo constituye areniscas cuarzosas de la formación Los Santos. De igual forma se puede observar una cima anticlinal donde se evidencia un pliegue constituido por las areniscas compactadas de la misma formación.

En la zona de El Picacho se exhiben escarpes con pendientes abruptas, casi verticales, relacionados con fallamientos muy activos regionalmente.

Se identifican facetas de falla que muestran la presencia de fallas como son la Falla Sevilla y la Falla Río de Oro. La presencia de la silla de falla sobre la vereda Granadillo, identifica el trazo de las falla Mensulí.

En el sector del Peaje del Picacho se identifican zonas de depresiones carsticas sobre la formación Rosablanca. Sobre la misma zona se pueden encontrar pendientes de denudacionales, con un alto grado de disolución de la formación Rosablanca.

1.2.2 Litoestratigrafía.

Sobre la zona de la cuenca se encuentran rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias con edades que se han reportado desde el Precámbrico hasta el Cretácico inferior, este conjunto se encuentra cubierto parcial y discontinuamente por depósitos sedimentarios de edad reciente y origen diverso. Las rocas metamórficas comprenden el Neis de Bucaramanga considerado de edad proterozoico y la Formación Silgara de edad paleozoica; las rocas intrusivas son preferiblemente cuarzomonzonitas (La Corcova y Santa Bárbara) del jurasico y cortan la secuencia metamórfica. El conjunto de rocas sedimentarias comprende la formación Girón del Jurásico Tardío y las formaciones cretácicas: Los Santos y Rosablanca.

1.2.2.1 Neis de Bucaramanga (pEb).

Constituye la parte basal del Macizo de Santander, se identifican rocas metamórficas de alto grado y origen sedimentario, consiste en rocas de alto grado de metamorfismo que abarcan fundamentalmente tres tipos composicionales: Neis biotítico, Neis anfibólico, en menor grado Neis cuarzofeldespatico y migmatitas. En

nuestra cuenca podemos encontrar Neis cuarzofeldespático, hacia el sector SW a la altura de la vía Piedecuesta – Sevilla.

En el Neis de Bucaramanga sobresalen sus pendientes abruptas y un patrón de drenaje subdendritico a sudparalelo. El grado de meteorización de estas rocas es variable pero las de tipo cuarzofeldespatico muestran un grado medio de meteorización, este tipo de roca produce niveles meteorizados de tipo arenoso.

1.2.2.2 Formación Silgará (pDs).

Corresponde a una secuencia de rocas clásticas metamorfizadas de estratificación delgada. La formación Silgará se presenta en la zona norte de nuestra cuenca limitada por las fallas Río de Oro y Sevilla como fajas discontinuas con orientación NS y se distinguen por presentar una estructura esquistosa bien definida y muy fina. En el sector del la quebrada el Rasgon se encuentra altamente meteorizada, presentando perfiles de suelo, con colores que varían de rojo a naranja; este proceso de meteorización produce perfiles de suelo con una textura fina y estructura esquistosa. A partir de esta formación se desarrolla un tipo de suelo arenoso arcilloso de color amarillo a naranja y el espesor de suelo puede alcanzar hasta 20 cm.

1.2.2.3 Cuarzomonzonita de la Corcova (JTRcg).

Aflora en la vereda de Granadillo del municipio de piedecuesta en dirección NS, donde presenta una topografía de pendiente moderada en esta zona se observan afloramientos de roca cuarzofeldespática de color claro, con un grado alto de meteorización, producto de meteorización mecánica y química, lo que origina la formación de minerales de arcilla, los perfiles de suelo originados por la meteorización, presentan una textura de tipo arenosa.

1.2.2.4 Cuarzomonzonita de Santa Bárbara (Jcs)

Es de color rosado, rosado naranja a gris violáceo, equigranular. Se presenta hacia la parte alta de la cuenca del Río de Oro, sobre la zona límite con el Paramo de Berlin, esta unidad de roca está afectada por meteorización esferoidal y desarrolla suelos residuales arenosos espesos muy susceptibles a la erosión hídrica.

1.2.2.5 Formación Girón (Jg)

Se localiza hacia la parte alta de la cuenca del Río de Oro, en el Picacho sobre la vía a Bucaramanga. Esta formación se describe y define por rasgos geomorfológicos y estratigráficos, debido a que en la zona no se presentan afloramientos que permitan definir mejor su unidad. La formación Girón se encuentra constituida por areniscas de grano medio intercalado por limolitas violáceas. Texturalmente se distingue por ser una arenisca mal calibrada, de granos subangulares a redondeadas, muy compacta y con baja porosidad. La formación Girón reposa discordante sobre la formación Silgará y Cuarzomonzonita de Santa Bárbara.

1.2.2.6 Formación los Santos (Kils)

Se encuentra en el alto el Picacho, compuesto principalmente por cuarzoareniscas blancas, ligeramente gravosa y conglomeráticas de grano muy grueso a fino, muy compactas con superficies de oxidación en la zona intermedia. También aflora hacia el sector de Llano Adentro, presentándose en contacto fallado por la formación Rosablanca y Silgara, y discordante con la cuarzomonzonita de Santa Bárbara.

1.2.2.7 Formación Rosablanca (Kir)

Se presenta en el sector del Alto del Picacho y Llano Adentro. Las calizas de la Formación Rosablanca presentan niveles fosilíferos, con conchas fragmentadas distribuidas aleatoriamente, estratificación plano paralela y venas de calcita,

intercalados con shales negros carbonosos hacia el tope. Debido a la composición química, tanto de la roca como del agua se observan zonas de alta disolución en las pendientes estructurales ubicada en el sector del Peaje. Igualmente se ubica, en los alrededores del sector del picacho sobre una topografía de considerable altura formando escarpes en algunas zonas y paisajes cársticos en otras. La meteorización es de grado medio – alto, dando como resultado suelos residuales con espesores de materia orgánica de hasta 40 cm.

1.2.2.8 Depósitos Coluviales o de ladera (Qd)

Son depósitos acumulados, por lo general en la base de escarpes, provienen del desprendimiento de materiales de laderas adyacentes debido a la acción de la fuerza de gravedad. En el sector de el Picacho se origina un depósito coluvial localizado hacia la parte baja de las pendientes estructurales, que forman la formación los Santos. En este sector los bloques son angulares, con un diámetro de hasta 2 m, sostenidos por una matriz de tamaño de grano, arena gruesa a grava, con espesor aproximado de 15 m.

2. RECOPIACIÓN Y ANALISIS DE LA INFORMACION SATELITAL Y DIGITAL UTILIZADA

El objetivo principal de este proyecto es la elaboración del Modelo Digital de Elevaciones y la clasificación de los diferentes tipos de suelo pertenecientes a la cuenca Superior del Río de Oro y a la cuenca del Lato, como insumo para el desarrollo de modelos hidrogeológicos.

La combinación de información cartográfica digital y de sensores remotos con herramientas de análisis espacial, enmarcados en un Sistema de Información Geográfica (SIG), proporciona un marco idóneo para la puesta en práctica y evaluación de técnicas de análisis de las características del terreno y de la hidrología de un área (Mertes et al., 1999).

En este sentido, la elaboración del modelo digital de elevaciones y la clasificación del tipo de suelo para la cuenca Superior del Río de Oro y del Lato constituye el producto del procesamiento y la interrelación de información obtenida a partir de imágenes Landsat ETM+, de la Misión Topográfica de Radar y de la información vectorial del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

2.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una colección organizada de hardware, software y datos geográficos diseñados para la eficiente captura, almacenamiento, integración, actualización, modificación, análisis espacial, y despliegue de todo tipo de información geográficamente referenciada. (ESRI, 1993).

Los SIG permiten separar la información en diferentes capas temáticas y almacenarlas independientemente, por esta razón se hacen una herramienta indispensable en la elaboración de un trabajo, ya que se puede acceder a cada una de estas capas de una manera ágil, rápida y sencilla.

Un SIG permite la representación del mundo, almacenando información sobre éste, en una serie de niveles temáticos.

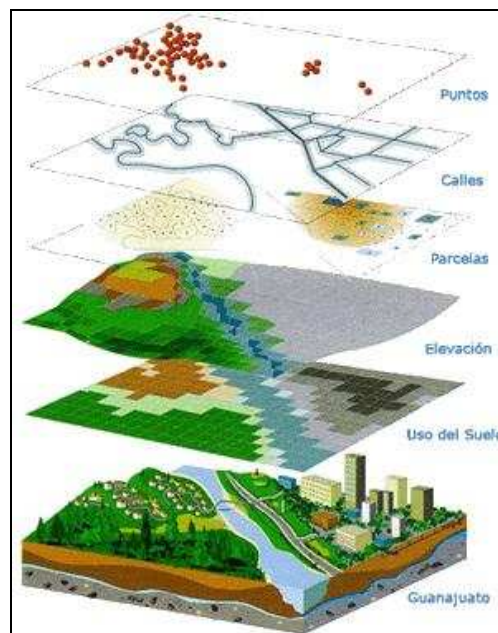


Figura 1. Funcionamiento de un SIG

Fuente: <http://dataplusdateunsupplement.blogspot.com>

Los SIG pueden ser representados a través de dos tipos de datos espaciales: *Vectorial* y *Raster*. Estos formatos se diferencian por la manera de almacenar los datos geográficos y por su apariencia.

En el formato Vectorial la información real es representada por puntos y líneas que definen sus límites, estableciendo un sistema de coordenadas para representar cada objeto. Un punto es representado por un grupo de coordenadas (X, Y, Z); una línea es un conjunto de coordenadas que corresponden a sus vértices

($X_1Y_1Z_1$; $X_2Y_2Z_2$; $X_3Y_3Z_3$) y un área, o sea un polígono es una línea cerrada y rellena.

Por su parte en el formato Ráster, el espacio está representado por un conjunto de celdas adyacentes llamadas *píxel*, que representan las unidades de información espacial. Estas establecen su localización por un sistema de referencia en filas y columnas, acompañado por la extensión del mapa y el tamaño de la celda. Los píxeles no mantienen una relación mutua entre sí. En la cobertura de tipo Ráster, cada celda tiene un valor o código asignado, correspondiente al tipo de información temática que representa la celda.

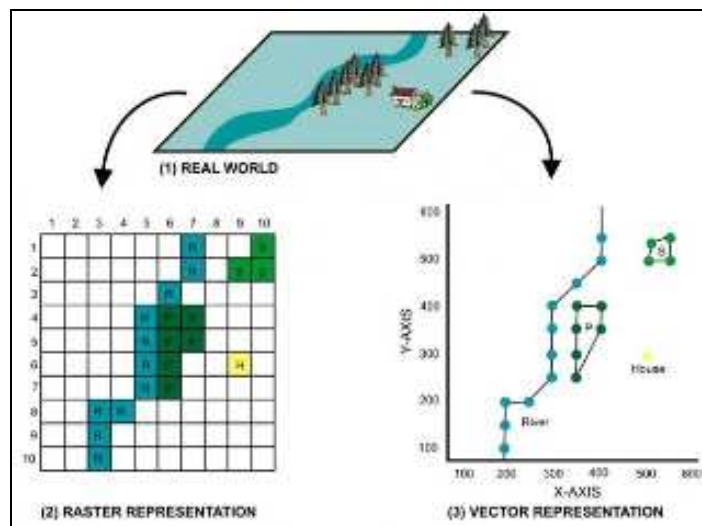


Figura 2. Formato ráster y vector
Fuente: <http://cookbook.hlurb.gov.ph>

Para la elaboración del proyecto se utilizaron los SIG ArcView y Spring, ya que se contaba con el conocimiento previo del ArcView, software que se maneja en la materia SIG dictada en el programa de pregrado de Ingeniería Civil, y Spring fue el software que cumplía las características necesarias para la realización de este trabajo..

2.1.1 ArcView GIS 3.x.

ArcView es un SIG que permite la visualización, exploración, consulta y análisis de datos geográficos implementando el manejo de información espacial con datos alfanuméricos de una forma fácil y amigable.

ArcView puede complementarse a través de sus extensiones las cuales son objetos que se pueden agregar a un proyecto existente con el fin de incluir nuevas herramientas y funciones que permitan realizar acciones especializadas.

Para el presente trabajo se utilizó extensión Gridmachine facilitada como una versión de prueba para estudiantes por el sitio web ECOGIS (www.ecogis.de), esta herramienta fue de vital importancia ya que es la que permite la interacción de datos entregados por el formato Raster de la SRTM y el SIG ArcView.

2.1.1.1 Características del ArcView.

- Explorar y administrar la información geográfica en múltiples formatos.
- Visualizar y consultar la información geográfica y alfanumérica.
- Crear y mantener los metadatos de la información catalogada.
- Crear el modelo de datos apropiado a las necesidades de cada usuario.
- Acceder de manera inmediata a servicios de Internet a través del servidor de aplicaciones ArcIMS.
- Realizar todo tipo de edición gráfica y alfanumérica gracias a su potente y avanzado entorno de edición.
- Realizar tareas de análisis avanzado tanto de los datos geográficos como los alfanuméricos.
- Producir cartografía de muy alta calidad.
- Permitir una personalización rápida y sencilla del entorno de trabajo.
- Acceder a funciones de geoprocesamiento mediante distintos entornos.

- Gestionar las propiedades de etiquetado de un mapa desde un entorno centralizado.

2.1.2 Spring.

SPRING es un procesador de datos geográficos para desarrollo de Sistemas de Información Geográfica, su principal característica es que integra en su funcionalidad un procesador de imágenes, para tratamiento de datos obtenidos mediante teledetección. Gracias a esta característica tan poco común en el mercado, SPRING realiza eficientemente la integración de datos con estructura vectorial y datos matriciales en una representación sobre un ambiente único.

SPRING es un producto desarrollado por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales INPE, de Brasil, con la cooperación de varias agencias estatales y de la industria privada, un software de dominio público, que puede ser adquirido a través de pagina web ("<http://www.dpi.inpe.br/spring>"), con solo registrarse en el sitio.

2.1.2.1 Características del Spring.

- Opera como un banco de datos geográfico sin fronteras y soporta un gran volumen de datos (sin limitaciones de escala, proyección y "huso"), manteniendo la identidad de los objetos geográficos a lo largo de todo el banco.
- Administra tanto datos vectoriales como datos raster y realiza la integración de datos de Teledetección en un único ambiente gráfico computacional.
- La lectura de imágenes Landsat, Sport, ERS -1 y NOAA y Procedimiento de imágenes, incluyendo registro y correcciones geométricas, mosaicas de imágenes, filtrajes espaciales, transformaciones IHS, operaciones aritméticas, clasificadores estadísticos y por segmentaciones de áreas y

cuencas, matrices de confusión, técnicas markovianas de post clasificación de imágenes, entre otras utilidades.

2.2 MODELOS DIGITALES DE ELEVACION

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) son estructuras numéricas de datos que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno (Felicísimo, 1994). Los más comunes son los de estructura tipo raster, que consiste en una malla o matriz de celdas cuadradas con la información de elevación en cada celda. También existen otros de tipo vectorial llamados Res Irregular de Triángulos (TIN), los cuales se sobreponen sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve.

El problema más importante de los modelos basados en estructuras vectoriales es que generan una estructura más difícil de manejar que la matriz regular (raster), por tal motivo se utilizará la estructura tipo raster para la elaboración del MDE.

En los MDE tipo raster, la ubicación de la celda tiene implícito el concepto de fila, columna, georreferenciada en algún sistema de coordenadas geográficas o de proyección plana conocida.

Un MDE tiene información suficiente para definir propiedades de la red de drenaje superficial y de la cuenca hidrológica.

2.2.1 Información Vectorial (Cartografía Digital).

Uno de los insumos para la realización del MDE fue una base altimétrica de alta resolución, que consistió en un archivo digital vectorial de curvas de nivel con equidistancia de 50 m, para alturas entre los 900 y 3500 msnm, a escala 1:25000, con coordenadas planas (proyección Gauss-Krueger modelo de la tierra Hayford o internacional y datum horizontal Bogotá) y cotas geoidales referidas al cero oficial de Colombia (Buenaventura).

Dicha base, fue provista por el Grupo de Predicción Hidroclimático (GPH) de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander (UIS) y editadas por el Grupo de Investigación GEOMATICA UIS a partir de la cartografía del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

En la *Figura 3* se muestran las 5 (cinco) hojas digitales que fueron seleccionadas y empalmadas a fin de constituir la estructura geográfica de referencia para la CSRO y la Cuenca del Lato, en la *Tabla 1* se muestran los valores máximos y mínimos de las coordenadas que lo componen.

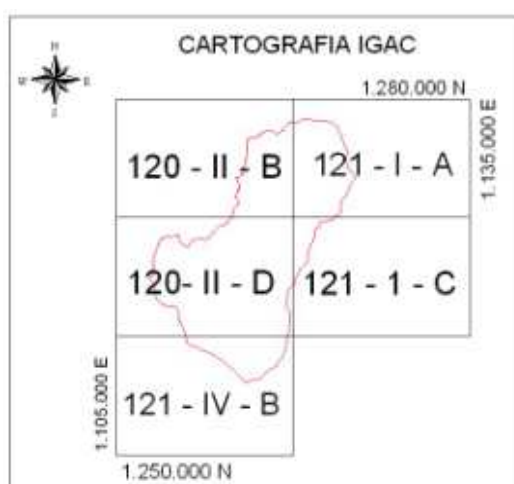


Figura 3. Planchas digitales para la zona de estudio.

Tabla 1. Coordenadas de las planchas digitales del IGAC.

PLANCHA IGAC	ESCALA	COORDENADAS			
		ESTE		NORTE	
		MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
120-IV-B	1:25000	1.105.000	1.120.000	1.250.000	1.260.000
120-II-D		1.105.000	1.120.000	1.260.000	1.270.000
121-I-C		1.120.000	1.135.000	1.260.000	1.270.000
120-II-B		1.105.000	1.120.000	1.270.000	1.280.000
121-I-A		1.120.000	1.135.000	1.270.000	1.280.000

2.2.2 Modelo Digital de Elevación (MDE) de la Misión Topográfica de Radar.

En febrero del 2000 la NASA, la Agencia Nacional de Inteligencia Geo-Espacial (NGA), y las Agencias Espaciales de Alemania e Italia lanzaron la Misión Topográfica de Radar (SRTM) la cual tuvo como objetivo la obtención de datos digitales topográficos de la tierra, con una resolución de 3 segundos de arco (90x90metros) de tamaño de grilla y una precisión absoluta altitudinal mínima de unos 12 metros. Sin embargo, y no obstante que los modelos digitales de elevación obtenidos de SRTM presentan una mayor calidad en cuanto al contenido de la información, no están exentos de presentar problemas para su análisis. El más importante de ellos es la falta de información ocasionada principalmente por la no medición del terreno en zonas donde la pendiente es mayor que el ángulo de incidencia del radar.

Para el presente trabajo se utilizaron 4 MDE que se encuentran entre los 6° y 8° de latitud norte y entre los 72° y 74° de longitud oeste, de 3 grado de arco de extensión y 90 metros de resolución espacial obtenidos del sitio web: (<ftp://e0srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/SRTM3>).

En este sitio se pueden descargar datos SRTM de diversos sectores del planeta, en coordenadas geográficas referidas al datum horizontal *WGS84* y al datum vertical *EGM96*.

La *Figura 4* muestra un modelo digital de elevación del SRTM la escala de grises representa en negro las zonas más altas y en blanco las zonas más bajas.

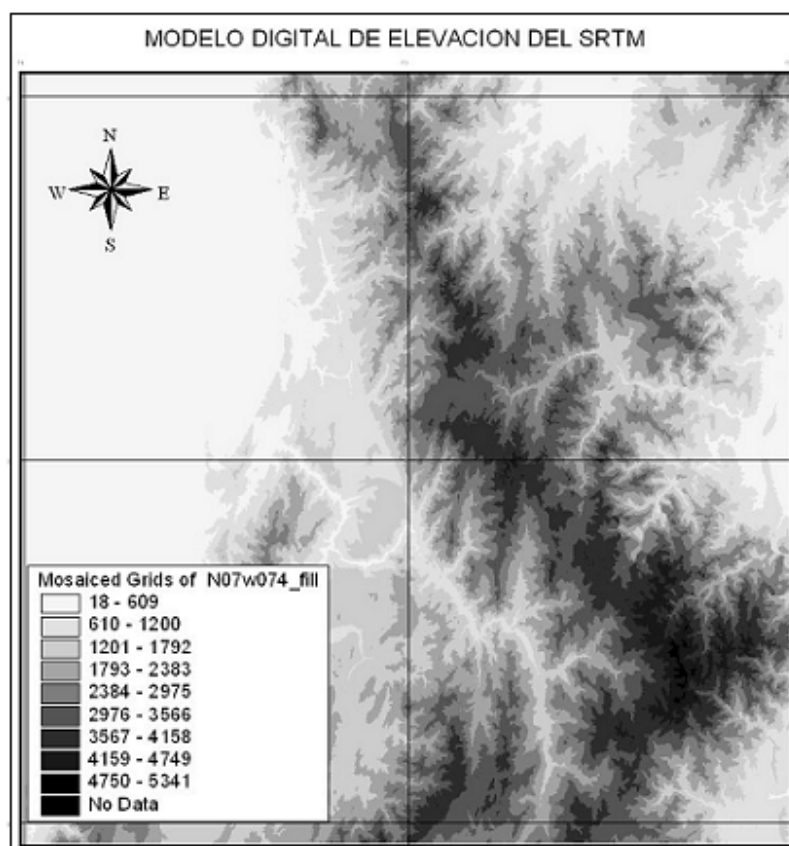


Figura 4. Modelo digital de elevación del SRTM.

2.3 TELEDETECCIÓN

La Teledetección se conoce como la técnica de adquisición y posterior tratamiento de datos de una superficie o fenómeno, a través del análisis de información adquirida por un instrumento que no está en contacto físico directo con él. Se basa en que cada objeto, área o fenómeno emite un espectro electromagnético específico, en función de su propia naturaleza y de las radiaciones que recibe. La reflectancia de ese espectro electromagnético se denomina firma espectral, la cual hace distinguible a ese objeto, superficie o fenómeno de los demás.

2.3.1 Principios Físicos de la Teledetección.

Los sensores de los satélites reciben la información de un objeto a través de la interacción del flujo de radiación que este emite y se dirige hacia el sensor. Este flujo puede ser, en cuanto a su origen, de tres tipos:

- Radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado)
- Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico)
- Radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar)

Las técnicas basadas en los dos primeros tipos se conocen como teledetección pasiva, es decir, los sensores pasivos de teledetección reciben la señal de una fuente de luz o energía externa reflejada por la superficie de los cuerpos. Al contrario de la teledetección activa se basan en que los sensores emiten su propia fuente de energía que va directo hacia los cuerpos y reciben la señal de retorno (radares, sonares, láser).

2.3.2 El Espectro Electromagnético.

La radiación electromagnética se presenta como una distribución continua de frecuencias que se conocen como espectro electromagnético.

Dicho espectro suele estar constituido por una serie de bandas espectrales donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar.

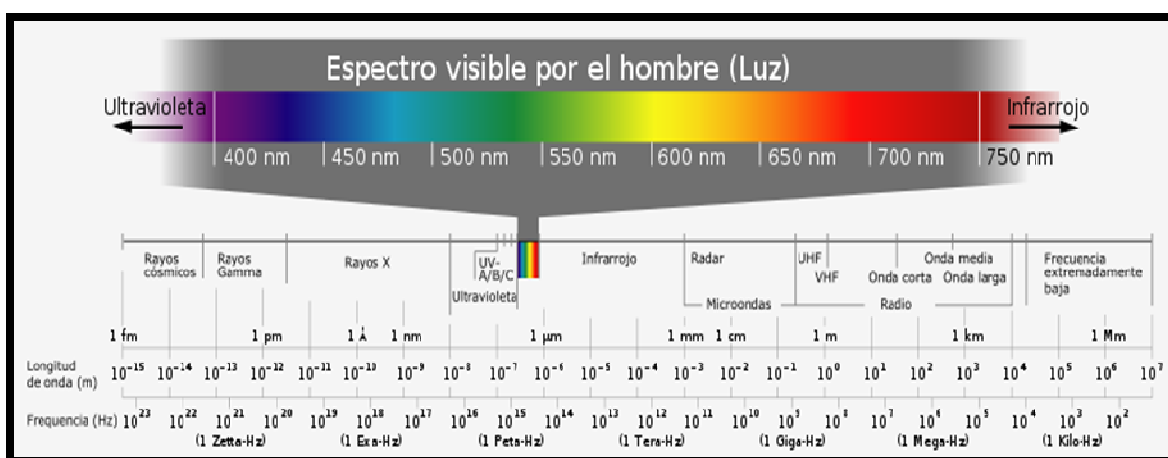


Figura 5. División del espectro electromagnético

Fuente: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Electromagnetic_spectrum-es.svg

La teledetección se enfoca de manera particular en los espectros electromagnéticos producto de la interacción de los rayos electromagnéticos generados durante el intercambio energético entre la Tierra y el Sol. En esta relación se destacan por su uso los siguientes espectros:

2.3.2.1 El espectro visible. Comprende en el intervalo de onda de 0.38 mm hasta 0.78 mm. Este intervalo es el único visible por el ojo humano y coincide con la longitud de onda donde es máxima la radiación solar.

2.3.2.2 El infrarrojo cercano. Comprende el intervalo de onda de 0.78 mm hasta 1.3 mm. Banda importante para diferenciar masas vegetales y concentraciones de humedad.

2.3.2.3 El infrarrojo medio. Comprende el intervalo de 1.3 mm hasta 8 mm. En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de luz solar y de emisión de la superficie terrestre, por lo que hay muchas dificultades. Este dominio es destinado a los estudios de contenido de humedad de la actividad clorofiliana.

2.3.2.4 El infrarrojo térmico. Comprende el intervalo de 8 mm hasta 14mm. Es la banda donde emiten energía todos los cuerpos de la superficie terrestre.

2.3.2.5 Las microondas. Desde 1mm. Poseen la propiedad de ser transparente a la cubierta nubosa, pero también de llevar asociada muy poca energía.

Los primeros cuatro dominios y otros del espectro magnético, delimitan el campo de la teledetección pasiva.

2.3.3 Firma espectral.

Cada tipo de superficie interacciona con la radiación de manera diferente, absorbiendo unas longitudes de onda muy concretas y reflejando otras diferentes en unas proporciones determinadas. Esta característica hace posible que se puedan identificar los distintos objetos: suelo, vegetación, agua, etc. ya que mediante experimentos de laboratorio se ha podido caracterizar el comportamiento de estas distintas superficies al recibir radiación y caracterizando los porcentajes de reflexión, absorción y transmisión. La radiación reflejada en función de la longitud de onda se le conoce como firma espectral de la superficie.

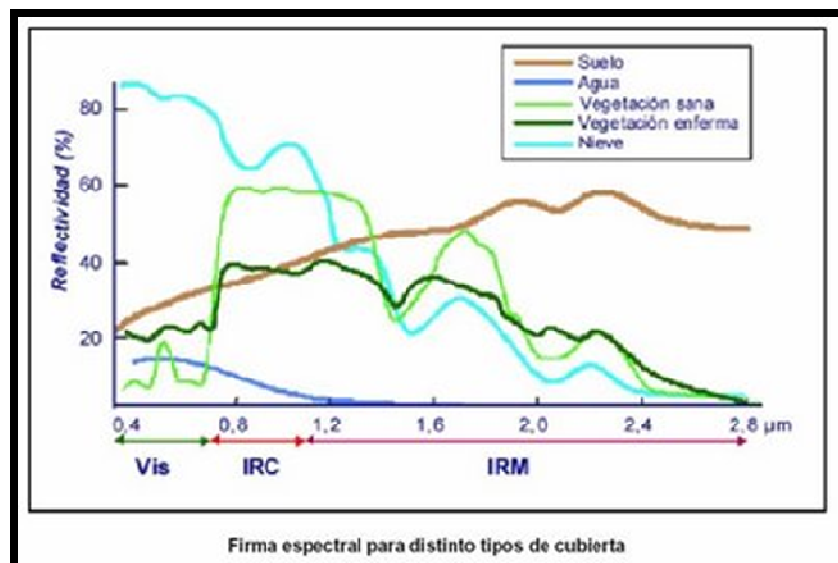


Figura 6. Firma espectral para distintos tipos de cubierta.
 Fuente: <http://fanpaulieb.blogspot.com/>

2.3.4 Imágenes Satelitales.

Como información Satelital, se utilizó una imagen correspondiente al satélite Landsat ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) cuyas bandas utilizadas para la clasificación se describe en la *Tabla 2*, obtenidas del sitio web de la United States Geological Survey del aplicativo USGS Global Visualization Viewer. (http://glovis.usgs.gov/ImgViewer/ImgViewer.html?limitMissions=FALSE&mission=LANDSAT_ARCHIVE&sensor=SLCOFF&lat=NaN&lon=NaN).

Sus características relacionadas a su resolución espacial y espectral se detallan en la *Tabla 3*.

Tabla 2. Características de la imagen landsat utilizada.

Estudio	Satélite	Sensor	Bandas	Path/Row	Fechas
Suelos	Landsat 7	(ETM+)	4 IRc (0.76-0.90 μm)	7/55	04/01/2003
			5 Mir (1.55-1,75 μm)		
			7 Mir (2,08-2,35 μm)		

Tabla 3. Características del Sensor Landsat 7 ETM+.

Bandas	Longitud de onda (μm)	Espectro	
1	(0,45-0,52)	Azul	B
2	(0,52-0,60)	Verde	G
3	(0,63-0,69)	Rojo	R
4	(0,76-0,90)	infrarrojo cercano	IRc
5	(1,55-1,75)	Infrarrojo medio	Mir
6	(10,40–12,50)	Infrarrojo térmico	Tir
7	(2,08-2.35)	Infrarrojo medio	Mir
8	(0,52-0,90)	Visible	
Resolución espacial: 30x30 m. (Banda 6 =60x60 m)			

Dichas imágenes se importaron y georreferenciaron al sistema de proyección Transverse Mercator y Datum Internacional o de Hayford. (Elipsoide asociado al Datum Bogotá). Sobre estas se superpuso un vector correspondiente a la Cuenca Superior Río de Oro y Cuenca del Lato utilizado como referencia para el recorte del área de interés.

Para el mapeo de los suelos se utilizó una imagen del satélite Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) correspondiente a la fecha 04/01/2003. La fecha elegida fue en época de verano, donde se maximiza las diferencias espectrales percibidas por el sensor.

En la *Figura 7* se observa una imagen de ejemplo del Satélite Landsat 7.



Figura 7. Ejemplo de una imagen Landsat 7, San Francisco, California, USA.
Fuente: <http://zuserver2.star.ucl.ac.uk/~idh/apod/ap990514.html>

2.4 DATOS DE CAMPO

Desde disciplinas y escalas muy diferentes, (análisis de productos de sensores remotos: Congalton, 1988; y estudios de suelos: Upchurch y Edmons, 1991) coinciden en destacar que, en esencia, en el procedimiento de muestreo existen tres elementos claves: el tamaño de la muestra (es decir: cantidad de puntos muestreados), el volumen de cada muestra en sí misma y la localización de cada punto de muestra (es decir: distribución espacial de las muestras). De allí surgen los diferentes tipos de estrategias de muestreos, cada uno con sus pros y sus contras en función del caso a analizar.

En este proyecto se empleó el procedimiento de muestreo de distribución espacial de las muestras, con un menor número de muestras.

Se recolectó información sobre 6 sitios en la zona centro y norte del área de estudio, donde se caracterizaba por cambiar significativamente su origen geológico. Para ello se determinó una leyenda compuesta de la clasificación de las muestras de suelos obtenidas, teniendo en cuenta el clima de las zonas y el mapa geológico, realizado por INGEOMINAS y la UIS en el 2006. Las muestras de suelos tomados de la zona de estudio fueron caracterizados por medio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), ya que esta clasificación se basa en las propiedades de plasticidad y en la distribución del tamaño de grano, factores importantes a la hora de especificar el comportamiento mecánico (permeabilidad, compresibilidad, resistencia al corte y tubificación) del suelo.

La *Figura 8* revela los puntos de muestreo sobre la zona de estudio y la *Tabla 4* proporciona las especificaciones de las coordenadas y del tipo de suelo presente en cada uno de los puntos de sondeo.

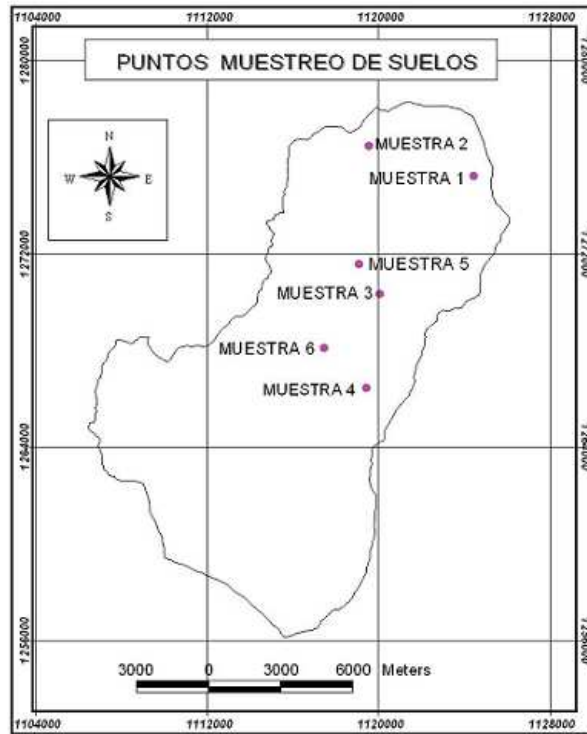


Figura 8. Puntos de muestreo sobre la zona de estudio.

Tabla 4. Coordenadas de los puntos de muestreo en la zona de estudio.

MUESTRA N°	COORDENADAS PLANAS	
	Norte	Este
1	1275224	1123786
2	1276457	1119457
3	1270333	1119893
4	1266448	1119358
5	1271598	1119041
6	1268092	1117600

3. MANEJO DE LA INFORMACION SATELITAL, DE RADAR Y DIGITAL

Cabe recordar que para todo el procesamiento digital de imágenes satelitales, de radar y cartográfica, es necesario antes de realizar cualquier procedimiento, tener en cuenta cuales son los objetivos finales del trabajo en que se requieran ocupar estos datos, en este caso la elaboración del MDE pretende obtener el mayor provecho de la cartografía digital e imágenes de radar al igual que la clasificación del tipo de suelo procura sacar el mayor provecho de una imagen satelital Landsat.

Teniendo claro lo anterior se realiza el análisis del material que se pretende trabajar, y de acuerdo a esto, comenzar a realizar todos los procedimientos y procesamientos respectivos en post del resultado final.

3.1. ELABORACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (MDE) A PARTIR DE LA CARTOGRAFIA.

La construcción de un MDE a partir de la información vectorial es básicamente un problema de interpolación, ya que se desea generar a partir de un conjunto de coordenadas (X, Y, Z) distribuidas irregularmente, un nuevo conjunto de puntos localizados en los nodos de una red regular de forma que la superficie interpolada sea una representación de la original con una pérdida mínima de información.

Por esta razón para la elaboración del MDE se utilizó el software ArcView GIS 3.1, el cual utiliza diferentes tipos de interpoladores geométricos los cuales usan la información proveniente de los vecinos para calcular el valor del atributo, para el

proyecto se examinan los tres tipos de interpoladores geométricos incluidos en el software, los cuales se muestran a continuación:

- Red Irregular de Triángulos (TIN)
- Peso proporcional al inverso de la distancia "Inverse Distance Weighting (IDW)"
- Generación de cuña "Splines".

3.1.1 Red Irregular de Triángulos (TIN).

Las curvas de nivel digitalizadas del terreno están presentes en un archivo .dwg (ACAD, autodesk) estas deben ser transformadas a un archivo base en formato .dxf para posteriormente realizar su importación al software ArcView por medio de la extensión Cad Reader, los mapas tipo CAD deben ser convertidos a formato shape (.shp) el formato natural de ArcView GIS para almacenar localizaciones y atributos de los elementos espaciales.

Esta información es utilizada por el software ArcView GIS para crear una red de triángulos irregulares (TIN), estos triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, y se adosan sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del terreno (Felicísimo).

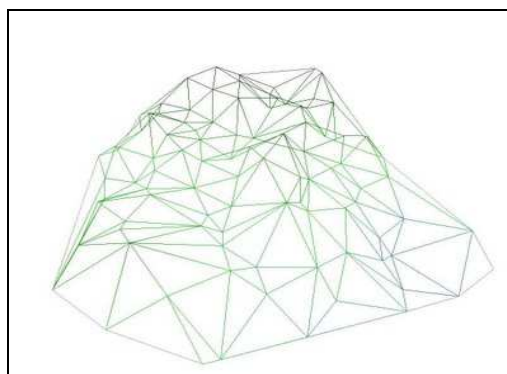


Figura 9. Red de triángulos irregulares.

El modelo TIN se convierte en una estructura muy usada debido a que se adapta a la complejidad local del terreno y a que respeta los valores de los puntos que son usados como vértices ya que conserva su altitud exacta.

Sin embargo a pesar de que un TIN es la estructura más adecuada para construir un MDE por la capacidad de representar un relieve complejo con precisión (Felicísimo, 1994), se ve sometido a problemas de tipo vectorial ya que genera una estructura difícil de manejar especialmente para procesos de análisis.

Por este motivo lo más usual cuando se parte de información cartográfica es decir de curvas de nivel, es generar un MDE según el modelo TIN, y posteriormente generar un MDE del tipo “malla regular”, es decir, una matriz de celdas cuadradas conteniendo cada una valores de posición geográfica definida y su dato de elevación, para esto se utilizó el método de interpolación local del vecino más cercano, este interpolador busca entre los datos más cercanos o más próximos al nodo a interpolar y el valor que se encuentre más próximo lo toma y se lo asigna.

Dicho método produce valores de altitud que representan razonablemente bien la superficie real, asignándole cotas a cimas y hondonadas más allá del rango de valores de las curvas y es recomendado como un método de interpolación exacto y de fácil aplicación. Para este proceso se utilizó la extensión Spatial Analyst y 3D Analyst del programa.

3.1.2. Peso proporcional al inverso de la distancia "Inverse Distance Weighting" (IDW).

El archivo de la zona de estudio con extensión .dwg se transformó a una extensión .dxf para posteriormente realizar su exportación al software Spell Map el cual fue desarrollado por el ingeniero Jorge Alberto Guzmán adscrito al Grupo de Predicción y Modelamiento Hidroclimático (GPH).

Spell Map se empleó en la extracción de los datos correspondientes a las coordenadas espaciales de cada una de las polilíneas que conforman la CSRO y la Cuenca del Lato; el programa generó un archivo de texto, donde se guardó la información correspondiente al tema de coordenadas planas (X, Y, Z), de cada curva de nivel de la zona de estudio, para su posterior uso en el software ArcView.

ArcView reconoce el archivo de texto como una serie de puntos ubicados espacialmente, cada uno con un valor de coordenada (X, Y) y un atributo Z, el método IDW combina la idea de vecindad con la idea de un cambio gradual de las superficies con una tendencia, cada punto de la muestra ejerce una influencia sobre el punto a determinar y disminuye en función de la distancia. Así a cada punto vecino se le asignará un peso en la determinación de la cota del punto a interpolar, este será mayor cuanto más cerca se encuentre, siguiendo el principio de correlación espacial.



Figura 10. Interpolacion IDW.

3.1.3 Generación de Cuña "SPLINES".

Para la elaboración del MDE por medio del método de interpolación Spline se utilizará el archivo de texto que contiene las coordenadas planas (X, Y, Z) de la zona de estudio. Spline estima valores usando una función matemática que reduce al mínimo la curvatura de la superficie total, dando como resultado una superficie lisa que pasa exactamente a través de los puntos muestreados.

Este método es el mejor, para variar superficies como la elevación, alturas de superficie de agua, o concentraciones de contaminación.

Hay dos métodos Spline: regularizad y tension (Regularizado y Tensión)

Regularizado: El método Regularizado crea una superficie suave, de manera gradual cambiando la superficie con los valores que pueden estar fuera de la gama de datos de la muestra.

Tensión: El método de Tensión suaviza la rigidez de la superficie según el carácter del fenómeno modelado. Esto crea la superficie lisa con valores estrechamente obligados por la gama de datos de la muestra.

Para el proyecto se utilizó el parámetro Tensión, ya que condiciona la superficie generada según la suavidad con que se adapte la grilla. El valor de la tensión depende de la escala de trabajo, y para valores elevados incrementa la distancia entre puntos considerados y reduce el rango de impacto de cada punto. Un valor bajo de tensión reduce la distancia entre puntos y la influencia de cada punto entre otro alcanza un amplio rango.



Figura 11. Interpolación Spline.

3.1.4 Resolución Espacial del MDE.

La resolución espacial (tamaño de celda o “pixel”) del MDE fue definida luego de una valoración de la estructura de las curvas de nivel, se debe tener en cuenta que para alcanzar una resolución óptima es necesario tener un equilibrio al momento de aumentar o disminuir el pixel, para que la morfología del terreno no presente un cambio significativo.

Cuando se trabaja con curvas de nivel como base para la elaboración de un MDE, se debe tener en cuenta que el tamaño del pixel no debe exceder de la separación que existe entre las curvas de nivel, para nuestro caso esta separación es de 50 metros, esto con el fin de evitar la pérdida de información altimétrica en las zonas donde las curvas son demasiado cercanas.

Con base en los enunciados anteriores y teniendo en cuenta que el tamaño del pixel para el MDE se desea de igual resolución al de las imágenes Landsat ETM+ utilizadas en la clasificación supervisada del tipo de suelo, se optó por adoptar un tamaño de pixel de 30 m.

A continuación se presentan los MDE generados por cada interpolador (*Figuras 12, 13 y 14*). La escala de grises representa en negro las zonas más altas y en blanco las zonas más bajas

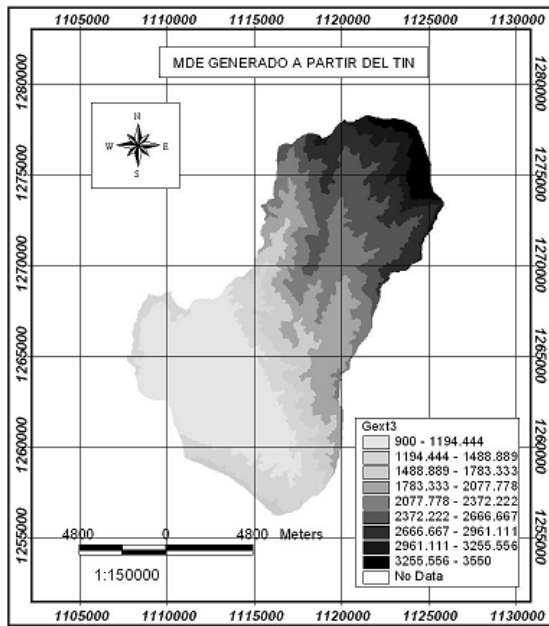


Figura 12. MDE generado a partir del TIN

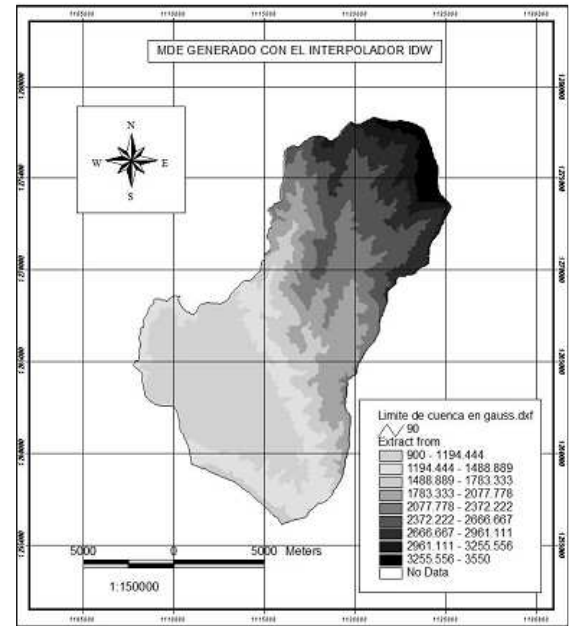


Figura 13. MDE generado a partir del interpolador IDW.

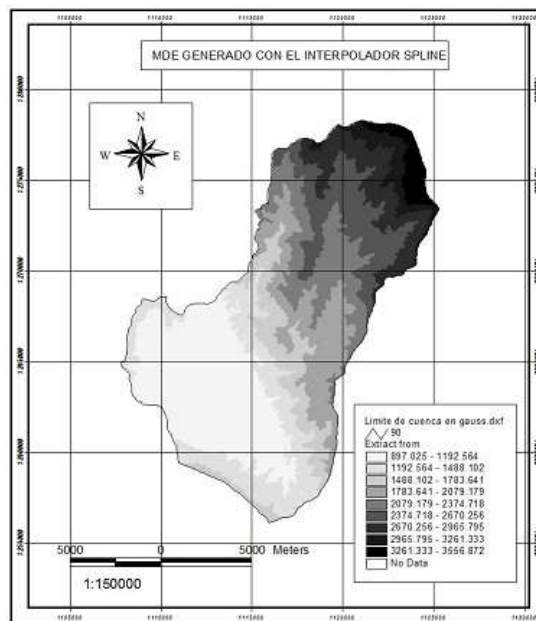


Figura 14. MDE generado a partir del interpolador Spline.

3.2. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN A PARTIR DE SRTM

Debido a que los modelos digitales de elevación generados a partir de la misión SRTM se están convirtiendo en una base de datos para trabajos a nivel internacional, se estimó como nuevo objetivo generar el MDE para la CSRO y la Cuenca del Lato a partir de estos datos, dejándolos expresados en el sistema de coordenadas utilizado en Colombia (proyección Gauss-Kruger modelo de la tierra Hayford o internacional).

A continuación se muestra el proceso necesario para el cumplimiento de este objetivo.

Algunos MDE de la misión SRTM son descargados con vacíos de información, esto debe corregirse ya que en estos huecos se presentarán problemas al momento de interpolar el modelo, para esto se utilizó el programa SRTMfill, una herramienta de versión gratuita descargado de la página web (<http://3dnature.com>) encargado de interpolar los vacíos de información con el fin de llenar los datos.

Luego de su descarga en formato GRID y su posterior limpieza, los datos SRTM fueron importados al software ArcView, seguidamente, mediante herramientas de la extensión Spatial Analyst, los cuatro rectángulos fueron mosaiqueados a fin de generar un MDE continuo y sin costuras para toda el área de estudio.

Los modelos digitales de la SRTM se encuentran en coordenadas geográficas, referidas al datum horizontal WGS84 y al datum vertical *EGM96* estos modelos se referenciaron en el software ArcView 3.1, por medio de la extensión **Grid analyst** la cual tiene la opción de proyectar el MDE, en esta función se debe asignar el elipsoide en que se quiera trabajar; se obtuvo un MDE en coordenadas planas (proyección Gauss-Kruger o Transversa de Mercator modelo de la tierra Hayford o internacional) el cual es el elipsoide asociado al datum Bogotá.

Los datos requeridos para la definición del sistema de proyección Gauss Kruger o Transversa de Mercator se presentan en la *Tabla 5*.

Tabla 5. Parámetros para la definición de un sistema de coordenadas de proyección en ArcView GIS.

DEFINICIÓN		EJEMPLO
Nombre	Descripción	Datum BOGOTÁ, Gauss-Krüger, Origen Bogotá
Falso Norte	Coordenada Norte del punto origen	1 000 000,0 m
Falso Este	Coordenadas Este del origen	1 000 000,0 m
Meridiano central	Longitud del punto origen	74° 04' 51,30"
Factor de escala	Relación, sobre el meridiano central, del dibujo con la comarca proyectada	1
Latitud de referencia	Latitud del origen	4° 35' 56,57"

Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

Ahora partiendo del modelo proyectado se procedió a cambiar el tamaño de la celda "pixel" a 30 m esto con el fin de lograr la unificación de tamaños para los diferentes modelos e imágenes, para esto se utilizó el método de interpolación del vecino más cercano, el cual es considerado como exacto y de fácil aplicación. Luego de esto se importó en el software un archivo en formato shapfile (.shp) que contiene el croquis con el límite de la zona de estudio, esto con el fin de separar la parte del modelo que nos interesa (*Figura 15*).

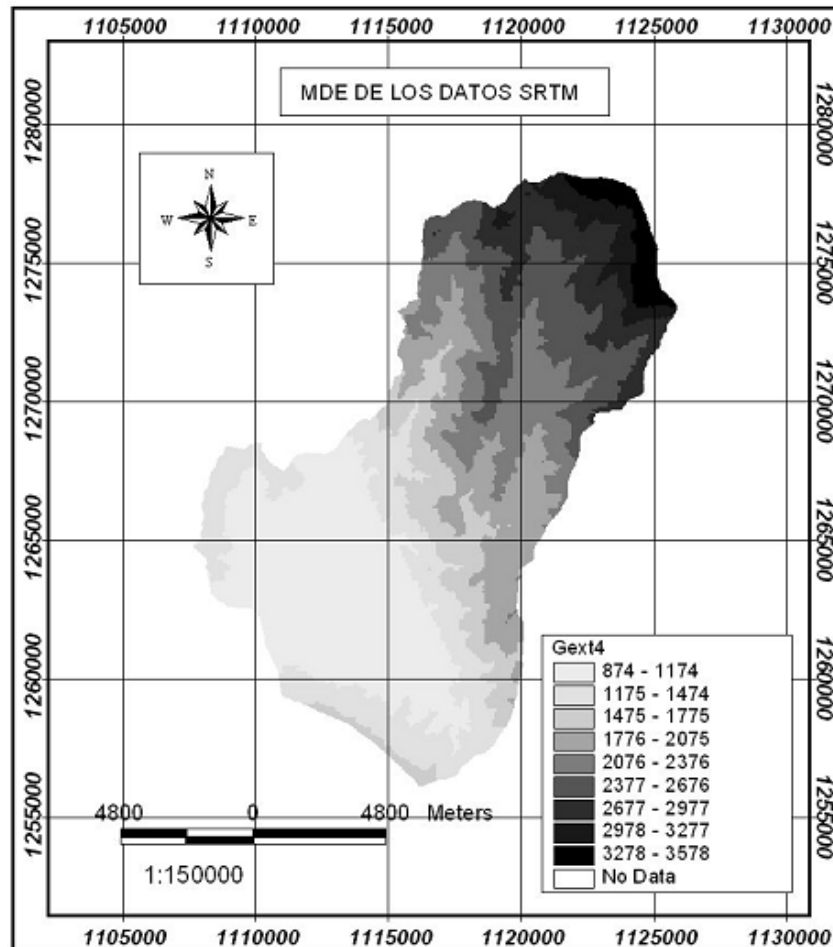


Figura 15. MDE generado a partir de la misión topográfica de radar (SRTM).

3.3 CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Una unidad cartográfica de suelos se diseña para representar un conjunto de suelos de diferentes características y cualidades. Cada uno de ellos será asociado a una estructura formal a fin de diferenciarlo de los demás, esto es, clasificarlo. Tal tipo de estructura se elabora normalmente siguiendo criterios genéricos, morfológicos u otros elaborados.

Se debe tener en cuenta que este trabajo se tomará como base para la realización del modelo hidrológico de la CSRO y de la Cuenca del Lato, por tal motivo se tendrá en cuenta valores exclusivamente de la granulometría del suelo, caracterizado por medio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, por este motivo llamaremos suelo a aquel material natural, que es posible de ser removido de su yacencia original mediante el uso de maquinaria sin la necesidad de emplear explosivos.

Para la clasificación de los suelos se desarrolló una nueva cartografía de suelos que se tendrá como base para la clasificación supervisada de la imagen satelital Landsat.

3.3.1 Generación de la Nueva Cartográfica de Suelos.

La generación de la nueva cartografía de suelos se desarrolló a partir de las muestras tomadas en campo, la cartografía de suelos generada para el POT del municipio de Piedecuesta y el mapa geológico del macizo de Santander elaborado por la UIS e Ingeominas en el 2006.

3.3.1.1 Cartografía de Suelos Empleada del POT.

La descripción en el POT de las unidades cartográficas de los suelos, se realizó con base en la geomorfología, clima ambiental, material litológico, relieve, pendiente, erosión, drenaje, apreciación textural, vegetación natural y uso actual de las cuencas en estudio; haciendo también referencia a las características físicas, químicas y de la composición taxonómica de los suelos.

Esta cartografía fue elaborada sobre planchas restituidas del IGAC a escala de 1:25000.

En la *Figura 16* se muestra el mapa y la leyenda en el POT para la clasificación del suelo.

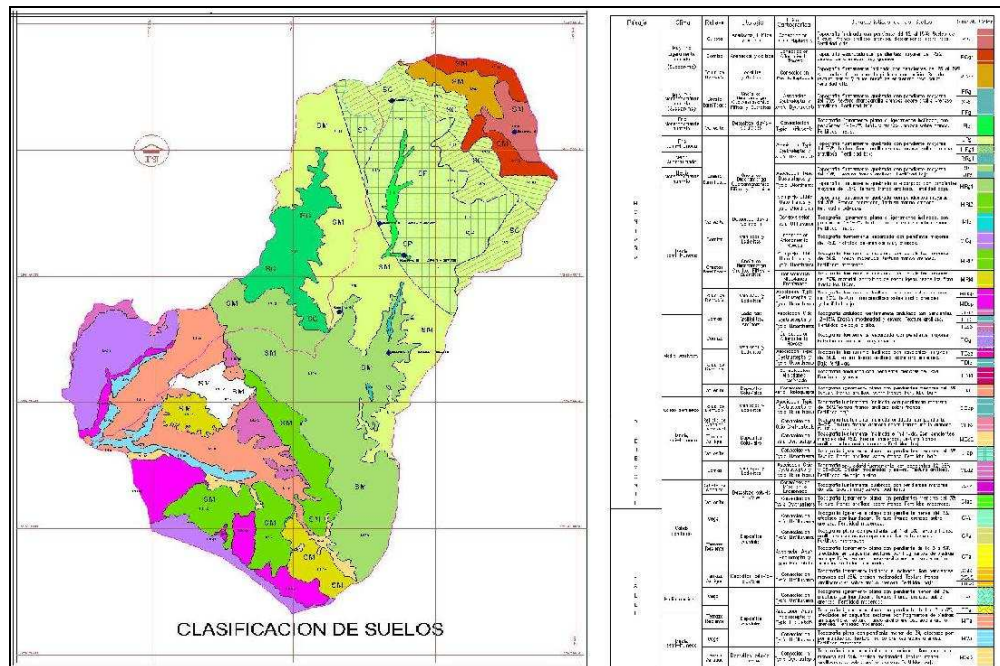


Figura 16. Mapa de clasificación de suelos según el POT del municipio de Piedecuesta.

3.3.1.2 Cartografía Geológica de la Zona.

La plancha geológica empleada fue elaborada por la UIS e Ingeominas en el año 2006, en esta se muestran las fallas geológicas, factores importantes a la hora de determinar los sitios para la toma de muestras de los suelos y para la homogenización de los mismos.

En la *Figura 17* se muestra el mapa y la leyenda en el POT para la clasificación del suelo.

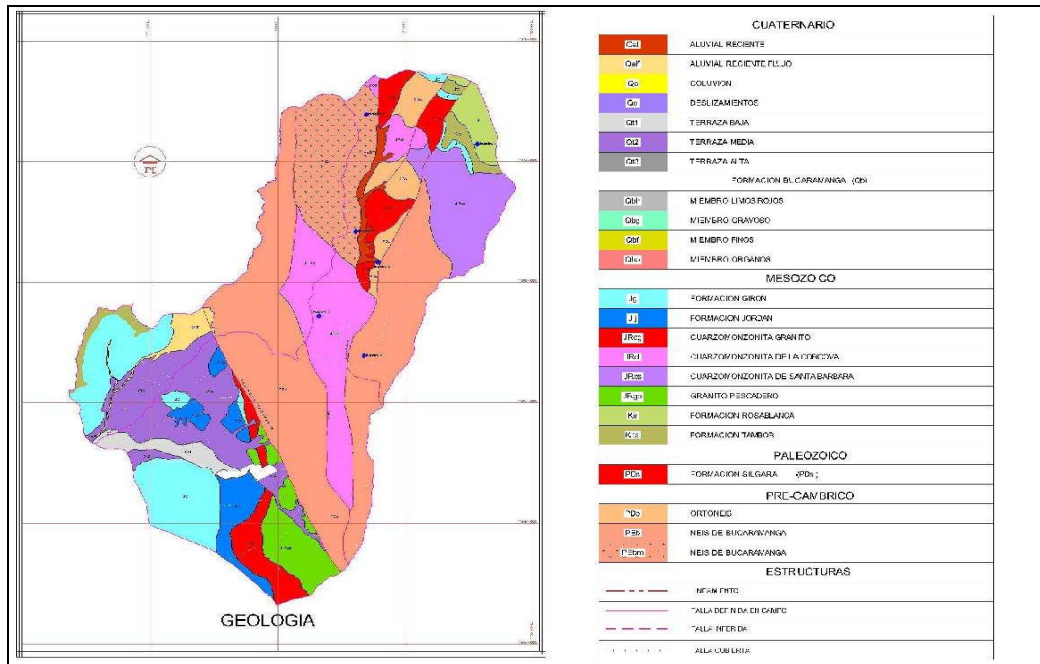


Figura 17. Mapa geológico elaborado por la UIS e Ingeominas.

3.3.1.3 Datos Obtenidos en Laboratorio.

Las pruebas de laboratorio realizadas sobre las muestras de campo fueron de granulometría (INVE- 123), límite líquido (INVE-125) y límite plástico (INVE-126) todas basadas en la norma del INVIAS, estas pruebas arrojaron los resultados que están contenidos en la *Tabla 6*.

Los datos fueron caracterizados por medio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), ya que esta clasificación se basa en las propiedades de plasticidad y en la distribución del tamaño de grano, factores importantes a la hora de especificar el comportamiento mecánico (permeabilidad, compresibilidad, resistencia al corte y tubificación) del suelo.

Tabla 6. Clasificación de las muestras de suelos.

MUESTRA N°	GRUPO	DESIGNACION
1	Arenas mal gradadas y limosas	SP-SM
2	Arenas mal gradadas y arcillosas	SP-SC
3	Arenas arcillosas	SC
4	Arenas arcillosas	SC
5	Arenas mal gradadas	SP
6	Arenas arcillosas	SC

Tabla 7. Evaluación cualitativa del comportamiento mecánico de los suelos según su clasificación.

MUESTRA N°	TIPO DE SUELO	PERMEABILIDAD	RESISTENCIA AL CORTANTE	RESISTENCIA A LA TUBIFICACION
1	SP-SM	Semipermeable	Alta	Media
2	SP-SC	Semipermeable	Media	Alta
3	SC	Semipermeable	Media	Alta
4	SC	Semipermeable	Media	Alta
5	SP	Permeables	Alta	Baja
6	SC	Semipermeable	Media	Alta

Como se observa en las *Tabla 6* y *7* las pruebas de laboratorio arrojaron cuatro tipos de suelos.

3.3.1.4 Cartografía de Suelo Final.

El mapa de suelos final, se realizó mediante la integración de la designación obtenida de las muestras en el laboratorio, la clasificación del clima en el mapa de suelo del POT del municipio de Piedecuesta y el mapa geológico realizado en el 2006 por la UIS e INGEOMINAS. De esta forma los suelos de la CSRO y de la Cuenca del Lato se pueden clasificar en 8 rangos diferentes, tal como se muestra en la *Figura 18* y se describe en la *Tabla 8*.

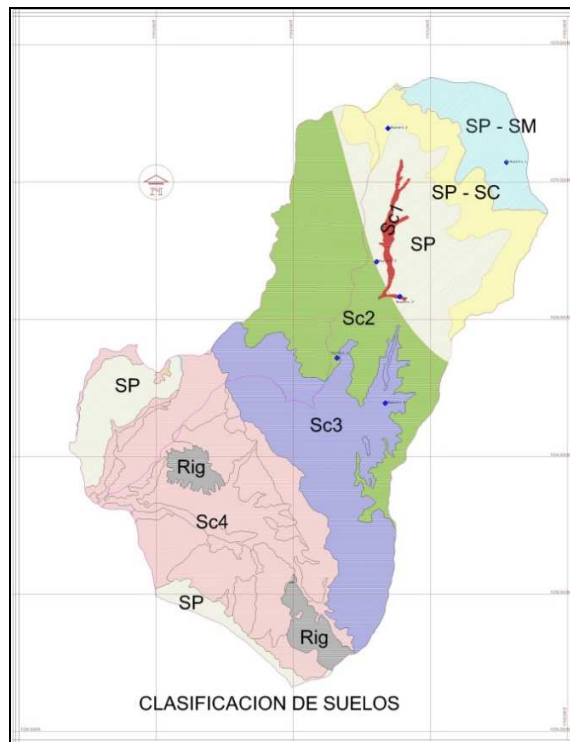


Figura 18. Mapa de la nueva clasificación de suelos para la zona de estudio.

Tabla 8. Nueva clasificación de suelos para la zona de estudio.

DESIGNACION	CLIMA	SIMBOLO	COLOR
SP-SM	Muy Frio Ligeramente Húmedo (Subparamo)	SP-SM	
SP-SC	Muy Frio Moderamiento Húmedo (Subparamo)	SP-SC	
SP	Frio Semi- Húmedo	SP	
SC [FMH]	Frio Medio- Húmedo	Sc1	
SC [MSPH]	Medio Super- Húmedo	Sc2	
SC [MMH]	Medio Moderadamente Húmedo	Sc3	
SC [MSH]	Medio Semi- Húmedo	Sc4	
RIG	Medio Semi- Húmedo	RIG	

- *Suelo Tipo SP-SM:* Arena mal gradada y limosa, propios de bajas temperaturas, semipermeable con alta resistencia al corte.
- *Suelo Tipo SP-SC:* Arena mal gradadas y arcillosas, propias del clima frio moderadamente húmedo, semipermeables con resistencia media al corte.

- *Suelo Tipo SP:* Arena mal gradada, propia de clima frio semi-húmedo, permeable con alta resistencia al corte.
- *Suelo Tipo SC:* Arena arcillosa, semipermeable con resistencia media al corte.

Los números que acompañan a las letras, indican el clima según la *Tabla 9*.

Tabla 9. Clima por fase.

FASE	CLIMA
1	Frio Medio - Húmedo
2	Medio Super - Húmedo
3	Medio Moderadamente Húmedo
4	Medio Semi - Húmedo

Esta nueva cartografía de suelos servirá como base para la clasificación del tipo de suelo en la imagen satelital con el fin de lograr una aproximación real de las características originales del terreno.

3.3.2 Clasificación de Suelo a partir de Imágenes Satelitales.

La definición de los tipos de suelo utilizando sensores remotos se basa en la reflectancia diferencial de los suelos en las bandas espectrales registradas por un sensor en distintas longitudes de onda (Guerschman, et al 2002). Dicho concepto implica que cada clase de suelo tiene un comportamiento espectral único frente a otros y tal comportamiento es más o menos evidente según la porción del espectro electromagnético donde se lo registre.

Para la clasificación de los tipos de suelo se utilizaron las bandas 4 Azul, 5 Verde y 7 Rojo (BGR) de la imagen Landsar 7 ETM+, ya que en ellas se evidencia el comportamiento espectral típico del suelo limo – arcilloso.

En la *Tabla 10* se describen las características de las bandas utilizadas, así como su respuesta espectral.

Tabla 10. Características de la bandas de la imagen Landsat.

Estudio	Satélite	Sensor	Bandas	Path/Row	Fechas
suelos	Landsat 7	(ETM+)	4 IRc (0.76-0.90 μm)	7/55	04/01/2003
			5 Mir (1.55-1,75 μm)		
			7 Mir (2,08-2,35 μm)		

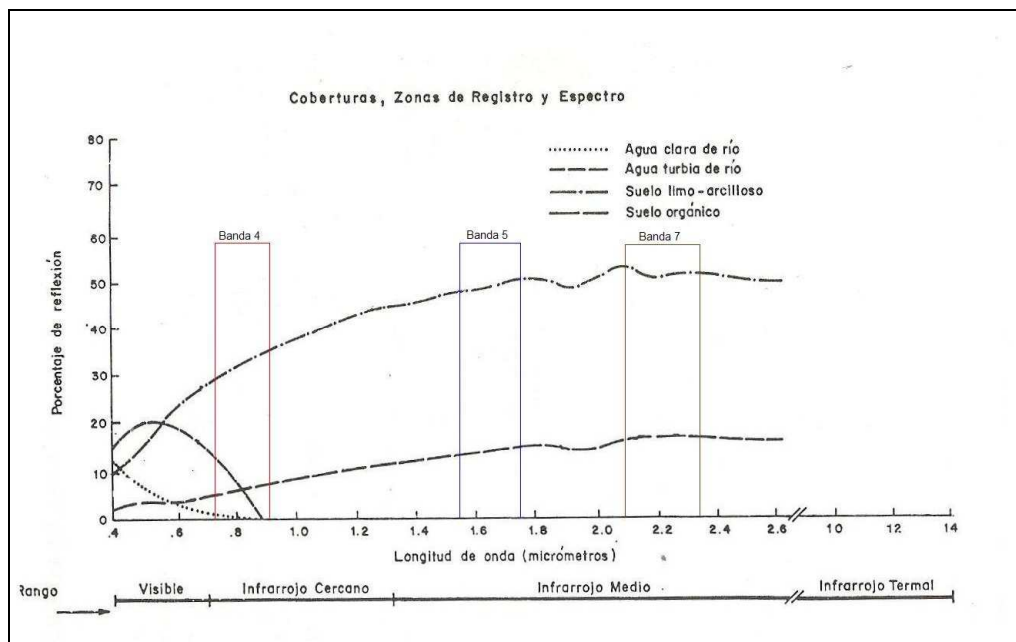


Figura 19. Firma espectral de suelos.

En este estudio se aplicó la etapa de clasificación supervisada, ya que las características del área bajo estudio requirieron de observaciones y datos de campo tomados en función de la geología de la CSRO y de la Cuenca el Lato.

3.3.2.1 Etapa de Clasificación Supervisada.

La clasificación supervisada comprende de una primera *fase de entrenamiento* en la cual se utilizaron los datos obtenidos en campo y de la interpretación visual de la imagen para definir las clases espectrales correspondientes a las coberturas de interés. Para ello se ubicaron sobre la imagen las distintas muestras, de ahora en adelante llamadas “campos de entrenamiento”. Asumiendo que las muestras o campos de entrenamiento seleccionadas representan fielmente a las distintas clases y que por lo tanto las medidas extraídas a partir de sus valores espectrales definen convenientemente a esas clases, se procedió a calcular las estadísticas elementales de cada categoría para luego seguir con la fase de asignación, en la cual se distribuye cada píxel, la mínima unidad de la imagen a cada una de las clases muestreadas.

EL primer paso para realizar la clasificación es geo-referenciar las imágenes con el fin de relacionarlas a un sistema de coordenadas específico, por esta razón se localizaron sobre las imágenes 17 puntos de control con coordenadas reales referenciados al nodo 1000000, 1000000 con origen en Bogotá, estos puntos fueron escogidos a partir de su visibilidad y fácil ubicación en la imagen.

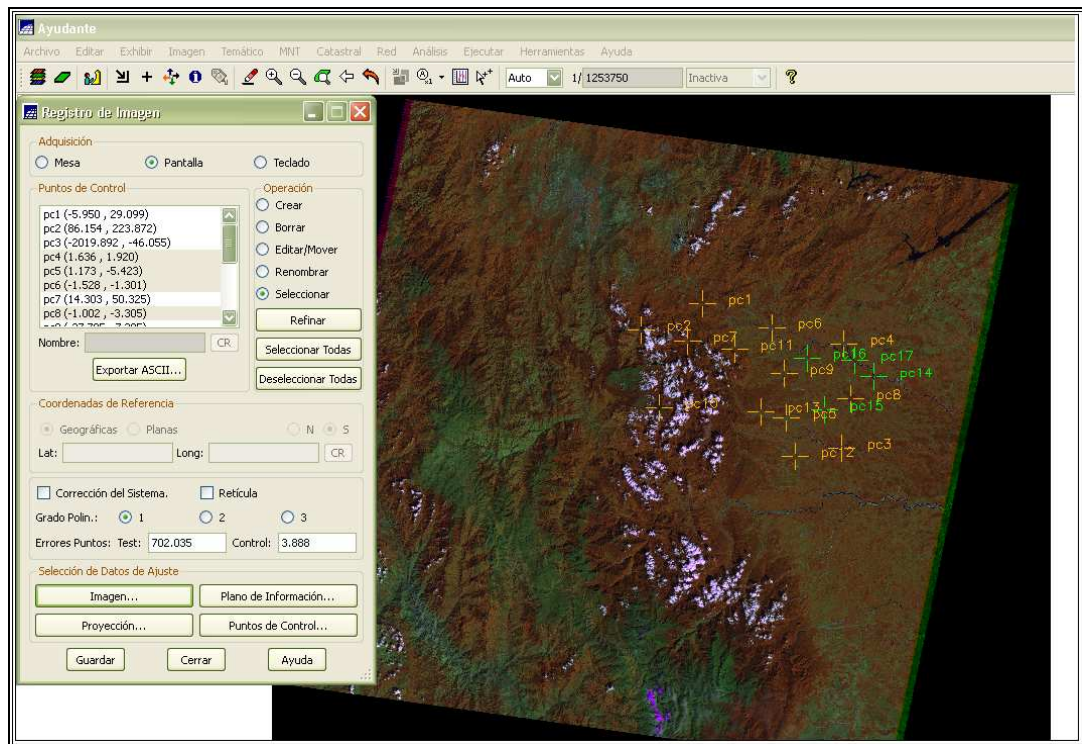


Figura 20. Imagen Landsat en falso color y Geo-referenciada

Con los puntos de control ubicados se comenzaron a realizar combinaciones prestando atención en el error medio cuadrático obtenido de la correlación entre los puntos seleccionados no superará los 5 píxeles, de esta manera al final se seleccionaron 8 de los 17 puntos. Después de esto se procede a importar las bandas 4(B), 5(G), 7(R) al proyecto activo para comenzar con la clasificación.

La clasificación será desarrollada en cuatro fases:

- I. Entrenamiento**
- II. Clasificación**
- III. Pos- clasificación**
- IV. Mapeo**

I. Entrenamiento.

Consiste en seleccionar las muestras en forma de zonas de píxeles que serán asignadas a una clase concreta basándose en el conocimiento previo de la zona de estudio, para que la clasificación funcione debe ser asignado un mínimo de dos zonas por cada clase.

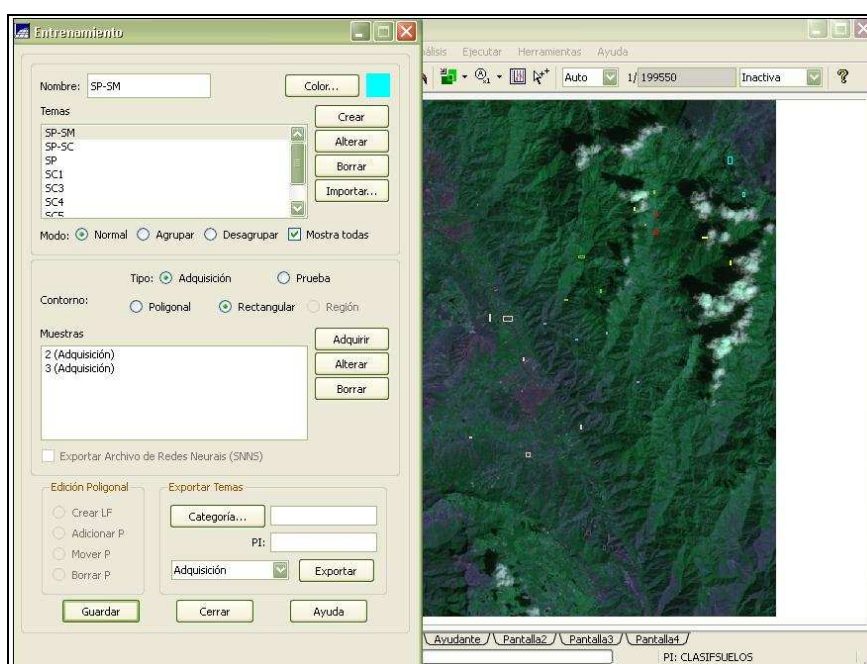


Figura 21. Fase de Entrenamiento

II. Clasificación.

Lo primero que se debe realizar es seleccionar uno de los clasificadores que están disponibles en el programa Spring, estos clasificadores ordenan los píxeles de la imagen asignándolo a un grupo de píxeles predefinidos con anterioridad, en este caso el análisis será hecho bajo los tres tipos de clasificadores el Maxver, Maxver lcm y el de Longitud Euclidiana.

- **Clasificador Maxver.**

Es el método más común y frecuente que se emplea, considera la ponderación de las distancias entre medias de los niveles digitales de las clases utilizando parámetros estadísticos. El clasificador a partir de los conjuntos de entrenamiento define el diagrama de las clases y sus distribuciones de probabilidad, considerando cada clase como una distribución de probabilidad normal.

En determinado caso donde dos curvas se sobreponen, indicando que determinado píxel tiene igual probabilidad de pertenecer a dos clases, en esta situación se establece un criterio de decisión a partir de la definición de umbrales.

EL umbral de aceptación indica el porcentaje de píxeles de la distribución de probabilidad de una clase que será clasificado como perteneciente a dicha clase, un umbral de 99%, toma el 99% de los píxeles y el 1% de los píxeles que tengan menor probabilidad serán ignorados con esto se compensa la posibilidad de algunos píxeles de haber sido introducidos erróneamente en determinada clase, o estar entre dos clases. Si se utiliza un umbral del 100% se obtendrá una imagen clasificada sin rechazos, es decir, todos lo píxeles serán clasificados.

- **Clasificador Maxver- lcm.**

Este clasificador en una primera fase clasifica la imagen por el algoritmo de MAXVER atribuyendo clases a los píxeles, considerando los valores de niveles digitales, en la segunda fase se considera la información contextual de la imagen, es decir, la clase atribuida depende tanto del valor observado en el píxel como de las clases atribuidas a los vecinos.

El algoritmo atribuye clases a un determinado píxel considerando la interacción por vecindad, este proceso finaliza cuando es alcanzado el porcentaje de píxeles que son reclasificados, este es definido con anterioridad.

El software SPRING ofrece diferentes probabilidades como por ejemplo, 5% lo que significa que la retribución de clases a los píxeles es interrumpida cuando es alterado el 5% o menos del total de píxeles de la imagen.

- **Clasificador Mínima Distancia Euclidiana.**

Este método de clasificación utiliza la distancia Euclidiana para asociar un píxel a una determinada clase. En esta clasificación cada píxel será incorporado a una clase a través del análisis de la medida de similitud de distancia Euclidiana.

El clasificador compara la distancia Euclidiana del píxel a la media de cada grupo. El píxel será incorporado al grupo que presente la menor distancia. Este procedimiento es repetido hasta que toda la imagen quede clasificada.

Se puede indicar un umbral para cada clase indicando la máxima distancia permitida para asignar la pertenencia a esa clase, así se puede otorgar parámetros a las distintas distancias máximas para cada clase en función del grado de concentración que presentan los píxeles.

Después de elegir el clasificador se procede a realizar el análisis de la matriz de clasificación de las muestras, esta nos presenta la distribución del porcentaje de píxeles clasificados correcta e incorrectamente.

El resultado de este análisis nos presenta:

- Desempeño Medio: Es el porcentaje de píxeles sobre los que se tiene certeza de su buena clasificación.
- Abstención Media: Indica el porcentaje de píxeles que no fue clasificado en ninguna categoría.
- Confusión Media: Este valor determina el porcentaje de píxeles que no están bien clasificados.

Lo ideal sería una matriz de clasificación con un Desempeño medio del 100%, lo cual indicaría que no hubo confusión entre las clases, sin embargo esta situación es demasiado difícil de lograr debido a las características de las imágenes utilizadas.



Figura 22. Análisis de muestras Maxver 100%

Para disminuir la confusión entre las clases se realiza un análisis entre las muestras adquiridas para cada clase, esto nos permite observar cuales muestras tienen gran certeza de pertenecer a la clase asignada; en la *Figura 22* se observa que la muestra número 2 del tipo de suelo SP-SM tiene un 66.67% de certeza de

pertenecer a la clase asignada, este es un valor aceptable que genera alta confianza, mientras que si el valor estuviera distribuido un 50- 50 entre dos clases, esto obligaría a eliminar la muestra.

Para culminar esta fase se procede a activar la opción clasificar, la cual nos permitirá observar la matriz de clasificación obtenida con cada uno de los clasificadores.

III. Pos-clasificación.

Esta fase nos permite realizar el filtraje de las imágenes, con base en esto se pueden obtener temas más uniformes eliminando puntos aislados o clasificados por fuera de su vecindad, esto ayuda a la eliminación del ruido.

En este momento debe ser otorgado un peso el cual definirá el número de veces que se considerará la frecuencia del punto central y un umbral que será el valor por encima del cual será modificado el punto central.

La definición del peso y el umbral fue de 4, este valor depende de las características de la imagen clasificada, entre menor sea el peso y el umbral se realizará un número de sustituciones mayor. En esta fase se debe tener cuidado ya que por tratar de obtener zonas más homogéneas y fáciles de interpretar se puede estar perdiendo exactitud, debe buscarse un equilibrio entre los dos.

IV. Mapeo

Consiste en generar los mapas definitivos donde cada tema generado debe ser otorgado a una clase, en un modelo de datos temático.

Después de desarrollados todos los procesos para la clasificación el modelo matricial debe ser transformado a un modelo vectorial, este proceso es más complejo que si se transformara de vector a matriz, ya que además de extraer los contornos de los objetos, se deben crear también las relaciones espaciales entre ellos, tales como relaciones de vecindad y pertenencia entre polígonos, y conectividad entre arcos. Este proceso solo es aplicado a los datos donde los objetos presentes tienen extensión en área, o sea polígonos.

A partir de la imagen original, el algoritmo genera una imagen binaria conteniendo apenas las fronteras entre los objetos presentes, esto es desarrollado de la siguiente manera:

- Las fronteras son construidas entre los "píxeles": si la imagen original tiene formato $(n \times n)$, donde n es el número de líneas y el número de columnas, la imagen binaria tendrá tamaño $(2n + 1) \times (2n + 1)$.
- Durante la conversión de la imagen para el formato binario, se detectan también los nodos.
- A continuación, los contornos de los objetos son extraídos (vectorizados) a partir de la imagen binaria y suavizados para minimizar el "efecto de escalera", característico de la representación raster.
- Finalmente, se construyen los polígonos y las relaciones espaciales (vecindad y pertenencia entre polígonos, y conectividad entre arcos).

Este proceso permite suavizar las regiones de la imagen para permitir una mejor interpretación.

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación se describen y analizan los resultados obtenidos a partir de la metodología anteriormente descrita, para la elaboración de los MDE y la clasificación de la imagen Landsat.

4.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

Para la validación del MDE se tomaron puntos georreferenciados espacialmente, elaborados por el instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC) para la Corporación Autónoma de la Defensa de La Meseta de Bucaramanga, de los cuales muy pocos se encuentran dentro de la zona de estudio, por esta razón se optó por tomar un área de mayor tamaño la cual abarca la totalidad de la cuenca del río de oro como se ilustra en la *Figura 23*.

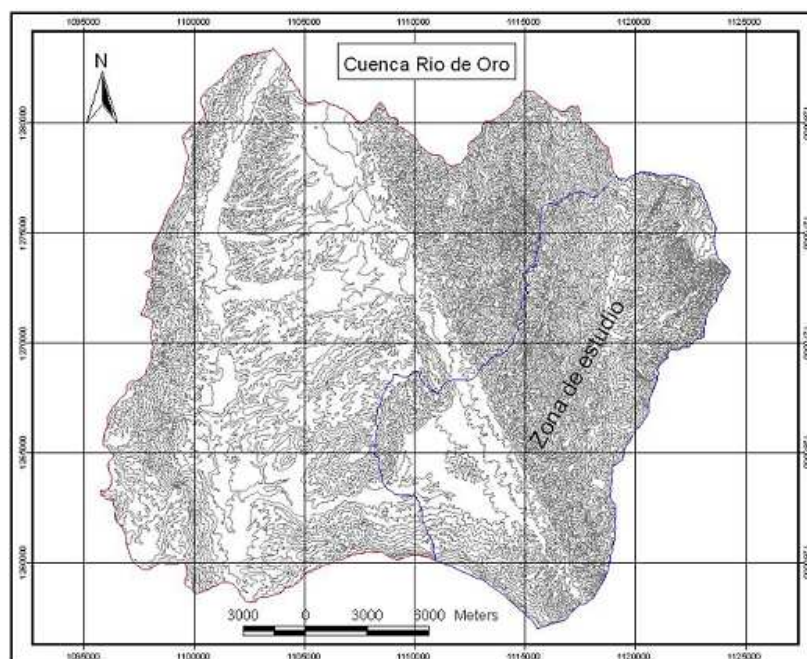


Figura 23. Cuenca Río de Oro

Para obtener una medida de la exactitud del MDE, es decir para la validación del modelo se eligieron 28 datos de la base de puntos georreferenciados provista por la CDMB que fueron tomados como “verdad de campo”. Estos datos fueron obtenidos con GPS de doble frecuencia y ajustados a la red cartográfica de Colombia. (Ver *Tabla 11*).

Tabla 11. Puntos georreferenciados provistos por la CDMB

ID	ESTE	NORTE	ALTURA	UBICACIÓN
1	1106439.29	1277716.72	955.1857	PUERTA DEL SOL
2	1100949.86	1273148.15	701.3129	GIRON TRANSEJES
3	1107111.85	1275403.71	911.4272	TRINITARIOS PROVENZA
4	1104367.95	1266151.91	1092.18	ACAPULCO
5	1113586.97	1265492.23	1029.4646	BARRIO SAN FRANCISCO PIEDECUESTA
6	1108535.19	1279607.76	1298.3104	MOTEL LOS PIRINEOS VIA CUCUTA
7	1109117.98	1276332.15	1022.18	BARRIO LA TRINIDAD ENTRADA POR SAN BERNARDO
8	1102837.13	1278962.27	900.276	BARRIO LA FERIA
9	1105861.92	1279075.43	993.672	CDMB
10	1103270.77	1276891.8	886.172	CALLE 45 TRES ESTRELLAS
11	1109792.46	1272010.45	974.993	LA VIRGEN A LA SALIDA DE FLORIDA HACIA PIEDECUESTA
12	1110437.25	1273578.61	1025.291	TANQUE DEL ACUEDUCTO EN EL BARRIO CARACOLI FLORIDABLANCA
13	1102687.47	1275187.9	744.1839	AUTOPISTA A GIRON
14	1104942.92	1276135.81	846.3871	BARRIO BUCARAMANGA
15	1108986.09	1273858.28	994.1021	LA CUMBRE BELLAVISTA
16	1100904.93	1277470.3	668.6288	CENTRO ABASTOS
17	1104079.9	1274933.73	884.192	BARRIO EL PORVENIR
18	1108413.36	1274836.93	1009.8335	LA CUMBRE
19	1112910.39	1270402.44	1389.023	VEREDA MENSULI
20	1111092.12	1269896.72	964.7925	ENTRADA RUITOQUE GOLF COUNTRY CLUB POMARROSO
21	1100300.01	1266064.9	841.4387	VEREDA RUITOQUE CHOCOITA
22	1113871.27	1267289.48	1249.151	I.C.P
23	1098535.7	1271012.18	1147.235	VEREDA ALTO LA ALDEA
24	1112470.45	1264088.13	1116.792	CERRO LA CANTERA PIEDECUESTA
25	1116744.18	1261014.46	1192.433	HACIENDA EL BORE CERCA DE COOPROFESORES
26	1100970.83	1262115.11	848.2901	CHOCOITA
27	1105925.32	1270934.52	890.462	SPORT COUNTRY CLUB
28	1115196.51	1256968.5	1681.653	LA PUNTA MESA DE LOS SANTOS

Con base a las cotas de estos puntos se calculó el error medio cuadrático (EMC) de acuerdo a la siguiente fórmula⁶ (Barringer y Lilburne, 1997; Chaplot et al., 2006):

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum(Z_I - Z_t)^2}{n}}$$

Donde:

n = número de puntos considerados.

Z_I = valor de cota estimado por el MDE.

Z_t = valor de cota observado obtenido de la CDMB.

El EMC constituye una medida general del error del modelo, que surge de la comparación de los valores estimados en el DEM con los valores observados.

El error permitido para un MDE cuyos valores de elevación han sido procesados, es de la mitad del intervalo entre curvas de nivel del mapa original⁷. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi).

Por ejemplo para nuestro caso el intervalo entre curvas de nivel es de 50 m y teniendo en cuenta el enunciado anterior nuestro EMC permitido será de 25 m.

El error medio cuadrático obtenido para cada uno de los MDE generados a partir de los diferentes interpoladores se representa en la *Tabla 12*.

Tabla 12. EMC de los interpoladores.

Interpolador	EMC	unidades
TIN - Raster	5.07	m
IDW	7.47	m
Spline	7.6	m

Como se observa en la *Tabla 12* el menor error se presenta al crear un MDE según la estructura TIN y después generar un MDE de matriz regular a partir de esta estructura, ya que es la que representa en un rango aceptable la superficie del terreno.

Al inicio del proyecto se trató de hacer una integración entre la cartografía digital y los datos SRTM, para lograr una densificación de datos en las zonas con carencia de información, esta operación no se pudo realizar debido a que la información contenida en estos dos archivos se encuentran referidas a datum verticales diferentes y hasta el momento, la autoridad competente en Colombia, sobre este tema, el IGAC, no ha elaborado un método que permita relacionarlas.

Por esta razón se planteó elaborar dos modelos digitales de elevación, uno a partir de la cartografía digital y el otro a partir de los datos SRTM, y dejar a disposición del usuario la elección sobre el modelo con el cual se desea trabajar.

4.1.1 MDE para la Cuenca Superior Rio De Oro Y Lato a partir de la Cartografía.

La *Figura 24* representa el modelo digital de elevaciones para la CSRO y la cuenca del Lato. La variación de las elevaciones va desde los 900 m.s.n.m. hasta los 3550 m.s.n.m. El modelo final fue generado con un tamaño de celda de 30m. Y un error medio cuadrático de 5 m de altura.

Elaborado a partir de la cartografía colombiana con coordenadas planas (proyección Gauss-Kruger modelo de la tierra Hayford o internacional y datum horizontal Bogotá) y cotas geoidales referidas al cero oficial (Buenaventura).

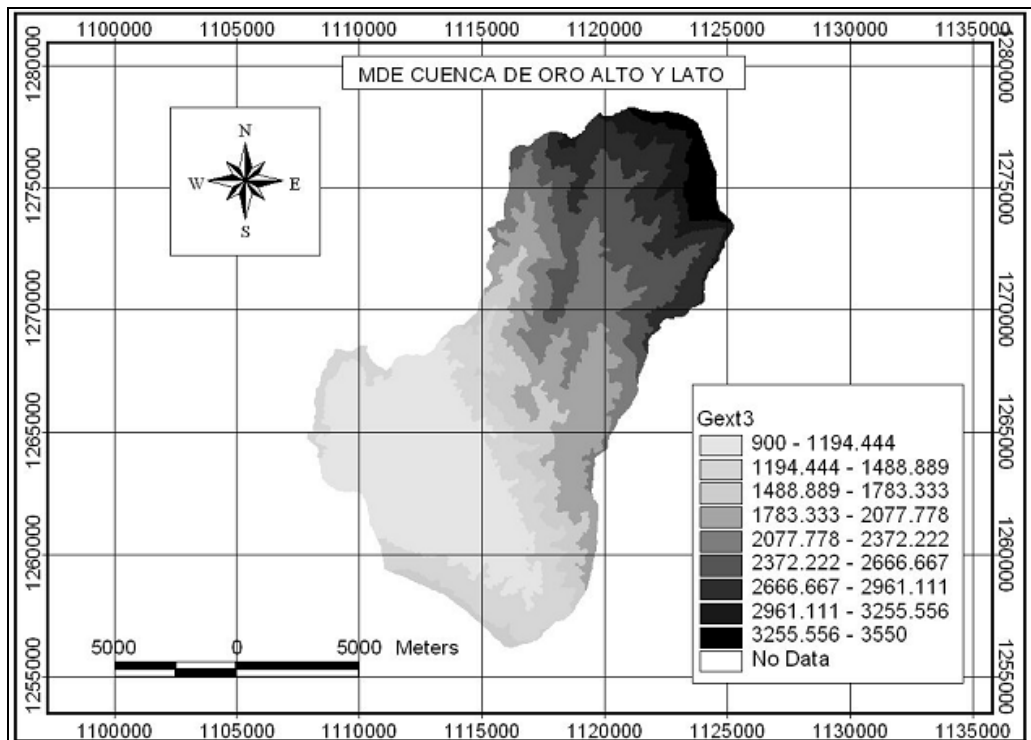


Figura 24. MDE final de la CSRO y de la Cuenca del Lato a partir de la cartografía.

4.1.2 MDE para la Cuenca Superior Río de Oro y Lato a partir de la Misión Topográfica de Radar SRTM.

Los Modelos Digitales de Elevación a partir de la Misión Topográfica de Radar SRTM, representan fielmente la forma del relieve de la tierra, por tal razón se tomarán estos modelos como de una buena precisión para la elaboración de proyectos a nivel internacional.

La *Figura 25* representa el modelo digital de elevaciones para la CSRO y la cuenca del Lato. La variación de las elevaciones va desde los 874 m.s.n.m. hasta los 3578 m.s.n.m. El modelo final fue generado con un tamaño de celda de 30m.

Elaborado a partir de la de la misión topográfica de radar SRTM con coordenadas planas (proyección Gauss-Kruger modelo de la tierra Hayford o internacional) y cotas verticales referidas al geoide EGM96.

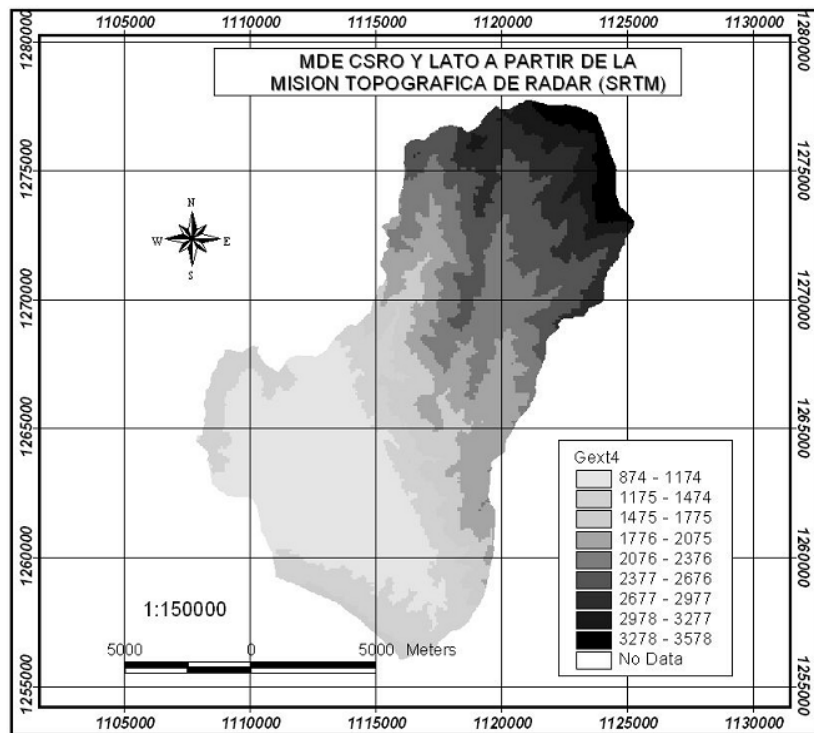


Figura 25. MDE de la CSRO y de la cuenca del Lato a partir de imagen SRTM.

La Figura 25 representa el MDE de imágenes SRTM en escala de grises, donde se identifican las mayores elevaciones en tonos claros, mientras que las tonalidades oscuras representan las menores elevaciones.

La escala de grises representa en negro las zonas de mayor elevación y en blanco las zonas con elevación menor.

4.2 CLASIFICACION SUPERVISADA

Según los resultados obtenidos por la metodología descrita para la clasificación de imágenes Landsat 7, se puede apreciar diferencia en la estimación de la superficie que ocupan cada uno de las categorías pre-establecidas por los métodos de clasificación Maxver y Longitud Euclidiana, por el método de clasificación Maxver- lcm no se pudo realizar la clasificación debido a que el programa no realizaba la operación con éxito.

Tabla 13. Matriz de confusión para la clasificación Maxver

Maxver	SP-SM	SP-SC	SP	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Rig
SP-SM	71.79%	1.28%	0%	11.54%	7.69%	7.69%	0%	0%
SP-SC	5.56%	77.78%	0%	5.56%	0%	0	5.56%	5.56%
SP	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
Sc1	5%	2.5%	15%	50%	22.5%	0%	0%	0%
Sc2	7.41%	0%	0%	11.11%	77.78%	3.70%	0%	0%
Sc3	23.08%	7.69%	0%	0%	15.38%	53.85%	0%	0%
Sc4	16.28%	0.58%	1.74%	4.07%	3.49%	9.88%	60.47%	0%
Rig	10.53%	1.75%	0%	0%	0%	8.77%	12.28%	66.67%

Tabla 14. Matriz de confusión para la clasificación Long. Euclidiana.

Long. Euclidiana	SP-SM	SP-SC	SP	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Rig
SP-SM	30.77%	16.67%	0%	20.51%	1.28%	21.70%	8.97%	0%
SP-SC	5.56%	66.67%	0%	5.56%	5.56%	11.11%	5.56%	0%
SP	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
Sc1	7.5%	12.50%	12.50%	52.50%	15%	0%	0%	0%
Sc2	3.70%	0%	0%	7.41%	81.48%	7.41%	0%	0%
Sc3	23.08%	23.08%	0%	0%	7.69%	23.08%	23.08%	0%
Sc4	11.05%	1.16%	1.74%	5.81%	4.07%	9.88%	64.53%	1.74%
Rig	3.51%	45.61%	0%	0%	7.02%	22.81%	21.05%	66.67%

Cada designación de suelos fue evaluada individualmente para estimar el grado de confiabilidad obtenido en la clasificación. Para esta evaluación se realizó una matriz de confusión entre clases tomando las muestras que fueron utilizadas en la

clasificación. Si la clasificación fuera perfecta los valores en la diagonal principal serian cercanos al 100%, pero esto es casi imposible de lograr ya que las imágenes utilizadas presentan características espectrales similares, es decir la firma espectral capturada por el sensor remoto no diferencia muy bien la firma espectral del suelo.

Para la matriz de confusión de la clasificación Maxver, el tipo de suelo SP-SM (Arenas mal gradadas y limosas) presenta una estimación de un 71.79 % de precisión, presentando dificultades para la discriminación entre Sc1 y Sc2.

Este mismo tipo de suelo por el método de clasificación de la Longitud Euclidiana presenta una estimación de 30.77% observando una gran discriminación con los suelos tipo SP-SC, Sc1 y Sc3.

El nivel de desempeño medio representa el porcentaje en que las muestras están bien clasificadas, y la confusión media muestra el porcentaje en que las muestras no se encuentran bien clasificadas.

Tabla 15. Desempeño medio del método de clasificación Maxver.

Desempeño Medio	64,72%
Abstinencia Media	0,00%
Confusión Media	35,28%

Tabla 16. Desempeño medio del método de clasificación Long. Euclidiana.

Desempeño Medio	51,34%
Abstinencia Media	0,00%
Confusión Media	48,66%

Teniendo en cuenta el valor de desempeño medio se determinó que el método de clasificación Maxver es el mejor, ya que presenta un porcentaje de valor del 64.72% de acierto en la clasificación de los tipos de suelos, este valor está en el rango permitido para este tipo de imágenes, que debe ser mayor a un 60% el valor de desempeño (>60%).

Las tablas que se muestran a continuación son la Matriz de Confusión de la Muestra y señalan en forma porcentual la posibilidad de que cada muestra asignada pertenezca a cada uno de los temas clasificados.

Tabla 17. Matriz de confusión de las muestras SP-SM.

Muestra	1	2
SP-SM	66.67%	100.00%
SP-SC	1.52%	0.00%
SP	0.00%	0.00%
Sc1	13.64%	0.00%
Sc2	9.09%	0.00%
Sc3	9.09%	0.00%
Sc4	0.00%	0.00%
Rig	0.00%	0.00%

Tabla 18. Matriz de confusión de la muestras SP-SC.

Muestra	1	2	3
SP-SM	0.00%	0.00%	16.67%
SP-SC	60.00%	85.71%	83.33%
SP	0.00%	0.00%	0.00%
Sc1	20.00%	0.00%	0.00%
Sc2	0.00%	0.00%	0.00%
Sc3	0.00%	0.00%	0.00%
Sc4	20.00%	0.00%	0.00%
Rig	0.00%	14.29%	0.00%

Tabla 19 Matriz de confusión de la muestras SP

Muestra	1	2
SP-SM	0.00%	0.00%
SP-SC	0.00%	0.00%
SP	100.00%	100.00%
Sc1	0.00%	0.00%
Sc2	0.00%	0.00%
Sc3	0.00%	0.00%
Sc4	0.00%	0.00%
Rig	0.00%	0.00%

Tabla 20. Matriz de confusión de las muestras Sc1.

Muestra	1	2
SP-SM	16.67%	0.00%
SP-SC	0.00%	3.57%
SP	33.33%	7.14%
Sc1	50.00%	50.00%
Sc2	0.00%	32.14%
Sc3	0.00%	7.14%
Sc4	0.00%	0.00%
Rig	0.00%	0.00%

Tabla 21. Matriz de confusión de las muestras Sc2.

Muestra	1	2
SP-SM	0.00%	0.00%
SP-SC	0.00%	0.00%
SP	0.00%	0.00%
Sc1	5.56%	20.00%
Sc2	94.44%	80.00%
Sc3	0.00%	0.00%
Sc4	0.00%	0.00%
Rig	0.00%	0.00%

Tabla 22. Matriz de confusión de las muestras Sc3.

Muestra	1	2	3
SP-SM	33.33%	0.00%	33.33%
SP-SC	33.33%	0.00%	0.00%
SP	0.00%	0.00%	0.00%
Sc1	5.56%	0.00%	0.00%
Sc2	0.00%	0.00%	0.00%
Sc3	33.33%	100.00%	66.67%
Sc4	0.00%	0.00%	0.00%
Rig	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 23. Matriz de confusión de las muestras Sc4.

Muestra	1	2	3	4
SP-SM	0.00%	11.11%	16.96%	27.27%
SP-SC	0.00%	2.78%	0.00%	0.00%
SP	0.00%	0.00%	2.68%	0.00%
Sc1	0.00%	13.89%	1.79%	0.00%
Sc2	0.00%	5.56%	1.79%	18.18%
Sc3	0.00%	5.56%	9.82%	18.18%
Sc4	100.00%	61.11%	63.39%	36.36%
Rig	0.00%	0.00%	3.57%	0.00%

Tabla 24. Matriz de confusión de las muestras Rig.

Muestra	1	2	3
SP-SM	0.00%	0.00%	0.00%
SP-SC	0.00%	0.00%	0.00%
SP	0.00%	0.00%	0.00%
Sc1	0.00%	0.00%	0.00%
Sc2	0.00%	0.00%	0.00%
Sc3	0.00%	16.67%	0.00%
Sc4	0.00%	83.33%	0.00%
Rig	100.00%	0.00%	100.00%

Finalizada la clasificación supervisada por medio del Spring, se procede a obtener los resultados, los cuáles nos muestran las áreas que fueron clasificados en cada grupo.

Tabla 25. Áreas de clasificación obtenidas de cada grupo.

Plano de Información:		
CLASIFICACION/CLASIFSUELOS-T		
Representación: Mapa Vectorial		
Área (kmxkm)		
Arenas mal gradadas y limosas	SP-SM	21,3077
Arenas mal gradadas y arcillosas	SP-SC	36,9612
Arenas mal gradadas	SP	21,1032
Arenas arcillosas	Sc1	6,4062
Arenas arcillosas	Sc2	35,9226
Arenas arcillosas	Sc3	24,4962
Arenas arcillosas	Sc4	47,3274
Roca Ígnea	Rig	15,6096
Área total de las clases:		195,3550
Área total de los Polígonos no clasificados		0

Clasificación Supervisada -Tipos de Suelo

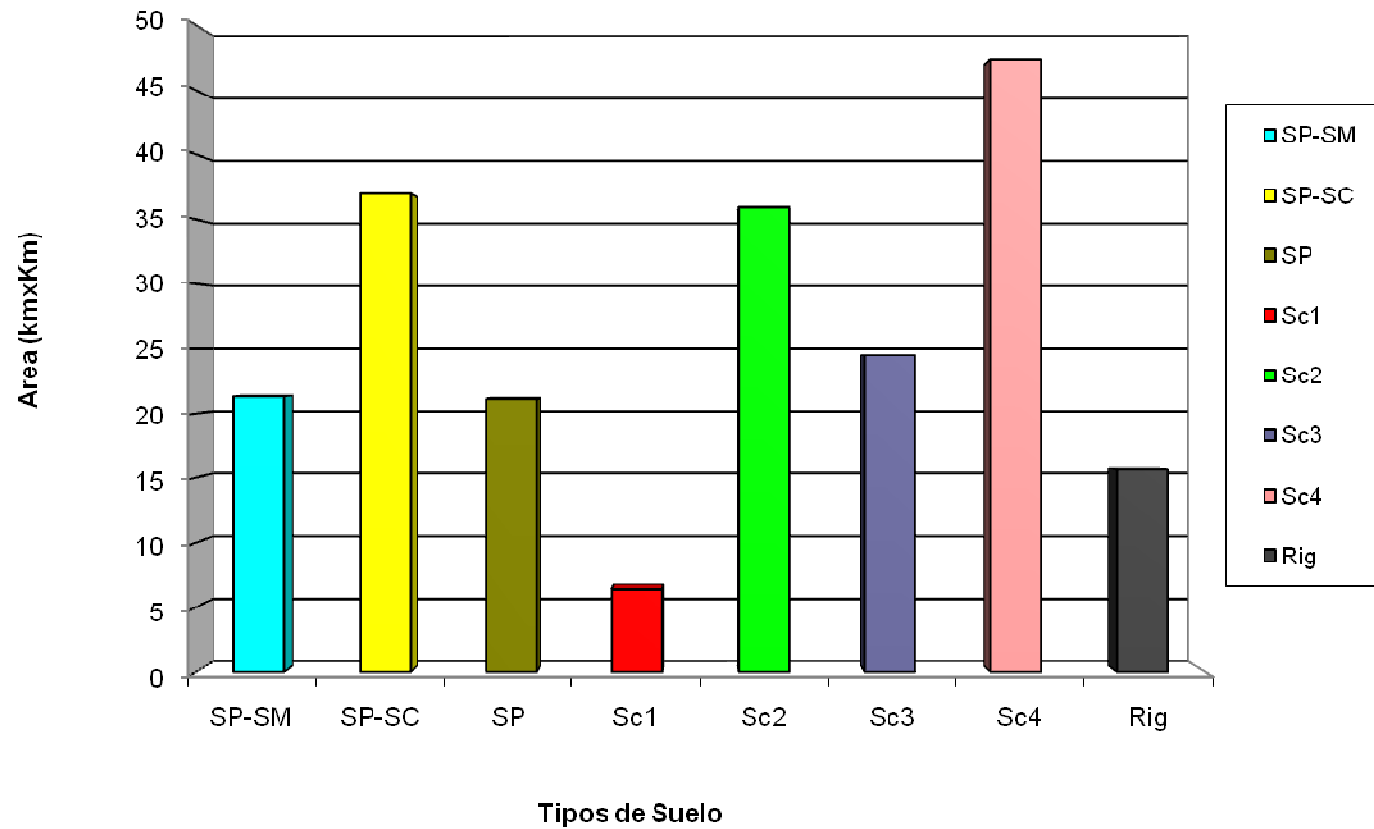


Figura 26. Diagrama de barras del área en km² de los tipos de suelos.

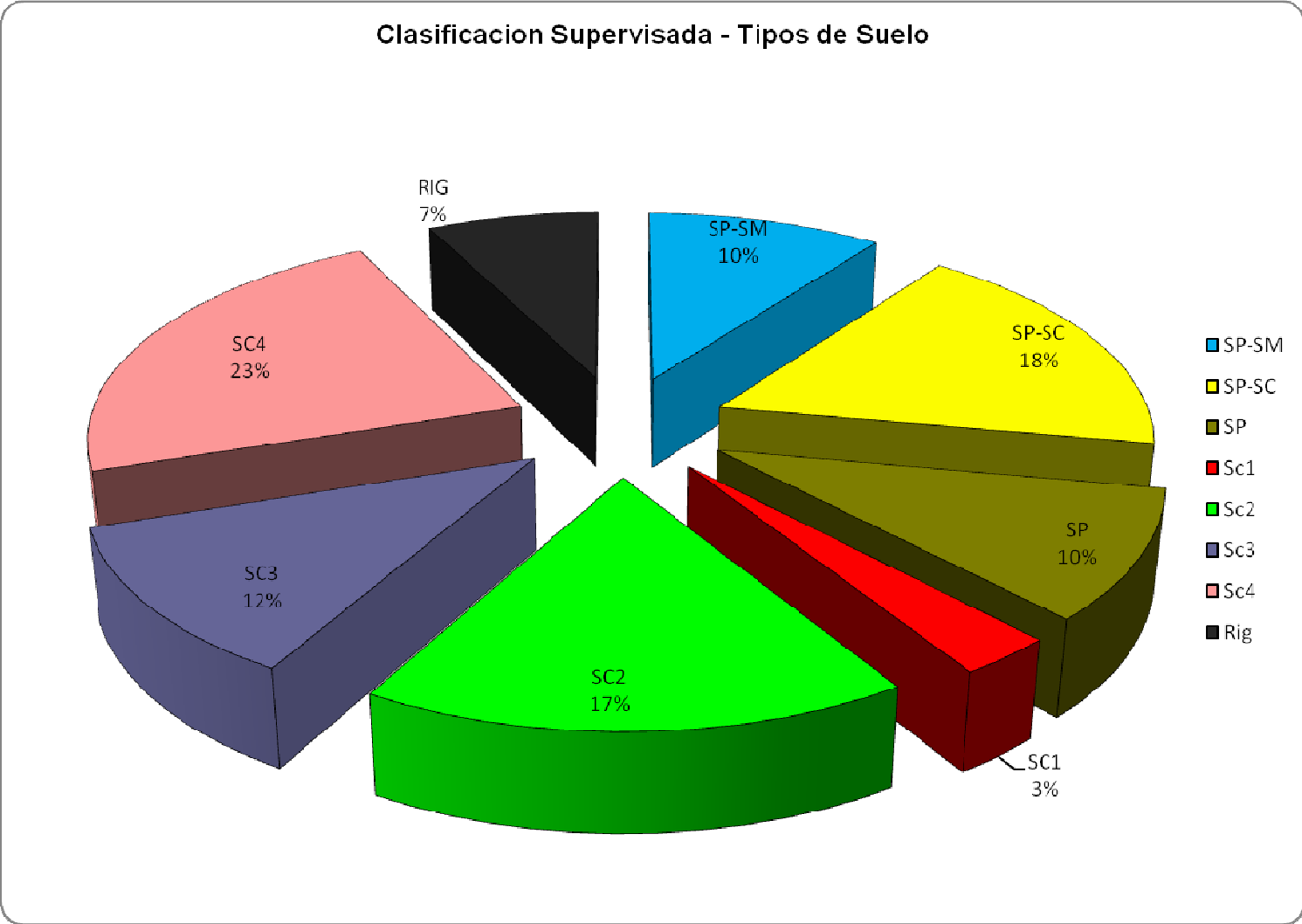


Figura 27. Diagrama circular % de area en Km² de los tipos de suelo.

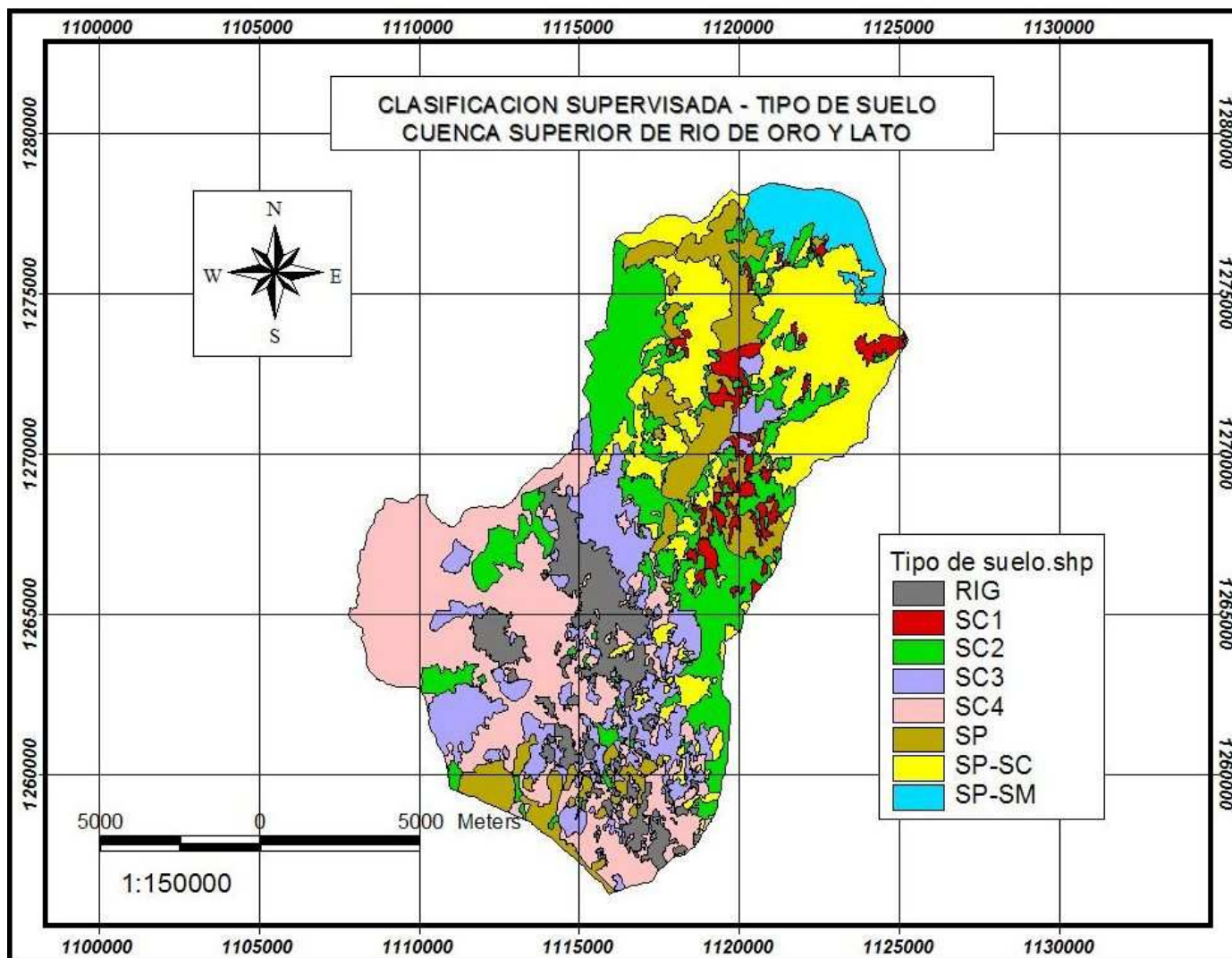


Figura 28. Resultado obtenido de la clasificación supervisada.

Para el proceso de validación de la clasificación obtenida del software Spring, se ubicaron las coordenadas de las muestras de los suelos tomados en la zona de estudio en el mapa obtenido de la clasificación final y se obtuvo el siguiente gráfico.

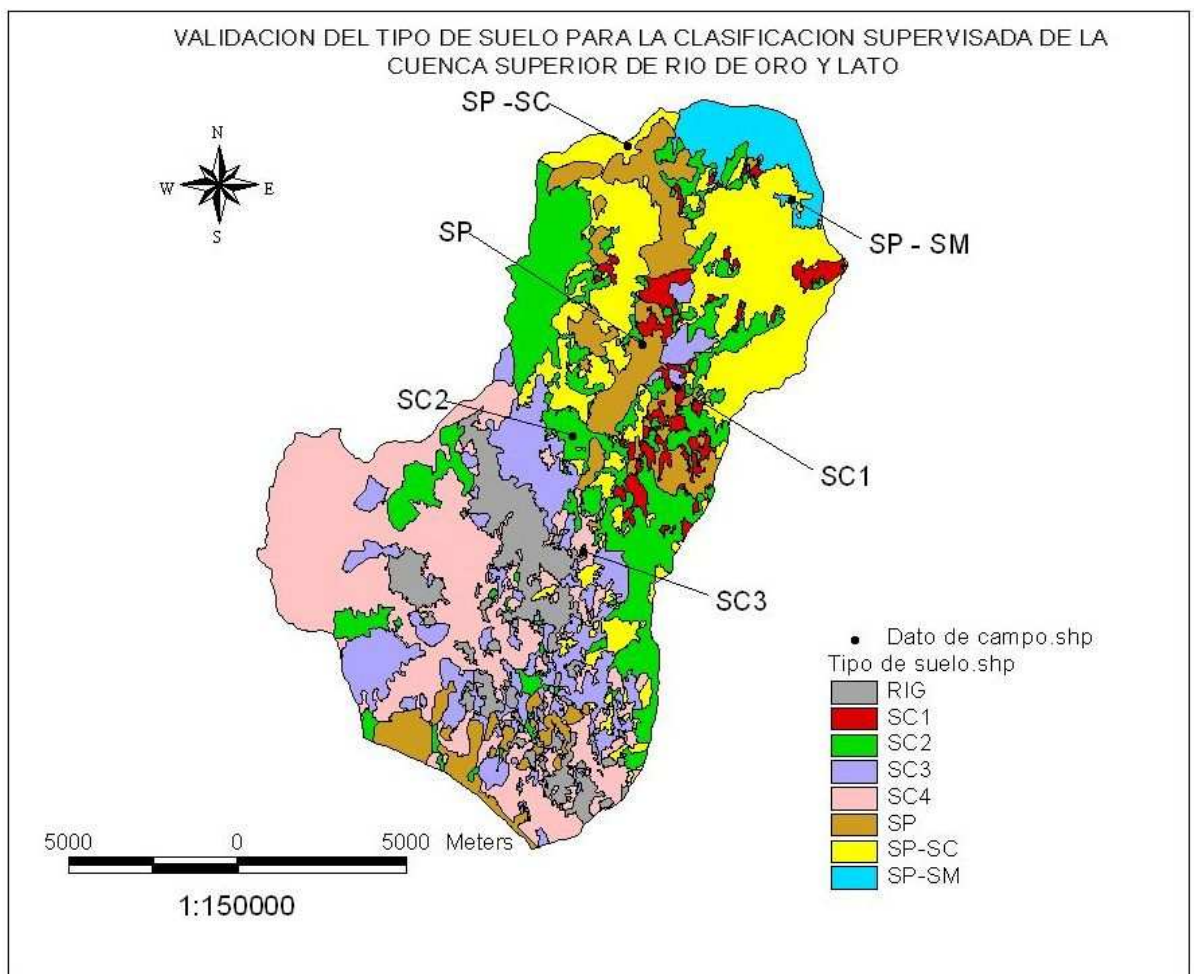


Figura 29. Validación de los suelos.

5. CONCLUSIONES

- De los métodos de interpolación utilizados en la generación del modelo digital de elevaciones a partir de la cartografía, la red de triángulos irregulares TIN es la que representa con mayor precisión la superficie del terreno, ya que presenta el menor error medio cuadrático que fue equivalente a 5.07 metros.
- En la clasificación supervisada de la imagen satelital de los diferentes tipos de clasificadores utilizados, el ordenador del tipo pixel a pixel Maxver con umbral del 100%, es el que nos generó el mayor grado de aceptación, con un desempeño medio del 64.72%, esto presenta una mayor similitud con la cartografía de suelos realizada; este mapa se realizó con base en la correlación de la cartografía de suelos del plan de ordenamiento territorial del municipio de Piedecuesta, los resultados de laboratorios de las muestras de campo y el mapa geológico realizado por la UIS e Ingeominas.
- No fue posible la integración del modelo digital de elevación generado a partir de imágenes de radar con el modelo digital de elevaciones generado a partir de la cartografía digital, ya que se encuentran referenciados a datums verticales diferentes, y hasta el momento no existe una formula matemática que los relacione. El modelo digital de elevación generado a partir de las imágenes de radar no pudo ser validado, ya que el datum de referencia de este es el geoide EGM96, y en la actualidad en Colombia no existen puntos georreferenciados a este geoide.
- En el estudio fueron obtenidos dos mapas con información topográfica de la Cuenca Superior del Río de Oro y del Lato con una resolución de 30 x 30 metros, el primero fue desarrollado con la cartografía digital disponible a una escala de 1:25000, mientras que el segundo es el resultado de la

manipulación de la información obtenida del Lanzamiento de la Misión Topográfica de Radar de la Nasa.

- Del mapa temático obtenido de la clasificación de las bandas 4, 5 y 7 de la imagen satelital Landsat 7 ETM+, se observa que los suelos de mayor presencia en la Cuenca Superior del Río de Oro y la Cuenca del Lato fueron los Sc4 (arenas arcillosa de clima medio semi-húmedo), SP-SC (arena mal gradada y arcillosa) y Sc2 (arena arcillosas de clima medio super-húmedo) con un porcentaje de área en Km² de 23%, 18% y del 17% respectivamente.
- El estudio ha mostrado que la interpretación de imágenes satelitales puede usarse para el reconocimiento más eficiente y acertado en la clasificación de parámetros como el tipo de suelo o la vegetación de un área de estudio comparado con la metodología convencional de mapas cartográficos, pudiéndose revisar estos mapas y mejorarse con la precisión que ofrecen las imágenes satelitales, los mapas obtenidos en este proyecto como insumo para el desarrollo de modelos hidrogeológicos.

6. RECOMENDACIONES

- Para futuros proyectos en la elaboración de modelos digitales de elevación a partir de cartografía existente, trabajar con información de mayor calidad (menor escala) con el fin de obtener una mejor representación de la realidad a través de los modelos.
- Se debería emplear el modelo digital de elevación a partir de cartografía digital para realizar trabajos que deban presentarse en Colombia ya que todavía se maneja la cartografía con origen al datum de Buenaventura con coordenadas Gauss Kruger, y emplear el modelo digital de elevación generado a partir de imágenes SRTM cuando se vayan a presentar resultados en el exterior.
- Emplear un equipo de cómputo con mayor desempeño (velocidad del procesador y memoria RAM) que permita un menor tiempo en la realización de los procesos a la imagen satelital y al modelo digital de elevación.
- La toma de puntos de validación para la clasificación supervisada debe ser más numerosa posible, es decir, deben tomarse puntos alrededor de toda la zona ya que esto permite certificar los estudios.
- Para proyectos futuros de clasificación a partir de imágenes satelitales se deberían emplear otros tipos de imágenes como las ASTER la cual posee hasta 14 bandas entre ellas las infrarrojas, esto permite tener una mejor y mayor confiabilidad en la clasificación.
- Para aprobar el MDE se debe contar con el mayor número de puntos georreferenciados ya que esto genera mayor confianza en la validación del modelo.

BIBLIOGRAFIA

Brasil. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Identificación del uso del suelo con sistemas agrícolas-pecuarios-florestales por medio de imágenes de satélite landsat y cbers. INPE-12568-PUD/168; 2005. 33p.

Buenahora C., Osorio H., Desarrollo del modelo digital de elevaciones de la cuenca de Rio Sucio Municipio de Tona; Tesis de grado. 2005; UIS. 68p.

Chuvieco E., Fundamentos de teledetección espacial. 3ed. España: Rialp, 2000. 568p.

Chuvieco E., Congalton R.G., 1989. Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping. Remote Sensing of environment, 29, 147-159p.

Colombia. Comisión Colombiana del Espacio – CCE, Clasificación digital de la cobertura del suelo urbano, usando algoritmos de redes neuronales artificiales. Bogota; 2007. 111-123p.

ESRI. 1999. User guide ArcView GIS, Version 3.2

ESRI (2003). Using Spatial Analyst. Environmental System Research Institute.

Farias G., Dimundo C., Clasificación supervisada con imágenes landsat.

En: En memorias del 2^{do} Seminario Internacional Cambio Climático y Sumideros de Carbono; 2003 Dic 17-18; Norte de Santa Fe.; 2003. pp 1-14.

Forero, J.C. Gómez S. Avance de la aplicación de un Modelo hidrogeológico en la cuenca superior del Río de Oro, Santander. III Congreso Colombiano de Hidrogeología, Bogotá. 2009.

Felicísimo, Ángel M. Modelos Digitales del Terreno, Introducción y Aplicaciones en las ciencias Ambientales. Oviedo (España), 1994.

Garcia M., Palabral A., Aplicación de Técnicas Cartográficas y de Teledetección en la Investigación y Conservación de los Yungas Bolivianos. En 8th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography; 2006 Oct. 29-31; La Paz; Universidad Mayor de San Andrés; 2006; pp 49-58.

Giraut M., Dinámica Geomorfológica del humedal fluvial del Río Paraná en la provincia del Chaco. [Tesis Doctoral]. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Naturales y Museo; 2005. 175p.

Guzmán J., Anaya A., Niño E., Gómez S., Colegial J., Cuenca experimental Río Sucio.[Informe Final Convenio Institucional amb-UIS] Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander; 2005. 219p.

Gutiérrez M., Branch J., Botero V., Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: "Landsat – Etm+" Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín.Vol.58, No.1.p.2611-2634.2005

J.H. Gómez, E.J.Rojas, E. Herrera. Curso Básico de ArcView GIS. Material de soporte para la Clase de Sistemas de Información Geográfica, UIS.2003.

Mari N., Estudio de la ocurrencia de incendios en el Valle de Punilla, Córdoba. [Tesis de grado]. Córdoba: Universidad de Ciencias Empresariales y Sociales. Licenciatura en Ingeniería Ambiental; 2003. 81p.

Mejia C., Coronado W., Cartografía geológica y caracterización estructural con fines hidrogeológicos en el sector nororiental de la cuenca del río de oro. [Tesis de grado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físico Químicas; 2006. 144p.

Osorio R., Gonzalo W., Modelo digital de elevación para la cuenca del río de oro. [Tesis de grado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físico Mecánica; 2005. 126p.

Plan de Ordenamiento Territorial (POT) municipio de Piedecuesta. (2004).

Pinto J., Interpretación Digital. En: Pinto J. Teledetección. Bucaramanga; pp 1 -28.

Puricelli M., Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica. [Tesis de Doctorado]. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería Hidráulica y medio Ambiente; 2003. 436p.

Richards J., Xiuping J., Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. 2 ed. Inglaterra: Springer, 1997. 283 p.

Singh A., Comparison of reconnaissance soil maps prepared by conventional method and landsat imagery interpretation, Jour. Ind. Soc. Photo-int. & Remote Sensing, Vol. 8, No. 1, 1980.

USGS, *United State Geological Survey*, <http://www.usgs.gov/>, *Information sobre SRTM*.

Vicente S., Pérez F., Lasanta T., Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of Landsat images. Elsevier. 2008; 3916 – 3934p.

Villamizar J., Generación del modelo digital de elevaciones (MDE) correspondiente a la mesa de Barichara, limitada por los ríos Fonce, Suarez y Chicamocha. [Trabajo de grado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico Mecánica; 2006; 100p.

ANEXOS

MANUAL DE PROCESAMIENTO PARA ELABORACION DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACION EN SOFTWARE

ArcView 3.1

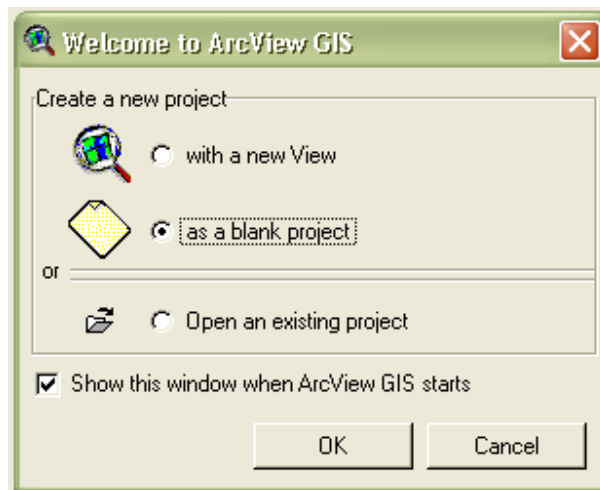
Basado Curso Básico de ArcView GIS. Material de soporte para la Clase de Sistemas de Información Geográfica, UIS, J.H. Gómez, E.J.Rojas, E. Herrera, 2003

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. GENERACION DE NUEVOS PROYECTOS	76
2. CREAR UNA VISTA	76
3. PROPIEDADES DE LA VISTA	77
4. AÑADIR TEMAS A LA VISTA	78
5. TEMAS CON FORMATO SHAPE	78
6. INTERPOLADORES	79
6.1 CREAR UN ARCHIVO TIN	79
6.2 PESO PROPORCIONAL AL INVERSO DE LA DISTANCIA	80
6.3 INTERPOLACION POR METODO SPLINE	81
7. IMPORTAR Y RECORTAR MASCARA	82
8. MODELO DIGITAL DE ELEVACION A PARTIR DE DATOS SRTM	84
8.1 IMPORTACION DE DATOS SRTM A ARCVIEW	85
9. IMPORTAR Y RECORTAR MASCARA	87

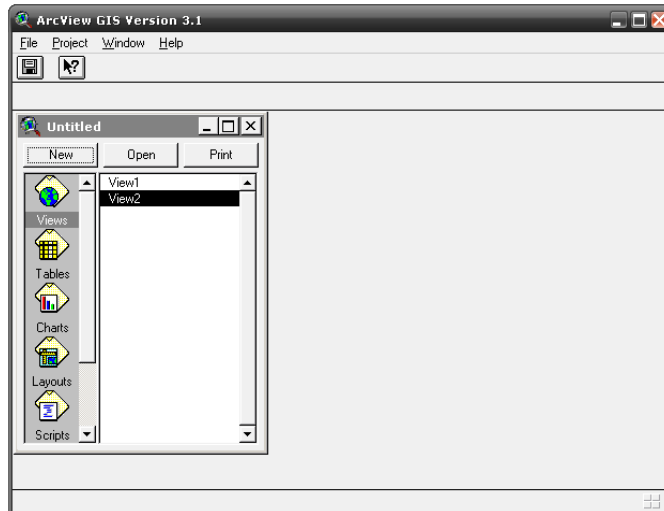
1. GENERACION NUEVOS PROYECTOS

Cuando se pone en marcha ArcView, aparece la pantalla inicial sobre la que se despliega un cuadro de diálogo, que permite elegir entre crear un proyecto nuevo o abrir uno ya existente. Al aceptar la opción de crear un proyecto nuevo desaparece el cuadro de diálogo, permitiendo visualizar por completo la ventana de aplicación de ArcView.



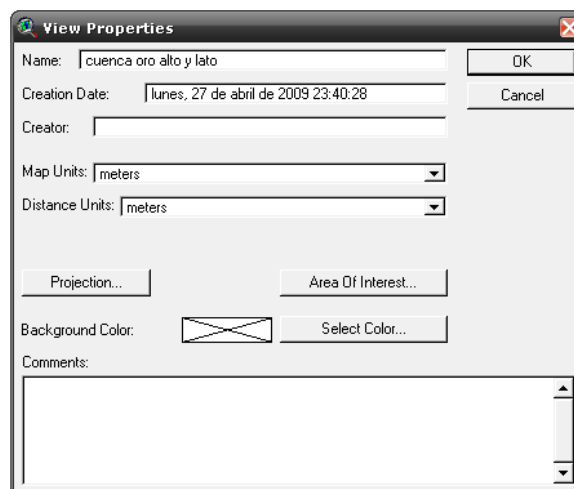
2. CREAR UNA VISTA

Una vista es un mapa interactivo que contiene las distintas capas de información geográfica. *En la **Ventana del proyecto**, seleccionamos la Interface “Vistas”, y creamos una **vista** nueva pulsando el botón **New** que aparece en la parte superior de la ventana.*




3. PROPIEDADES DE LA VISTA

En el menú **View**, seleccionamos la opción **Properties**. Allí, podemos establecer las propiedades de la vista. Es muy importante seleccionar las unidades de la cartografía (unidades en las que fue construida la cartografía) y las unidades de distancia que usaremos para esa vista.



4. AÑADIR TEMAS A LA VISTA

Dentro de una vista, podemos agregar diferentes tipos de “temas” o capas de información cartográfica: vectoriales, raster, etc. Los temas o capas del tipo “vectoriales” representan elementos geográficos, mediante tres formas básicas: puntos, líneas y polígonos. Los temas pueden ser creados desde una variedad de fuentes, incluso mapas digitales existentes, imágenes y ficheros tabulares.

Para cargar dibujos CAD como archivos DWG, DXF, DGN hace falta cargar la extensión 'Cad Reader'. Asimismo, para que ArcView pueda visualizar archivos de imágenes satelitales del tipo “raster” (img, tiff, etc), también debemos cargar las extensiones pertinentes. -Añadimos los temas, que van a formar parte de la vista, eligiendo la opción **Add Themes**, dentro del menú **View**, o pulsando sobre el botón .

5. TEMAS CON FORMATO SHAPE

Es el formato nativo de ArcView GIS para almacenar localizaciones y atributos de los elementos espaciales. Los archivos shapes pueden ser creados a partir de fuentes de información espacial existente, o pueden ser generados desde ArcView, donde podemos añadir y dibujar los elementos. Estos archivos tienen gran rapidez en el despliegue y visualización, y pueden ser editados. Aunque desde ArcView un fichero se trata como un solo archivo, en realidad consta de tres o más archivos con el mismo nombre y extensiones diferentes:

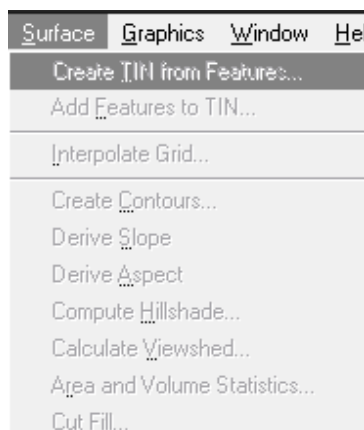
Podemos convertir una capa de información proveniente de un archivo de CAD, en un tema con formato shape. Cargamos a nuestro proyecto el tema en cuestión. Desde el menú **Theme**, seleccionamos **Convert to shape**.

6. INTERPOLADORES

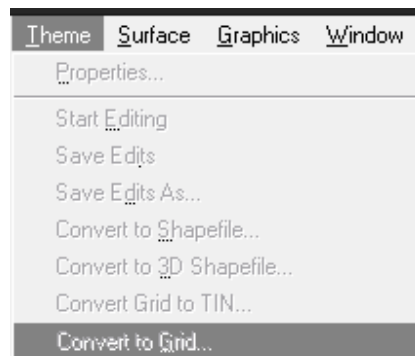
ArcView utiliza métodos de interpolación locales usan la información proveniente de los vecinos para calcular el valor del atributo.

6.1. CREAR UN ARCHIVO TIN

Esto consiste en generar una Red Irregular de Triángulos los cuales se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales y se agrupan formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferentes grados de detalle en función de la complejidad del relieve, para esto en la opción **Menú- Surface- Create TIN From Features**. Después de esto aparecerá una ventana llamada **Create New TIN**, en la opción **Height Source** se busca el campo **Elevación** y se presiona **OK**. Se debe ubicar el TIN en la carpeta que se está trabajando y se le debe otorgar un nombre.



A partir del tema construido se elabora una grilla para esto usamos la opción **Menu- Theme-Convert to Grid** y muestra una ventana en la cual se especifica la carpeta para guardar el archivo luego de esto se debe especificar el tamaño de la celda o pixel se da **Enter** y **Ok**. El programa nos pregunta si queremos añadir la grid a la vista y damos **Ok**.

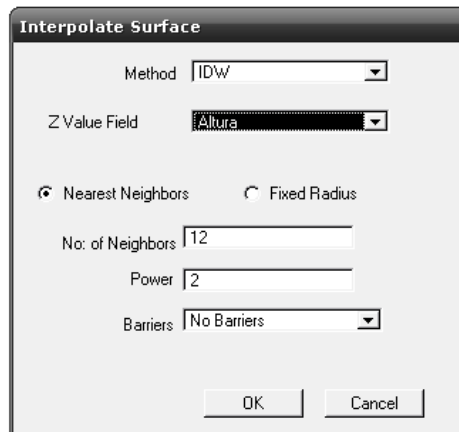


6.2. PESO PROPORCIONAL AL INVERSO DE LA DISTANCIA (IDW)

Cada punto de la muestra ejerce una influencia sobre el punto a determinar y disminuye en función de la distancia. Así cada punto vecino contará con un "peso" en la determinación de la cota del punto a interpolar, que será mayor cuanto más cerca se encuentre, siguiendo el principio de correlación espacial. IDW se presenta en Spatial Analyst como dos opciones: Con un radio de búsqueda fijo y un radio de búsqueda variable. Para el primero de ellos el radio del círculo usado para buscar entradas de puntos es igual para cada celda interpolada. Para especificar una cantidad mínima se puede asegurar que dentro del radio fijo, al menos un número mínimo de puntos de entrada será usado en el cálculo de cada celda interpolada.

Con un radio variable, la cantidad representa el número de puntos usados en calcular el valor de la celda interpolada. Esto hace variable la búsqueda del

radio para cada píxel interpolado, dependiendo de cómo tenga que estirarse para alcanzar el número especificado de los puntos de la entrada.



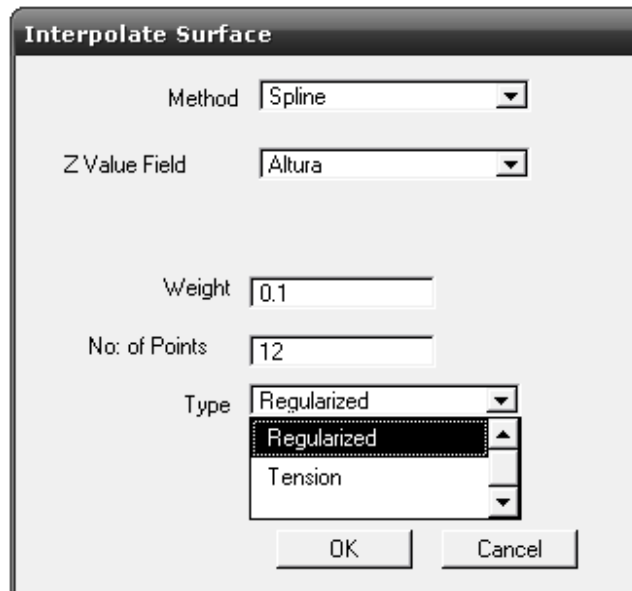
6.3 INTERPOLACIÓN POR MÉTODO SPLINE

Spline estima valores usando una función matemática que reduce al mínimo la curvatura de la superficial total, dando como resultado una superficie lisa que pasa exactamente a través de los puntos muestreados. Este método es el mejor para con cuidado variar superficies como la elevación, alturas de superficie del agua, o concentraciones de contaminación.

Hay dos métodos Spline: Regularizad y tension (Regularizado y Tensión)

Regularized: El método Regularizado crea una superficie suave, de manera gradual cambiando la superficie con los valores que pueden estar fuera de la gama de datos de la muestra.

Tension: El método de Tensión suaviza la rigidez de la superficie según el carácter del fenómeno modelado. Esto crea la superficie lisa con valores estrechamente obligados por la gama de datos de la muestra.



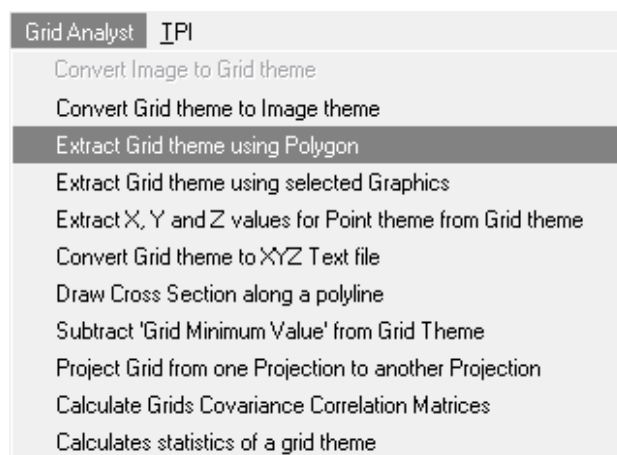
7. IMPORTAR Y RECORTAR MASCARA

El primer paso es importar un tema que contenga la delimitación del área de interés, para esto se debe importar el archivo tipo **CAD** y convertirlo a formato **Shape** siguiendo los pasos anteriormente mencionados.

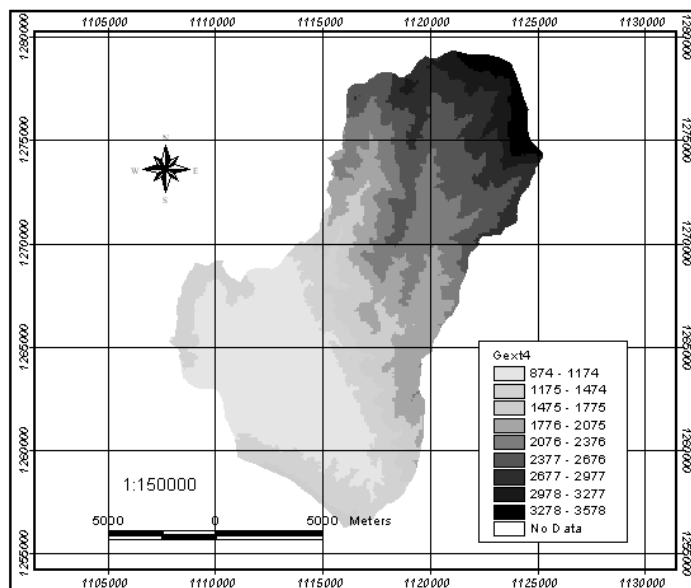
A partir de este tema generamos un polígono para esto utilizamos el **Menu-Xtools-Make One Polygon From Polylines** nos pregunta que si queremos construir a partir del tema seleccionado y damos **Ok** y especificamos la carpeta en la que queremos guardar el archivo.



Para recortar de la Grid la parte seleccionada se va a **Menu Grid Analyst-Extract Grid Theme Using Polygon** y damos **Ok** y especificamos el polígono del cual se desea realizar el recorte y damos **Ok**.



Con esto el programa genera un archivo tipo Grid que contiene el área delimitada por el polígono generando el Modelo Digital de Elevaciones para las curvas de nivel analizadas.

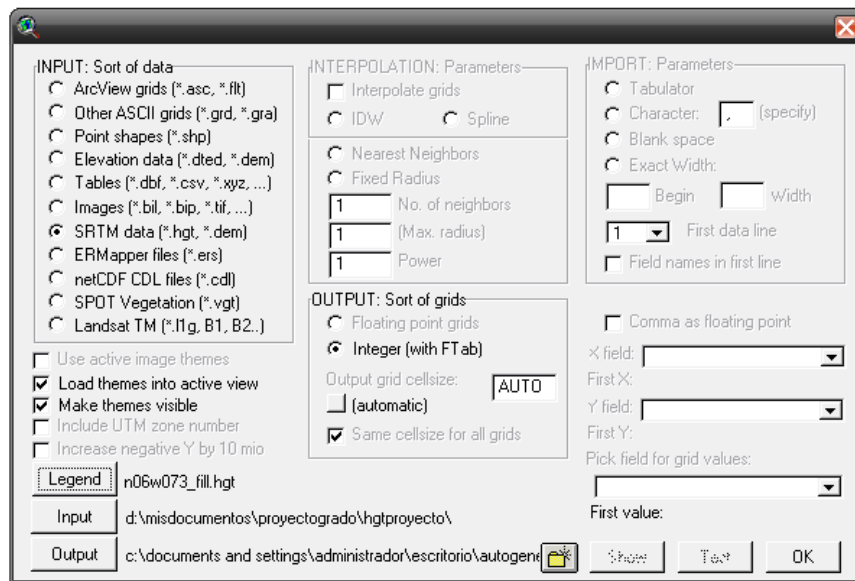


8. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DE A PARTIR DE DATOS SRTM

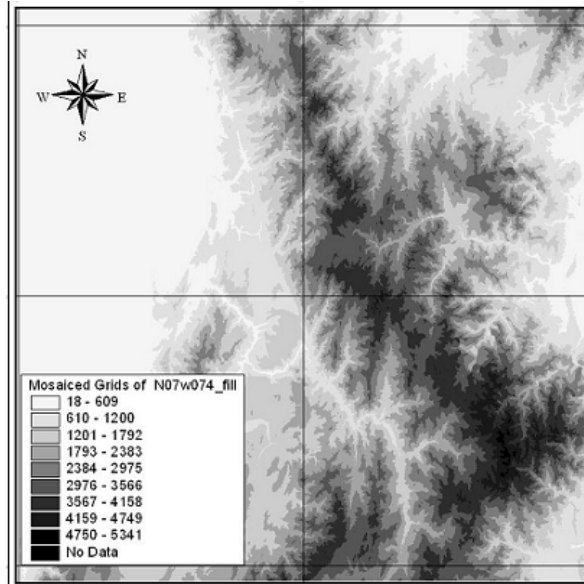
Para realizar la integración entre los datos cedidos por el formato **RASTER** de la **SRTM** (lanzamiento de la Misión Topográfica de Radar) y el **SIG ArcView** se utilizó la extensión **Gridmachine** facilitada como una versión de prueba para estudiantes por la página Web ECOGIS (www.ecogis.de), esta extensión se ejecuta y ella automáticamente se anexa en la carpeta extensión del programa, y se activa en el **Menu File-Exten**.

8.1 IMPORTACIÓN DE DATOS SRTM A ARCVIEW.

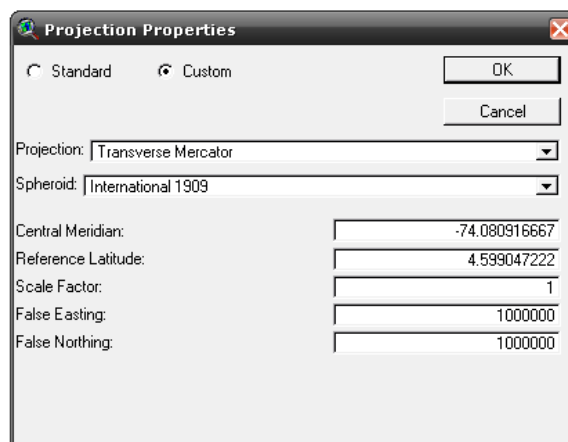
Para importar los datos **SRTM** a **ArcView** vamos a **Menu GirdMachine-Import Machine**, esta nos despliega una ventana en la cual se debe especificar el tipo de dato, la carpeta donde se encuentran recopilados los datos y la carpeta de salida y damos **Ok**.



Para generar el modelo definitivo fue necesario la utilización de cuatro archivos diferentes de la misión **SRTM**, con estos archivos se debe generar un mosaico; esta se logra a través de Menu **Transformation-Mosaic**, esto genera un Modelo continuo y sin costuras.



Los datos **SRTM** se encuentran en coordenadas geográficas (latitud y longitud); estos deben ser proyectados al sistemas de coordenadas planas trabajado en Colombia (**Proyección Transverse de Mercator o Gauss Krugger Medele de la Tierra Hayford o Internacional**), esto se realiza a través de **Menu Grid Analyst-Project Grid From one Projection to another Projection**, y nos pide que especifiquemos las unidades en las cuales queremos trabajar y seleccionamos metros, y damos **Ok**, se abre una ventana en la incluimos los parámetros para la definición del sistema de coordenadas de Colombia y damos **Ok**.



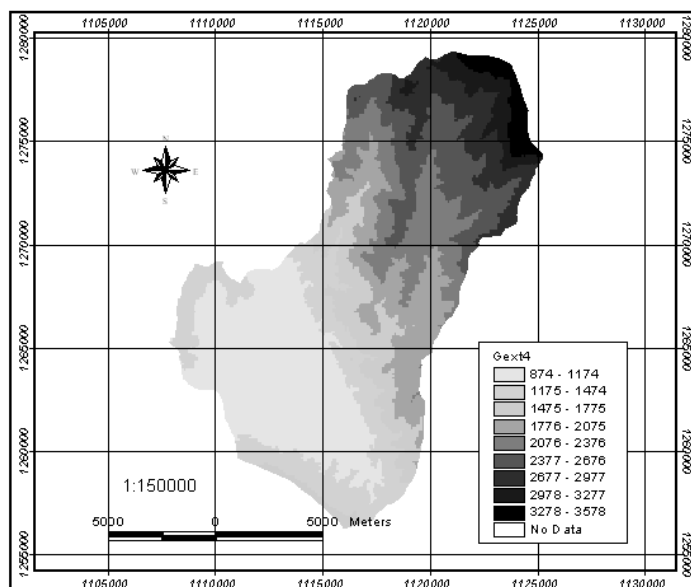
9. IMPORTAR Y RECORTAR MASCARA

El primer paso es importar un tema que contenga la delimitación del área de interés, para esto se debe importar el archivo tipo **CAD** y convertirlo a formato **Shape** siguiendo los pasos anteriormente mencionados.

A partir de este tema generamos un polígono para esto utilizamos el **Menu-Xtools-Make One Polygon From Polylines** nos pregunta que si queremos construir a partir del tema seleccionado y damos **Ok** y especificamos la carpeta en la que queremos guardar el archivo.

Para recortar de la Grid la parte seleccionada se va a **Menu Grid Analyst-Extract Grid Theme Using Polygon** y damos **Ok** y especificamos el polígono del cual se desea realizar el recorte y damos **Ok**.

Con esto el programa genera un archivo tipo Grid que contiene el área delimitada por el polígono, generando el Modelo Digital de Elevaciones para los **SRTM**.



**MANUAL DE PROCESAMIENTO
PARA ESTUDIO DE CUENCAS EN
ZONAS TROPICALES BASADOS
EN ANÁLISIS DE IMÁGENES
SATELITALES EN SOFTWARE**

SPRING 5.0.4.


Basado en el Taller de Clasificación de Imágenes. Material de soporte para la Especialización en Sistemas de Información en Geográfica, UIS, Jorge Pinto, 2003

TABLA DE CONTENIDO

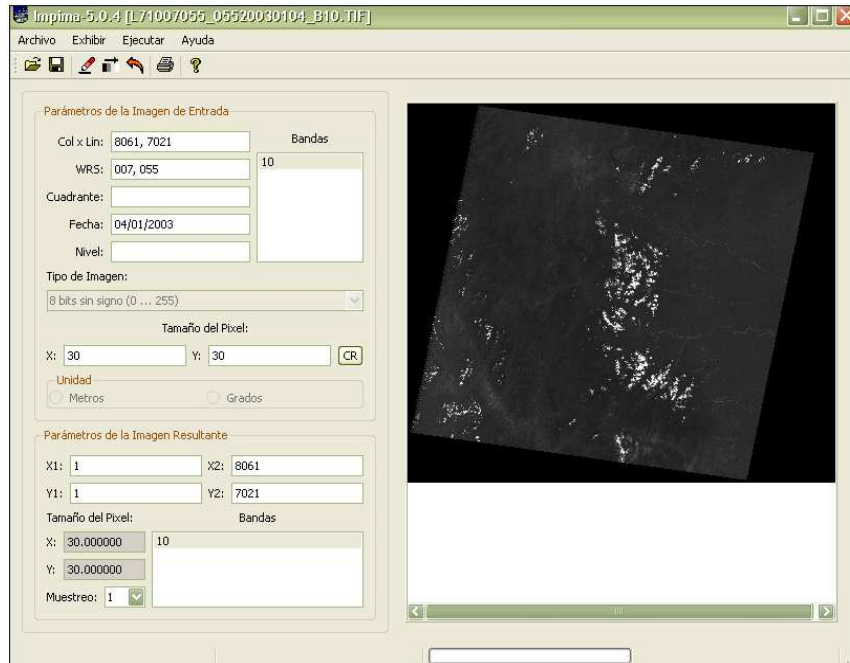
	Pág.
1. ADQUISICION IMAGEN PARA IMPIMA	90
2. GENERACION DE UN BANCO DE DATOS	91
3. CREACION DE PROYECTOS SPRING	92
4. REGISTRO DE UNA IMAGEN	94
5. IMPORTAR IMÁGENES A SPRING	96
6. CLASIFICACION SUPERVISADA POR PIXEL	97
6.1 ENTRENAMIENTO	99
6.2 CLASIFICACION	100
6.3 POS-CLASIFICACION	103
6.4 MAPEO	104
7. IMPORTAR Y RECORTAR MASCARA	105
8. ANALISIS MATRICIAL Y VECTORIAL	108

1. ADQUISICION DE LA IMAGEN POR IMPIMA


Para trabajar una Imagen de Satélite en cualquiera de las versiones de SPRING lo más aconsejable es transformar el formato de la imagen ya sea tipo RAM (Formato crudo de adquisición de las imágenes otorgado por Satélite) o formato TIFF a formato GRIB. Para realizar este proceso SPRING ofrece una herramienta llamada IMPIMA que utiliza las imágenes y permite guardarlas en el formato deseado.

YA en IMPIMA se especifica el tipo de archivo que se va a abrir y se indican el número de columnas por filas que posee la imagen y la resolución de adquisición del satélite, se procede a señalar la banda y a visualizar la imagen dando clic en el botón visualizar .

Después de visualizada la imagen se guarda como archivo tipo SPG se señala la banda y se debe observar que el **Muestreo** sea 1 para que se mantenga la resolución a la hora de guardar la imagen. Este procedimiento debe realizarse para todas las bandas.



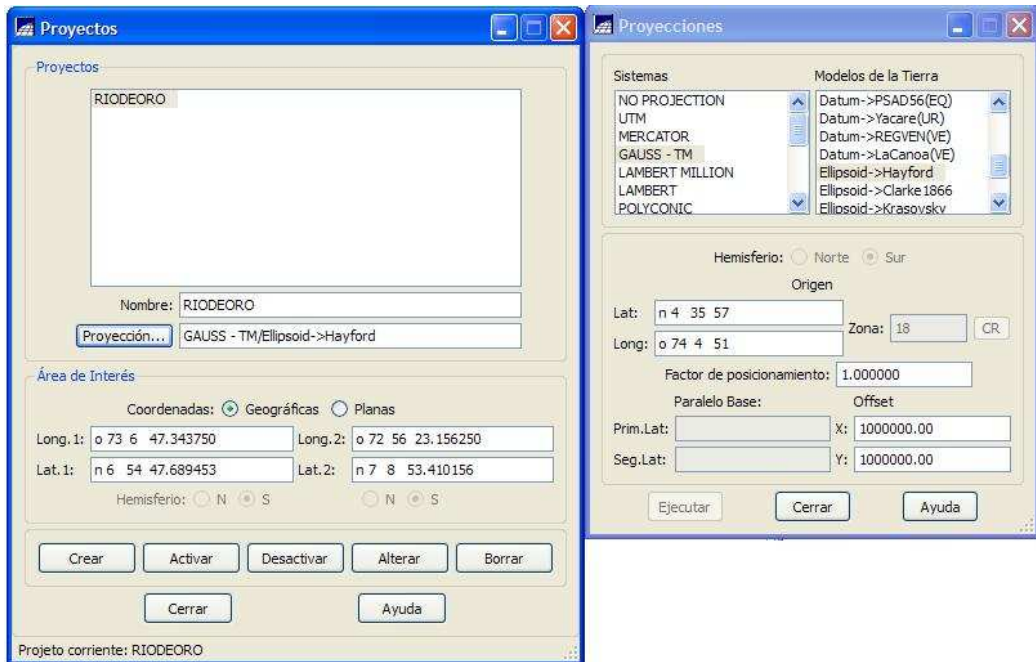
2. GENERACION DE UN BANCO DE DATOS


Una vez en la pantalla principal del Spring, con el botón  o por la Ruta **Archivo-Banco de Datos** abrimos el banco de datos sobre el cual se quiere trabajar, sino se ha creado ningún banco de datos dar un Nombre y el Tipo de formato en el que se quiera guardar la base de datos ya sea Dbase, Access o Oracle entre otras y se da clic en **Crear** y luego **Activar**. Si ya se ha creado uno previamente entonces sobre la ventana se selecciona el banco de datos y posteriormente se da clic en activar. Lo más recomendable es guardar el banco de datos en el Disco D del computador donde se está trabajando.




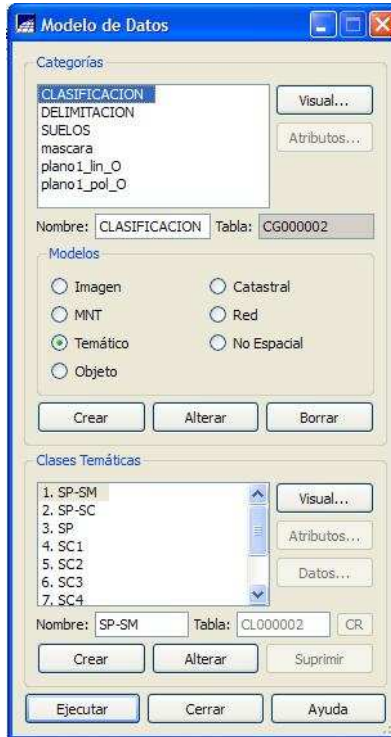
3. CREACION DE PROYECTOS SPRING

Para crear el proyecto en el que se trabajara es necesario determinar la proyección de las imágenes y las coordenadas del proyecto, este paso es de suma importancia: la proyección puede venir ya determinada por el tipo de imagen con la cual se está trabajando, para nuestro caso trabajamos con la proyección GAUSS- TM con el Elipsoide Hayford y tomando como origen Bogotá. Las coordenadas del proyecto deben ser mayores al área de las imágenes sobre las cuales vamos a trabajar para evitar errores de borde en la clasificación, para finalizar damos clic en **Ejecutar** y luego **Activar**



Cada vez que se desee activar el proyecto se puede proceder con el botón  o siguiendo la ruta **Archivo- Proyecto**.

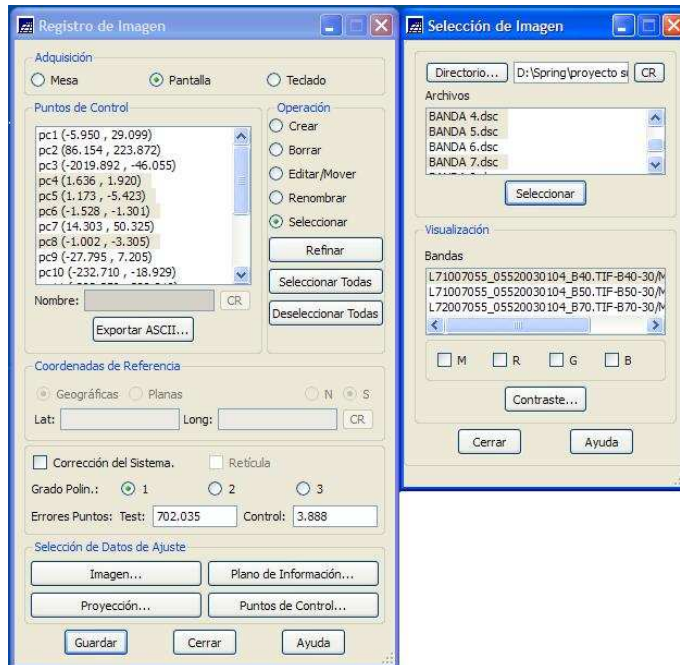
Es de gran importancia crear las categorías y sus respectivas clases antes de realizar el registro e importación de imágenes georeferenciadas al proyecto, para esto se puede llamar al modelo de datos mediante el botón  o por la ruta **Archivo- Modelo de Datos**, aquí se crean las categorías con las que se trabajaran ya sean tipo Imagen, Temáticas, Objeto, Catastral, etc. Después de creadas las categorías y sus clases dar clic en **Ejecutar**.



4. REGISTRO DE UNA IMAGEN

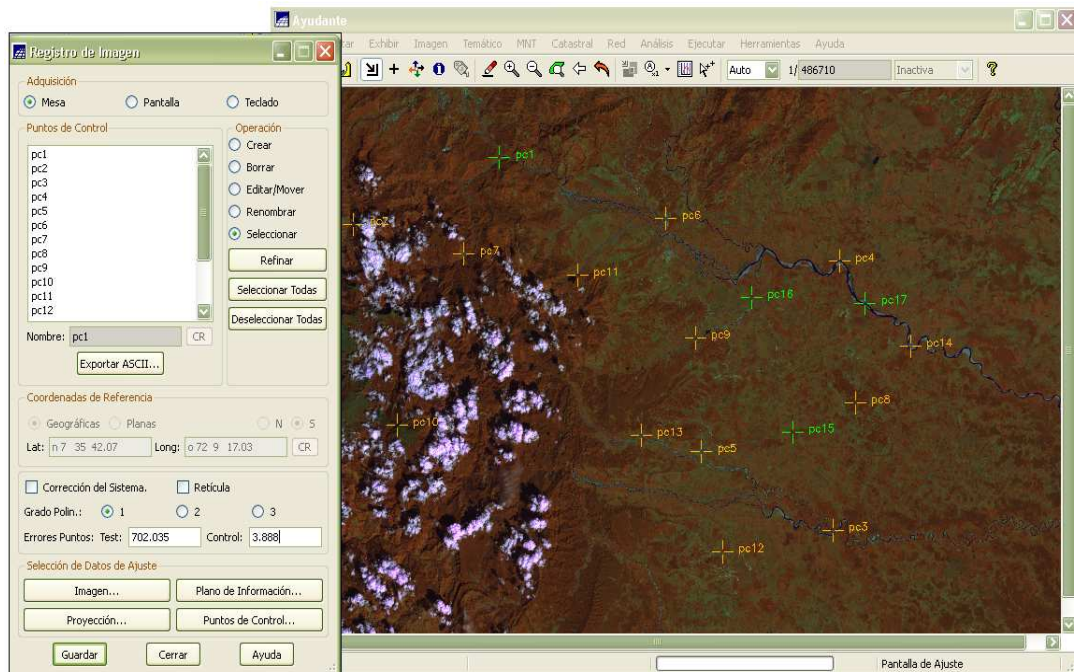
Para la Clasificación Supervisada es necesario que las imágenes sean georeferenciadas y para esto se debe realizar primero el registro de la imagen en SPRING por la ruta **Archivo- Registro**.

Aparece de inmediato la pantalla **Ayudante** allí se visualizara la imagen y los puntos de control que se irán creando. En la selección Imagen se buscara la carpeta en donde se encuentran registradas las imágenes y se seleccionan las bandas con las que se va a trabajar, por ejemplo: 4(R), 5(G), 3(B)



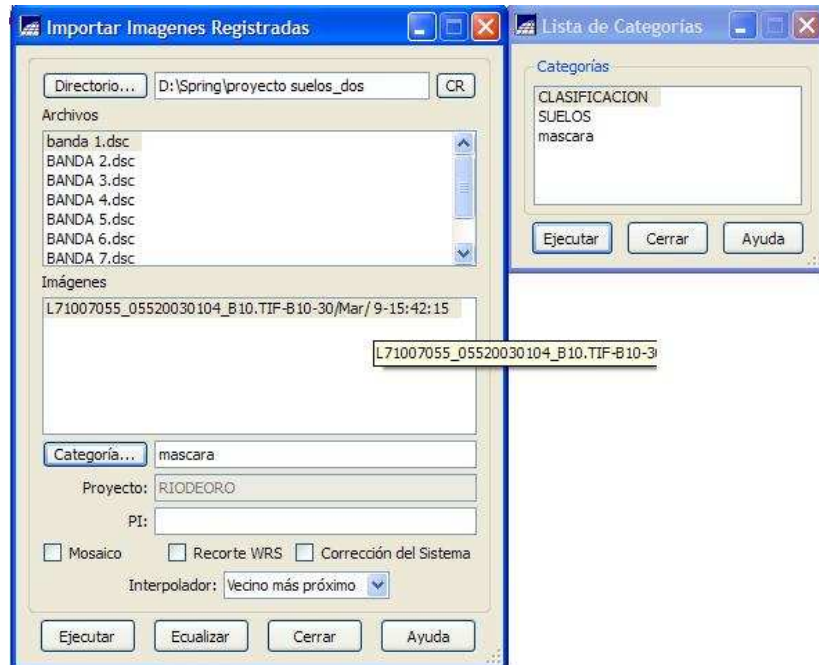
En registro de imagen se escoge el tipo de adquisición por **Teclado**, para activar la opción **Crear** en **Operación** y asignar un nombre al primer punto de control, puede ser PC1 y se hace clic en CR, luego en la pantalla Ayudante se ubica el punto de control (se recomienda ubicar puntos que sean fácilmente reconocidos a simple vista). Para finalizar se le otorga las **Coordenadas de Referencia** ya sean Planas o Geográficas y se da clic en **CR**.

Esta operación debe realizarse para un número considerable de puntos de control mínimo 6 si se trabaja con **Grado Polin1**, lo mejor es tomar el mayor número de puntos de control como lo sea posible y después seleccionar los que me generen un menor error. En el momento de escoger los puntos de control se debe observar el error por puntos de control que muestra SPRING automáticamente, este error no debe ser mayor a 5 Pixeles en caso de trabajar con USO DE TIERRA O COBERTURA VEGETAL.




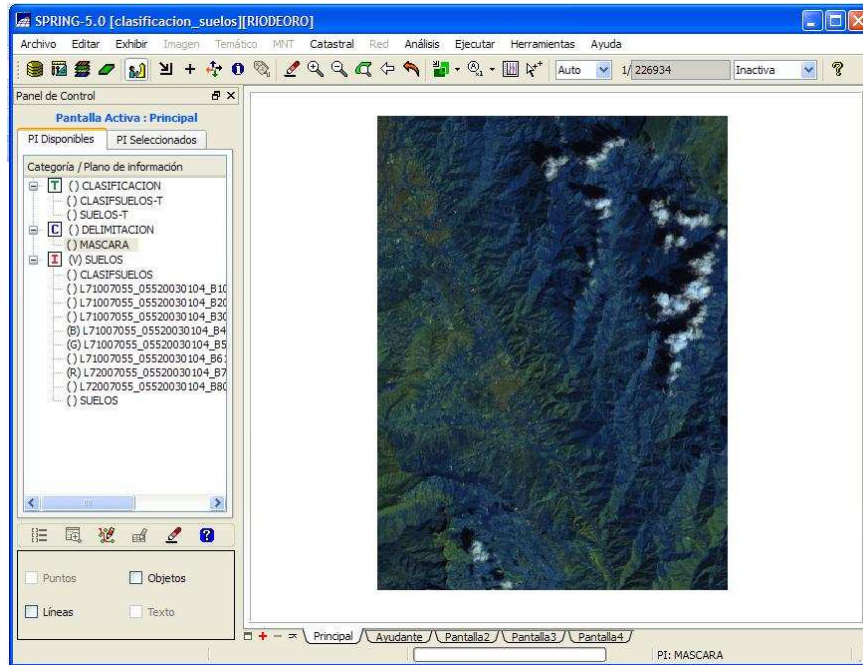
5. IMPORTAR IMÁGENES A SPRING

Es posible importar las bandas georeferenciadas previamente a SPRING, mediante la ruta **Archivo- Importar Imágenes Registradas**. Aquí se busca el directorio donde se encuentran guardadas las imágenes y se selecciona una por una, seleccionando la categoría tipo Imagen a la que pertenecen, luego se le otorga el nombre al PI en el que se quiere guardar y se da clic en **Ejecutar**, estos se repite para todas las bandas.

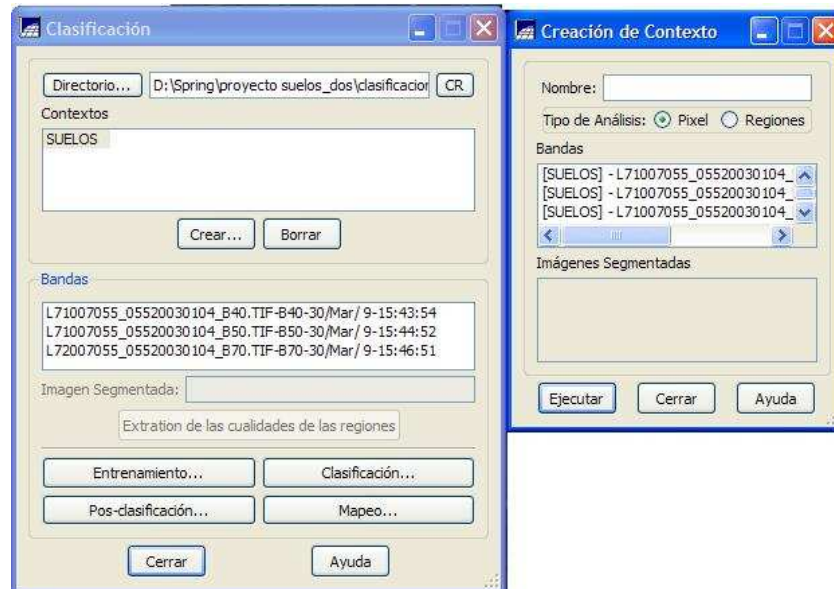


6. CLASIFICACION SUPERVISADA POR PIXEL

Para realizar la clasificación Pantalla principal se selecciona la categoría Imagen donde se encuentran guardadas las bandas y se genera en falso color la combinación de Bandas 4(R), 5(G), 3(B) y se oprime el botón Restituir .



Después de esto se selecciona **Menú- Imagen- Clasificación** para comenzar con el proceso de clasificación. Lo primero que se debe hacer es hacer clic en **Crear** allí se le otorgara un nombre y se seleccionan las bandas con las que será realizada la clasificación y se presiona **Ejecutar** para que sea creado.

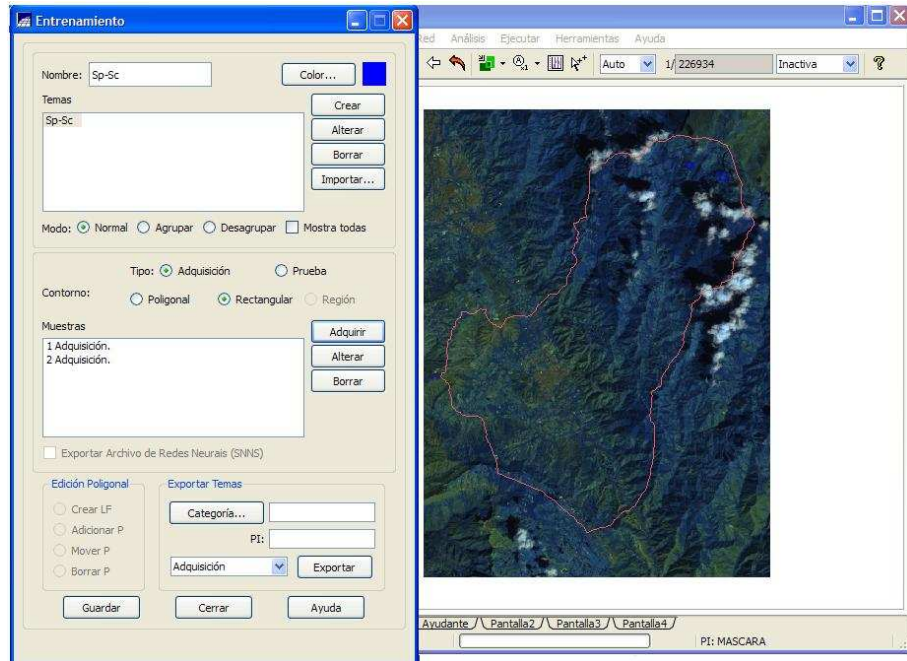


La clasificación se lleva a cabo en 4 pasos: Entrenamiento, Clasificación, Pos-Clasificación y Mapeo

6.1. ENTRENAMIENTO

Una vez desplegada la ventana **Entrenamiento** se debe asignar el nombre del primer tema, se le asigna un color que concuerde con los asignados en el Modelo de Datos y se hace clic en **Crear**.

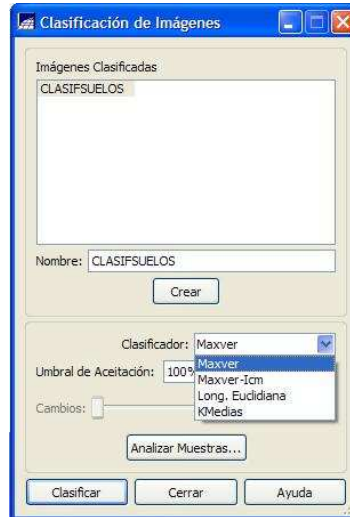
Se debe escoger el tipo de adquisición y se adquieren las muestras con un contorno en forma rectangular, seleccionando sobre la imagen como si se fuera a hacer un Zoom, una vez realizado esto se hace clic en Adquisición esto se repite para todos las muestras. Se deben adquirir por lo menos dos muestras para cada tema.



Una vez realizada la adquisición de las muestras se pueden visualizar entrando de nuevo en el menú entrenamiento y seleccionando cada uno de los temas o de las muestras que se desee visualizar, además se tiene la opción de alterar el tipo de muestras si se desea.

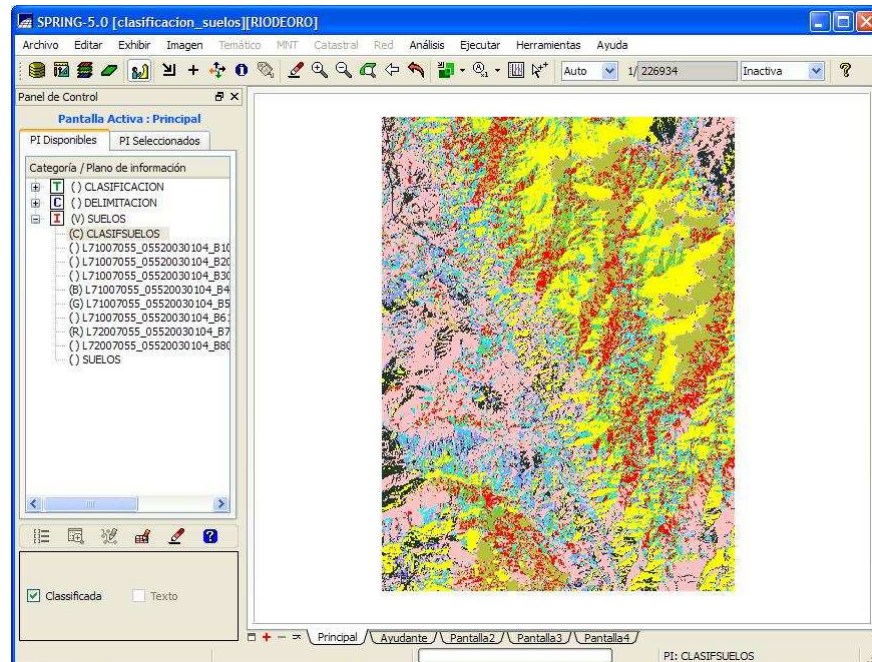
6.2. CLASIFICACION

Una vez realizado el Entrenamiento, el paso siguiente es la clasificación, al entrar a esta opción se debe asignar un nombre, crear el archivo y luego seleccionar el clasificador que se va a utilizar se recomienda realizar la prueba varias veces cambiando el clasificador ya que cada uno realiza diferentes ajustes.

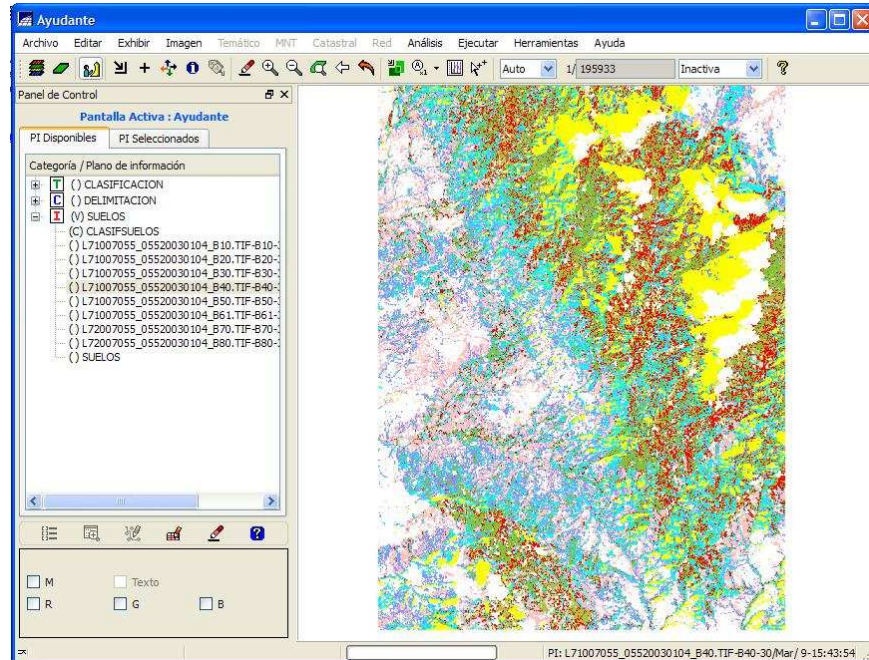


A continuación se muestran algunos ejemplos de los diferentes clasificadores para una misma zona de estudio

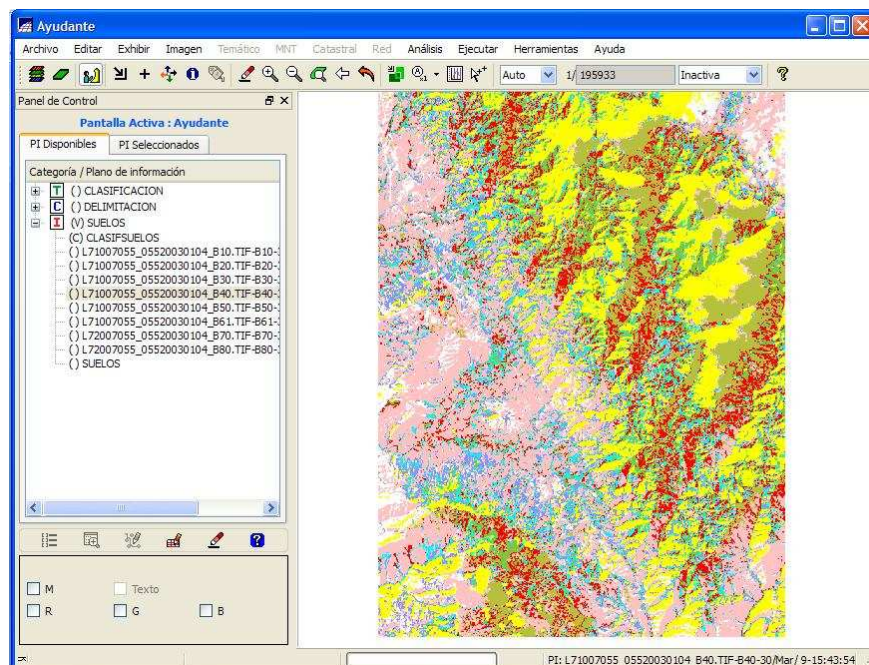
- Clasificador Maxver umbral 100%



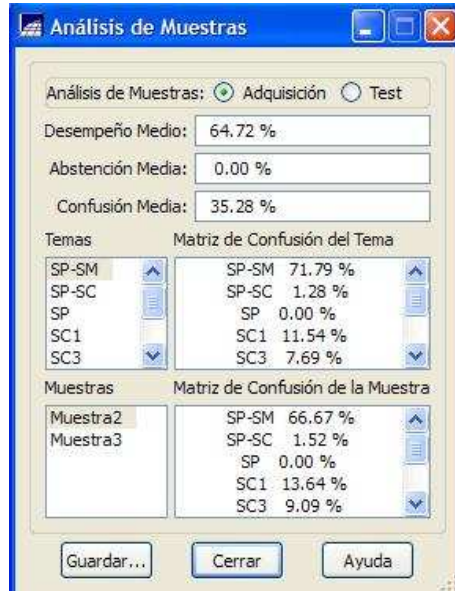
- Clasificador Maxver- Icm porcentaje de mudanza 100%



- Clasificador Distancia Euclidiana



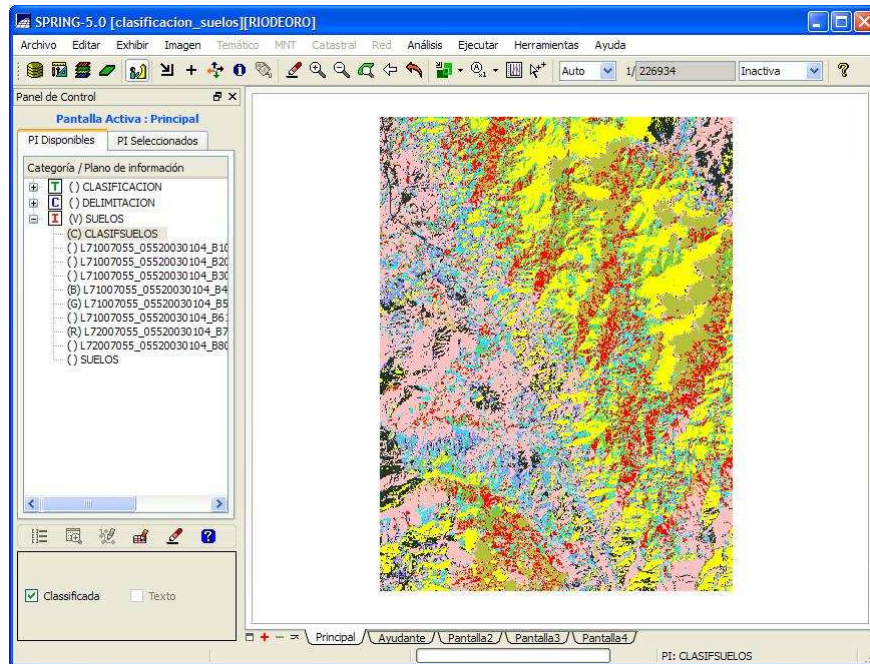
El Paso siguiente es Analizar las muestras tomadas



Si se presentan muestras que presentan una alta confusión, retornar al entrenamiento para edición. Si los resultados son aptos se guarda el archivo y se realiza la clasificación final de la imagen.

6.3. POS- CLASIFICACION

En este paso se eliminan los ruidos de clasificación, para este proceso se escogen las imágenes clasificadas y se les asigna un peso, que para efectos de nuestro análisis será igual a 4, un umbral que será 4 y se ejecuta el proceso. Una vez realizado esto se visualiza la imagen resultante en el **Ayudante**. Es recomendable otorgar diferentes pesos y umbrales.



6.4. MAPEO

Este es el último paso en el cual se propone cartografías temas de la imagen clasificada para clases del Banco de datos



Se debe activar la opción **Mapeo** y una vez ahí se escoge la Categoría, Imagen Clasificada, Temas y Clase. Este proceso se debe repetir para todos los temas y para cada Tema debe haber una clase temática asociada.

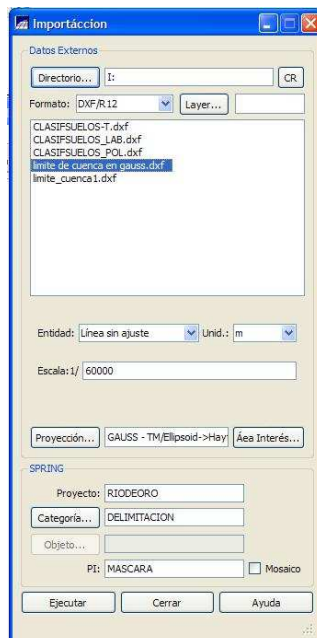
7. IMPORTAR Y RECORTAR MASCARA

La imagen completa en falso color es muy grande para trabajar y requeriría mucho equipo para realizar los procesos de análisis matricial y vectorial. Por esto se debe recortar la imagen en el área de interés. Para realizar este proceso se debe importar un archivo en el que las coordenadas de la máscara coincidan con las del área del proyecto a trabajar, el formato de la máscara debe ser DXF.

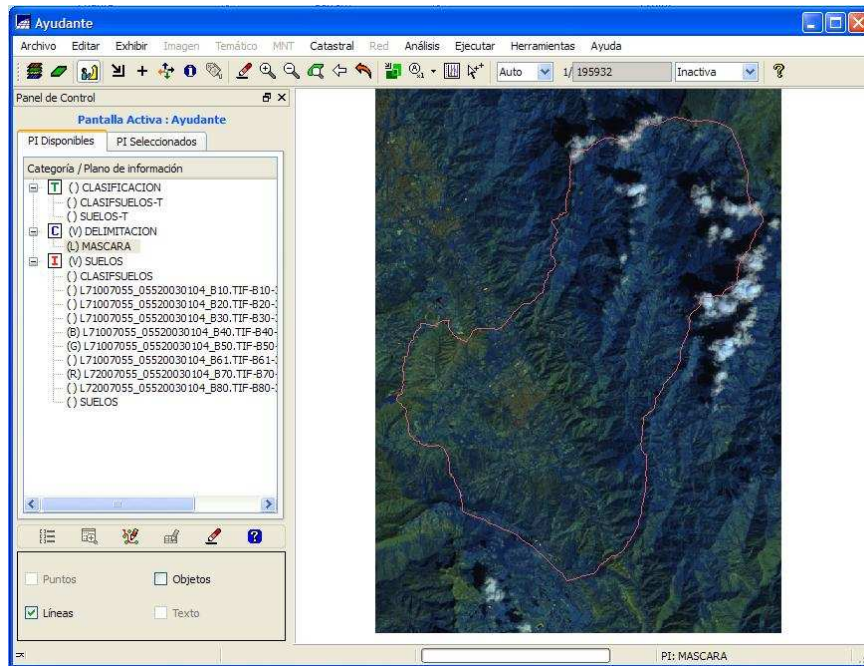
Antes de importar por la ruta **Editar- Plano de Información** se crea un tema en el modelo Catastral allí se debe otorgar el nombre con el que se va a guardar el archivo DXF.



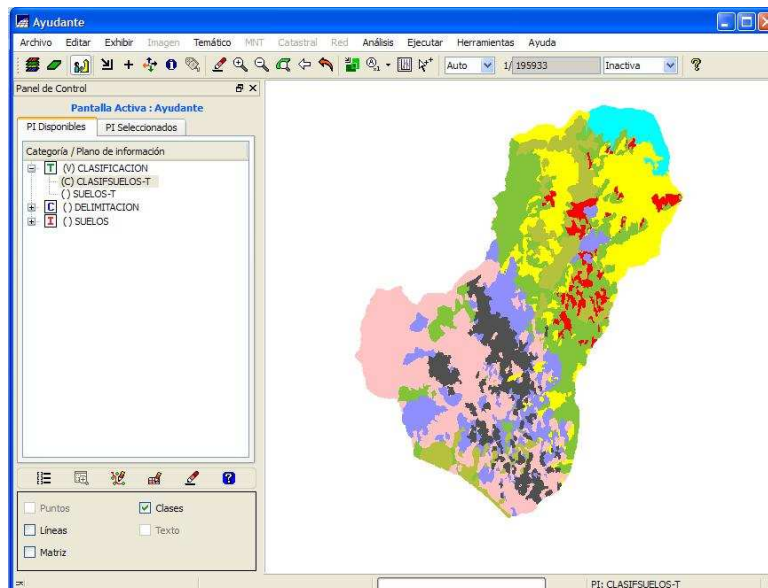
Para importar archivos DXF se sigue la ruta **Archivo- Importar** aquí se señala el tipo de archivo que se importara en este caso DXF/R12, luego se selecciona el Layer que se va a importar y se da clic en **Ejecutar**



Después de importado se debe visualizar y chequear que coincida con la zona que se desea trabajar de lo contrario hay que realizar los ajustes en AUTOCAD y repetir todo el proceso.

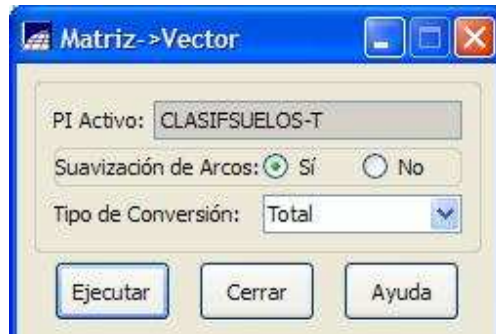


Después se recorta la zona de interés por la ruta **Herramientas- Recortar Plano de Información** aquí se selecciona la máscara y clic en **Ejecutar**, se activa el ayudante y se da clic dentro de la máscara seleccionada, el corte debe ser interior para que se conserve lo que está dentro de la máscara.

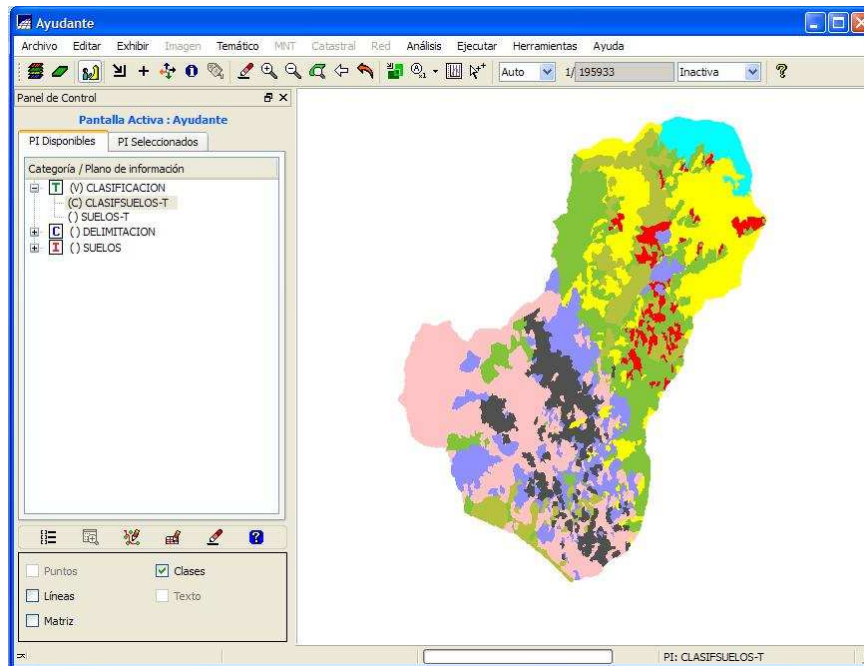


8. ANALISIS MATRICIAL Y VECTORIAL

Después de obtener el modelo temático del terreno es necesario transformar el terreno matricial a uno vectorial. Si el estudio no requiere un análisis tan detallado del terreno en el modelo vectorial es posible eliminar los polígonos de menor área. Para pasar de matricial a vectorial utilice la ruta **Temático- Matriz->Vector**



La representación vectorial y de las clases se vería de la siguiente manera.



Si se desea eliminar los polígonos muy pequeños para homogenizar mejor las regiones se puede utilizar por ejemplo 1.5 Ha siguiendo la ruta **Herramientas-Limpiar vectores**.



Aquí se debe asignar un valor de Topología automática igual a 0.5 m de ajuste que es aceptable para asegurar la corrección de posibles errores en el ajuste de polígonos.

Después de esto se debe ingresar a **Temático- Vector-> Matriz**, para generar el nuevo modelo matricial resultante.



Es posible que se generen vacíos en la matriz donde ninguna clase ha sido asignada para corregir estos errores por esto se debe ir a **Temático- Edición Matricial** y basándose en el conocimiento de las clases se procede a completar los vacíos generados durante el proceso.

Se debe seleccionar la clase y generar el polígono en la región de vacío que corresponde y completar el modelo matricial. Después de terminadas las

respectivas correcciones ir a **Temático- Matriz->Vector** y reemplazar el modelo vectorial previo.

La clasificación consiste en un proceso de extracción de información en imágenes para reconocer patrones y objetos homogéneos, Los Clasificadores pixel a pixel utilizan únicamente la información espectral de cada pixel aisladamente para encontrar zonas homogéneas. El resultado final de la clasificación es una imagen digital que constituye un mapa de pixeles clasificados, representados por símbolos gráficos o colores.