



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
POSTGRADO EN CIENCIA DEL SUELO
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA



**PRECISIÓN DE LA ORTO-RECTIFICACIÓN DE UNA IMAGEN DEL
RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR) EN UNA ZONA DEL
CENTRO-NORTE DE VENEZUELA**

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al Grado de Especialista en Geomática

Autor: Ing. Víctor J. Guevara Hernández

Tutor: MSc. Ramiro Salcedo

Maracay, julio de 2013

INDICE GENERAL

RESUMEN	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 El problema y su implicación	2
1.2 Justificación	4
1.3 Objetivos generales y específicos.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
II. MARCO REFERENCIAL	6
2.1 Antecedentes de la investigación.....	6
2.2 Bases Teóricas	8
2.2.1 Percepción Remota	8
2.2.1.1 Principios físicos	8
2.2.1.2 Espectro Electromagnético.....	8
2.2.1.3 Bandas en el Micro-Onda.....	10
2.2.1.4 Sistema Sensor	10
2.2.1.4.1 Tipos de Sensores.....	10
2.2.2 RADAR	11
2.2.2.1 Retrodispersión	13
2.2.2.2 Formación y naturaleza de una imagen RADAR.....	14
2.2.2.2.1 Formación de una imagen de RADAR	14
2.2.2.2.2 Retro-dispersión de los objetos	14
2.2.2.2.2.1 La rugosidad	14
2.2.2.2.2.2 Constante Dieléctrica.....	15
2.2.2.2.2.3 Geometría de observación	15

2.2.2.2.4	Longitud de onda.....	16
2.2.3	Radar de Apertura Sintética (SAR).....	16
2.2.3.1	Geometría de vuelo del SAR.....	17
2.2.3.2	Resolución de un SAR	19
2.2.3.2.1	Resolución en azimut	19
2.2.3.2.2	Slant Range and Ground Range	19
2.2.4	Geometría del SAR.....	20
2.2.4.1	Inversión por relieve (Lay-over)	22
2.2.4.2	Sombra	23
2.2.4.3	Contracción del relieve (foreshortening).....	23
2.2.5	Radiometría.....	23
2.2.6	Modelos Digitales de Elevación (DEM).....	24
2.2.7	Sistemas Globales de Navegación por satélite.....	24
2.2.8	Transformación de coordenadas del datum geodésico PSAD-56 al SIRGAS.....	24
2.2.8.1	Modelo de Similaridad Badekas-Molodensky:.....	25
2.2.8.2	Parámetros de Transformación PATVEN_98.....	25
2.2.8.3	Modelo de Bursa-Wolf.....	26
2.2.9	La Orto-rectificación.....	26
2.2.10	Corrección Geométrica SAR	28
2.2.10.1	Conversión del alcance inclinado al terrestre.....	28
2.2.10.2	Rectificación polinomial	29
2.2.10.3	Método Radargramétrico	29
2.2.11	El Satélite RADARSAT-2	31
2.2.12	Imagen SAR como producto Cartográfico	32
2.2.13	Precisión Cartográfica.....	33
2.2.13.1	Parámetros de Precisión Cartográfica	33

2.2.13.1	Normas Nacionales	35
2.2.13.2	Normas Internacionales.....	36
2.2.14	Calidad visual de imágenes.....	37
III.	ÁREA DE ESTUDIO.....	38
IV.	METODOLÓGIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	40
4.1	Diseño de la investigación.....	40
4.2	Esquema Metodológico	42
4.3	Insumos para la investigación.....	43
4.3.1	Imagen Radarsat-2	43
4.3.2	Selección de Puntos	45
4.3.3	Puntos DGNSS Levantados	46
4.3.3.1	Levantamiento DGNSS.....	46
4.3.3.2	Cálculo de la altura Cuasi-Ortométrica.....	52
4.3.3.3	Puntos DGNSS de campos anteriores.....	52
4.3.4	Puntos de validación adicionales	53
4.3.5	Modelo Digital de Elevación	53
4.3.5.1	DEM del SRTM.....	53
4.3.5.2	DEM de las cartas topográficas.....	53
4.3.5.3	Validación de los DEM's.....	54
4.3.6	Transformación de los raster de LA CANOA a REGVEN	62
4.3.7	Orto-rectificación de Imagen SAR	66
4.3.8	Influencia del DEM y las características del sensor en la generación de la orto-imagen. 68	
4.3.9	La Evaluación de la Tolerancias o errores permisibles en el mapa	70
4.3.10	Corrección Radiométrica	72
V.	RESULTADOS OBTENIDOS	73

5.1	Análisis estadísticos de los resultados	73
5.1.1	Análisis de la calidad visual.....	73
5.1.2	Resultado del modelo orto-rectificación SAR en base del número de GCP.....	74
5.1.2.1	Resultado con 20 GCP y 7GVP	75
5.1.2.2	Resultados con 12 GCP y 15GVP.....	76
5.1.2.3	Resultados con 9 GCP y 18 GVP.....	78
5.1.2.4	Resultados con 5 GCP y 22GVP.....	80
5.1.2.5	Análisis de resultados.....	82
5.1.3	Resultados de precisión cartográfica bajo diferentes condiciones de relieve	86
5.1.3.1	Zonas planas.....	86
5.1.3.1.1	DEM de la Carta <i>6646-I-SE</i>	87
5.1.3.1.2	DEM del <i>SISDELAV</i>	88
5.1.3.2	Zonas onduladas.....	91
5.1.3.3	Zona montañosa	93
5.1.4	Análisis de resultados	95
5.1.5	Análisis cualitativo	98
5.2	Sistematización de Procesos.....	98
VI.	CONCLUSION Y RECOMENDACIONES.....	103
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
	ANEXO	113

LISTA DE CUADROS Y TABLAS

Cuadro 2.1. Bandas de frecuencias utilizadas frecuentemente en micro-ondas.....	10
Cuadro 2.2. Descripción de los factores de distorsiones geométricas de una imagen.	27
Cuadro 4.3. Coordenadas de los GCP y GVP y sus Errores en la medición.....	50
Cuadro 4.4. Coordenadas y sus Errores en la medición de puntos levantados en campos anteriores	52
Tabla 4.5: Diferencias de alturas de los DEM's con las medidas DGNSS cuasi-ortométrica. Todas las unidades expresadas en metros.....	55
Tabla 4.6: Estadísticas de las Diferencias de alturas de los DEM's con las medidas DGNSS cuasi-ortométrica.	57
Tabla 4.7: Estadísticas de las Diferencias de alturas de los DEM's con las medidas DGNSS cuasi-ortométrica eliminando el vértice geodésico LA ENCRUJIDA.....	57
Tabla 4.8: Estadísticas de las Diferencias del DEM de los Orto-foto comparados con el DEM de SISDELAV y el SRTM.....	60
Tabla 4.9: Estadísticas de las Diferencias del nuevo DEM del SRTM (-4,00 m) con el del Orto-foto y los puntos DGNSS.....	61
Tabla 4.10. Comparación de ambos modelos de transformación.....	64
Tabla 5.1. Parámetro de Calidad Visual – Valor grafico vs valor real a escala 1:50.000 y diferentes escalas mínimas en función de la resolución espacial.	73
Tabla 5.2. RMS en X, Y y Total de los GCP's y GVP's para los diferentes ajustes en el modelo de orto-rectificación de la imagen SAR.	74
Tabla 5.3. Residuales y RMS de cada punto de los 20 GCPs y 7 GVPs.....	76
Tabla 5.4. Residuales y RMS de cada punto de los 12 GCP's y 15 GVP's.	78
Tabla 5.5. Residuales y RMS de cada punto de los 9 GCPs y 18 GVPs.....	80
Tabla 5.6. Residuales y RMS de cada punto de los 5 GCPs y 22 GVPs.....	82
Tabla 5.7. Parámetro de Precisión cartográfica– Errores permisibles a escala 1:50.000 y diferentes escalas mínimas en función del EOI.....	85

Tabla 5.8. Error de cada uno de los puntos de validación para la sección de la Imagen SAR usando el DEM 6646-I-SE en condiciones de relieve plano.	88
Tabla 5.9. Error medio cuadrático de los puntos de verificación para las diferentes orto- imágenes usando diferentes DEM para el área de la carta 6646-I-SE en condiciones de relieve plano.	88
Tabla 5.10. Error de cada uno de los puntos de validación para esta sección de la Imagen SAR usando el DEM SISDELAV en condiciones de relieve plano.	90
Tabla 5.11. Error medio cuadrático de los puntos de verificación para las orto-imágenes con diferentes DEM para el área del SISDELAV en condiciones de relieve plano.	91
Tabla 5.12. Error de cada uno de los puntos de validación para la sección de la Imagen SAR usando el DEM SISDELAV y SIACARG en condiciones de relieve ondulado.	92
Tabla 5.13. Error medio cuadrático de los puntos de verificación para la Imagen SAR con diferentes Modelos Digitales de Elevación para el área en condiciones de relieve ondulado.	93
Tabla 5.14. Error de cada uno de los puntos de validación para esta sección de la Imagen SAR usando el DEM de Cartocentro en condiciones de relieve montañoso.	94
Tabla 5.15. Error medio cuadrático de los puntos de verificación para diferentes Modelos Digitales de Elevación en un área con condiciones de relieve montañosas.	95

LISTA DE GRÁFICOS

Figura 2.1: El espectro electromagnético	9
Figura 2.2: Funcionamiento del RADAR.....	12
Figura 2.3: Tipos de reflexión de la imagen de radar.....	13
Figura 2.4: RADAR de Apertura Sintética.....	17
Figura 2.5: Geometría de vuelo del SAR	18
Figura 2.6: Resolución SAR.....	20
Figura 2.7: Geometría de una imagen de radar	21
Figura 2.8: Dominio Alcance-Doppler.....	30
Figura 2.9: RADARSAT-2.....	31
Figura 3.1. Ubicación relativa del área de la imagen SAR.....	38
Figura 3.2. Ubicación del área de estudio que dispone de DEM.....	39
Figura 4.1. Esquema metodológico de la investigación	42
Figura 4.2: Imagen Radarsat-2.	43
Figura 4.3: Parámetros de la Imagen Radarsat-2.....	44
Figura 4.4: Distribución de los GCP (amarillo y anaranjado) y GVP (cyan y azul) en la Imagen. 45	
Figura 4.5: Red ajustadas de los puntos BaseLV y BaseVV desde el vértice geodésico ENCRUCIJADA	47
Cuadro 4.1. Coordenadas de las Estaciones Bases y sus Errores en la medición	48
Cuadro 4.2. Coordenadas de los GCP y GVP y sus Errores en la medición.....	48
Figura 4.6: Puntos GCP y GVP desde los puntos bases BaseLV y BaseVV	49
Figura 4.7: Puntos GCP y GVP desde los puntos bases IGVS y ServiTeodolitos	50
Figura 4.8: Diferencias de alturas entre el DEM de la carta 6646-I-SE y del SISDELAV.....	58
Figura 4.9: Diferencias de alturas entre el DEM del SISDELAV y del SRTM v.2.....	58

Figura 4.10: Diferencias de alturas entre el DEM de la carta 6646-I-SE y el DEM del SRTM v2	59
Figura 4.11: Diferencias de alturas entre el DEM de las cartas 6746-II-NO, 6746-II-NE, 6746-II-SE y 6746-II-SO, y el DEM del SRTM v.2.....	61
Figura 4.12: Programa de transformación usando el Modelo de similaridad de Badekas-Molodensky	63
Fuente: Cartogeo [programa en line] http://www.cartogeo.com/productos.html , 2010.....	63
Figura 4.13: Programa que usa el Modelo de transformación Bursa-Wolf.....	64
Fuente: Coordinate Calculator de Erdas Imagine 2010.....	64
Figura 4.14: Orto-foto re-proyectada sobre puntos levantados DGNSS.....	65
Figura 4.15: Flujograma de Orto-rectificación.....	67
Figura 4.16. Influencia del ángulo de adquisición (deg) de la imagen y la precisión del DEM (Δh) en la precisión de la orto-imagen (Δx).	69
Figura 5.1. Distribución de los 12GCP y los 15 GVP.....	77
Figura 5.2. Distribución de los 9 GCP y los 18 GVP.....	79
Figura 5.3. Distribución de los 5 GCPs y los 22 GVPs.....	81
Figura 5.4. Imagen SAR resultante usando 5 GCP's y el DEM de srtm-4.	83
Figura 5.5. Estimación de la propagación de los Residuales de la orto-imagen SAR resultante usando 5 GCP's.	84
Figura 5.6. Distribución de los 20 GVPs en azul y cyan. Los GCPs en amarillo.	87
Figura 5.7. Distribución de los 45 GVPs en azul y cyan. Los GCPs en amarillo.	89
Figura 5.8. Distribución de los 33 GVPs en azul y cyan. Los GCPs en amarillo.	91
Figura 5.9. Distribución de los 24 GVPs en azul. Los GCPs en amarillo.....	93
Figura 5.10. Imagen SAR resultante usando 5 GCP's, y el DEM de SISDELAV al nor-este, SIACARG al sur y Cartocentro al este. Con vectores que muestra el comportamiento del error de ésta.	96

Figura 5.11. Estimación de la propagación de los Residuales de la orto-imagen SAR resultante validados con los GVP's como producto cartográfico 1:50.000.	97
Figura 5.12. Esquema de la propuesta para el proceso de validación cartográfica de la Orto-Imagen SAR	102

RESUMEN

Las imágenes de sensores tanto ópticos como las de radar, facilitan tener datos oportunos de la superficie terrestre, las cuales nos permiten levantar información de cartografía básica y/o temática, a sabiendas que hay que considerar las técnicas de adquisición de los diferentes sensores y plataformas que van a encaminar la aplicación y la escala del producto cartográfico a generar. Los sensores de radar son los menos usados y los que presentan mayor complejidad en su geometría de adquisición. Considerando el planteamiento anterior, el objetivo general de la investigación se perfila hacia la definición de criterios y procedimientos en la obtención de estimaciones más precisas en el proceso para la orto-rectificación de imágenes de RADAR (detección y localización por Radio [Radio Detection And Ranging]) de Apertura Sintética (SAR, Synthetic Apertura Radar).

La metodología empleada involucró varios procesos dentro de los cuales destaca la orto-rectificación de la imagen SAR aplicando un ajuste de las efemérides con puntos de control DGNS y se corrigieron las distorsiones por efecto del relieve usando un DEM adecuado para la escala de trabajo en una zona del Centro-norte de Venezuela. Luego se realizó la validación del producto cartográfico a los fines de verificar que este se encuentre dentro de los estándares de precisión cartográfica en diferentes condiciones de relieve y usando un DEM de las cartas topográficas 1:25.000 y el Global del SRTM. De esta forma, se logró un producto a escala 1:50.000 que podrá ser usado tanto en aplicaciones de ingeniería como en cualquier otra vertiente de aplicación de Geomática.

El resultado final de la investigación queda plasmado en una síntesis de criterios y procedimiento para el control planimétrico en la generación orto-imágenes SAR.

I. INTRODUCCIÓN

En la presente investigación se plantean criterios y procedimientos en la obtención de estimaciones más precisas en el proceso para la orto-rectificación de imágenes de RADAR (detección y localización por Radio [Radio Detection And Ranging]) de Apertura Sintética (SAR, Synthetic Aperture Radar). Esta implementación de criterios y procedimientos para el control de calidad planimétrica servirá como fundamento en el establecimiento de especificaciones técnicas para el tratamiento espacial de imágenes satelitales, orientadas a las SAR, que requiera ser usadas dentro algún campo de aplicación de la Geomática como un producto cartográfico.

La investigación se enmarca en un conjunto de propuestas que han surgido desde la Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico (FIIDT), institución que ha dado el primer paso en el abordaje de proyectos relacionados con el uso de este tipo de imágenes, en áreas como la actualización e interpretación geológica y estructural para futuros análisis en las actividades de prospección de hidrocarburos por parte de Petróleos de Venezuela Sociedad Anónima (PDVSA). De la misma forma, actualmente la institución también participa en una mesa de trabajo liderada por el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB), para conformar los estándares para la publicación de datos raster en la Infraestructura de Datos Espaciales de Venezuela (IDEVEN), siendo el planteamiento de esta investigación la base para en su definición técnica.

El área de estudio considerada para la investigación se ubica en la región centro norte del país. Su selección responde a tres factores fundamentales, área de adquisición de la imagen SAR del satélite Radarsat-2, disponibilidad y características del Modelo Digital de Elevación para el área considerada y por último, condiciones de relieve presentes en la zona.

A los fines de lograr la consecución de los objetivos propuestos para la investigación, la misma se ha estructurado en tres fases fundamentales: fase de exploración, fase de ejecución y fase de resultados.

La primera fase, como su nombre lo indica, de exploración, representa la búsqueda, recopilación y depuración de todos aquellos documentos que permiten definir el marco referencial donde se presentan los antecedentes, teorías y conceptos fundamentales que brindan asidero a la investigación.

Asimismo, es en esta fase donde se presentan la metodología y procesos involucrados en el tratamiento de la orto-imagen SAR con la profundidad que la investigación amerita.

Por su parte, en la fase de ejecución se da curso al procesamiento de la imagen del satélite RADARSAT-2. Dicho tratamiento, como se verá en el transcurso de esta fase involucró una serie de procesos que son los que finalmente permitirán el paso a la siguiente y última fase de la investigación denominada resultados.

En la fase de resultados, se presentan y analizan estadísticamente, en primer lugar el modelo matemático de orto-rectificación para la validación del uso de un mínimo de 5 puntos de control terrestre medidos con la técnica Diferencial GNSS y posteriormente se evalúa la calidad planimétrica de la orto-imagen SAR resultante para las diferentes condiciones de relieve y se valida como producto cartográfico de calidad.

Como punto de cierre de la investigación, se reúnen una serie de conclusiones y recomendaciones, que permiten establecer los criterios y procedimientos más adecuados de cómo se debe utilizar la orto-imagen SAR obtenida como producto cartográfico validado a escala 1:50.000 en diferentes condiciones de relieve.

1.1 El problema y su implicación

Los planificadores en proyectos de Geomática en Venezuela cuentan con una significativa cantidad de datos geográficos provenientes de sensores remotos, capturados por plataformas aéreas y/o satelitales, estos datos son usados para la generación de productos cartográficos (orto-imágenes) con la ventaja primordial de integración de las virtudes de las diferentes plataformas de adquisición.

Justamente, se mejora la baja resolución temporal, se incrementa el acceso a la información en todas las regiones del país, y a partir de la incorporación de los sistemas activos de RADAR se disminuyen los inconvenientes de visibilidad generados por eventos naturales como la existencia de intensa y continua cobertura de nubes (Salcedo, 1999).

Los sistemas de RADAR poseen una virtud fundamental en la región del espectro electromagnético por ser prácticamente transparentes a la influencia atmosférica, pues trabajan en longitudes de ondas muy superiores al tamaño habitual de las gotas de agua (Chuvieco, 2006). Estos sistemas resultan de particular interés para Venezuela por encontrarse

en la zona de convergencia inter-tropical (ITCZ) que conlleva la presencia de cobertura nubosa en gran parte del año.

Considerando la creciente demanda que ha experimentado el uso de las imágenes satelitales en el país, se ha generado una gran cantidad de datos geográficos que pese a lo oportuno que pudiesen resultar por lo actualizado de su información, en ocasiones presentan imprecisiones espaciales debido, entre otras razones, a la poca rigurosidad que existe en la sistematización de procesos que garanticen un producto cartográfico de calidad.

En este orden de ideas, las imágenes de los sensores activos de RADAR son un caso particular al que se le debe prestar especial atención al emplearse como insumo para levantar información cartográfica básica y/o temática. En especial, cuando se intenta usar métodos clásicos de geo-referenciación de estas imágenes, debido a que poseen una geometría de adquisición compleja, como es el caso de los múltiples ángulos de adquisición, característica que prevalece en este tipo de insumo, siendo muy superior al de los sensores ópticos (Huang, *et al.*, 2004). Otro elemento de gran importancia a considerar es la topografía presente en el área de estudio puesto que resulta determinante en la precisión cartográfica requerida.

Por estas razones, el procesamiento de estas imágenes amerita emplear modelos matemáticos de rectificación diferencial que consideren la realidad física desde el punto de vista geométrico y corrijan las deformaciones producidas por la plataforma, el sensor y la Tierra.

Considerando lo antes mencionado, es evidente la complejidad que presentan las imágenes de RADAR y por ello resulta necesario la sistematización de criterios y procesos que permitan obtener orto-imágenes con la precisión cartográfica requerida. Así, el propósito de esta investigación se circunscribe a la generación de criterios y procedimientos para la orto-rectificación de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) con fines cartográficos en una zona del centro-norte de Venezuela.

1.2 Justificación

En el país, pese a la importancia que ha tenido desde siempre el representar el espacio geográfico y sus distintos fenómenos a partir de la cartografía utilizando para ello diversos insumos donde destacan las Imágenes de satélite, son prácticamente inexistentes los documentos oficiales que normen y permitan conocer los parámetros necesarios respecto a precisión cartográfica. Considerando la situación anteriormente expuesta, se plantea esta investigación, ajustándose a los niveles requeridos de una tesis de especialización, pretende sumar, sistematizando procedimientos y una metodología que permitirán la replicabilidad de la experiencia.

De esta forma, el producto cartográfico de esta investigación posibilita la generación de información temática para cualquier proyecto de Geomática, como las que podrán ser obtenidas de la interpretación visual de la orto-imagen SAR, donde se identificarán, características asociadas a la rugosidad y lineamientos del terreno para determinar estructuras geológicas y geomorfológicas. Asimismo, será posible identificar objetos creados por el hombre, determinar el contenido de humedad del suelo, la cantidad de vegetación, entre otros elementos, permitiendo finalmente obtener un aprovechamiento máximo para dar a conocer información básica para el manejo del espacio geográfico con la precisión cartográfica requerida.

Por otra parte, la presente investigación consolidará información actualizada y precisa en algunas zonas del centro-norte de Venezuela, como es el caso de la cuenca alta del río Guárico que alimenta el embalse de Camatagua, siendo un área de gran importancia estratégica para la nación por su aporte de agua de consumo humano que se suministra a la región capital, como también, será para parte de la región de los Valles de Aragua por su gran importancia estratégica en la región central del país.

Asimismo, aportará una sistematización de criterios y procedimientos necesarios para la ortorectificación de imágenes SAR, podrá ser de utilidad para que otros investigadores consideren su aplicación, permitiendo incrementar la calidad cartográfica de este tipo de datos de teledetección en referencia a su precisión y exactitud, para su futura verificación o validación como productos cartográficos.

1.3 Objetivos generales y específicos

1.3.1 Objetivo General

Generar criterios y procedimientos para la orto-rectificación de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) con fines cartográficos en una zona del centro-norte de Venezuela.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Distinguir la posición precisa de los puntos de control terrestre a ser levantados con la técnica GNSS Diferencial.
2. Generar una orto-imagen SAR de la zona de estudio.
3. Evaluar la precisión cartográfica de la orto-imagen SAR resultante, bajo diferentes condiciones de relieve.
4. Sistematizar criterios y procedimientos para la orto-rectificación de imágenes SAR.

II. MARCO REFERENCIAL

2.1 Antecedentes de la investigación

Salcedo (1999) menciona que la producción de cartografía topográfica básica en medios tropicales enfrenta importantes limitaciones referidas a factores naturales y de logística. La cobertura de nubes se cuenta entre las limitaciones naturales determinantes por cuanto impide la toma de datos, ya sea desde plataformas aerotransportadas u orbitales. En este sentido, plantea de manera perentoria, la utilización de sensores y técnicas distintas a las convencionales para la generación de mapas en aquellas regiones donde, como es el caso del sur de Venezuela, no se ha podido completar el cubrimiento cartográfico por medios convencionales.

De acuerdo a Machado (2006), el estado actual de la cartografía mundial muestra carencias de información actualizada para extensas regiones del planeta. Adicionalmente, indica que en los últimos años, muchos países han adelantado estudios diversos que buscan probar las bondades de las imágenes de satélite en la actualización de las cartas topográficas. Finalmente, propone evaluar una metodología para la orto-rectificación y fusión de imágenes Landsat ETM+ con fines de actualización cartográfica a escala 1:100.000.

De Oliveira (2001), estudió la precisión cartográfica de las imágenes SAR orto-rectificadas, debido a que estas imágenes crudas manifiestan deformaciones geométricas que son causadas por diferentes elementos. La cuantificación de la calidad geométrica de estas imágenes se realizó con puntos de verificación medidos con GPS Diferencial en la región de Arequimes con variaciones altimétricas desde 100 a 376 metros, presentándose errores geométricos inferiores a 0,5 mm en el producto cartográficos que fueron aceptables para escalas 1:50.000.

Huang, *et al.* (2004) plantea que los sistemas SAR se caracterizan por tener un modo de vista lateral, cuyo ángulo de adquisición es mucho más grande que los sensores ópticos, causando esto, grandes distorsiones en las imágenes SAR debidas a la elevación, que a su vez, son muy difíciles de corregir. Es por ello que desarrollaron un algoritmo que les permitió obtener orto-imágenes más precisas del área montañosa de Dali, Yunnan en China. Al ejecutarlo con al menos 50 puntos de control alcanzaron una RMS de 2,2 píxeles para una imagen de Radarsat-1 de 25 m de resolución espacial.

Main (2000). Recomendó que la escogencia de los puntos de control terrestres con alta calidad de reconocimiento en la imagen son de vital importancia para ubicar estos con alta precisión.

En Venezuela, Miguel (2006) combinó o fusionó las orto-imágenes de Radar del Proyecto Cartográfico del Sur (CARTOSUR) con las imágenes Landsat TM, con la finalidad de obtener un mejor análisis visual de los elementos del territorio.

Por su parte Rojas y Lombardo (2000) mencionan al Radar como uno de los sensores de plataforma espacial más recientes y, por lo tanto, de los que se tiene menor conocimiento en cuanto al potencial que puede representar para distintas aplicaciones ambientales. Adicionalmente, agregan que la aplicabilidad de las imágenes de Radar en el campo de la geomorfología a nivel latinoamericano ha sido poco explorada, de allí estos autores evaluaron los alcances y limitaciones de las imágenes Radarsat para la interpretación de la geomorfología en áreas tropicales.

Mansourpour, et al., (2008), enfatiza que el nivel de precisión que pueden alcanzar las imágenes de radar es una desventaja para las diferentes aplicaciones. Mencionaron que debido al proceso de formación de la imagen se producen un ruido multiplicativo inevitable como moteado, que degrada la calidad radiométrica de la misma para una futura interpretación. Lo concerniente a esta investigación, las distorsiones geométricas como la contracción del relieve, inversión por relieve, sombra y otros problemas relacionados con la geometría de la imagen de los sistemas de radar, disminuye la fiabilidad de estas. Finalmente, sugieren que se deben aplicar a las imágenes de radar las correcciones radiométricas y geométricas, antes de usarlas, y además obtuvieron como resultados de la orto-rectificación para la imagen Radarsat-1 con resolución espacial de 12,5m con 5 puntos de control un RMS de 50,8 m y siendo el filtro de Gamma-MAP proveyó mejores resultados.

Toutin, et al. (2011), generaron un modelo digital del terreno a partir de imágenes estéreo de alta resolución (pixel de 1,3 x 2,1 m) de Radarsat-2 y con la metadata aportada por MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd. (MDA) en un área en Canadá. Para esto, se usó el modelo radargramétrico determinístico de Toutin. Donde se realizaron dos pruebas, una sin puntos y otra con ocho puntos de control terrestre, ambas se validaron en planimetría y altimetría con 60 y 52 puntos de verificación, medidos con GPS Diferencial (10-20 cm de precisión) para cada uno de estos procesos respectivamente. Obteniéndose como resultados

para la primera prueba sin puntos de control una desviación estándar (1 sigma) en X de 0,93, Y de 1,33 y Z de 2,34 m y para la otra prueba con error en X 0,85, Y de 0,88 y Z de 2,46 m.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Percepción Remota

La Teledetección ó Percepción Remota es la ciencia que comprende un conjunto de procedimientos y técnicas que permiten evaluar y analizar las características y propiedades físicas de un objeto, área o fenómeno bajo investigación, cuyos datos sean adquiridos por un dispositivo sin estar en contacto directo con éste (Chuvieco, 2010, pp. 17-20).

2.2.1.1 Principios físicos

El flujo energético es uno de los principales componentes de un sistema de teledetección que junto al sensor nos permite detectar al objeto. Ese flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye en la teledetección una forma de radiación electromagnética.

Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético. Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de la onda y frecuencia. La primera hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda, mientras que la frecuencia designa al número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo¹.

2.2.1.2 Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético es una representación organizada en bandas donde la radiación electromagnética² tiene un comportamiento similar, partiendo de longitudes de onda corta,

¹ Chuvieco, E. 2010. Teledetección Ambiental. 3ra ed. Barcelona, España, Ariel Ciencias. Cap. 2. Pp.44-45

² Curso Introductorio de Geomática. Modulo I. 2006. p. 7. Centro de Procesamiento Digital de Imágenes. Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico

algunos μm , hasta valores altos (km). En la Figura 2.1, se representa las longitudes de onda del espectro electromagnético.

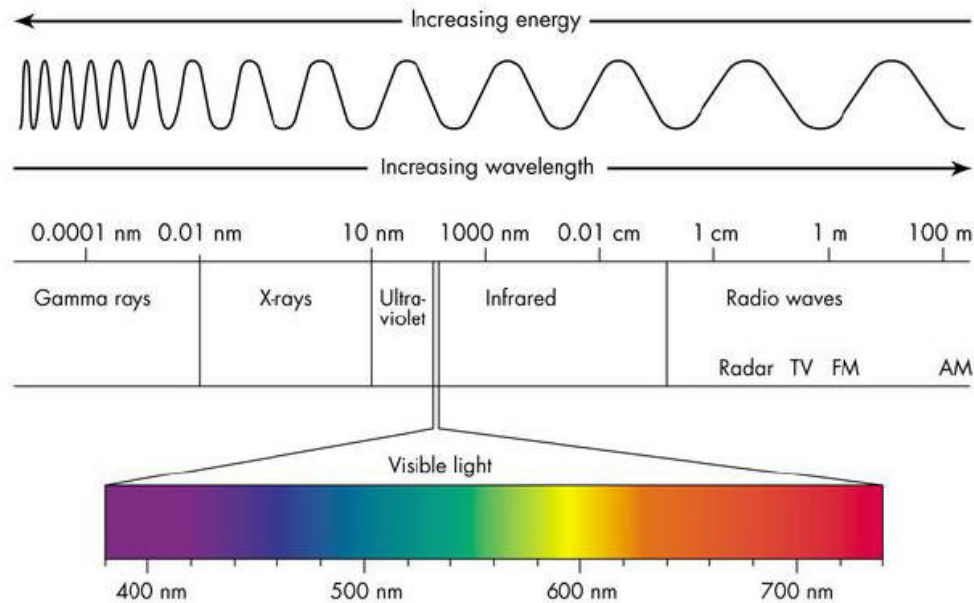


Figura 2.1: El espectro electromagnético

(Fuente: http://www.antonine-education.co.uk/physics_gcse/Unit_1/Topic_5/em_spectrum.jpg)

Las longitudes de onda más cortas, inferiores a 400nm, son ampliamente utilizadas en medicina, astronomía y microscopía, se destacan los rayos gamma, rayos X y la luz ultravioleta.

El espectro visible, corresponde al rango de longitudes de onda a las cuales es sensible el ojo humano. Las ondas más cortas (400 nm) se perciben de color azul y las más altas (750nm) se ven de color rojo, las longitudes intermedias se perciben de color verde (540nm), amarillo (580nm), etc. La luz blanca está constituida por una combinación de ondas con energía semejante y longitudes de onda en el rango del visible. Este rango de longitudes de onda es el más utilizado para la generación de imágenes.

La luz infrarroja cubre el rango del espectro electromagnético con longitudes de onda que van desde 0,78 mm a 1 mm. La banda infrarroja se divide en tres secciones de acuerdo a su distancia a la luz visible: cercana (780 nm a 2.500 nm), intermedia (2.500 nm a 50.000 nm) y lejana (0,5 mm a 1 mm) esta última relacionada con la temperatura del objeto.

Con especial interés se enmarcara, las microondas (1 mm a 1 m) que incluyen al Radar como fuente de generación de imágenes.

Finalmente, las ondas de radio se utilizan en la producción de imágenes por ecosonogramas y el sonar en medio marino.

2.2.1.3 Bandas en el Micro-Onda

En esta región de micro-ondas se han organizado estructuralmente un conjunto de bandas que se han usado en teledetección desde las aplicaciones militares que tienen características equiparables. Como se ve en la próxima tabla, estas bandas del microondas se denominan por una letra, y suelen acotarse por rangos de frecuencias (GHz).

Cuadro 2.1. Bandas de frecuencias utilizadas frecuentemente en micro-ondas.

Denominación	Anchura (cm)		Valor Típico	Anchura en GHz	
Ka	0,75	1,10			
K	1,10	1,67	1,0	10,9	36
Ku	1,67	2,40			
X	2,40	3,75	3,0	5,75	10,90
C	3,75	7,50	5,6	3,90	5,75
S	7,50	15	10,0	1,55	3,90
L	15	30	23,0	0,39	1,55
P	30	100	70,0		>0,39

Fuente: Chuvieco, 2010, p. 78

2.2.1.4 Sistema Sensor

El sistema sensor está compuesto por el sensor y la plataforma que lo alberga. Su finalidad primordial consiste en captar la energía proveniente de las cubiertas terrestres, codificarla y almacenarla (Chuvieco, 2010, p. 87).

2.2.1.4.1 Tipos de Sensores

Considerando la longitud de onda en la cual este trabaja, la teledetección los clasifica en dos grupos diferentes:

a. Sensores pasivos

Son aquellos que reciben la energía electromagnética (visibles e infrarrojas) reflejada o emitida por la Tierra cuando es proveniente de un foco exterior, ya sea la reflejada de los rayos solares y/o emitida en virtud de la propia temperatura de los objetos.

b. Sensores activos

Son aquellos que producen su propia energía para “iluminar” el objeto. Teniendo como el equipo más conocido, y que es objeto de estudio, al RADAR, que trabaja en las regiones del espectro electromagnético del micro-onda, donde estos generan sus propias ondas de radio.

2.2.2 RADAR

La teledetección activa de microondas más usual es el **RADAR** (Detección y localización por ondas de radio - siglas del término del inglés - "RAdio Detection And Ranging"), este término es utilizado de forma genérica para clasificar los sistemas que operan en la franja de frecuencia de microondas. El radar es un radiómetro activo de micro-ondas, que suministra su propia fuente de iluminación, en la región del espectro electromagnético del micro-ondas. (Chuvieco, 2010, pp. 71-74).

Las principales funciones del sistema de radar³ radica en enviar los pulsos de radiación electromagnética de microondas de radio hacia la escena (ver figura 2.2), las cuales, se emiten en una frecuencia de repetición del pulso (PRF), luego detecta la porción de esta energía transmitida que se refleja hacia el sensor desde la escena iluminada (señal retro-dispersada o ecos), y finalmente se mide la potencia de la señal reflejada (intensidad o potencia retro-dispersada), así como el tiempo de retardo entre pulso transmitido y reflejado con la finalidad de discriminar entre los diferentes objetos y determinar la distancia del transmisor-objeto, donde posteriormente son almacenados los datos crudos en una matriz (Prats, *et al.*, 2001).

En comparación con sensores ópticos, la teledetección por radar tiene sus ventajas. En primer lugar, como un sistema activo, puede adquirir datos tanto en el día como en la noche. En segundo lugar, teniendo en cuenta el comportamiento de las ondas electromagnéticas en el rango de longitud de onda de radar, se puede observar que las características atmosféricas

³ Tutorial: Radar Remote Sensing, Cap. Introducción a la percepción remota mediante radar. <http://www.nrcan.gc.ca/> Pag.4.

tales como nubes, lluvia ligera, niebla, calina, polvo y humo tienen poco efecto sobre la capacidad del sistema de adquisición de datos radar, ya que las longitudes de onda en la que trabaja, son muy superiores al tamaño habitual de las gotas de agua. Esto hace que el radar actúe como un todo sobre el clima para los sistemas de percepción remota. Por último pero no menos importante, las señales de RADAR penetran parcialmente en el suelo y la cubierta de vegetación, además de la información superficial, también puede proporcionar información del subsuelo (Mansourpour, *et al.*, 2008).

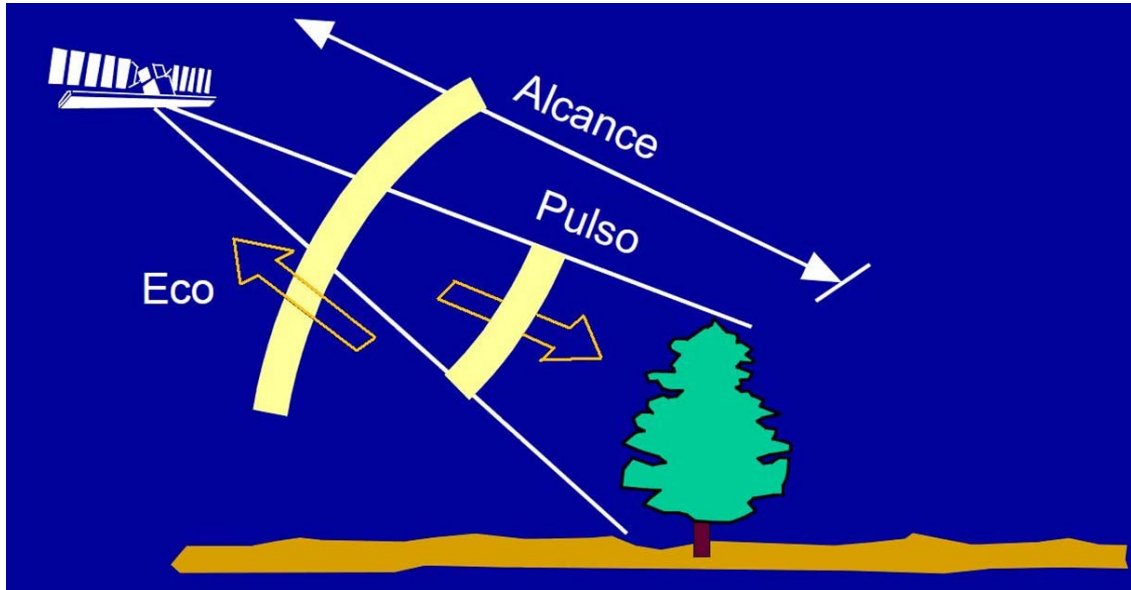


Figura 2.2: Funcionamiento del RADAR

(Fuente: Tutorial de Radar Remote Sensing, Cap. Introducción a la percepción remota mediante radar, p. 5. <http://www.nrcan.gc.ca/>.)

Pese a sus múltiples ventajas, a la teledetección por RADAR se le asocia su principal desventaja a que los sensores activos de radar realizan observaciones de vista lateral, lo que conlleva a errores geométricos de mayor proporción.

Sin embargo, los sensores de RADAR han alcanzado tal importancia que se han puesto en órbita en las últimas décadas algunas misiones de satélites como: *ALOS-PALSAR*, *ENVISAT-ASAR*, *ALMAZ*, *JERS-1*, *ERS-1*, *ERS-2*, *SIR-A*, *SIR-B*, *SIR-C*, *SEASAT*, *TERRASAR X*, *RADARSAT-1*, *RADARSAT-2*.

2.2.2.1 Retrodispersión

Se define por retro-dispersión a la señal dispersada sobre el objeto en la misma dirección del flujo incidente que finalmente será captada por el sensor para su registro en la imagen de radar.

Como se puede apreciar en la figura. 2.3 existen tres tipos de retro-dispersión de la energía electromagnética. La primera, es la *reto-dispersión especular*, donde la cubierta refleja la energía con el mismo ángulo del flujo incidente y se caracterizan por dispersar toda la energía incidente como en un espejo (especularmente), traduciéndose en que la energía reflejada se aleja del radar, visualizándose en la imagen con tonos oscuros o negros. La siguiente es la *reflexión difusa o lambertiana*, en la que las superficies reflejan las ondas de microondas en todas las direcciones, presentándose en la imagen con tonalidades claras. Por último, *la retro-dispersión de esquina o angular*, está asociada con elementos geométricos que forman dos planos con ángulo recto, siendo el ejemplo más característico un edificio con una superficie horizontal (Richards, *et al.*, 2006, pp. 7-8).

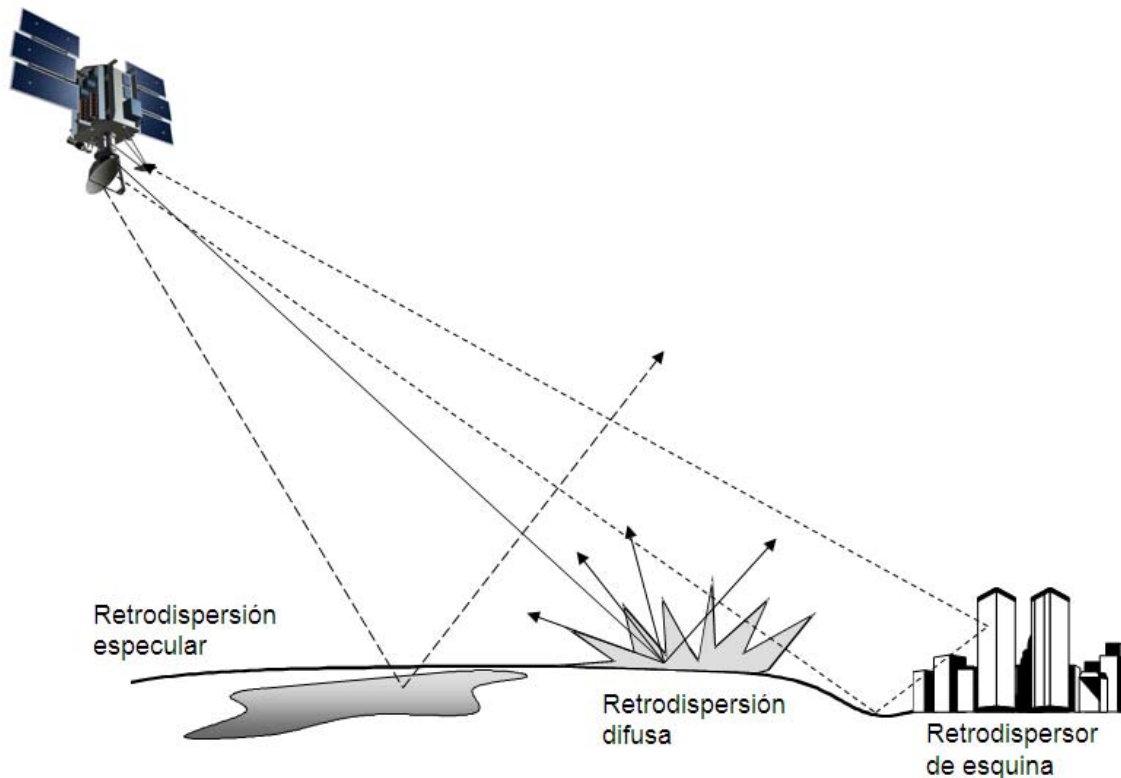


Figura 2.3: Tipos de reflexión de la imagen de radar
(Fuente: Chuvieco, 2010, p. 75).

2.2.2.2 Formación y naturaleza de una imagen RADAR

2.2.2.2.1 Formación de una imagen de RADAR

Una imagen de radar es una pantalla de niveles de grises, en la cual, cada uno de estos tonos son proporcionales a la cantidad de retro-reflexión que es recibido de un objetivo. Cuando se analizan cualquier imagen de radar, se puede observar que los elementos sobre la superficie terrestre que producen una gran cantidad de retro-dispersión aparecerán de color gris con tonalidad clara sobre la imagen de radar. Los objetivos que producen poca retro-dispersión aparecerá como tonos de gris oscuro, y los objetivos que reflejan cantidades intermedias de retro-dispersión aparecerá como tonos grises intermedios. En conclusión cada pixel, elemento más pequeño de la imagen de radar, representa el coeficiente de reto-dispersión de esta área sobre el terreno, siendo el valor almacenado tanto mayor cuanto más intensa sea la señal de retorno (Chuvieco, 2010, p. 111).

2.2.2.2.2 Retro-dispersión de los objetos

Como ya se ha mencionado una imagen de radar es un registro de interacción del flujo energético con los objetos en la superficie terrestre (. Esta retro-dispersión (backscatter) está vinculado con dos factores primordiales relacionados a las características del objetivo y el modo de observación. El primero está vinculado con la rugosidad y la constante dieléctrica, y el último se debe a la longitud de onda, el ángulo de incidencia y la polarización (Chuvieco, 2010, pp. 75-77).

2.2.2.2.2.1 La rugosidad

La rugosidad en la superficie terrestre influye directamente proporcional en la retro-dispersión, determinando las diferencias en tonos de grises en una imagen de radar. Es importante mencionar que este factor no solo depende de la estructura de la superficie sino también de la longitud de onda y del ángulo de observación. En consecuencia sí en una imagen de radar se visualiza con los tonos más oscuro se traduce que es una superficie lisa debido a que esta produce una reflexión especular y las superficies más rugosas aparecen con tonos de grises claros debido a la existencia de una retro-dispersión mayor. Cuando intervienen otros factores como la longitud de onda, por ejemplo, sí es corta las superficies

relativamente llanas se visualizaran en la imagen de radar como rugosas, mientras se comporta como lisa en longitudes mayores. (Chuvieco, 2010, p. 75).

2.2.2.2.2 Constante Dieléctrica

La constante dieléctrica se relaciona con la capacidad de la cubierta para almacenar y transmitir electrones, estando ésta relacionada con valores altos para elementos sobre la superficie terrestre que contengan agua, trayendo como consecuencia una afectación significativa sobre la señal de retorno. Esta presencia de humedad en los objetos sobre la superficie terrestre afectará en la absorción, emisión y reflexión de la energía de microondas. Observándose en la imagen de radar mayor brillo a medida que el contenido de humedad también sea mayor (suelos y vegetación húmedos son más brillantes que los secos). Otros que ofrecen valores mayores de retro-dispersión son las superficies metálicas por ser un conductor natural. Esta característica también está afectada por la longitud de onda, siendo por lo general, mayor la retro-dispersión a media que es mayor la longitud de onda (Chuvieco, 2010, p. 75).

Es importante acotar que la principal característica de los sensores de radar es la de emitir su propia energía, pudiéndose controlar las condiciones de adquisición: ángulo, distancia, orientación, polarización, etc. Entonces, al mantener estos parámetros y analizar las características de los objetos, por ejemplo, un objeto húmedo sufrirá una retro-dispersión mayor en la parte más externa del cuerpo, y adicionalmente, la magnitud y el tipo de dispersión están asociados a la rugosidad de la superficie. Por el contrario, con un objeto seco, la superficie aparecerá lisa al radar, debido a que este flujo penetra en mayor magnitud y si a esto se suma una longitud de onda mayor entonces se presentará mayor poder de penetración.

2.2.2.2.3 Geometría de observación

Este factor al igual que los anteriores, también es condicionante en determinar la cantidad de energía que regresa al sensor. Su conformación geométrica está vinculada al ángulo con que la superficie terrestre refleje la energía incidente, al igual con que el ángulo que formen el haz incidente con la posición del sensor. Influyendo en relación inversa entre ellos, por ejemplo, cuando la reflexión sea especular o la intensidad de retorno baja, estará influenciado por el haz de iluminación que sea más oblicuo o mayor sea el ángulo de incidencia.

2.2.2.2.4 Longitud de onda

En cada uno de los factores que se ha estudiado, se ha notado que están interrelacionados, no escapa de ello el caso de longitud de onda que junto a la geometría de observación influyen en la rugosidad que presenta imagen de radar y adicionalmente al jugar con estos parámetros aumenta la capacidad de obtener información del terreno a cierta profundidad, encontrando información interesante sobre fondo de vegetación o suelos (Chuvieco, 2010, p. 75).

Es por esto que si se asume una longitud de onda y una superficie dada, la superficie se visualizará en la imagen de radar más lisa cuando el ángulo de incidencia sea mayor. También al estudiar en profundidad estas longitudes de ondas se observaría el efecto que tienen sobre la constante dieléctrica y la rugosidad, así como la capacidad de obtener información del sustrato. (Chuvieco, 2010, p. 75)

Finalmente, como la longitud de onda, la geometría de observación y la polarización son factores controlables en el momento de la adquisición de la imagen de radar, donde cada una afecta la retro-dispersión de la onda, permitiendo estudiar la rugosidad y contenido de humedad de los elementos sobre la superficie que se representan en la imagen de radar. Entendiéndose como la polarización a la forma como la onda es transmitida y recibida por el sensor.

2.2.3 Radar de Apertura Sintética (SAR)

El la figura 2.4 se ilustra la definición del Radar de Apertura Sintética (**SAR**, siglas del término del inglés de *Synthetic Aperture Radar*). Donde en 1987 Elachi define que la operación básica del SAR, está basada *en el efecto Doppler, que afecta a la observación realizada cuando existe un movimiento relativo entre objeto y sensor. En el caso del SAR se registran los pulsos de un mismo punto de la superficie terrestre en dos momentos distintos de la trayectoria, con la que la resolución es equivalente a la que se obtendría con una antena de similar longitud a la distancia existente entre ambos puntos* (citado por Chuvieco, 2010, p.113).

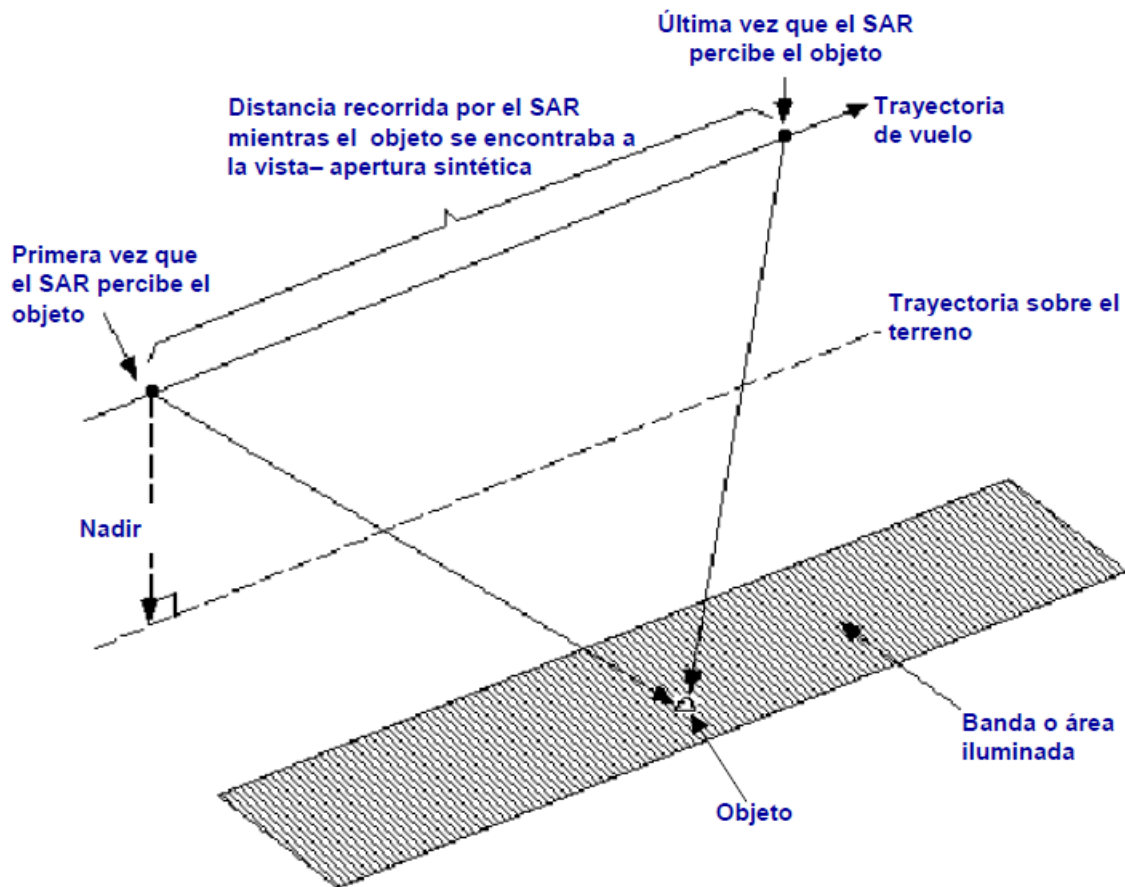


Figura 2.4: RADAR de Apertura Sintética
(Fuente: Tutorial de Radar Remote Sensing. p. 4. Disponible: <http://www.nrcan.gc.ca/>)

2.2.3.1 Geometría de vuelo del SAR

La adquisición de las imágenes de radar se constituye una serie de variables geométricas (ver figura 2.5) que definen sus características geométricas:

- *La altitud*, es altura del sensor de radar sobre la superficie terrestre.
- La dirección de la trayectoria de la plataforma, también conocida como la dirección de *azimut*.
- *El alcance*, es la distancia desde la antena al objetivo en la superficie terrestre.
- *El alcance cercano*, es el alcance de la primera señal retro-dispersada recibida tras iluminar el terreno.
- *El alcance lejano*, es el alcance de la última señal retro-dispersada.

- *Alcance sobre el terreno*, es la distancia desde el nadir del sensor activo hasta el objeto iluminado.
- *El ancho del área iluminada*, corresponde a la distancia en la superficie terrestre desde el primer elemento en su primer eco al último.
- *Angulo de incidencia*, es ángulo entre la dirección de transmisión del sensor de radar y la normal a la superficie terrestre.
- *Angulo local de incidencia*, considera la inclinación local de la superficie.

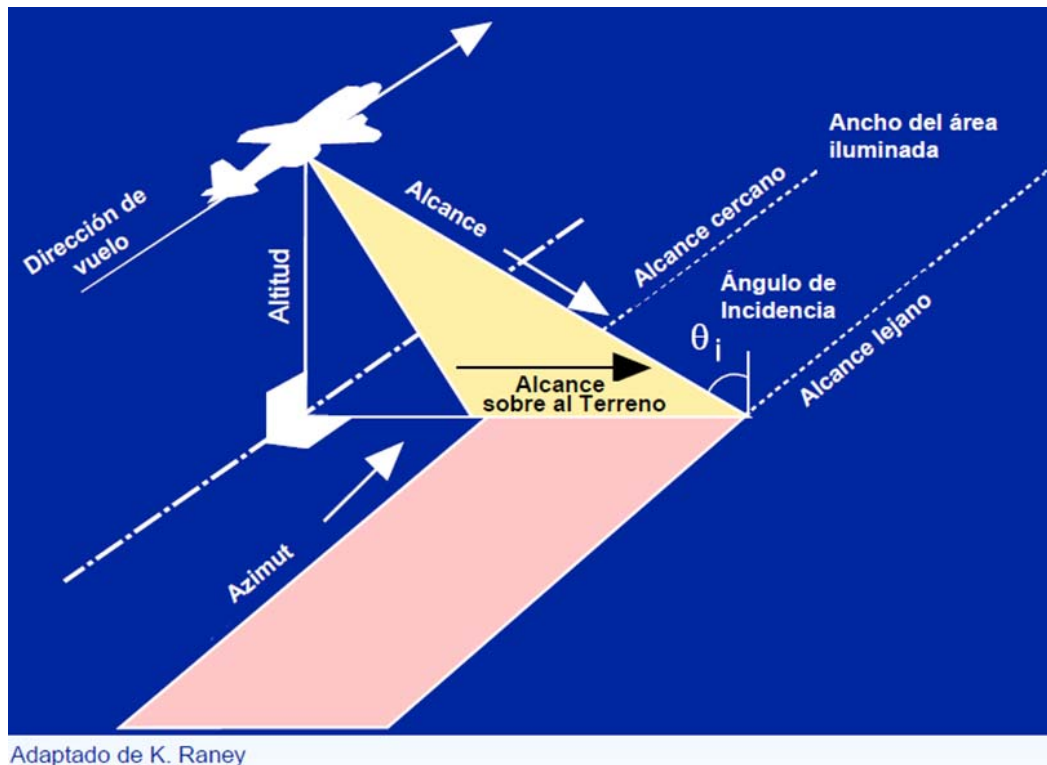


Figura 2.5: Geometría de vuelo del SAR
 (Fuente: Tutorial de Radar Remote Sensing, Cap. Formación de imágenes SAR.
<http://www.nrcan.gc.ca/> Pag.5.)

En sistema SAR se presenta dos ejes fundamentales en su conformación geométrica, uno de ellos en la dirección del azimut y el otro en la dirección del alcance inclinado (*slant range*) siendo ortogonales entre sí, que proyectado sobre la superficie terrestre se denomina *alcance sobre el terreno* (*ground range*).

2.2.3.2 Resolución de un SAR

2.2.3.2.1 Resolución en azimut

Los sistemas SAR bajo su premisa de apertura sintética, facilitan adquirir imágenes de reflectividad del terreno, basado en la síntesis de una antena ficticia de gran longitud para obtener de este modo una alta resolución en azimut (paralela en dirección de la trayectoria del satélite) que lo que se podrían adquirir con la apertura real de una antena (Prats, *et al.*, 2001).

2.2.3.2.2 Slant Range and Ground Range

En la figura 2.6 se puede observar cómo está conformada la geometría de observación lateral de una imagen de radar, definiendo una nueva resolución en la dirección de la profundidad (range, perpendicular a la trayectoria), siendo esta dependiente a la distancia real al objeto cambiando proporcionalmente entre los dos extremos de la imagen, representándose los píxeles en el alcance cercano con un área efectiva más pequeña a los que se encuentran en el alcance lejano (Chuvieco, 2010, p. 113).

La resolución en la dirección del alcance se clasifica en dos⁴:

-*Alcance Inclinado* (Slant Range Image): consiste en las distancias que son medidas entre la antena y el objetivo a lo largo de un plano inclinado. Este es el resultado natural de la medición en rango de un radar.

-*Alcance Terrestre* (Ground Range Image): Son las distancias medidas entre la trayectoria terrestre de la plataforma y el objetivo, y proyectadas a la posición correcta sobre el plano de referencia escogido.

⁴ Agencia espacial Europea (ESA). Radar Course III. Slant range / ground range [en línea]

http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/Radar_Course_III/slant_range_ground_range.htm

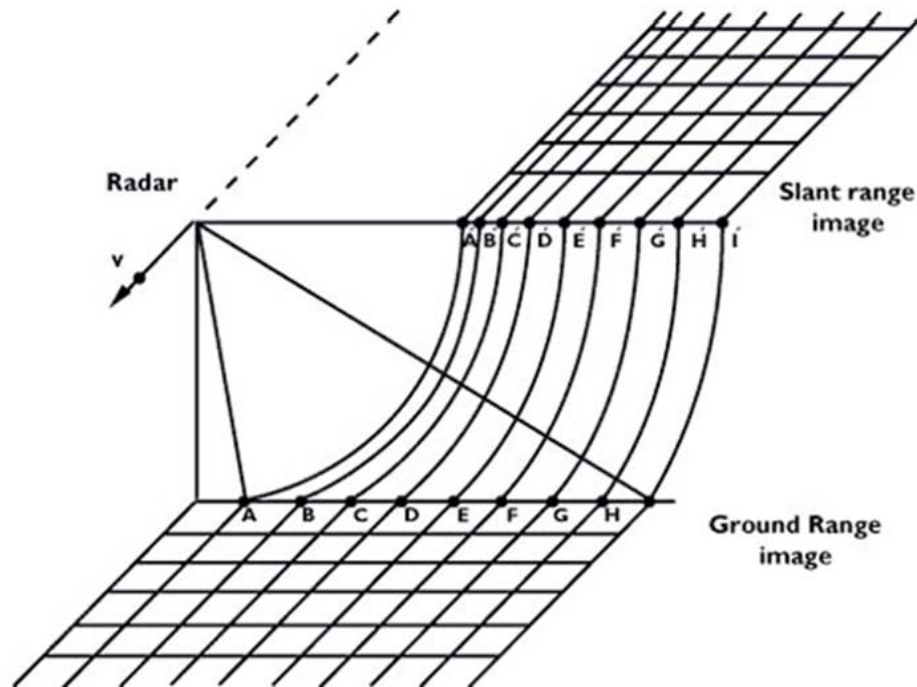


Figura 2.6: Resolución SAR
 (Fuente: Agencia Espacial Europea [ESA]. Curso de Radar. III. Disponible:
<http://earth.esa.int/applications/>)

2.2.4 Geometría del SAR

Como ya se ha mencionado, el registro de la imagen de radar está vinculado a la señal de retorno de los objetos del suelo, que a su vez, está influenciado por las características de la señal de radar transmitida, las características del objeto y, en lo que concierne a este apartado, a la geometría del radar en relación con la superficie de la Tierra y la geometría local entre la señal de radar y su objetivo.

Por consiguiente, la geometría de visualización del SAR se refiere a la geometría entre el pulso SAR transmitido y el objetivo tierra, considerando el parámetro principal de esta geometría al ángulo local de incidencia, definido como el ángulo entre el vector del alcance del SAR (SAR range vector) y la superficie normal a cada elemento del terreno fotografiado por el SAR. Conceptualizando que esto puede estar observando a cualquier pendiente sobre la superficie terrestre que se explora (considerando diferentes topografías), por consiguiente la geometría de la interacción de la señal-objeto es totalmente diferente. También es importante enmarcar que el otro parámetro que resalta al sistema SAR es que mide el tiempo de retardo entre la transmisión y la recepción de un pulso, midiendo recíprocamente la distancia, con la

finalidad de determinar dónde están los objetivos uno respecto al otro en la dirección del alcance (rango). (Mansourpour, et al., 2008).

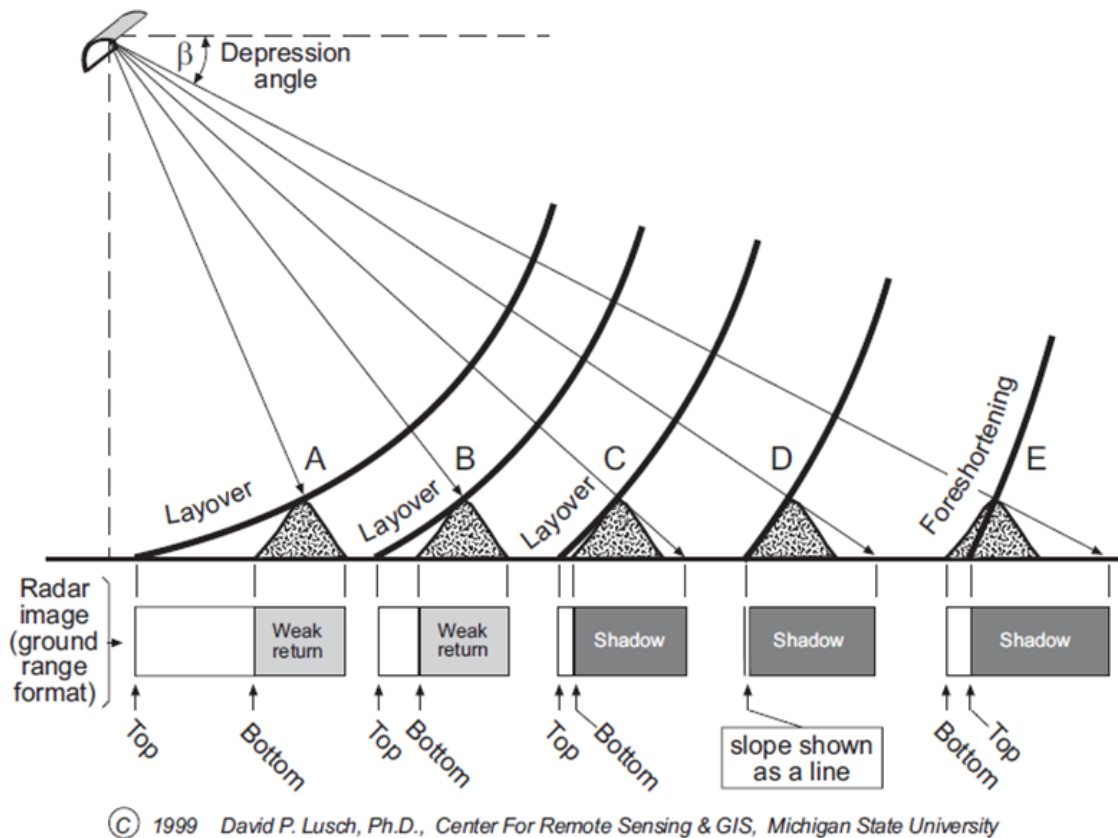


Figura 2.7: Geometría de una imagen de radar

(Fuente: Lusch, 1999. Pág. 28). [β es el ángulo complementario al ángulo de incidencia en el tope de la montaña o colina]

Las distorsiones geométricas presente en las imágenes de Radar se discriminan como⁵:

- a) *Las distorsiones del efecto de alcance*: El radar mide en el alcance inclinado, pero esta debe ser corregida al alcance terrestre para una representación correcta de la imagen y esto se logra conociendo el ángulo de incidencia local en cada punto.
- b) *Las distorsiones por efecto de relieve*:

Esta ocurre en aquellos casos donde los puntos tienen una elevación diferente de la elevación media del terreno en la escena iluminada. Influyendo de gran manera en la geometría de adquisición de la imagen de radar, que va modificando el ángulo local de

⁵ Agencia espacial Europea (ESA). Radar Course III. Slant range / ground range [en línea] Disponible: http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/Radar_Course_III/slant_range_ground_range.htm y Chuvieco (2010)

incidencia, y adicionalmente convierte la superficie real en superficie proyectada sobre la imagen.

Estas posibles distorsiones, debido al relieve y al ángulo de incidencia, pueden llegar a ser tan grandes, que se caracterizan en tres tipos diferentes: sombra, contracción del relieve (foreshortening), e inversión por relieve (layover) (figura 2.7).

Es posible corregir estas distorsiones con un modelo digital de elevación adecuado (Chuvieco, 2010, p. 115).

2.2.4.1 Inversión por relieve (Lay-over)

Como es sabido, en la dirección del alcance de la imagen de radar se almacena el tiempo que le toma a la señal de interactuar con el objeto y regresar a la antena, este tiempo es transformado en distancia en el plano del alcance inclinado. Resultando que los objetos altos, como en un relieve escarpado (montañas), el pulso de radar podría llegar primero a la cima de la montaña y luego llega a la parte inferior de esta, siendo este el caso extremo de desplazamiento por relieve (Lusch, 1999, p.27). Así, a partir del punto de vista del SAR, la parte superior de la montaña estará más cerca que la base de la montaña (figura 2.7, ejemplos A, B y C).

Las proporciones de la inversión por relieve dependen del ángulo de depresión (β) ya que controla el ángulo del frente de onda y el ángulo local de incidencia. A mayor ángulo de depresión el efecto será más severo, también para ángulos de incidencia pequeños o con características del terreno abrupto (montañosos), la retro-dispersión a menudo regresa desde la parte superior antes de la base de la característica de este terreno. Esto ocurre cuando el ángulo de incidencia local es mayor que el ángulo de incidencia. En la imagen SAR, esto parece como si el punto más alto del rasgo vertical se coloca sobre la parte superior de su base en la dirección del sensor, en otras palabras, cuando se representa en una imagen bi-dimensional, la montaña parece estar inclinándose hacia el sensor, lo que resulta en el desplazamiento de la cima de las montañas y de otras características topográficas de sus posiciones verdaderas ortográficas (Mansourpour, et al., 2008).

2.2.4.2 Sombra

Las Sombras en una imagen de radar dependen de la relación entre el ángulo de depresión y la pendiente de la vertiente opuesta a la dirección de iluminación. Entonces si el ángulo de ésta vertiente es menor que el ángulo de depresión se presentará una retro-dispersión débil (figura 2.7, ejemplos A, B). En caso contrario (Fig 2.7, ejemplos C, D, E), se apreciará en las imágenes algunas regiones de la superficie terrestre que no han sido iluminadas por la señal de radar, traducéndose en pérdida de información en dicha área (Lusch, 1999, p.29). Debido a esto, las sombras ayudan a definir la dirección de iluminación de la imagen de radar, así como la altura de los objetos. Adicionalmente el ángulo local de incidencia y las sombras aumentan cuando el objeto se encuentra más alejado en la dirección del alcance (CCRS, en línea).

2.2.4.3 Contracción del relieve (foreshortening)

A medida que los ángulos de depresión van siendo más pequeños y ángulo local de incidencia se aproxima a 90° la inversión por relieve desaparece, y ocurre una nueva distorsión, la contracción del relieve, con ésta podría aparecer un sombreado severo (figura 2.7, ejemplo E). La Contracción del relieve aparece en una imagen con pixeles muy brillantes, como si las vertientes frontales se están inclinando hacia el sensor, mientras que las vertientes opuestas se alargan. Al observar la figura 2.7, ejemplo D, vemos que existe una geometría de transición y esta se alcanza cuando el ángulo local de incidencia es 0° en toda la ladera, ocuparan desde su base al tope de la misma sobre una línea brillante sobre la imagen (Lusch, 1999, p.29).

Finalmente al analizar la figura 2.7, se programan la adquisición de las imágenes de radar considerando el ángulo de incidencia neto de la misma de manera que se logre un equilibrio entre la presencia de contracción del relieve y sombras en la imagen resultante.

2.2.5 Radiometría

En cuanto a los problemas radiométricos, el más importante es el conocido moteado (speckle), que aparece como consecuencia de las interferencias que se producen entre las diversas vistas que se requieren para generar una imagen con la técnica de SAR. El efecto es un moteado brillante, más o menos aleatorio sobre la imagen, que añade ruido y degrada las relaciones físicas, complicando la clasificación de la imagen. (Chuvienco, 2010, pp. 115-116).

2.2.6 Modelos Digitales de Elevación (DEM)

Un DEM, (cuyas siglas en inglés - Digital Elevation Model) se define como una estructura numérica de datos, que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. De forma general, la unidad básica de información en un DEM es un valor de altitud (z) al que acompañan los valores correspondientes de “x” e “y”, expresados en un sistema de proyección cartográfica para una precisa referenciación espacial (Felicísimo, 1994).

2.2.7 Sistemas Globales de Navegación por satélite

Un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) es una constelación de satélites que transmite rangos de señales utilizados por equipos receptores para el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre, sea por tierra, mar o aire. (Koolhaas, 2003).

a.- Posicionamiento Relativo o Diferencial:

Las mediciones Diferenciales del Sistema Global de Navegación por Satélite (DGNSS, en su acrónimo inglés) es una técnica que permite obtener las coordenadas de un punto con mayor precisión siendo un método basado en la corrección de todas las posiciones tomadas (calculadas con un receptor fijo en un punto conocido), que luego son aplicadas a un receptor itinerante. Con esta técnica se eliminan los errores de los relojes y en las efemérides, así como también elimina los efectos atmosféricos.

2.2.8 Transformación de coordenadas del datum geodésico PSAD-56 al SIRGAS

El Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía (SAGECAN), hoy el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB), adscrito al Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, comunicó que según Gaceta Oficial N° 36.653 del 03 de marzo de 1999, a partir del 01 de abril de 1999 se adoptó como marco de referencia para Venezuela, la Red Geodésica Venezolana (REGVEN), la cual materializa en Venezuela la densificación de la Red SIRGAS. Este sistema de referencia se encuentra referida al ITRF 94, época 1995.4 y como Elipsoide asociado el GRS 80.

En relación con la red de triangulación clásica, actualmente se dispone de los parámetros de transformación (PATVEN 98) entre PSAD 56 (La Canoa – Hayford) y SIRGAS, obtenidos

por La Universidad del Zulia y oficializado por el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar.

2.2.8.1 Modelo de Similaridad Badekas-Molodensky:

La expresión matemática matricial de este modelo es la siguiente (EPSG, 2003):

$$\begin{pmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M & RZ & -RY \\ -RZ & M & RX \\ RY & -RX & M \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_S - XM \\ Y_S - YM \\ Z_S - ZM \end{pmatrix}$$

$$XM = \Sigma X_S/n \quad YM = \Sigma Y_S/n \quad ZM = \Sigma Z_S/n$$

donde:

X_T, Y_T, Z_T : Coordenadas geodésicas cartesianas en el Datum global (REGVEN/ITRF94_1995.4).

X_S, Y_S, Z_S : Coordenadas geodésicas cartesianas en el Datum local (PSAD-56/LA CANOA-HAYFORD).

dX, dY, dZ : Parámetros de translación que relacionan la posición de los orígenes de los sistemas.

RX, RY, RZ : Parámetros de rotación que relacionan la orientación de los ejes de los sistemas.

M : Parámetro que permite considerar la diferencia en escala entre los sistemas.

XM, YM, ZM : Coordenadas geodésicas cartesianas promedio en el sistema local, para la muestra de puntos utilizados en el cálculo de los parámetros de transformación.

2.2.8.2 Parámetros de Transformación PATVEN_98

Los parámetros de transformación PATVEN_97 fueron calculados en Junio de 1998 por el Laboratorio de Geodesia Física y Satelital de la Universidad del Zulia (LUZ) para IGVS. Estos representan a nivel nacional la relación espacial entre el Datum venezolano PSAD-56 y el marco de referencia REGVEN. Fueron derivados a partir de un ajuste por cuadrados mínimos utilizando 19 puntos comunes distribuidos en el país. Sus valores son los siguientes:

$$\begin{array}{lll}
dX \text{ [m]} = -270,933 & dY \text{ [m]} = 155,599 & dZ \text{ [m]} = -360,226 \\
RX \text{ [''}] = -5,266 & RY \text{ [''}] = -1,238 & RZ \text{ [''}] = 2,381 \\
M \text{ [ppm]} = -5,109 & XM \text{ [m]} = 2.464.351,594 & \\
YM \text{ [m]} = -5.783.466,613 & ZM \text{ [m]} = 974.809,808 &
\end{array}$$

2.2.8.3 Modelo de Bursa-Wolf

Esta transformación se concatena desde un sistema geocéntrico a otro y su principal característica es que requiere de 7 parámetros de transformación, siendo su expresión matemática (EPSG, 2003):

$$\begin{pmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{pmatrix} = M * \begin{pmatrix} 1 & -R_Z & +R_Y \\ +R_Z & 1 & -R_X \\ -R_Y & +R_X & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{pmatrix}$$

En 1997 Acuña hace referencia que el LGFS de LUZ calculó los 7 parámetros de transformación usando el programa TRANSDAT (citado por Martín, et al., 2001) siendo los resultados como sigue:

$$\begin{array}{lll}
dX \text{ [m]} = -296.497 \pm 5.909 & dY \text{ [m]} = 85.260 \pm 5.723 & dZ \text{ [m]} = -263.967 \pm 13.943 \\
RX \text{ [''}] = -2.904 \pm 0.433 & RY \text{ [''}] = -0.817 \pm 0.198 & RZ \text{ [''}] = -1.210 \pm 0.221 \\
M \text{ [ppm]} = -4.688 \pm 0.634 & &
\end{array}$$

Martín, et al., 2001 realizaron comparaciones de puntos con coordenadas medidas en los datums La Canoa –Hayford y SIRGAS – REGVEN, con coordenadas de los mismos puntos transformadas a SIRGAS – REGVEN usando los 7 parámetros de Bursa –Wolf mostrados anteriormente, observándose diferencias lineales de 2,02 metros.

Siendo esto suficiente para trabajos a escalas menores a 1:25.000.

2.2.9 La Orto-rectificación

Las imágenes originales contienen distorsiones geométricas significativas que no permiten que sean utilizadas directamente con productos cartográficos y Sistemas de Información Geográfica (SIG). De hecho, cada sistema de adquisición de imágenes produce distorsiones geométricas únicas, las cuales varían considerablemente con diferentes factores,

principalmente la plataforma, la órbita y el sensor. La geometría de cada imagen cruda debe ser convertida por separado a una orto-imagen, de manera que pueda ser registrada, comparada y combinada en una base de datos cartográfica común.

Para la generación de orto-imagen se introduce la definición de orto-corrección u orto-rectificación como:

“El proceso mediante el cual se remueven las distorsiones geométricas presentes en las imágenes y que están ocasionada por la orientación de la cámara o el sensor, el desplazamiento debido al relieve y los errores sistemáticos asociados a la imagen”.⁶

Las distorsiones geométricas mostradas en la tabla 2.2, incluyendo deformaciones de los mapas son predecibles o sistemáticas. Algunas de ellas, especialmente las relativas a la instrumentación son corregidas en las estaciones receptoras terrestres. Las distorsiones geométricas restantes requieren modelos y funciones matemáticas para la corrección geométrica de las imágenes (orientación del sensor y orto-rectificación), bien sea con modelos heurísticos y probabilísticas o con modelos físicos y determinísticos como lo establecen Robertson, Toutin, Chen et al. (citado en Toutin, 2006).

Cuadro 2.2. Descripción de los factores de distorsiones geométricas de una imagen.

CATEGORÍA	FUENTES DE DISTORSION
Plataforma (espacial o aéreo-transportada)	Variaciones de la órbita o línea de vuelo Variaciones de la actitud de la plataforma (bajas a altas frecuencias)
Sensor (VIR, SAR o HR)	Variaciones en mecanismos del sensor (tasa de escaneo, velocidad del escaneo, etc.) Distorsiones de los lentes (focal, descentrado, etc.) Ángulos de Vista Efecto Panorámico (FOV)
Instrumentos de Medición	Variaciones de Tiempo o Sincronización del reloj
Atmósfera	Refracción y turbulencia
Tierra	Curvatura, rotación, efecto topográfico
Mapas	Transformaciones Geoide - Elipsoide – Mapa

Fuente: Toutin, 2006

⁶ Erdas Tour Guide, Cap. 12. 1997-2001. Pag.2.

La Orto-imagen es una fotografía que muestra los objetos en su verdadera posición. Las Orto-imágenes son por tanto, geoméricamente equivalentes a líneas convencionales y con planimetría de mapas. Se producen a partir de fotos a través de un proceso llamado rectificación diferencial, lo que elimina de la imagen el desplazamiento debido a la inclinación de la toma y el desplazamiento del terreno. Este último se determina a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM).

2.2.10 Corrección Geométrica SAR

Se ha mencionado en secciones anteriores, que los sistemas de radar tienen como principal función el de medición de distancia de vista lateral (side-looking), caracterizándose fundamentalmente sus parámetros geoméricos por el ángulo de incidencia, ángulo local de incidencia y la dirección de observación. La geometría de vista lateral del radar resulta en un par de distorsiones geoméricas relevantes, tales como las distorsiones de escala en la dirección del alcance inclinado y distorsiones por relieve. Las correcciones geoméricas incluyen en la dirección del alcance terrestre, el registro, y correcciones ángulos locales de incidencia, donde sus correcciones precisas depende de la disponibilidad de la información topográfica DEM (Mansourpour, et al., 2008).

En términos generales, los algoritmos de corrección geométrica se clasifican en tres métodos, el primero es el método de conversión del alcance inclinado a alcance terrestre (Slant/Ground Range), el siguiente es el registro de imagen con la transformación polinomial (mejores ajustes de aproximación) y finalmente el método Radargramétrico (conocida la geometría del sensor) que usa puntos de control terrestre (GCP) que se utilizan para establecer y/o perfeccionar la transformación (Mansourpour, et al., 2008).

2.2.10.1 Conversión del alcance inclinado al terrestre

Las características de adquisición de los datos SAR es que son tomados en el plano del alcance inclinado y al realizar su conversión al alcance terrestre se proyecta la imagen adquirida a un sistema de proyección terrestre. Por esto, es necesario conocer los parámetros relacionados a la geometría de la imagen, la actitud de la plataforma, el retraso de la señal y la elevación del terreno (DEM). Este remuestreo en el alcance terrestre se utiliza para dar espaciamiento uniforme del píxel a través de esta franja de imagen. Esta conversión se puede

hacer durante el procesamiento de las señales o durante el procesamiento de imágenes. En el caso particular de los productos RADARSAT, estos asumen la superficie de referencia del alcance terrestre al nivel del mar cero en el modelo elipsoide tierra que es interrelacionado por el Modelo de ondulaciones geoidales (Mansourpour, et al., 2008).

2.2.10.2 Rectificación polinomial

Basado en funciones polinómicas, el polinomio de transformación utiliza un modelo de mejor ajuste que, dependiendo del grado del polinomio podrá adaptar a la imagen a su realidad posicional. Al aplicar un polinomio de primer orden, se realizará un ajuste relacionado al cambio de rotación de la imagen, mientras que para los polinomios de segundo orden se usan para las imágenes que requieren deformación no lineal. Los polinomios de tercer orden o más, podrían crear un mundo más complejo para la transformación de la imagen. Adicionalmente, a mayor orden del polinomio estos requerirán mayor número de puntos de control (GCP) con el fin de producir el modelo de transformación matemática. Los polinomios de orden alto no garantizaran una mayor precisión. Estos por lo general ajustan a la imagen a los puntos de control (GCP), pero puede aumentar los errores entre ellos (Mansourpour, et al., 2008).

Resumiendo, para lograr una precisión aceptable al usar este método, se debe analizar el cómo ocurren las deformaciones en la imagen debido a la geometría de adquisición de sensor y las condiciones topográficas del relieve. Por ejemplo, si se considera una zona plana y una buena distribución de GCP en la imagen SAR podríamos corregir las distorsiones geométricas de la misma.

2.2.10.3 Método Radargramétrico

La Geocodificación es la corrección geométrica de los datos de imagen a una proyección cartográfica. Siendo el método tradicional de geocodificación la transformación polinomial, cuya principales desventajas son la no exigencia de un modelo geométrico de visión del sensor y de no utilizar datos de elevación para corregir la topografía.

El método más preciso de geocodificación es el método radargramétrico, este utiliza la formulación analítica de las distorsiones en la formación de imágenes. Considerando que realiza la corrección geométrica empleando el modelado y refinamiento de las efemérides (sí se proporcionan GCP) que requiere como insumos a las efemérides del satélite con sus

respectivos datos auxiliares que provienen de la lectura de los datos del encabezado (header) de la imagen. También considera el modelado de las deformaciones geométricas debidas al sensor con sus variables relacionadas al tiempo de integración, la duración del pulso, el ángulo de depresión. Finalmente, considera la corrección relacionadas con la topografía cuya información primordial sería el DEM. Teniendo como resultado una "Orto-imagen" que ha sido corregida por todas las distorsiones, incluyendo el terreno, cuya exactitud dependerá de los GCPs y del DEM (Mansourpour, et al., 2008).

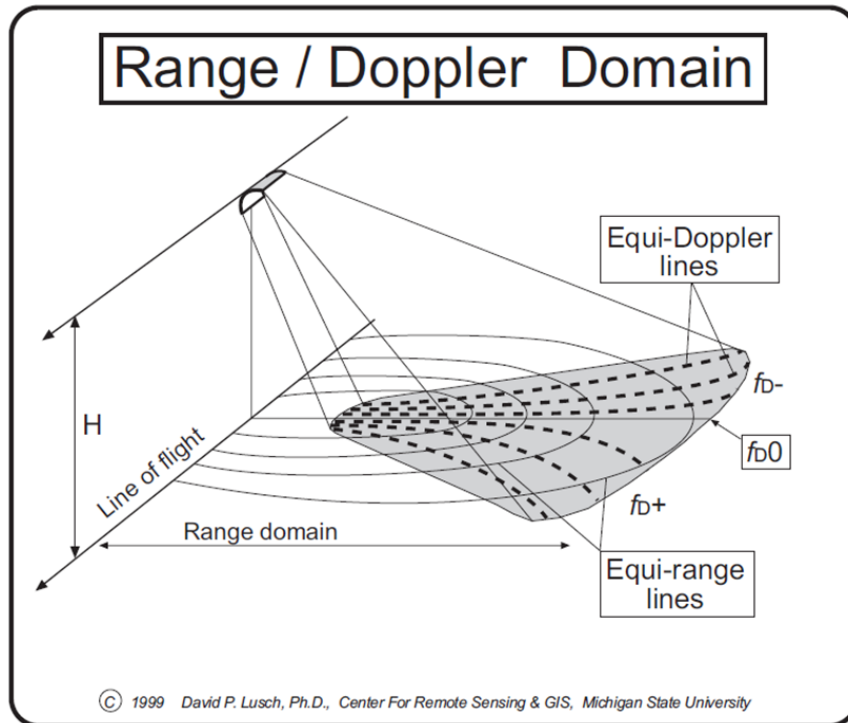


Figura 2.8: Dominio Alcance-Doppler
(Fuente: Lusch, 1999. Pág. 26).

El modelado de las deformaciones geométricas de las imágenes SAR se realiza aplicando un proceso llamado procedimiento Alcance-Doppler (Figura 2.8), que al analizar la geometría de las imágenes SAR, considera la relación de los puntos de la imagen y los puntos de destino. Este proceso en la geocodificación precisa analiza los elementos en la conformación de la imagen basándose: En la dirección del alcance (range direction), la distribución de los puntos equidistante desde el objeto al radar en clúster circular homocéntrico, cuyo centro de un círculo es un punto debajo de satélite. Por otro lado, igual frecuencia Doppler ajusta los puntos creados por el movimiento relativo entre satélite y el objetivo distribuyéndolos como clúster hiperbólica en la dirección del azimut. Por lo tanto, el objetivo terrestre puede ser

confirmado por la intersección de la redondez homocéntrica e hiperbólica de los clústeres. El algoritmo de Range-Doppeln su mayoría se encuentra en la exactitud del catálogo de datos fundamentales (Huang, *et al.*, 2004).

2.2.11 El Satélite RADARSAT-2

*Características principales del Radarsat 2*⁷

- Inclutación de la órbita de 98,6°
- Dimensiones de la Antena SAR de 15 m x 1,5 m.
- La antena opera en la banda C (5,405 GHz de frecuencia ó 5,6 cm de longitud de onda).
- Resolución espacial de 3 metros (ultra-fina) a 100 metros.

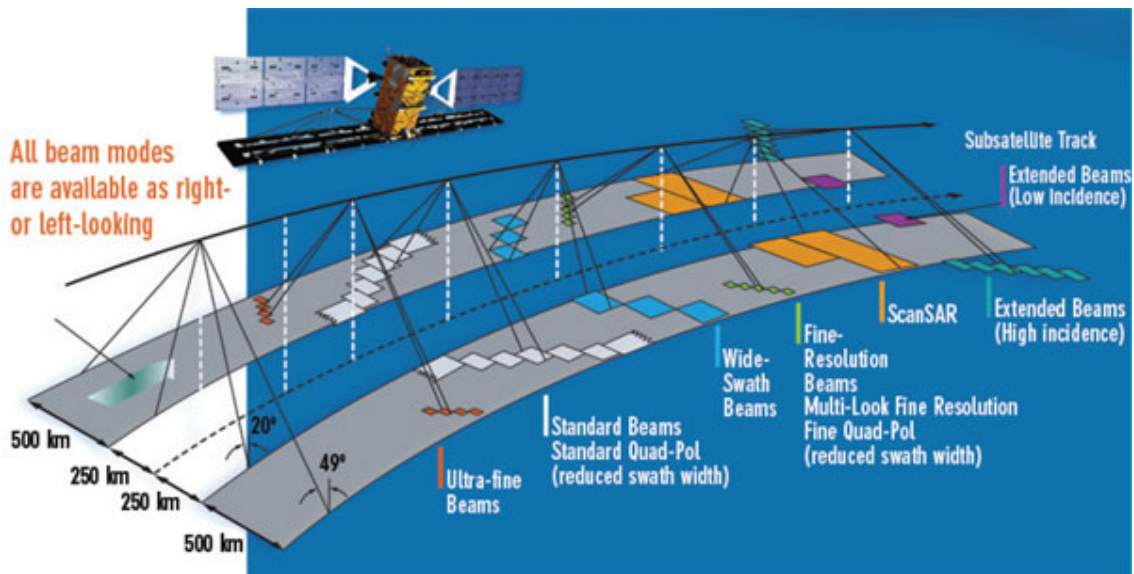


Figura 2.9: RADARSAT-2

(Fuente: Canadian Space Agency <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat/radarsat-tableau.asp>).

- Modos de observación lateral hacia la izquierda o la derecha, aumentando la frecuencia de revista.
- Polarización seleccionada por el usuario (en función del modo de generación de la imagen)

⁷ Canadian Space Agency (CSA). RADARSAT Systems: Satellite Characteristics [en línea] www.asc-csa.gc.ca

- Combinación de polarización seleccionable (HH o VV o HV o VH o (HH y HV) o (VV y VH))
- Cuadri-polarización (HH, VV, HV, VH)
- Polarización única seleccionable (HH, VV, HV, o VH)
- Los receptores GPS a bordo proporcionan conocimiento de la posición en tiempo real con ≤ 60 m. Mejorando la precisión geométrica comparados con su antecesor.
- Inclinación controlable para cero-desplazamiento Doppler en el centro del haz.
- Tiene 7 opciones de adquisición de imágenes o modo de haz. Cada uno de estos modos ofrece diferentes coberturas y diferentes resoluciones. El instrumento también permite seleccionar un rango de ángulo de visión lateral desde 10 a los 59 en posiciones fijas, pudiendo elegir desde una posición del haz con cada modo de operación.
- El satélite cruza el ecuador en las órbitas descendente sobre las 6:00 a.m. (hora local) y en órbita ascendente sobre las 6:00 p.m. (hora local), con un error de +/-15 min.
- El satélite es capaz de capturar una imagen de la misma zona cada 24 días, pero gracias a sus características especiales es posible reducir la frecuencia temporal.

2.2.12 Imagen SAR como producto Cartográfico

La generación de productos cartográficos a partir de imágenes de satélite o aerotransportado ha sido una versátil herramienta para la representación de espacio terrestre en grandes extensiones, a gran detalle y cada vez más precisos, que dependiendo de la aplicación, se podrán usar sensores activos o pasivos asociados a sus diferentes geometría de adquisición.

Están imágenes se caracterizan por estar confeccionadas por sensores satelitales, los cuales se caracterizan por ser totalmente métricos, donde la posición de cada pixel de la imagen esta interrelacionada a su posición espacial, ya que se tiene una primera aproximación de su posición y orientación (orientación relativa). Siendo el objetivo de este trabajo el estudio de las imágenes SAR donde fue expresada todas las condiciones geométricas para la formación de la misma en secciones anteriores, las cuales cuando se modela con un proceso de ortorectificación y de ajuste de los parámetros orbitales con puntos de control terrestre se logra obtener una imagen donde cada pixel tiene una referencia espacial precisa que dependiendo de la escala de trabajo se deberán definir parámetros de precisión para la ubicación de cada

pixel, que en un futuro servirá para integrar esta imagen a un Sistema de Información Geográfica (SIG).

2.2.13 Precisión Cartográfica

El principal producto de este trabajo de investigación fue la generación de información espacial que será usada como insumo para la producción de información cartográfica, que a la vez estará asociada a alguna aplicación de la geomática. Por esta razón, al ser una representación de posición de los objetos sobre el terreno, fue importante realizar la evaluación de la exactitud posicional de esta orto-imagen que se generó, como lo establece la Norma Internacional de Calidad, eso sí, solo enfocada al elemento de calidad de datos de *exactitud posicional* de la ISO 19113:2002 “Información Geográfica – Principio de Calidad” (IPGH, 2010).

La evaluación de la calidad del producto consistió en determinar según parámetros, requisitos, o especificaciones nacionales o internacionales, si es rechazada o válida para una escala de trabajo determinada, siendo importante recalcar que la exactitud posicional es un aspecto fundamental en cualquier producto cartográfico.

En materia de cartografía en el país, el ente responsable, según la Ley de Geografía, Cartografía y Catastro Nacional, es el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB) siendo *el organismo rector de la actividad geográfica, cartográfica y de catastro del Estado*⁸, y por consiguiente el encargado en definir las normas de precisión. Aun este organismo mantiene como tarea pendiente, la definición de una normativa lo suficientemente clara y su respectiva publicación en un documento oficial.

2.2.13.1 Parámetros de Precisión Cartográfica

La precisión cartográfica de un mapa tiene asociada en su confección unos parámetros que están relacionados a su escala de representación y esta se logra realizando un control de la calidad, donde se considera su precisión o exactitud. El control planimétrico se basa en el análisis estadístico de los errores lineales en cada uno de sus componentes y/o un error circular que corresponde a un análisis del error global planimétrico (Ariza, et al., 2006).

⁸ Gaceta Oficial 37.002, Titulo IV, Capitulo I, Artículo 45, 28 de julio 2000.

Es importante enmarcar que según la aplicación para la cual fue diseñado el mapa, hay que establecer un parámetro de precisión o calidad. Estos valores delimitan las diferencias máximas de los valores geométricos entre la representación de cada elemento en el mapa y su correlativo sobre el terreno, y no deben extralimitarse al valor fijado por el parámetro de precisión. Por esta razón cada mapa cumple con su respectivo requisito de precisión. Al tratarse de puntos medidos en campo, los errores de medición deben ser menores a un tercio del parámetro de calidad del mapa o según las normas que se establezca para tales fines (Sevilla, 1991).

La cuantificación de estas diferencias máximas se realiza con un análisis de los criterios de error de un mapa que se establecen según la teoría de error. Donde la verificación del producto final debe estar consolidada por un buen procedimiento basado en teorías matemáticas precisas. La media y el error medio cuadrático considera todos los errores asociados en el proceso cartográfico y ayuda a establecer el control de calidad de un mapa. Los mapas topográficos dan como información básica de fácil extracción a las coordenadas planimétricas X e Y y a la coordenada altimétrica Z, por esta razón los criterios de calidad estarán asociados primordialmente a los errores de estas coordenadas debido a que estos datos son muy conocidos y utilizados en aplicaciones de geomática, ingeniería y catastrales.

Los criterios de precisión están asociados al análisis de muestras usando métodos estadístico, y debido a que se trata de información espacial, al escoger un conjunto de N puntos deben tener una buena distribución en todo el mapa. Para cada punto se tiene su correspondiente magnitud obtenida por observación directa sobre el terreno o sobre otro mapa validado de igual o superior escala, a esta diferencia se le denomina *discrepancia*. La precisión planimétrica de un mapa está indicado por el error medio cuadrático de las coordenadas horizontales (X,Y). Ahora bien, el control planimétrico tiene como finalidad comprobar que este límite de precisión es alcanzando verazmente. En definitiva, un producto cartográfico que es aceptado con una precisión de σ_0 , significa que las diferencias están por debajo de σ_0 con una probabilidad del 68,3 por 100 y por debajo de $3\sigma_0$ con una probabilidad del 99,7 por 100. Por ejemplo, al considerar una precisión cartográfica sobre el mapa de 0,25 mm, entonces los puntos sobre el mapa están a menos de 0,43 mm de su posición correcta al 90 por 100 (Sevilla, 1991).

Otro ejemplo relacionado a aplicaciones correspondientes con el mapa base, se establece que la tolerancia planimétrica está entre 0,2 y 0,3 mm, a la escala de preparación del mapa. Y para

aplicaciones de levantamientos forestal y considerando escala mayores de 1:100.000, la tolerancia a la escala del mapa se sugiere de un 1 mm en terreno plano y de 1,5 mm en terrenos montañosos (Pernía, *et. al.*, 1999).

Finalmente *un mapa aprueba su control de calidad cuando los errores planimétricos y/o altimétricos no sobrepasa los límites de error (σ_0) establecidos por las normas de precisiones planimétricas y/o altimétricas, en caso contrario el mismo debe ser rechazado.*

2.2.13.1 Normas Nacionales

Las Normas Técnicas para la Formación y Conservación del Catastro Nacional, especifican que para levantamientos catastrales se define la exactitud planimétrica para dos ámbitos.

El primero con 0,20 m está asociado al ámbito urbano, la base cartográfica a usar será a escala 1:1.000, de esto se concluye que su exactitud está relacionada a 1/5 (0,20) del milímetro sobre el papel, también especifica esta norma que se puede usar escalas entre 1:500 y 1:2.500, en función a la estructura parcelaria existente.

El siguiente es el ámbito rural, con exactitud de 2,5 m para escalas comprendidas entre 1:25.000 y 1:5.000, en función de la densidad y del tamaño de los predios o parcelas. Quedando de manera ambigua en ambos casos su interpretación de la precisión cartográfica medida sobre el papel entre 1/10 mm a ½ milímetro, solo para aplicaciones de levantamiento catastrales.

Por ejemplo, IGVS (2011) desarrollo unos términos de referencia para el contrato de servicio para el “apoyo a la cartografía y el catastro venezolano CARCAVEN”, donde especifica que la escala de trabajo es 1:1.000 y que los parámetros de precisión (de los objetos representados en el mapa) son:

- Precisión cuyo error medio cuadrático en planimétrica sea menor o igual a ± 25 cm y en altimetría a ± 30 cm.
- Exactitud establece que la Tolerancia en planimetría es menor a ± 3 mm y altimétrica es de $\frac{1}{4}$ del valor de la equidistancia entre las curvas.

Finalmente de lo anteriormente expuesto se concluye que para escalas de gran detalle para aplicaciones catastrales la precisión cartográfica está relacionada a $\frac{1}{4}$ (0,25) del mm en el mapa.

2.2.13.2 Normas Internacionales

En 1947 la U.S. BUREAU OF THE BUDGET definió el *United States National Map Accuracy Standards (NMAS)*, especificando que el 90% de los puntos deben estar dentro de ésta tolerancia, la cual, se define en base a dos rangos de escalas. La primera está asociada a escalas mayores a la 1:20.000 el error admisible debe ser menor a 1/30 pulgadas que equivale a 0,846 mm y la otra, para escalas representación menor o igual a 1:20.000 está asociada a 1/50 pulgadas que corresponde en el sistema métrico a 0,508 mm sobre el papel según la escala de representación, y directamente asociada al error circular para el 90% de probabilidad como estadístico de comparación, y finalmente para la ubicación de los puntos de control en tierra, su error debería ser menor a 1/100 pulgadas que corresponde a 0,254 mm (citado en USGS,1999).

En 1990 el comité de especificaciones y estándares de la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) definió un estándar de precisión para mapas de escalas superior a 1:20.000 para aplicaciones de ingeniería o propósitos especiales. Para las escalas presentadas en el sistema métrico se saca la relación que el límite del RMSE en planimetría evaluado independiente en los ejes x o y sería 0,25 mm. El anterior lo definen como estándar Clase 1 y adicional a este se definen dos clases adicionales. Donde la Clase 2 admite una tolerancia doble a la primera (0,50 mm) y la Clase 3 admite la triple (0,75 mm) (citado en FGDC 1998). Es de recordar que estas dos últimas clases de precisión se deben trabajar según el propósito del mapa y por consiguiente considerar la exactitud de identificación de los elementos en el mapa resultante.

El Instituto Geográfico Nacional (IGN) de España establece que el límite σ_0 correspondería a 0,25 mm sobre el mapa y que equivale aproximadamente a decir que el 90 por 100 de los puntos del mapa están a menos de 0,43 mm de su posición correcta en el mapa y los errores resultantes del levantamiento de puntos de control en campo deben ser menores a un tercio que los permitidos en las normas de precisión del mapa según su escala correspondiente y los puntos de validación con precisión inferior a la especificación cartográfica del mapa a evaluar (Sevilla, 1991).

2.2.14 Calidad visual de imágenes

Los sistemas sensor con tamaño de pixel de 6 m son ideales para la producción de mapas topográficos a escala 1:50.000 y para la actualización de mapas a escala 1:25.000. Considerando un tamaño del pixel en relación al mapa, que debe estar entre 0,05 a 0,1 mm visto a la escala del mapa, y adicionalmente esta relación depende de la calidad radiométrica, de la información espectral, y del tipo de aplicación a considerar, ya que el ámbito urbano requiere un nivel de detalle diferente al ámbito rural (Jacobsen, *et. al.*, 1998).

La ASPRS establece que el menor elemento identificable de un mapa está comprendido entre 0,2 – 0,3 mm. Siendo el pixel el elemento más pequeño identificable en una imagen digital.

En cambio Schiewe (1995) en su investigación plantea que la relación 10 pixeles/mm de Doyle (citado por Schiewe, 1995) podría ser muy pesimista, demostrando que para orto-imágenes con 5 pixeles/mm se obtiene una impresión visual adecuada al no presenciar dobles pixeles o irregularidades en los lineamientos.

Para ser menos rigurosos, Ball Aerospace recomendó para impresiones de calidad de imágenes QuickBird una relación de 80 pixeles por pulgada, lo cual equivale a 3,14 pixeles/mm (citado por Corbelle, 2006). Ésta última ofrece suficiente calidad visual (Corbelle, 2006), remarcando que esta sugerencia se aplica para imágenes de sensores ópticos.

III. ÁREA DE ESTUDIO

La definición del área de estudio responde a tres factores: el primero es al área de adquisición de la imagen SAR del satélite Radarsat-2, ésta se localiza en el sector Centro-Norte de Venezuela, entre las coordenadas 09° 38' 41" y 10° 06' 18" de Latitud Norte, y 67° 41' 53" y 67° 06' 19" Longitud Oeste, comprendiendo partes de los estados Aragua, sureste de Carabobo y norte de Guárico, enmarcadas por los centros poblados de Maracay al norte, hasta Parapara al sur (Figura 3.1). El segundo es la existencia del Modelo Digital de Elevación (DEM) a escala 1:50.000 ó superior que cumpla el primer factor (Figura 3.2). Y el último, está relacionado a los diferentes tipos de relieve: plano, ondulado y montañoso.

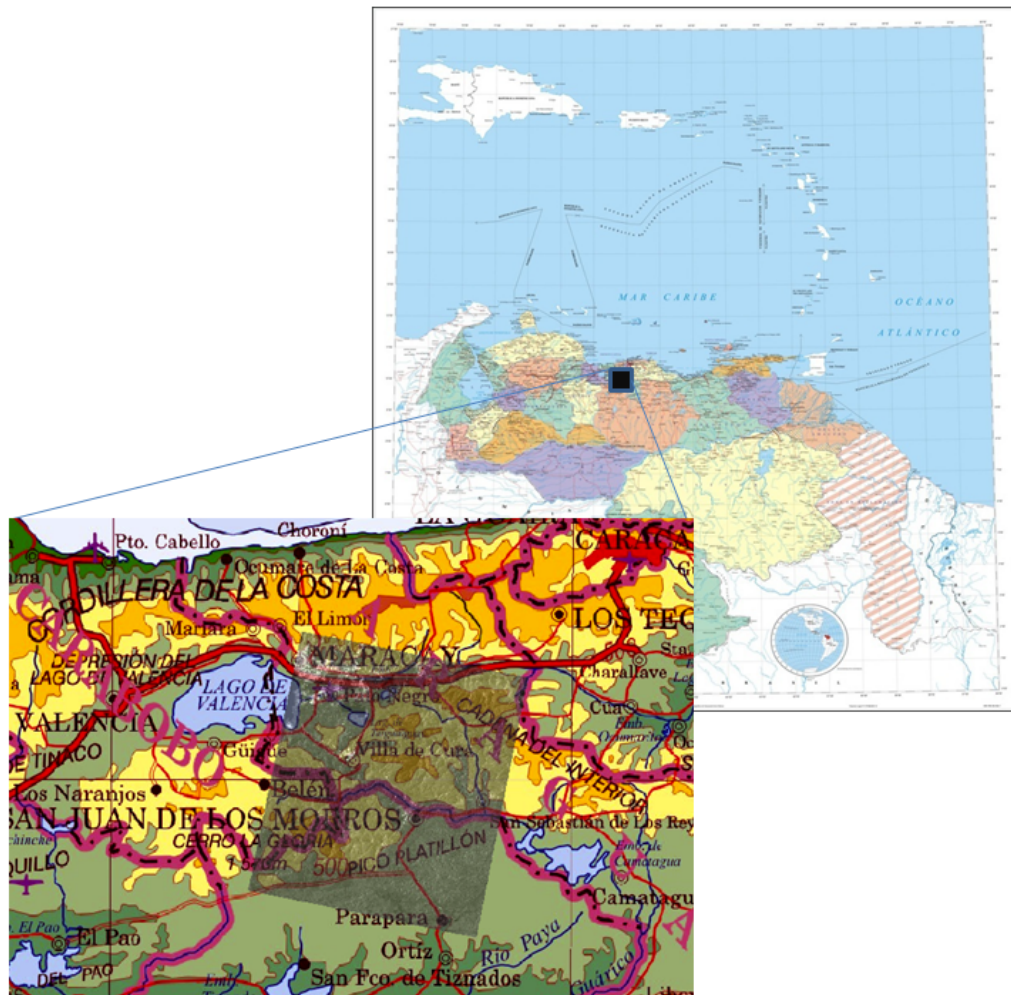


Figura 3.1. Ubicación relativa del área de la imagen SAR

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la ubicación nacional del mapa político y la ubicación relativa local del mapa físico de Venezuela del IGVS, donde se muestra la imagen SAR orientada. 2010.

En la Figura 3.2 se pueden apreciar las diferentes áreas donde se tiene un DEM, la zona plana de la cuenca del Lago de Valencia que corresponde a una sección de los valles de Aragua (al norte de la imagen). De la misma forma, existe otro con pendientes onduladas correspondiente a parte de la cuenca del Río Tucutunemo (área anaranjada en el centro de la imagen). Finalmente en la zona montañosa se tiene un DEM de la cuenca del río San Juan (área anaranjada al sur de imagen), y parte de la cuenca del Río Caramacate (área anaranjada al este de imagen).

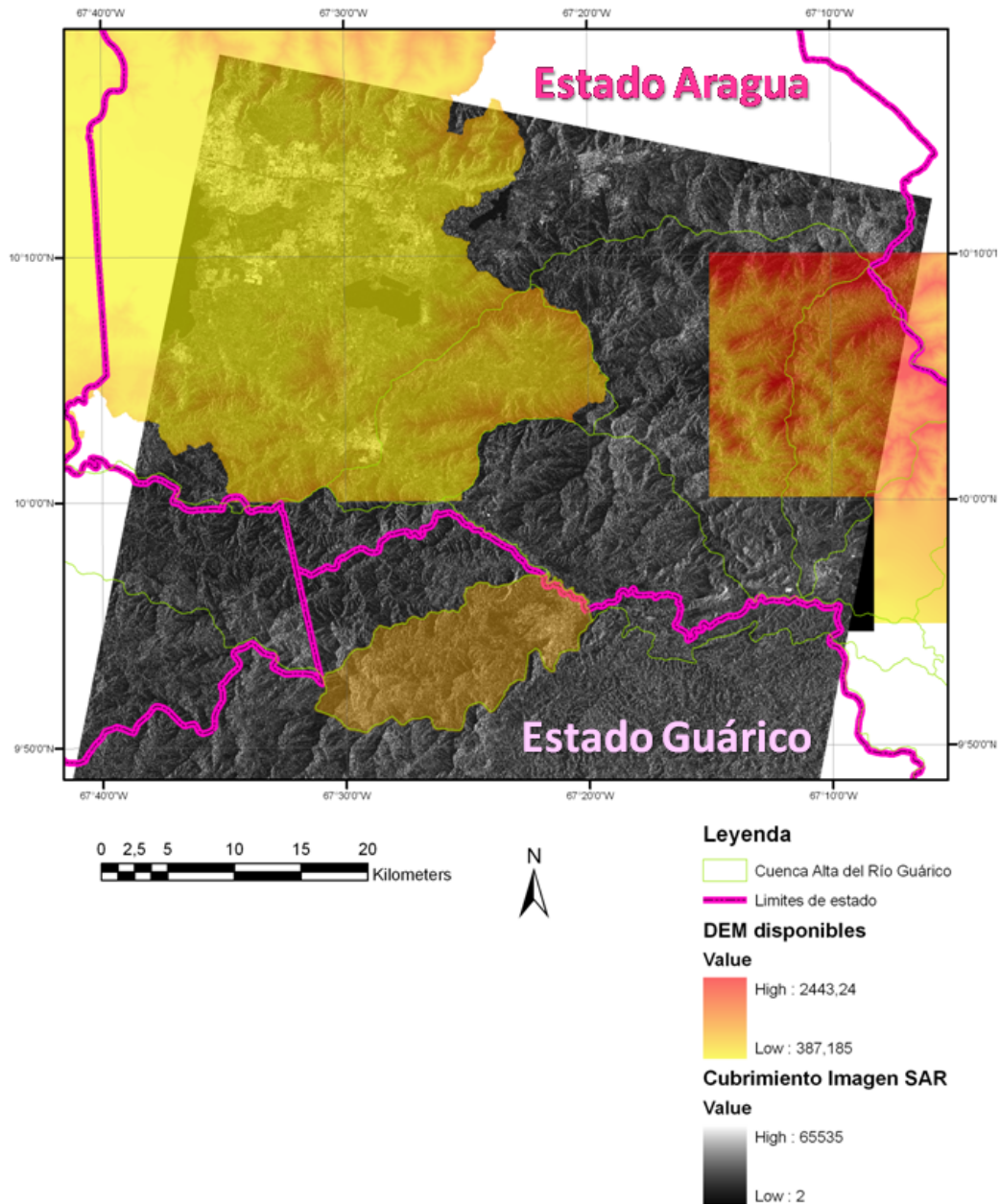


Figura 3.2. Ubicación del área de estudio que dispone de DEM

Fuente: Elaboración propia sobre la base de los límites de estados levantados en la FIIDT-CPDI 2010

IV. METODOLÓGIA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología consistió en re-proyectar la imagen SAR original usando puntos de control terrestres (GCP) obtenidos de mediciones Diferenciales del Sistema Global de Navegación por Satélite (DGNSS) y el Modelo Digital de Elevación (DEM). La orto-rectificación de la imagen RADARSAT-2 se realizó empleando el programa computacional *ERDAS Imagine* (Ver Anexo).

4.1 Diseño de la investigación

La investigación se planteó a partir de la concreción de tres fases fundamentales: *exploración, ejecución y resultados* (Figura 4.1).

La fase de exploración se planteó de tipo *documental*, ya que se fundamentó en la búsqueda, análisis e interpretación de datos secundarios, significando esto que han sido pertinentes todos aquellos documentos, estudios, entre otros, relacionados con los parámetros geométricos de adquisición del sensor SAR.

En referencia al diseño de la investigación de acuerdo al origen de los datos, éste se ha basado en el esquema de diseño bibliográfico presentado por Sabino (1992, p 89), quien los define como sigue: “*Cuando los datos a emplear han sido ya recolectados en otras investigaciones y son conocidos mediante informes correspondientes nos referimos a datos secundarios, por que han sido obtenidos por otros y nos llegan elaborados y procesados de acuerdo con los fines de quienes inicialmente los obtuvieron y manipularon. Como estas informaciones proceden de documentos escritos, pues esa es la forma uniforme en que se emiten los informes científicos, damos a estos diseños el nombre de bibliográficos.*” A lo que posteriormente aclara: “*...todo trabajo bibliográfico no deja por eso de referirse a la experiencia empírica tanto como los diseños de campo, porque los datos que nosotros tomamos como secundarios han sido datos primarios para el investigador inicial...*”.

La investigación posee características del nivel de investigación *descriptiva* (según clasificación de Sabino, 1992), pues en ella se correlacionaron variables independientes para obtener un producto utilizando una metodología que basada en técnicas probadas y aplicadas en otros países, se adaptará a las condiciones y posibilidades reales de un caso particular de aplicación en Venezuela. Adicionalmente, la investigación requirió de la realización de un

levantamiento Diferencial GNSS que se usó como insumo para el procesamiento de la imagen SAR y también como partida para la verificación del producto final. Por lo tanto, es una *investigación de campo* sin excluir su carácter descriptivo, ya que se fundamenta en la recolección de datos en el área de estudio que cubre la imagen SAR y permite establecer su precisión.

Para la ejecución de esta investigación se recopiló información de diferentes instituciones, como la cartografía básica a escala 1:25.000 al IGVS, como ente rector en materia de cartografía en Venezuela; la imagen SAR de satélite a PDVSA-Exploración, que lleva a cabo el proyecto que ejecuta la FIIDT titulado “ANÁLISIS DE IMÁGENES MULTI E HIPERESPECTRALES CON FINES DE PROSPECCIÓN PETROLERA AL NORTE DEL RÍO ORINOCO, VENEZUELA: DETECCIÓN DE ANOMALIAS ESPECTRALES Y TÉRMICAS” que luego será usada para efectuar la interpretación geológica y estructural, con su respectiva utilización de filtros para el realce de estructuras y la aplicación de metodologías propias de los sensores activos. Se utilizaron puntos GNSS Diferencial levantados previamente por la FIIDT para orto-rectificar imágenes de sensores ópticos como IKONOS y ASTER. De la misma forma, en para el desarrollo efectivo de la investigación se emplearon los Modelos Digitales de Elevación desarrollados por la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela (FA-UCV).

En la fase de ejecución, se incluyó el proceso de orto-rectificación la Imagen SAR. Este, está definido por un algoritmo que determina las distorsiones introducidas por el sensor y por la superficie del terreno y reprocesa la imagen calculando las nuevas posiciones para cada píxel. Para determinar las distorsiones introducidas por el sensor es necesario conocer el modelo geométrico de éste y los parámetros orbitales de la plataforma que se ajustaron con exactitud con la inclusión de los puntos de control terrestre, y para determinar el desplazamiento por relieve en toda la imagen fue necesario el uso del DEM.

Ya en la última fase de la investigación, Resultados de la orto-rectificación se evaluó con puntos de verificación para determinar la precisión cartográfica del producto generado bajo diferentes condiciones de relieve (plano, ondulado y montañoso). Los puntos de control y de verificación se levantaron empleando las técnicas DGNSS y adicionalmente para los puntos de verificación se emplearon las orto-fotos disponibles de la zona de estudio. La técnica DGNSS, está basada en la transmisión de información desde una constelación de satélites hasta los receptores GNSS que están sobre la superficie terrestre. El uso de dos receptores

grabando simultáneamente y captando la señal de casi todos los satélites es una manera efectiva de disminuir el error y aumentar la precisión del posicionamiento plani-altimétrico.

4.2 Esquema Metodológico

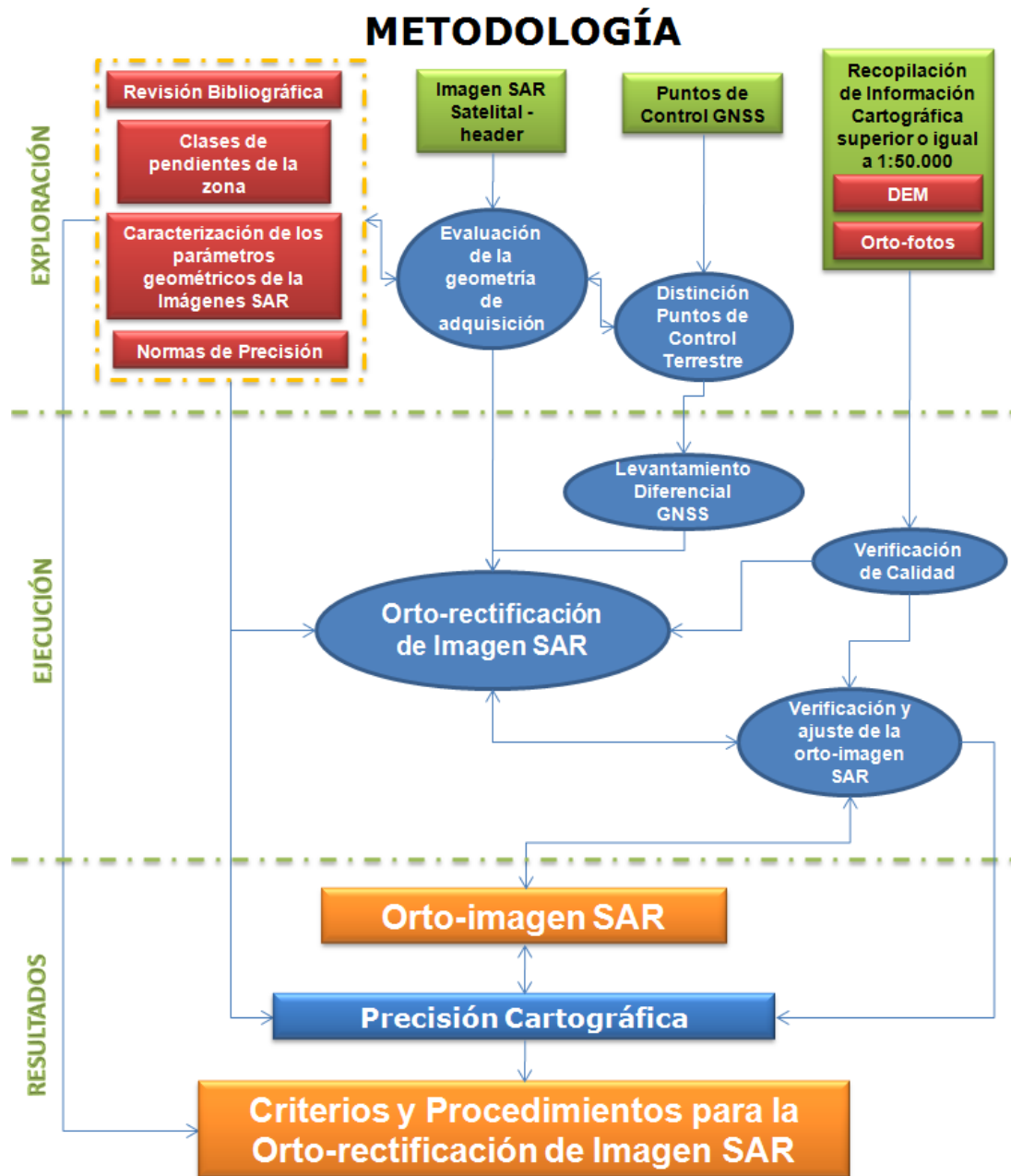


Figura 4.1. Esquema metodológico de la investigación
Fuente: Elaboración propia 2013

4.3 Insumos para la investigación

4.3.1 Imagen Radarsat-2

La Imagen SAR (figura 4.2) fue adquirida en órbita descendente, el 11 de marzo de 2010, el inicio de la toma de la imagen fue a los 37.012,844963073730 segundos del día (10:16:52,84 GMT) y la culminación de la misma fue a los 37.022,282011985779 (10:17:02,28 GMT), con una duración total de adquisición de 9,4370489120483398 segundos. Ésta comprende de 8.787 columnas por 10.087 filas. Con resolución espacial en la dirección del alcance de 6,25 m y en azimut de 6,25 m y resolución radiométrica de 16 bits por cada banda. En la constitución de la imagen, esta ha sido proyectada sobre el plano del alcance terrestre.

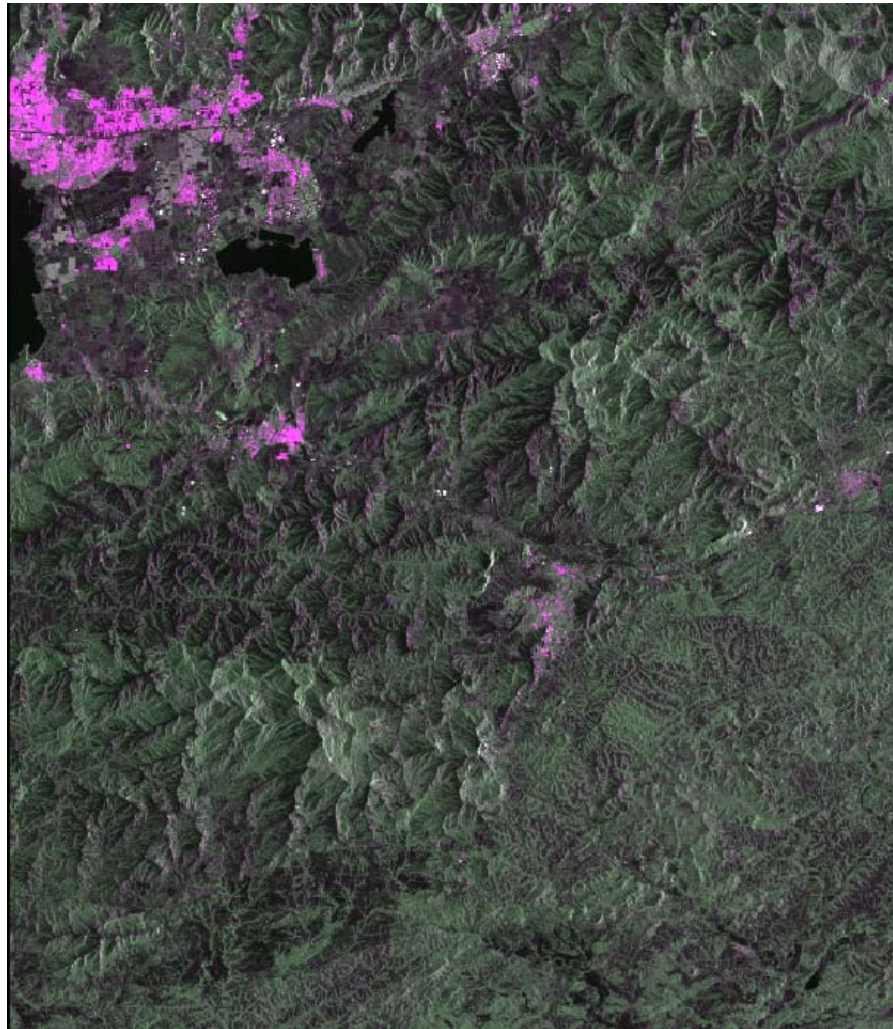


Figura 4.2: Imagen Radarsat-2.

Fuente: Elaboración propia. 2012. Combinación de bandas (R,G,B)



El ángulo de incidencia local es de 38,4011288 con dirección de emisión del pulso desde el este hacia el oeste. La dirección de la toma fue a 90° de la dirección de azimut. Longitud de onda es de 5,546577 cm para más detalles de la imagen requeridos para la orto-rectificación ver figura 4.3. la polarización fue para la banda 1 en HH y para la banda 2 en HV. Estos elementos geométricos permitirán distinguir las diferentes estructuras naturales y antrópicas sobre el área adquirida.

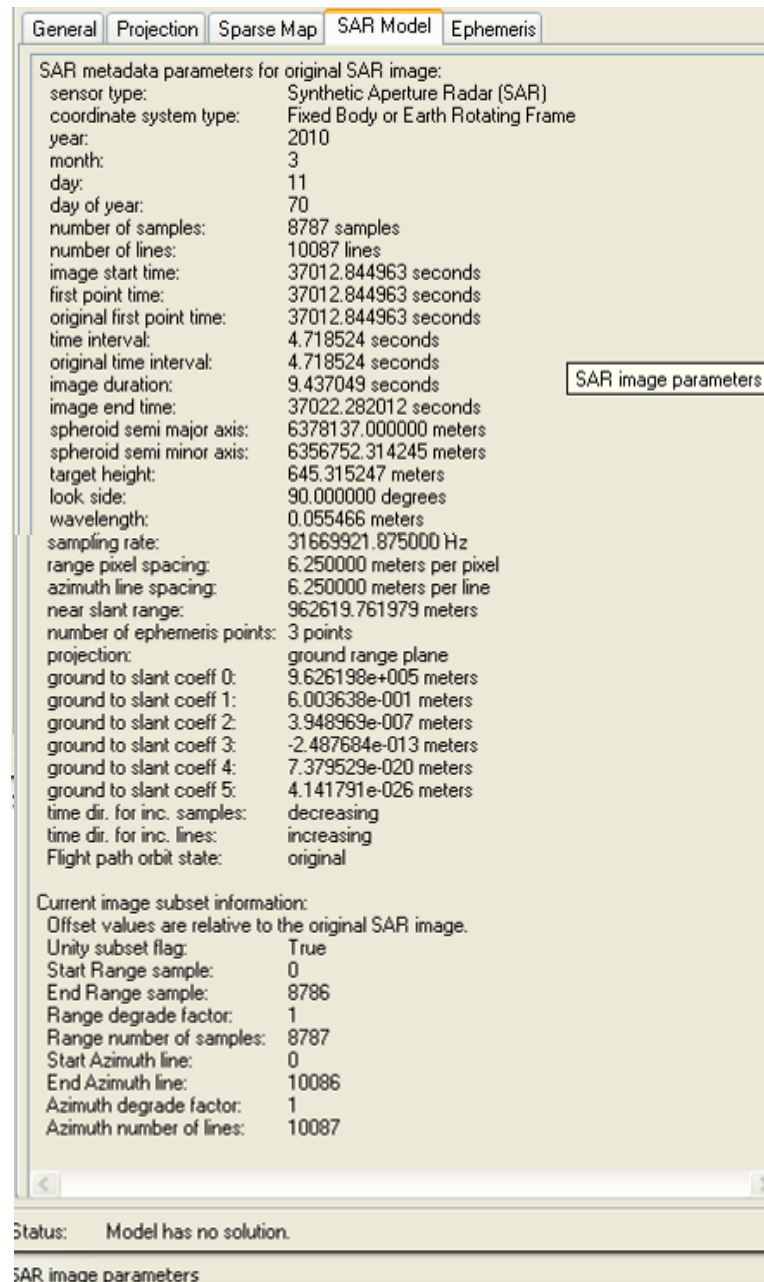


Figura 4.3: Parámetros de la Imagen Radarsat-2.
Fuente: Elaboración propia 2012

geométricos ubicados sobre la superficie terrestre y su identificación en la imagen, estableciendo así los puntos de control terrestre. Este análisis consistió en considerar la longitud de onda, el ángulo de incidencia, la polarización, la dirección del alcance y de la trayectoria de la plataforma, todo este conjunto geométrico, permitió estudiar cualitativamente la rugosidad y la constante dieléctrica de los elementos sobre la superficie que se representan en la imagen de radar. Siendo los objetos sobre la superficie terrestres aquellos del tipo reflector de esquina, los que se identificaron mejor sobre la imagen de Radar y los que poseían una alta constante dieléctrica que fue influenciado por superficies metálicas, como por ejemplo, los techos de Zinc. Cada uno de estos parámetros tiende a crear variaciones en el contraste de la imagen, lo cual, permitió diferenciar los elementos que conforman estructuras naturales y las desarrolladas por el hombre.

3.- Se escogieron los GCP y GVP de tal manera que puedan ser fácilmente accesibles y reconocidos y ubicados en la imagen con una precisión del orden de un (1) píxel (6,25m).

4.- El área que cubre la Imagen es de aproximadamente 3.450 Km², lo que comprende zonas urbanas importantes y áreas rurales que se extienden sobre una topografía muy diversa en la zona central del país, lo cual influye por una parte en la distribución ideal de los puntos y por otra, en los tiempos de accesibilidad a las zonas de levantamientos.

4.3.3 Puntos DGNSS Levantados

4.3.3.1 Levantamiento DGNSS

Para el levantamiento diferencial de los puntos se utilizaron los equipos receptores GMS-2 y las antenas externas PG-A5 marca Topcon y los mismos fueron procesados con el software Topcon Tools v. 6.11.01.

La planificación previa a la salida de campo para la captura con la técnica GNSS Diferencial, de dieciseis Puntos de Control Terrestres (GCP) y nueve Puntos de Verificación Terrestre (GVP), comenzó con la identificación de estos con precisión de un píxel en la imagen SAR para garantizar la generación de la orto-imagen que cubre el área de estudio a la escala 1:50.000.

Adicional a esto, se estudió la accesibilidad de los puntos que se iban a levantar, ya que se establecieron los tiempos para acceder al levantamiento y finalmente se consideraron las

distancias de las líneas base que definieron los tiempos de observación en la medición de cada uno de los puntos. Este proceso de adquisición de datos en el terreno tuvo la prevención de que se aplicaron métodos de medida precisos y se realizaron las observaciones con la máxima garantía y fiabilidad. El post-procesamiento de los datos fue presentado en el datum geocéntrico SIRGAS-REGVEN.

Previo al levantamiento de estos puntos se midieron las coordenadas de las estaciones base, estas fueron escogidas privilegiando el resguardo de los instrumentos de trabajo. Las estaciones base (cuadro 4.1 y figura 4.5) fueron establecidas en el caserío de Villa Virginia ubicado entre las poblaciones de Villa de Cura y San Juan de Los Morros que se denominó BaseVV y la otra base, en la población de La Victoria que se denominó BaseLV.

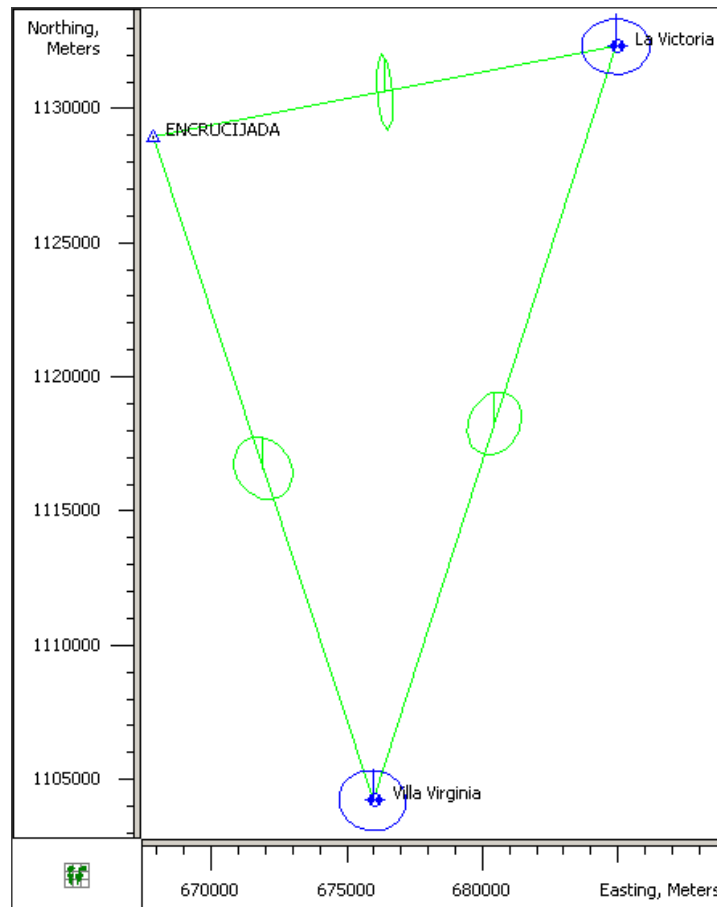


Figura 4.5: Red ajustadas de los puntos BaseLV y BaseVV desde el vértice geodésico ENCUCIJADA

Fuente: Elaboración propia Trabajo de campo GNSS 2010.

Para ambas bases se trasladaron las coordenadas usando la técnica de posicionamiento diferencial midiéndose al mismo tiempo desde las coordenadas conocidas del vértice

geodésico del IGVS “LA ENCRUCIJADA” (ARA 2) del monumento REGVEN - Orden C. Las cuales, tienen líneas bases de 26,03 Km y 17,37 Km, con errores de medición en planimetría 3,2cm y 4,5cm, y en altimetría de 5,3cm y de 6,2cm respectivamente.

Cuadro 4.1. Coordenadas de las Estaciones Bases y sus Errores en la medición

Id	Norte	Este	Elevación (m)	Control	Std Dev n (m)	Std Dev e (m)	Std Dev Hz (m)	Std Dev u (m)
ENCRUCIJADA	1128959,44	667876,902	508,683	Vértice	0	0	0	0
BaseVV	1104212,83	675951,264	488,777	Punto	0,021	0,024	0,032	0,053
BaseLV	1132314,98	684916,555	603,264	Punto	0,028	0,034	0,045	0,062

Fuente: Elaboración propia sobre la base de los datos del vértice Geodésico REGVEN “LA ENCRUCIJADA” y las mediciones de dos puntos en el trabajo de campo, 2010.

Cuadro 4.2. Coordenadas de los GCP y GVP y sus Errores en la medición

Id	Norte (m)	Este (m)	Elevación (m)	Std Dev n (m)	Std Dev e (m)	Std Dev Hz (m)	Std Dev u (m)
1001a	1078880,49	642786,737	289,603	0,055	0,224	0,23	0,131
1002H	1069582,24	685444,988	184,146	0,206	0,473	0,516	0,434
1003b-2	1082071,63	671574,462	338,347	0,185	0,715	0,738	0,379
1005B	1102180,10	649121,020	676,434	0,008	0,008	0,011	0,024
1007a	1096269,86	680465,332	411,238	0,003	0,002	0,003	0,007
1009A	1116623,17	651715,587	418,036	0,004	0,008	0,009	0,018
1011B	1115960,35	685907,403	801,033	0,125	0,36	0,381	0,182
9005a	1103665,95	673472,871	497,24	0,001	0,001	0,001	0,003
9010A	1114520,69	674863,364	586,819	0,011	0,015	0,019	0,044
1003A	1082952,80	663689,039	352,219	0,181	0,492	0,524	0,342
9202A	1089058,00	676015,752	351,791	0,006	0,006	0,009	0,015
1217B-2	1135520,45	655460,097	448,231	0,191	0,38	0,425	0,339
1204C	1080336,74	683271,694	246,393	0,113	0,317	0,336	0,234
1207C2	1097369,38	681252,743	401,299	0,003	0,003	0,004	0,007
1208B	1099157,67	698162,015	340,448	0,142	0,355	0,383	0,239
1210A	1109969,16	665856,546	500,957	0,014	0,011	0,018	0,04
1214A	1119186,06	670245,084	440,811	0,02	0,013	0,024	0,033
1223	1125015,24	654972,457	399,781	0,331	0,527	0,623	0,504
9008A	1126142,47	663181,33	426,486	0,148	0,356	0,385	0,274
1219A	1131847,09	688229,233	539,946	0,099	0,204	0,227	0,179
1215F	1127469,76	677824,963	509,173	0,014	0,012	0,018	0,048
1218A	1133291,18	667720,455	465,426	0,084	0,200	0,217	0,148

Fuente: Elaboración propia, Trabajo de campo 2010 y Post-procesamiento de los datos

Luego que se establecieron las estaciones Bases se procedió al levantamiento de los puntos que serían usados como GCP y GVP para el proceso de orto-rectificación de la Imagen SAR, el uso de cualquiera de estos puntos medidos diferencialmente como estación base dependería de la distribución espacial para el acceso a cada una de estas dos zonas. En la figura 4.6 se

podrá ver la conformación de las líneas base para la medición diferencial de cada uno estos puntos y el resultado de este levantamiento en el cuadro 4.2. Con línea base no superior a 42 Km representada gráficamente por el punto 1001a. El error máximo de medición en planimetría es de 0,738 m representado por el punto 1003b-2, y en altimetría es de 0,504 m representado por el punto 1223.

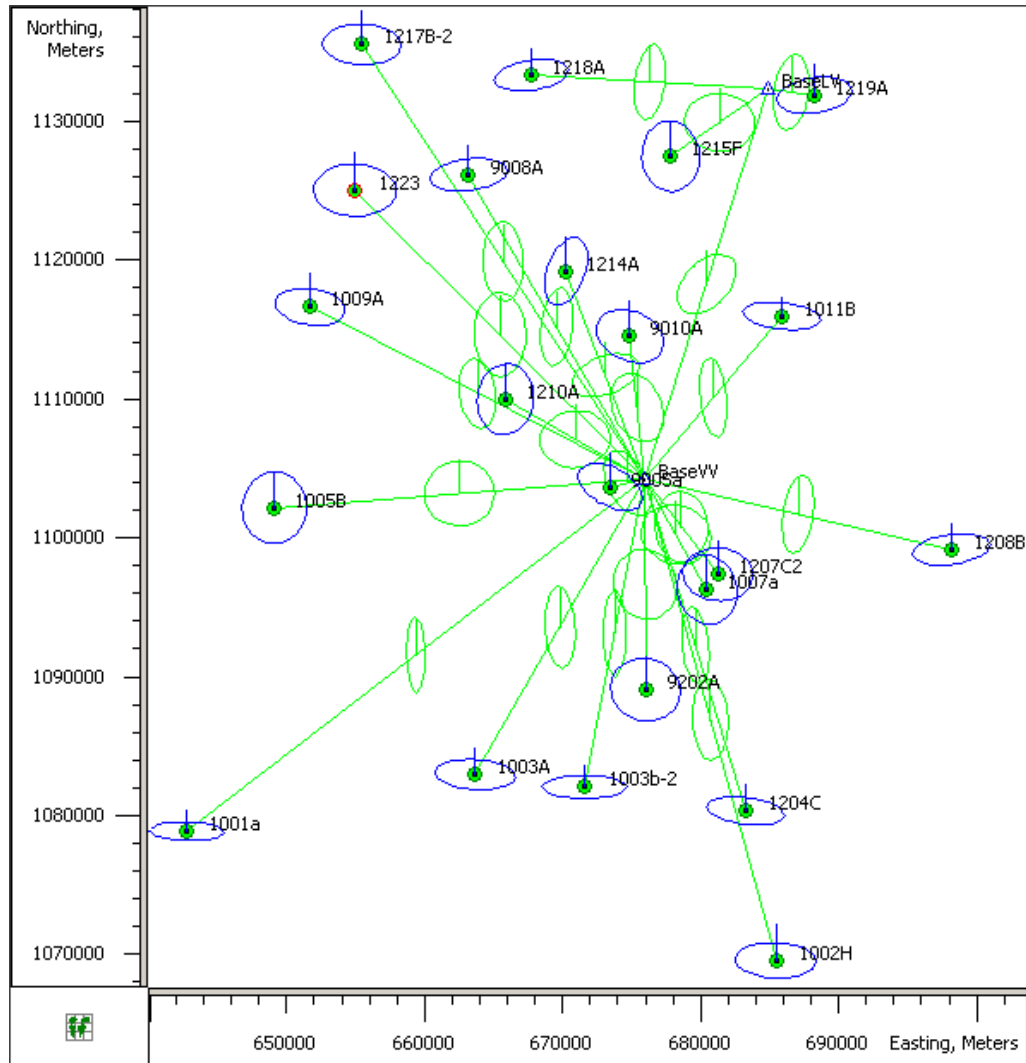


Figura 4.6: Puntos GCP y GVP desde los puntos bases BaseLV y BaseVV
Fuente: Elaboración propia 2010.

La planificación para el levantamiento diferencial inicial consistió en usar como estación Base cualquiera de las que fueron medidas para este ejercicio, pero se presentaron inconvenientes con la estación base que dejaba de medir debido a que la memoria de los equipos estuvo comprometida. Para solucionar estos inconvenientes se buscó de la Red Estaciones de Monitoreo Satelital GPS (REMOS) que dispone el IGVSB en Caracas

(<http://www.igvsb.gov.ve/remos>) y también se trabajó con la estación base privada de Servi Teodolitos, C.A. (ST) también en Caracas (figura 4.7 y cuadro 4.3). Presentándose otro inconveniente relacionado a la gran distancia desde los puntos GCP y GVP a las bases, que comprende desde los 46 km a los 83 km aproximadamente y los tiempos de captura de los receptores GNSS tampoco fueron suficientes, comprendidos entre 20 min. a 26 min., afectando el nivel de certeza en el levantamiento, donde se obtuvo soluciones flotante. Al observar el cuadro resultante de post-procesamiento de los datos se precisa que la exactitud de estos puntos está por debajo de un metro. El error máximo de medición en planimetría es de 0,617 m, y en altimetría es de 0,397 m representado por el punto 9206-A.

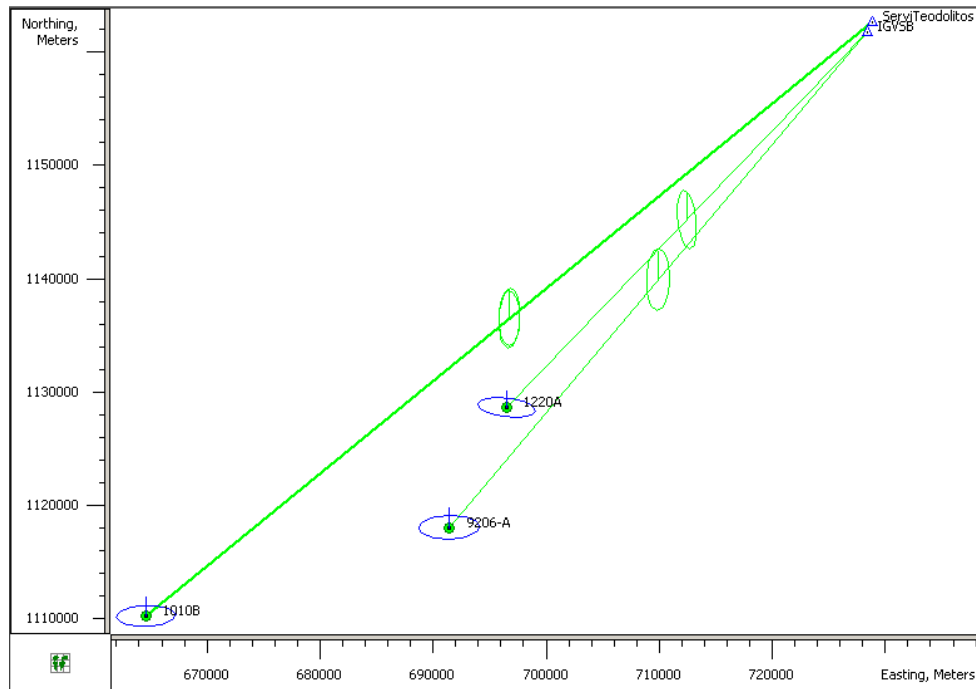


Figura 4.7: Puntos GCP y GVP desde los puntos bases IGVSB y ServiTeodolitos
Fuente: Elaboración propia 2010.

Cuadro 4.3. Coordenadas de los GCP y GVP y sus Errores en la medición

Name	Norte (m)	Este (m)	Elevación (m)	Std Dev n (m)	Std Dev e (m)	Std Dev Hz (m)	Std Dev u (m)
1010B	1110269,95	664620,617	503,696	0,17	0,489	0,518	0,327
1220A	1128652,02	696514,086	656,446	0,142	0,435	0,458	0,265
9206-A	1118077,46	691420,567	527,821	0,218	0,577	0,617	0,397
IGVSB	1161732,94	728356,613	912,999	0	0	0	0
ST	1162698,53	728867,401	937,231	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia 2010 y Post-procesamiento de los datos usando como base la estación REMOS Caracas y Serviteodolitos.

En su totalidad, en la salida de campo de este proyecto de investigación fueron levantados 25 puntos de los cuales se identificaron 21. Esto se debió a que durante el levantamiento GNSS en campo se tuvo que replantear los puntos durante esta fase porque el acceso a las zonas de medición no se logró. Asimismo, no se cumplía con los parámetros geométricos identificados en campo que se observaba con detalle en la imagen de SAR y a las condiciones locales para medición con GNSS (interferencia de la señal por cableado, arboles, infraestructura, entre otros) afectando directamente el PDOP. A pesar de todo lo que se consideró en la planificación de la salida de campo y al apoyo de imagen SPOT 5, estos replanteos de los puntos en campo conllevan a afectar la distribución ideal de los puntos de control y desde luego a afectar la identificación en la imagen SAR, resultando en tener menos puntos de control levantados.

En la figura 4.4 se puede observar la distribución de los puntos identificados y levantados con la técnica de medición GNSS Diferencial (DGNSS) para el área que cubre esta escena, donde se detalla los puntos GCP en color amarillo y el par de puntos GVP levantados en color azul. Este problema se solventó con salidas previas de otros proyectos DGNSS de la FIIDT en el área de estudio.

En la fase de post-procesamiento de los datos GNSS se obtuvo una precisión planimétrica inferior a 0,738 m y altimétrica de 0,504 m. Concluyendo que según el NMAS el error de los puntos de control levantados deben ser inferiores a 0,254 mm medidos en el mapa, la cual corresponde en la realidad a la escala 1:50.000 con 12,7 m.

El IGN de España especifica que para un el parámetro de calidad cartográfica inferior a 0,25 mm, los puntos de control debe tener una precisión menor a 0,083 mm que corresponde con la realidad para la escala 1:50.000 a 4,16 m, y por esta razón el error de procesamiento es para todos los puntos, inferior a 4,16 m. Esto garantizará la generación de la orto-imagen con la precisión cartográfica requerida.

Inclusive si aplicamos la relación de escala que corresponde a dividir el Valor grafico (parámetro de calidad) entre el Valor real (máximo error del levantamiento DGNSS) se observa que estos puntos podrían ser usados para generar productos con escala iguales o menores 1:8.892 y extrapolándola a una escala de uso práctico sería para escala igual o menores a la 1:10.000.

4.3.3.2 Cálculo de la altura Cuasi-Ortométrica

Las alturas elipsoidales (h) obtenidas con medición GNSS fueron transformadas a alturas cuasi-ortométricas (H) usando el Modelo Geoidal Combinado de Venezuela 2.004 (MGCV04), con una precisión de 0,31 m, la cual fue usada para la orto-rectificación de la imagen. Este modelo fue desarrollado por la Universidad del Zulia.

4.3.3.3 Puntos DGNS de campos anteriores

Para nutrir el proceso de orto-rectificación de la Imagen SAR se procedió a buscar los puntos ya levantados en campos diferente de este proyecto que se puedan identificar en la imagen. Como se puede observar en la figura 4.4 se logró identificar un punto adicional de color anaranjado que cumplió función como punto de control terrestre, además se puede observar cinco puntos de verificación que sirvieron de apoyo en la evaluación de la orto-rectificación de la imagen SAR, siendo el error máximo horizontal fue de 1,074 m (cuadro 4.4). El punto usado como GCP solo fue *Turmero* por identificarse mejor en la imagen con error planimétrico de 0,591 m. El error máximo altimétrico de medición para estos puntos esta en el orden de 1,707 m. Y según norma cartográfica también tienen Errores mucho menor a 4,16 m siendo esta una de la más estricta de los parámetros de calidad internacionales (cuadro 4.4).

Cuadro 4.4. Coordenadas y sus Errores en la medición de puntos levantados en campos anteriores

Name	Norte (m)	Este (m)	Elevación - h (m)	H _{MGCV04}	Std Dev Hz (m)	Std Dev u (m)
202_LA ⁹	1.129.500,691	655.970,295	404,419	421,35	1,012	1,707
401_LA	1.129.334,924	660.412,673	422,766	439,68	0,418	0,772
404_LA	1.129.851,270	663.814,671	439,090	455,99	0,381	1,651
Turmero ¹⁰	1.135.257,394	664.806,554	499,51	516,77	0,591	0,542
1_15aster	1.116.245,836	657.059,876	417,517	433,79	1,074	0,780
218-aster	1.080.068,370	655.176,985	275,117	290,44	0,468	0,526

Fuente: Elaboración propia 2011.

⁹ Guevara, et al., 2002. El IGVS B Certificó el levantamiento de Puntos de Control usando GPS, en el Municipio Francisco Linares Alcántara del Estado Aragua.

¹⁰ FIIDT – CPDI, 2009. Taller de Procesamiento Digital de Imágenes ASTER para la Generación de DEM y ortoimágenes. Proyecto: “Análisis de imágenes multi e hiperespectrales con fines de prospección petrolera al norte del río Orinoco, Venezuela: detección de anomalías espectrales y térmicas”

4.3.4 Puntos de validación adicionales

Para el proceso de validación cartográfica de la orto-imagen SAR o de certificación del modelo de orto-rectificación, se usaron productos cartográficos existentes del IGVSb a escala 1:25.000 de la zona de estudio correspondiente a los proyectos aero-fotogramétricos de Cartocentro y Pitsa, teniendo como datum origen el topocéntrico de La Canoa y las cuales fueron re-proyectadas al datum REGVEN. Para efectuar este control se elige en la imagen SAR orto-rectificada un conjunto de 20 a 25 puntos de verificación (GVP) bien definidos e identificado por cada área de cubrimiento del índice de carta 1:50.000, los cuales deben cumplir las características del punto 2 del capítulo 4.3.2, además deben estar bien distribuidos por toda la hoja y presentarse ambos en el mismo sistema de proyección y datum de referencia (Sevilla, 1991).

4.3.5 Modelo Digital de Elevación

4.3.5.1 DEM del SRTM

El DEM Global de la Misión Topográfica de Radar del Transbordador Espacial (SRTM) fue generado por la NASA para obtener la topografía de gran parte de la superficie terrestre. Para toda Venezuela, se dispone de un DEM con una resolución espacial de 3 arco-segundos.

Márquez, *et al.* 2010, determinaron la calidad altimétrica de diversos DEM Globales disponibles comparados con diversas fuentes de datos altimétricos de referencia (estaciones de redes geodésicas, pozos petroleros medidos con GNSS y levantamiento sísmicos), enmarcando su estudio en diferentes zonas petroleras del país. Concluyendo que el SRTM fue el DEM Global más apropiado para las diferentes aplicaciones de la industria petrolera, donde este reportó residuales de $\pm 4,3\text{m}$, el ACE2 dio residuales con un RMS de $\pm 5,5\text{m}$ y el modelo ASTER GDEM reportó residual altimétrico de $\pm 9,8\text{m}$.

4.3.5.2 DEM de las cartas topográficas

Estos DEM fueron tomados de trabajos previos realizados en FAGRO-UCV, y otros DEM's adquiridos del IGVSb para proyectos de la misma facultad y de la FIIDT.

Jácome, *et al.* (2001), generaron el DEM de la cuenca alta del río Guárico en el proyecto del SIACARG, este lo construyeron a partir de las curvas de nivel e hidrografía vectorizadas de

las cartas 1:25.000 y elaboraron una Red de Triangulación Irregular (TIN) y posteriormente fue convertido en un formato Grid (rasterizado) con un pixel de 30 m de resolución espacial. El datum original de esta información está representada en el datum topocéntrico La Canoa asociado al elipsoide Internacional de Hayford (PSAD56), en proyección UTM Huso19.

Castillo (2007), generó el DEM para la cuenca del Lago de Valencia para el proyecto SISDELAV. Este lo generó vectorizando las curvas de nivel, puntos de cotas, hidrografía y cuerpos de agua desde los ortofotomapas del proyecto Pitsa y Cartocentro del IGVSb a escala 1:25.000 y desde el comando Topogrid de Arcinfo construyó el DEM con 10 metros de resolución espacial. El datum original de esta información esta presentada en el datum topocéntrico La Canoa, asociado al elipsoide Internacional de Hayford (PSAD56), en proyección UTM Huso19.

Adicionalmente se tienen los DEM's del IGVSb correspondiente a las coberturas de las campañas aero-fotogramétricas ejecutadas en la décadas de los '90, donde una de ellas pertenece al proyecto PITSA identificada con el índice de carta 6646-I-SE y el resto al proyecto Cartocentro identificada con los índices de cartas 6746-2-NO, 6746-2-NE, 6746-2-SE y 6746-2-SO. Y todas presentadas por el IGVSb en el datum geocéntrico venezolano (REGVEN) asociado al elipsoide GRS-80 con proyección UTM Huso 19.

4.3.5.3 Validación de los DEM's

Los DEM's se verificaron con los datos GNSS Diferenciales capturados para este trabajo de investigación y adicionalmente se consideraron otros puntos de diferentes proyectos que la FIIDT desarrolló en la zona de estudio y cinco vértices geodésicos del IGVSb. Se tomaron las alturas cuasi-ortométricas MGCV04 y se contrastaron con las alturas de los diferentes DEM's (tabla 4.5). Observándose para el DEM del SISDELAV una desviación estándar de 7,20 m y una media de 1,03 m (tabla 4.6), además sí se observa la tabla 4.5 con el punto LA ENCRUCIJADA se detalla una diferencia muy grande de la altura de este vértice geodésico y es debido a que el mismo se encuentra sobre una montaña que esta terraceda y que el área que representa el DEM en esa zona constituye el promedio de altura de un área interpolada para el tamaño del pixel (10m x 10m), y finalmente al eliminarlo del análisis estadístico la desviación estándar para este DEM queda en 5,44 m y una media de 0,71 m (tabla 4.7). Ahora para el DEM del SIACARG da una desviación estándar de 4,60 m y mediana de 2,71 m

(tablas 4.5 y 4.6). Finalmente el DEM Global del SRTM presenta una desviación estándar de las diferencias de 3,23 m y una media de -4,39 m (tabla 4.5 y 4.7).

Tabla 4.5: Diferencias de alturas de los DEM's con las medidas DGNSS cuasi-ortométrica. Todas las unidades expresadas en metros

NOMBRE	Mediciones DGPS - MGCV04			SRTM v.2		SISDELAV		SIACARG		6646-1-SE	
	ESTE	NORTE	H	H	Dif	H	Dif	H	Dif	H	Dif
221c	640523,29	1116110,44	438,68	445	-6,32	442,23	-3,55	-	-	-	-
320a-65	677950,78	1116820,57	618,43	623	-4,57	616,29	2,14	-	-	-	-
332c-65	668399,00	1133993,59	494,64	496	-1,36	492,01	2,63	-	-	-	-
102c	633952,84	1134434,61	426,06	432	-5,94	422,90	3,16	-	-	-	-
turmero-last65	664806,55	1135257,39	516,77	519	-2,23	508,27	8,50	-	-	-	-
201	631540,34	1137379,47	465,63	468	-2,37	460,00	5,63	-	-	-	-
216dgps65	675377,34	1075518,97	243,44	248	-4,56	-	-	-	-	-	-
216c	674359,29	1075882,99	249,28	252	-2,72	-	-	-	-	-	-
218a-gps65	655176,99	1080068,37	290,44	295	-4,56	-	-	-	-	-	-
212c2-gps65	675140,85	1096930,02	491,95	499	-7,05	-	-	489,24	2,71	-	-
324a-65	635322,69	1099105,29	589,50	591	-1,50	-	-	-	-	-	-
219d	644893,54	1103926,10	692,68	697	-4,32	-	-	-	-	-	-
gdp4	687046,17	1130439,29	561,75	564	-2,25	-	-	-	-	-	-
gcp1	633180,49	1135177,06	430,23	437	-6,77	429,95	0,28	-	-	-	-
gcp7	623003,11	1116059,96	418,34	419	-0,66	-	-	-	-	-	-
gcp13	619383,61	1095692,41	528,25	531	-2,75	-	-	-	-	-	-
gcp12	679812,64	1099305,57	415,49	432	-16,51	-	-	419,60	-4,11	-	-
gcp25	667950,33	1108198,43	514,11	518	-3,89	523,13	-9,02	-	-	-	-
gcp15	657059,88	1116245,84	433,79	439	-5,21	439,94	-6,15	-	-	-	-
gcp18	674520,87	1083848,43	355,63	359	-3,37	-	-	-	-	-	-
gcp19	646478,46	1103081,21	696,30	691	5,30	-	-	-	-	-	-
101	655785,62	1126954,10	419,65	426	-6,35	419,79	-0,14	-	-	419	0,65
102	655839,52	1127008,96	421,05	425	-3,95	420,40	0,65	-	-	420	1,05
103	655807,80	1128201,12	415,49	421	-5,51	413,98	1,51	-	-	417	-1,51
104	656098,33	1129867,16	426,87	431	-4,13	422,98	3,89	-	-	423	3,87
107	655205,20	1128943,94	414,59	419	-4,41	412,21	2,38	-	-	417	-2,41
201	654354,88	1128620,88	406,00	415	-9,00	410,42	-4,42	-	-	411	-5,00
202	655970,30	1129500,69	421,35	423	-1,65	416,95	4,40	-	-	421	0,35
205	659376,89	1130093,51	435,97	439	-3,03	439,23	-3,26	-	-	436	-0,03
205	659380,25	1130110,09	435,83	439	-3,17	439,22	-3,39	-	-	436	-0,17
206	660939,20	1129754,01	442,39	447	-4,61	442,63	-0,24	-	-	442	0,39
207	658898,65	1129528,64	431,80	438	-6,20	439,39	-7,59	-	-	433	-1,20
208	658025,00	1129842,71	431,37	437	-5,63	427,58	3,79	-	-	431	0,37
301	654809,30	1127950,14	412,96	418	-5,04	415,33	-2,37	-	-	414	-1,04
302	653463,82	1127950,35	410,16	415	-4,84	410,09	0,07	-	-	407	3,16
303	653383,39	1127183,95	408,64	411	-2,36	408,90	-0,26	-	-	408	0,64
304	655137,87	1127584,51	415,52	422	-6,48	414,67	0,85	-	-	417	-1,48
305	655312,34	1128691,66	415,84	418	-2,16	411,36	4,48	-	-	416	-0,16
306	658682,65	1128464,95	432,72	438	-5,28	431,64	1,08	-	-	432	0,72
307	659919,41	1128609,62	435,41	442	-6,59	438,75	-3,34	-	-	438	-2,59

309	657928,73	1127388,27	426,35	433	-6,65	428,56	-2,21	-	-	426	0,35
310	656739,11	1128214,35	423,03	427	-3,97	421,48	1,55	-	-	423	0,03
401	660412,67	1129334,92	439,68	445	-5,32	440,38	-0,70	-	-	440	-0,32
402	661518,12	1129467,27	444,06	447	-2,94	442,30	1,76	-	-	443	1,06
403	662814,70	1129618,63	450,37	455	-4,63	472,40	-22,03	-	-	451	-0,63
404	663814,67	1129851,27	455,99	460	-4,01	453,14	2,85	-	-	455	0,99
405	664869,43	1127981,29	451,77	454	-2,23	451,15	0,62	-	-	-	-
406	663550,37	1126624,61	445,18	448	-2,82	444,16	1,02	-	-	447	-1,82
407	661264,96	1126752,25	438,64	443	-4,36	441,01	-2,37	-	-	439	-0,36
1223	654972,46	1125015,24	416,48	422	-5,52	417,16	-0,68	-	-	413	3,48
1001a	642786,74	1078880,49	304,89	310	-5,11	-	-	-	-	-	-
1002H	685444,99	1069582,24	199,71	205	-5,29	-	-	-	-	-	-
1003A	663689,04	1082952,80	367,57	373	-5,43	-	-	-	-	-	-
1003b2	671574,46	1082071,63	353,84	355	-1,16	-	-	-	-	-	-
1005B	649121,02	1102180,10	691,86	697	-5,14	-	-	-	-	-	-
1007a	680465,33	1096269,86	427,11	435	-7,89	-	-	419,41	7,70	-	-
1009A	651715,59	1116623,17	434,34	440	-5,66	441,46	-7,12	-	-	-	-
1010B	664620,62	1110269,95	519,63	532	-12,37	515,45	4,18	-	-	-	-
1011B	685907,40	1115960,35	816,93	815	1,93	-	-	-	-	-	-
1204C	683271,69	1080336,74	262,15	266	-3,85	-	-	-	-	-	-
1207C2	681252,74	1097369,38	417,22	423	-5,78	-	-	416,69	0,53	-	-
1208B	698162,02	1099157,67	356,70	363	-6,30	-	-	-	-	-	-
1210A	665856,55	1109969,16	516,87	524	-7,13	510,16	6,71	-	-	-	-
1214A	670245,08	1119186,06	457,09	460	-2,91	447,35	9,74	-	-	-	-
1215F	677824,96	1127469,76	525,68	530	-4,32	-	-	-	-	-	-
1217B2	655460,10	1135520,45	465,42	471	-5,58	463,54	1,88	-	-	-	-
1218A	667720,46	1133291,18	482,52	484	-1,48	487,18	-4,66	-	-	-	-
1219A	688229,23	1131847,09	556,34	556	0,34	-	-	-	-	-	-
1220A	696514,09	1128652,02	672,70	663	9,70	-	-	-	-	-	-
9005a	673472,87	1103665,95	513,00	522	-9,00	-	-	-	-	-	-
9008A	663181,33	1126142,47	443,19	448	-4,81	444,11	-0,92	-	-	445	-1,81
9010A	674863,36	1114520,69	602,80	608	-5,20	604,10	-1,30	-	-	-	-
9202A	676015,75	1089058,00	367,44	371	-3,56	-	-	361,79	5,65	-	-
9206A	691420,57	1118077,46	543,83	545	-1,17	-	-	-	-	-	-
P0	670331,96	1124533,22	454,19	458	-3,81	445,28	8,91	-	-	-	-
p7	670165,32	1124486,64	454,34	458	-3,66	447,67	6,67	-	-	-	-
MARACAY	657054,53	1132507,50	441,38	445	-3,62	440,60	0,78	-	-	444	-2,62
LA ENCRUCIJADA	667876,90	1128959,44	525,48	498	27,48	491,06	34,42	-	-	-	-
PARDILLAL	714914,86	1099601,27	385,72	390	-4,28	-	-	-	-	-	-
LA CABRERA	648313,03	1134502,89	437,48	442	-4,52	425,93	11,55	-	-	-	-
PARADERO	655957,74	1080170,37	294,43	294	0,43	-	-	-	-	-	-

Fuente: Cálculos propios sobre la base de vértices geodésico del IGVSb, puntos DGNSS levantado en campo, con altura cuasi-ortométrica comparadas con alturas de los DEM's. 2012

Los DEM's de los orto-fotos están validados y certificados por el IGVSb por ser el ente rector en materia de cartográfica. Al DEM correspondiente a la carta topográfica del IGVSb 6646-I-SE tiene desviación estándar de 1,27 m y mediana de -0,09 m (tabla 4.5 y 4.6).

Es importante considerar que la totalidad de las muestras de estos puntos se encuentran en áreas con características del relieve que van desde zonas planas a onduladas. Adicionalmente al analizar los resultados estadísticos presentados en las tablas 4.5, 4.6 y 4.7 permite la validación altimétrica del DEM SRTM v.2 para estas condiciones de relieve.

Es necesario traer a colación que el DEM del SRTM tiene como ventaja que presenta el promedio de alturas tomadas directamente para la conformación de cada uno de sus pixeles en un área sobre el terreno de 92 m x 92 m aproximadamente. En cambio, los DEM's de las cartas topográficas generadas a partir de la interpolación como lo son el del SISDELAV y el SIACARG, dado que en una carta 1:25.000 tienen curvas de nivel con distancia altimétrica de cada 20 m, y las distancia planimétricas entre ellas podrían variar dependiendo de las condiciones topográficas particulares de la zona desde los 500 m hasta más de 3.000 m, que son distancias grandes comparadas con los 92 m del SRTM. Esto aunado al análisis estadístico, por poseer una muestra mayor al DEM de SISDELAV se nota que la desviación estándar o error estándar es mayor a la del SRTM (tabla4.7), siendo estos comportamiento de la incertidumbre en una medida de dispersión de la muestra.

Tabla 4.6: Estadísticas de las Diferencias de alturas de los DEM's con las medidas DGNSS cuasi-ortométrica.

	Min	Max	Promedio	Media	Desv Estándar
SRTM v.2	-16,51	27,48	-4,36	-3,77	4,76
SISDELAV	-22,03	34,42	0,78	1,03	7,20
SIACARG	-4,11	7,70	2,71	2,50	4,60
6646-1-se	-5,00	3,87	-0,09	-0,20	1,85

Fuente: Cálculos propios. Todas las unidades expresadas en metros. 2012.

Tabla 4.7: Estadísticas de las Diferencias de alturas de los DEM's con las medidas DGNSS cuasi-ortométrica eliminando el vértice geodésico LA ENCRUJIDA.

	Min	Max	Promedio	Media	Desv Estándar
SRTM v.2	-16,51	9,70	-4,16	-4,39	3,23
SISDELAV	-22,03	11,55	0,71	0,36	5,44

Fuente: Cálculos propios. Todas las unidades expresadas en metros. 2012.

Ahora, considerando que los orto-fotos fueron producidos por el IGVSb y que están ajustados a las normas cartográficas correspondiente a la escala 1:25.000, por consiguiente, estos se usaron para hacer dos comparaciones capturando las diferencias altimétricas pixel a pixel: la primera en zona plana, con el DEM de SISDELAV y el DEM del SRTM, y la última en una zona montañosa con el SRTM.

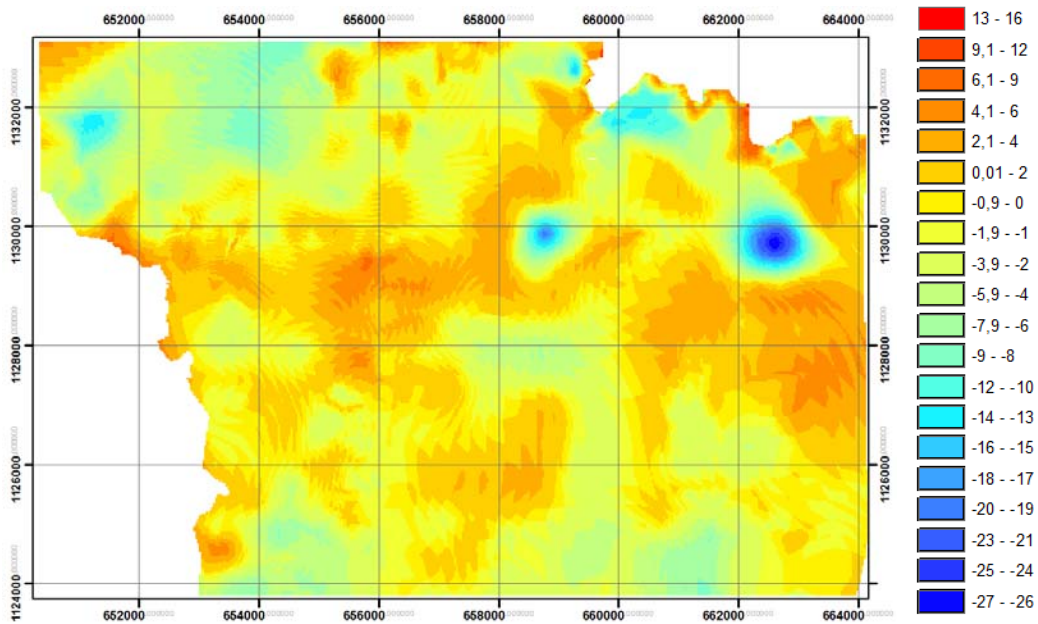


Figura 4.8: Diferencias de alturas entre el DEM de la carta 6646-I-SE y del SISDELAV.
Fuente: Elaboración propia 2012.

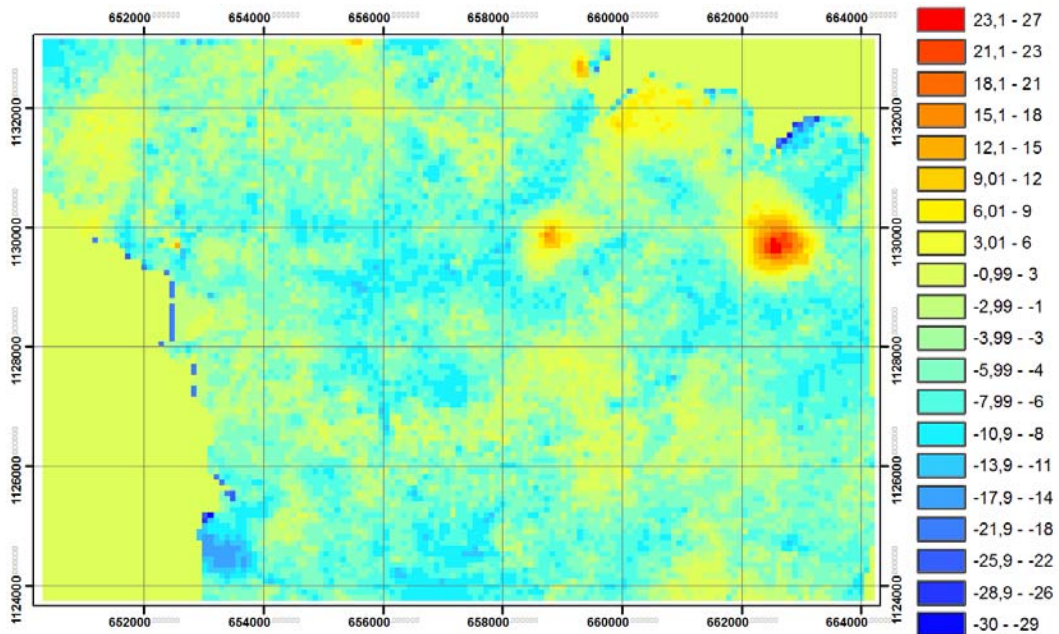


Figura 4.9: Diferencias de alturas entre el DEM del SISDELAV y del SRTM v.2.
Fuente: Elaboración propia 2013.

Al analizar la figura 4.8 y la tabla 4.8 se puede observar que los valores con las diferencias en metros se cuantifican estadísticamente con la mediana de -1, promedio de -0,879, moda a cero y desviación estándar de 3,464, estando graficadas en la figura 4.8 con los colores en amarillo y anaranjado claro. Las dos zonas con mayor diferencia se grafican en tonalidades de azul que

se ubican al nor-este y nor-centro de la carta, que por su disposición, según las especificaciones en la construcción de este DEM por interpolación, se usó como insumo los puntos de cota de las cartas, las cuales podrían tener un valor de altitud errado, por lo afectaría al momento de realizar la orto-rectificación de la Imagen-SAR, y por ser identificadas tempranamente se evaluó estas zonas y se le dio mayor peso por su precisión al DEM del orto-foto del IGVSB.

De la tabla 4.5, se observa que el punto 403 presenta diferencia significativa de -22,03 m con la altura del DEM de SISDELAV, pero con el DEM del SRTM v2 la diferencia es mínima de -4,63 m y el DEM del orto-foto una diferencia casi nula de -0,63 m, este error tan grande presente en el primero difícilmente este asociado al método de interpolación y si podría estar asociado a un error en el dato inicial que casualmente ésta ubicado sobre la diferencia significativa que hay entre el DEM de SISDELAV y la carta 6646-I-SE que se podrá ver al noreste en la figura 4.8 y figura 4.9.

Cuando no disponga de información precisa como el DEM de otras cartas topográficas o generados por métodos directo de plataformas satelitales, se puede realizar el proceso de validación espacial de DEM cuantitativamente, usando el DEM del SRTM v-2 para la detección de anomalías en zonas planas como se muestra en la figura 4.9.

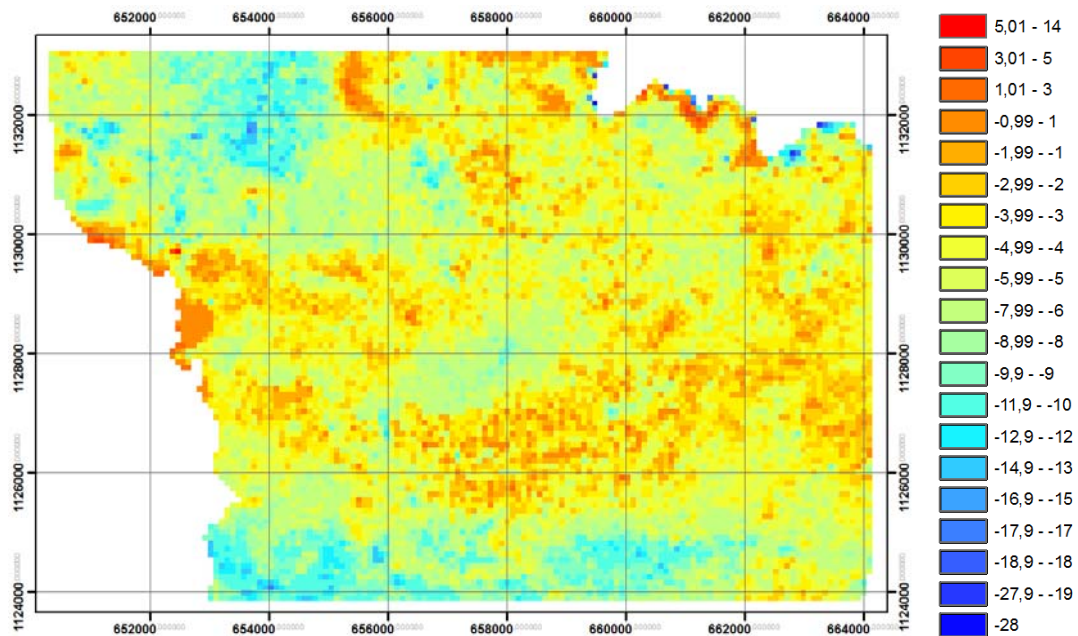


Figura 4.10: Diferencias de alturas entre el DEM de la carta 6646-I-SE y el DEM del SRTM v2
Fuente: Elaboración propia 2012.

De igual forma, al evaluar las diferencias altimétricas del DEM del SRTM con el del orto-foto como se ve en la figura 4.10 y la tabla 4.8, se cuantifica estadísticamente las diferencias en metros cercanas a la media de -5, con promedio de -4,856, moda de -4 y desviación estándar de 2,707, donde se grafican en la figura con colores anaranjado los valores con diferencias cercanas a cero. La representación de valores altos graficado en rojo, al nor-oeste de la carta, al visualizarlo en el orto-foto se observa que corresponde a una laguna de oxidación (cuerpo de agua en movimiento), siendo esta una desventaja de la técnica de adquisición de datos por Interferometría de Radar.

Tabla 4.8: Estadísticas de las Diferencias del DEM de los Orto-foto comparados con el DEM de SISDELAV y el SRTM

	Min	Max	Promedio	Media	Moda	Desv Estándar
Zona Plana						
SRTM v.2	-28	14	-4,856	-5	-4	2,707
SISDELAV	-27	16	-0,879	-1	0	3,464
Zona Montañosa						
SRTM v.2	-93	54	-9,743	-10	-10	14,835

Fuente: Elaboración propia. Todas las unidades expresadas en metros. 2012.

Ahora para contrastar al DEM Global del SRTM en una zona de diferente topografía como lo es la zona montañosa de la cuenca del Caramacate, se escogieron los DEM de las orto-fotos del IGVSB con índice 6746-II-NO, 6746-II-NE, 6746-II-SE y 6746-II-SO con los datos validos. Observándose que la estadísticas de las diferencia altimétrica (figura 4.11 y tabla 4.8) queda en unidades de metros con la media de -10, promedio de -9,743, moda de -10 y desviación estándar de 14,835, y se grafican en la figura en los colores en amarillo los pixeles que tienen valores con diferencia cercanas a cero.

Al comparar el DEM Global del SRTM con el DEM de SISDELAV desde un contexto general en zonas con topografía planas solamente, ambos están bien correlacionados, y este primero se podría usar para orto-rectificar la imagen SAR.

Reflexionando que este DEM Global fue generado sin puntos de control terrestre, y al observar las comparaciones altimétricas estadísticas con la Orto-foto en la zona plana y los puntos DGNSS (tablas 4.7 y 4.8) cuyas media están en -5 y en -4,39 respectivamente, esto refleja un comportamiento de la incertidumbre donde cada una de las muestras se mueven alrededor de un valor central que debería ser cero por tratarse de una comparación con valores altimétricos donde cada una representa la realidad. Considerando lo anterior, para este ejercicio se generó un nuevo DEM del SRTM ajustado para esta zona de estudio, donde se le

restó el valor de 4,00 m a cada pixel de este DEM para llevar a la media de las diferencias altimétricas a un valor más cercano a cero, en procura del mejoramiento del proceso de orto-rectificación en zonas planas. Obteniéndose una media comparada con la altimetría de los Puntos DGNSS y las Orto-foto de -0,16 m y -086 m respectivamente, donde el resto de los parámetros estadísticos se mantienen (tabla 4.9).

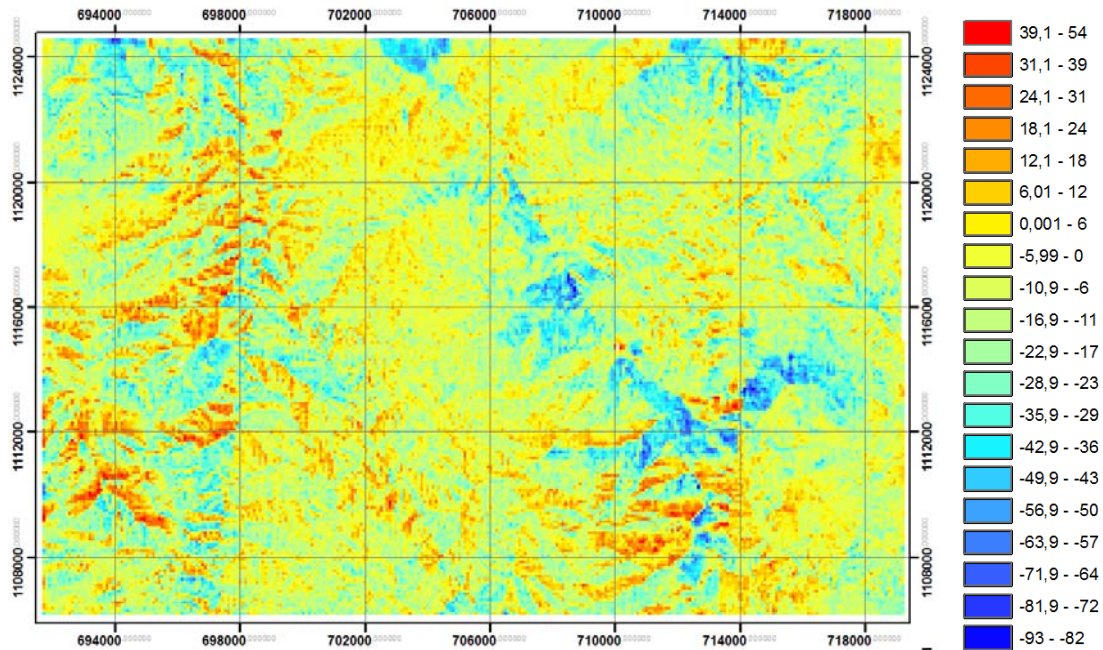


Figura 4.11: Diferencias de alturas entre el DEM de las cartas 6746-II-NO, 6746-II-NE, 6746-II-SE y 6746-II-SO, y el DEM del SRTM v.2
Fuente: Elaboración propia 2012.

De igual forma, para la zona montañosa mejora la media, pero la desviación estándar es muy alta, el tamaño del pixel sigue siendo muy grande para la escala de trabajo 1:50.000, y ni hablar del ángulo de adquisición alto que caracteriza a las Imágenes de Radar, y debido a lo anteriormente expuesto no se recomendaría este DEM Global para realizar un proceso de orto-rectificación en esta zona.

Tabla 4.9: Estadísticas de las Diferencias del nuevo DEM del SRTM (-4,00 m) con el del Orto-foto y los puntos DGNSS.

	Min	Max	Promedio	Media	Moda	Desv Estándar
Zona Plana						
DGNSS	-12,51	13,70	-0,16	-0,39	1,77	3,23
Orto-foto	-24,00	18,00	-0,86	-1,00	0	2,71
Zona Montañosa						
Orto-foto	-89	58	-5,06	-5	-3	14,75

Fuente: Cálculos propios. Todas las unidades expresadas en metros. 2012.

4.3.6 Transformación de los raster de LA CANOA a REGVEN

Para transformar las coordenadas planimétricas de los DEM's (previa a la validación presentadas en la sección anterior), y los orto-fotos de PITSA y Cartocentro en formato raster desde el datum La Canoa-Hayford a SIRGAS-REGVEN, durante este trabajo de investigación no se disponía de un paquete computacional que permitiera usar el modelo de similaridad de Badekas-Molodensky y los 10 parámetros de transformación PATVEN_98. Al ser el Demo de Erdas Imagine versión 10 el software para el procesamiento digital de Imágenes, se procedió al estudio del modelo matemático de transformación entre datums que usa este paquete, siendo el Bursa-Wolf con uso estricto de los 7 parámetros de transformación relacionados al datum WGS84 como sistema geocéntrico para el cálculo de las transformaciones.

Está entendido que el elipsoide de referencia del datum SIRGAS-REGVEN es el GRS-80 pero desde el punto de vista práctico se puede usar el WGS-84 como su similar. Como lo plantean Martín, et al., 2001 que *para casi todas las aplicaciones topográficas, cartográficas y geodésicas los sistemas WGS84 y GRS80 se pueden tomar como idénticos. La diferencia entre las coordenadas en ambos datums es de menos de 3 cm, y cada vez va haciéndose menor por el trabajo conjunto del segmento espacial del GPS con las estaciones y modelos del IGS.*

Para re-proyectar se procedió a:

- definir las unidades para los 7 parámetros determinados por el modelo matemático de Bursa-Wolf, donde las traslaciones deben ser expresadas en metros, las rotaciones debe ser presentados en radianes y notación científica, y el parámetro del factor de escala debe ser presentado en partes por millón (ppm) y en notación científica, quedando como dX: -296,497, dY: 85,260, dZ: -263,967, RX: -1,40789892994209e-05, RY: -3,96092777466491e-06, RZ: -5,86624554142538e-06 M:-4,688e-06 (LGFS-LUZ).
- Se ubicó el archivo maestro SPHEROID.TAB donde el Erdas almacena todos los datums con que trabaja. Se realizó la edición del mismo y se ubica primero el elipsoide asociado a La Canoa que se conoce como "International 1909". Luego dentro de esta rutina de este elipsoide se definió el nombre del datum "PSAD56 (PDV LUZ)"

y seguido a este con un espacio intercalado se agregaron los 7 parámetros de Bursa-Wolf.

```
"International 1924" alias "International 1909" {
  5 6378388.0 6356911.94613
  "International 1909"
  "PSAD56 (V PATVEN98 3P)" -270.933 115.599 -360.226 0 0 0 0
  "PSAD56 (PDV LUZ)" -296.497 85.260 -263.967 -1.40789892994209e-05 -3.96092777466491e-06
  -5.86624554142538e-06 -4.688e-06
  "PSAD56 (Venezuela)" -295 173 -371 0 0 0 0
```

- Se definió el datum para uno de las capas raster con el nuevo datum creado "*PSAD56 (PDV LUZ)*", esto incluye los orto-fotos para el proceso de validación de la ortorectificación, y los DEM's de *SISDELAC* y el *SIACARG*, esto se hizo en el icono de la información de capas raster, con la opción *edit, add/ change projection*.
- Se re-proyectó los DEM's y los orto-fotos usando la herramienta *Reproject Imagine*, definiendo los parámetros de salida al datum geocéntrico WGS-84.

Se verificó la calidad de transformación de los 7 parámetros de Bursa-Wolf que calculo el LGFS de LUZ (figura 4.12) con los 10 parámetros oficiales PATVEN 98 del IGVS (figura 4.13) mediante la transformación de 4 puntos cualesquiera distribuidos en área de estudio y se evaluaron las diferencias obtenidas con ambos modelos de transformación (tabla 4.10).

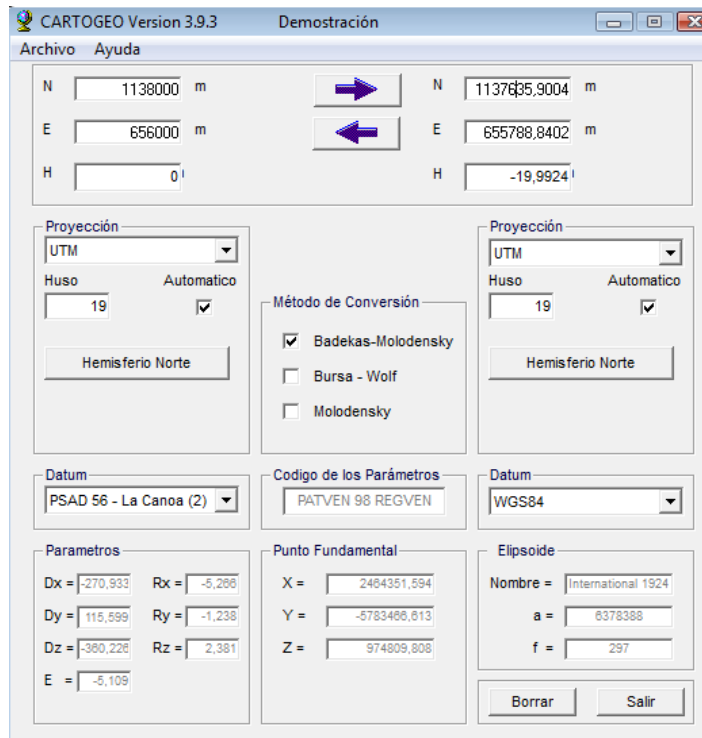


Figura 4.12: Programa de transformación usando el Modelo de similaridad de Badekas-Molodensky Fuente: Cartogeo [programa en línea] <http://www.cartogeo.com/productos.html>, 2010

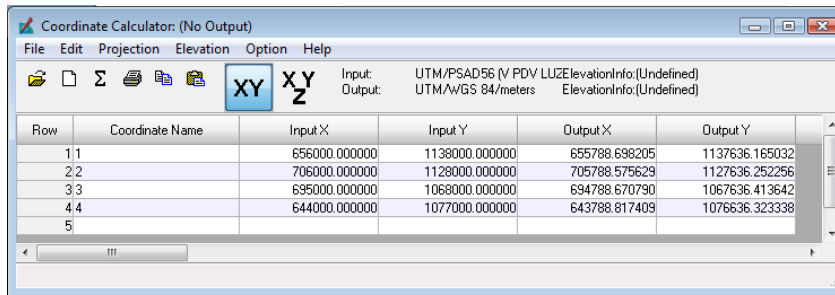


Figura 4.13: Programa que usa el Modelo de transformación Bursa-Wolf
Fuente: Coordinate Calculator de Erdas Imagine 2010

Al evaluarse las diferencias obtenidas entre los modelos de transformación con sus correspondientes parámetros de transformación (tabla 4.10) se obtuvo una diferencia máxima de hasta 32 cm, que en la realidad para la escala 1: 50.000 no es relevante, estando estas diferencias muy por debajo de 0,01 mm en su equivalente en el mapa lo que permite concluir que estos parámetros de transformación usando el modelo matemático de Bursa-Wolf son suficientes para transformar las capas de información raster del área de estudio.

Tabla 4.10. Comparación de ambos modelos de transformación

Id	La CANOA		Badekas-molodesky PATVEN_98		Bursa-Wolf 7P - LUZ		Diferencia		
	Este	Norte	Este	Norte	Este	Norte	Este	Norte	Total
1	656000	1138000	655788,840	1137635,900	655788,698	1137636,165	0,142	-0,265	0,30
2	706000	1128000	705788,704	1127635,959	705788,576	1127636,252	0,128	-0,294	0,32
3	695000	1068000	694788,772	1067636,134	694788,671	1067636,414	0,101	-0,280	0,30
4	644000	1077000	643788,923	1076636,067	643788,817	1076636,323	0,106	-0,256	0,28

Fuente: Cálculos propios. Todas las unidades expresadas en metros. 2012.

Adicionalmente, Martín, et al. (2001), realizó la comparación de puntos medidos, abarcando los Husos 18 (1 punto), 19 (5 puntos) y 20 (10 puntos), cada uno con coordenadas en los datums La Canoa – Hayford y SIRGAS-REGVEN, diferenciándolos con la transformación de los mismos puntos usando PATVEN_98 y los 7 parámetros de Bursa – Wolf, donde encontraron que el promedio de las diferencias resultó 2,07 m y 2,02 m, respectivamente.

Ahora bien, si se analiza lo anteriormente expuesto y la tabla 4.10, se observa que esta última relación cumple con los valores de tolerancia requeridos para las escalas menores a 1:25.000, dado que un decimo del milímetro en el papel equivale a 2,5 m lo que nos permite mostrar que los productos estarían adecuados para la escala de trabajo.

Finalmente, al concluir la re-proyección desde el datum La Canoa al SIRGAS-REGVEN de todos los DEM's, y orto-fotos de PITSA y Cartocentro disponibles del área de estudio, se realizó la validación con los puntos DGNSS medidos en campo para este proyecto (Figura 4.14), observando sobre los mismos buena correlación espacial y avalando nuevamente la re-proyección usando el modelo matemático de Bursa-Wolf con sus respectivos parámetros.

Respecto al inventario de los orto-fotomapa, se observó la no existencia de cartografía básica con cubrimiento del 100% en la zona de estudio, que obligó desde un principio al levantamiento de Puntos de Control terrestres medidos con la Técnica GNSS Diferencial (DGNSS) para la orto-rectificación de la Imagen del satélite Radarsat-2.



Figura 4.14: Orto-foto re-proyectada sobre puntos levantados DGNSS
Fuente: Elaboración propia 2012.

4.3.7 Orto-rectificación de Imagen SAR

Para la Orto-rectificación de la imagen de satélite RADARSAT-2 usando el ajuste de la efemérides del satélite, se ejecutó con el software propietario ERDAS IMAGINE ® 2010 con su módulo de IMAGINE OrthoRadar en su versión 10.0 Demo desarrollado por ERDAS en cooperación con el Remote Sensing Technology Institute del German Aerospace Center (DLR) y GEOSYSTEMS GmbH. Este paquete de procesamiento digital de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) puede leer directamente el formato XML (prod*.xml) original de RADARSAT-2. Este tipo de formato que usan para este satélite es reconocido como un archivo maestro, el cual estructura un conjunto de datos, especificando sus parámetros orbitales (efemérides), modo de adquisición, los datos raster en forma TIFF, polarización, modo de procesamiento de los datos, etc.

Este programa permite realizar la geocodificación precisa o la orto-rectificación de las imágenes de SAR, usando el modelo del sensor SAR, los parámetros orbitales y el Modelo Digital de Elevaciones (DEM).

El proceso de Orto-rectificación elimina las distorsiones de la imagen producidas, tanto por la geometría de adquisición, como por las variaciones del terreno, ajustando las imágenes adecuadamente sobre el relieve y a una proyección cartográfica dada, donde cada punto de la imagen es visto desde el nadir. Este nuevo muestreo de la orienta la imagen SAR para corregir directamente a la distancia oblicua en la dirección del alcance a la proyección del mapa, sin que la conversión intermedia a tierra sea necesario.

El método utilizado es de Intersección del Rango Esférico, del Cono Doppler y el Modelo de la Tierra (RDTC), que en otras palabras significa Corrección del Terreno por el Alcance Doppler. Para la rectificación de imágenes SAR utiliza información del vector del estado de la órbita contenido en la metadata, datos del reloj del Radar (timing annotation), los parámetros de la conversión del alcance inclinado al alcance terrestre (slant to ground range) los cuales, son modelados y ajustados con los puntos de control terrestre, conjuntamente con el Modelo de Elevaciones de referencia, todo ello, con la finalidad de derivar la información de geolocalización con precisión (relacionado al desplazamiento por relieve de los sensores ópticos).

El papel de la simulación rigurosa resulta primordial en la corrección de altura y el efecto de lay-over producido por la imagen de RADAR (Erdas Tour Guide).

En este trabajo se realizó el ajuste de la efemérides del satélite usando los Puntos de Control Terrestres que se midieron en campo con la técnica GNSS Diferencial y fue corregido el desplazamiento por relieve usando dos fuentes diferentes de DEM, el DEM Global del SRTM versión 2 (*srtm_v2*) y el DEM del SRTM ajustado (*srtm-4*), y los DEM de los orto-fotos y los DEM interpolados de las curvas de nivel de los proyectos SIACARG y SISDELAV (figura 4.15).

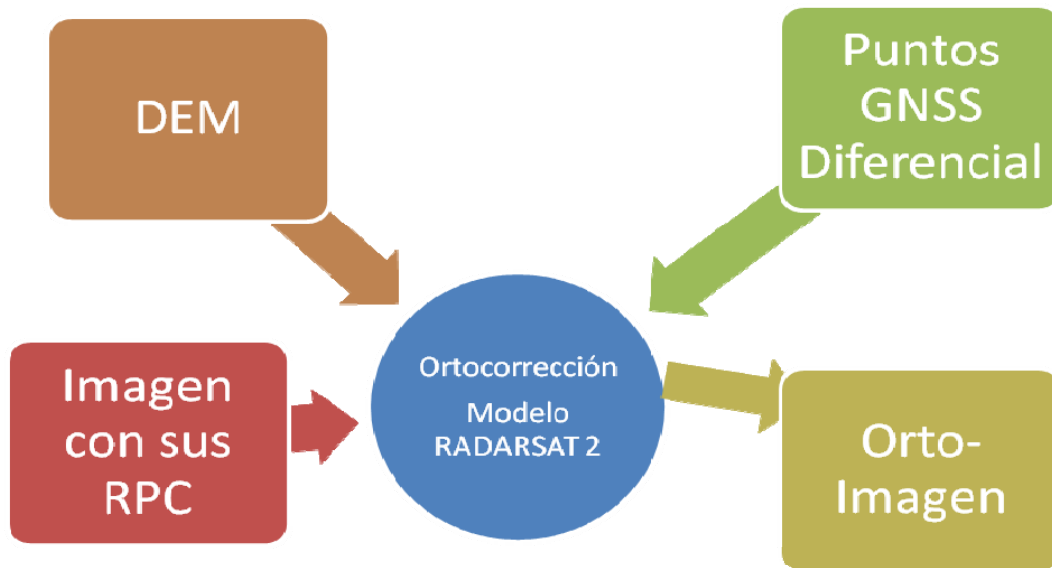


Figura 4.15: Flujograma de Orto-rectificación.
Fuente: Elaboración propia 2012.

Para la orto-rectificación se especificó la proyección UTM, huso 19 con elipsoide de referencia WGS84, que es similar para fines prácticos a esta escala al GRS80 usado por el sistema de referencia Geocéntrico SIRGAS - REGVEN.

Se ubicaron los Puntos de Control GNSS sobre la imagen, con coordenadas de salida Este, Norte y altura cuasi-ortométrica, en el nuevo Datum (SIRGAS-REGVEN). En la figura 4.4 se puede observar la distribución de los puntos para el proceso de orto-rectificación.

Se procedió a evaluar el Error Medio Cuadrático (RMS) usando desde 5 GCP hasta los 20 GCP levantado con DGNSS.

Para generar las orto-imágenes SAR de 6,25 m de resolución en la dirección de alcance y del azimut con polarización HH y HV se procedió:

1. La orto-imagen *sar_srtm_v2* fue Orto-rectificada usando el DEM *srtm_v2*.
2. La orto-imagen *sar_srtm-4* fue Orto-rectificada usando el DEM *srtm-4*.

3. La orto-imagen *sar_sisdelav* fue Orto-rectificada usando el DEM *SISDELAV*.
4. La orto-imagen *sar_siacarg* fue Orto-rectificada usando el DEM *SIACARG*.
5. La orto-imagen *sar_6646-I-se* fue Orto-rectificada usando el DEM *6646-I-SE*.
6. La orto-imagen *sar_caramacate* fue Orto-rectificada usando el DEM de los orto-fotos 6746-II-NO, 6746- II -NE, 6746- II -SE y 6746- II -SO.

Para el remuestreo de la imagen se usó el algoritmo de interpolación de convolución cúbica siendo el más recomendado para la imágenes de RADAR porque genera buen registro y apariencia del producto. Por el contrario, la interpolación por vecino más cercano puede distorsionar la estadística de la imagen. Y el algoritmo de interpolación bilineal, siendo no muy apropiado para imágenes de radar por su ruido de moteado, también puede suavizar la apariencia de la imagen final, alterar los valores de grises y atenuar los márgenes y bordes en la imagen y disminuir la resolución¹¹.

Para el proceso de calidad a cada imagen orto-rectificada se realizó la comparación visual con los orto-fotos a escala 1:25.000 y se agregó puntos de validación (GVP) usando estas mismas orto-fotos para proceder al análisis estadísticos para las diferentes áreas y por consiguiente evaluación de los errores permisible del mapa.

4.3.8 Influencia del DEM y las características del sensor en la generación de la orto-imagen.

Los sensores satelitales por las alturas de sus plataformas tienen un estrecho campo de vista (FOV) de modo que el principio del efecto del error del DEM sobre la producción de orto-imágenes puede ser reducido casi a cero si la imagen es adquirida tan cerca al nadir como sea posible.

Sin embargo, una de las virtudes de estos sensores satelitales es que estos pueden rotar, lo que les brinda flexibilidad y mayor posibilidad de revisita, y es por esto que es muy importante que el DEM usado en la orto-rectificación (disponible o producido) sea lo suficientemente preciso, véase la figura 4.16 (Kapnias, et al., 2008. p.17). Con especial interés para Imágenes SAR ya que los ángulos de adquisición de estas imágenes son superiores a las de los sensores ópticos.

¹¹ CCRS, Características geométricas pp 60-65, [en-línea]

http://geogratis.cgdi.gc.ca/download/part2/learning/globesar2/espanol/intermediate/sec6_form.pdf.

Al analizar la figura 4.16 para ángulo de adquisición de las imágenes cercanos al nadir, sus terrenos planos y ondulado suaves podrían considerarse como un plano. Pero en lo concerniente a esta investigación, la característica más importante de las imágenes SAR es su ángulo de incidencia alto en comparación con los sensores ópticos. La imagen SAR usada para esta investigación tiene un ángulo de incidencia local en el centro de la escena de 38,40 grados, por consiguiente al revisar la grafica entre los ángulos 35 y 40 grados para un DEM con error en altimetría de 5,44 metros como fue cuantificado y mostrados en las tablas 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 se traduce en un error en planimetría para la nueva orto-imagen aproximadamente a 4 m, tal cual como fue analizado anteriormente para diferentes DEM's en zona planas y onduladas.

La evaluación en las zonas montañosas en la generación de la orto-imagen final se realizó con la evaluación de la precisión cartográfica en esta zona con el DEM de los orto-fotos y el DEM Global del SRTM, considerando que la influencia en el tamaño del pixel de estos podrían incidir en el producto cartográfico final.

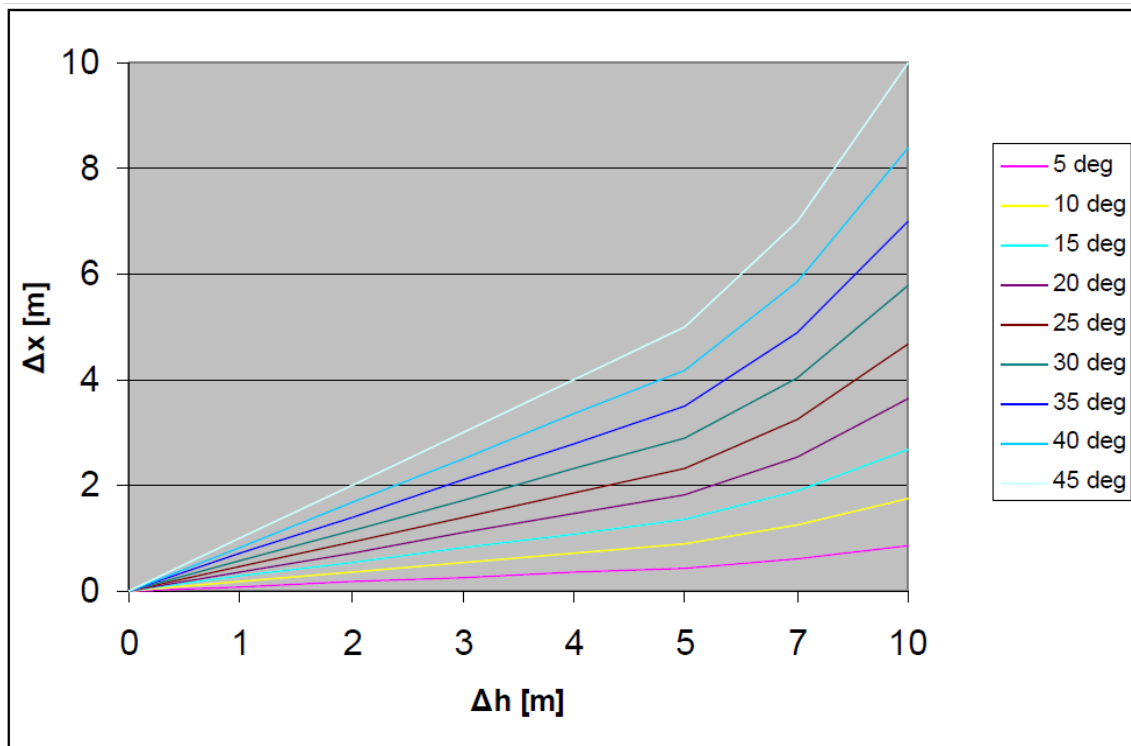


Figura 4.16. Influencia del ángulo de adquisición (deg) de la imagen y la precisión del DEM (Δh) en la precisión de la orto-imagen (Δx).
Fuente: Kapnias, et al., 2008. p.17

4.3.9 La Evaluación de la Tolerancias o errores permisibles en el mapa

Con la evaluación de la precisión cartográfica de la orto-imagen SAR resultante se persiguió establecer si este producto será o no rechazado como producto cartográfico. Y también depende cuando se define una tolerancia sobre la base de la aplicación del mapa.

Es por esto, que se analizó la componente horizontal de error de posición espacial de la orto-imagen, a partir de su distribución circular del error (CEP), que según norma del NMAS (National Map Accuracy Standard) de los Estados Unidos de América, queda planteada que el 90% de los puntos bien definidos y distribuidos en la orto-imagen no debe estar con un error horizontal mayor a 0,508 mm en el mapa (sobre el papel) y que para la escala 1:50.000 corresponde con la realidad a 25,4 metros.

Greenwalt and Schultz (1968), mencionan que sí el error es normalmente distribuido en cada componente x y y el factor aplicado para calcular el error circular en un nivel de confiabilidad del 90 % es 2,146 (citado por la FGDC). El estándar de error circular del mapa (CMAS) basado por la NMAS corresponde:

Norma de Precisión cartográfica (probabilidad de 90%) = $2,146 * \sigma$

$$\text{CMAS-90} = 2,1460 * \text{RMSE}_r / 1,4142$$

$$\text{CMAS-90} = 1,5175 * \text{RMSE}_r \quad \text{ecuación 4.1}$$

Como se está generando un nuevo producto cartográfico considerando una información básica como lo son los puntos de control terrestre GNSS y un modelo matemático de orto-rectificación SAR, se obtiene que el Error final esté representado por la ecuación siguiente.

$$\text{RMSE}_r = (E_{OI})^2 = (E_{\text{GNSS}})^2 + (E_{\text{SAR}})^2 \quad \text{ecuación 4.2}$$

E_{OI} : Error total (orto-imagen)

E_{GNSS} : Error de los puntos GNSS

E_{SAR} : error del modelo matemático de orto-rectificación de la imagen SAR.

Durante el proceso de generación de la orto-imagen los RMS se presentan en unidades de pixeles y es necesario conocer la ecuación de transformación para distancias representadas por la imagen a su correspondiente valor sobre el terreno usando la siguiente ecuación.

$$d_T = GDS * d_I \quad \text{ecuación 4.3}$$

d_T : Distancia Terreno. Unidades metro

GDS : Resolución espacial. Unidades metro/pixel

d_I : Distancia sobre la imagen. Unidades pixel

Entonces, siendo el parámetro de precisión cartográfica del mapa (CMAS-90) de 25, 4 m, por consiguiente al sustituir y despejar de la ecuación 4.1 el $RMSE_r$, se obtiene que este error total (E_{OI}) para la generación de la orto-imagen SAR debe estar por debajo de 16,73 m. Al conocer el Error máximo del levantamiento de los puntos GNSS (E_{GNSS}) usados como GCP que corresponde a 0,738 m, al despejar de la ecuación 4.2 se obtiene que el error de la orto-rectificación (E_{SAR}) no debería ser mayor de 16,71 m. Adicionalmente al despejar de la ecuación 4.3 en unidades imagen este Error no debería ser mayor a 2,67 pixel.

De la misma forma, se consideró la evaluación del Error con otro parámetro de validación cartográfica como la es la del ASPRS en que se evalúa la componente x y y de manera independiente y donde el error debe ser menor a $\frac{1}{4}$ del mm sobre el mapa que a la escala 1:50.000 corresponde a 12,5 m sobre el terreno, siendo este el $RMSE_r$. De igual forma el E_{GNSS} es conocido para los GCP y al despejar de la ecuación 4.2 resulta que el E_{SAR} no debería ser mayor a 12,47 m en ninguna de sus componentes. Siendo su equivalente con unidades de imagen a 1,99 pixeles.

Se verificaron los errores posicionales tomando en cuenta la evaluación de la cantidad de los puntos de control terrestre usados en la generación del modelo de orto-rectificación, considerando el uso desde 5 GCP hasta llegar a los 20 GCP.

La validación cartográfica se cuantificó usando puntos de verificación terrestres (GVP), donde se comparó a ver si cumple con los parámetros de tolerancia cartográfica definida previamente. Para esta realización de los controles posicionales se recurrió a una fuente de mayor exactitud que fueron los orto-fotos a escala 1:25.000, donde para el área de cubrimiento de una mapa a escala 1:50.000 se escogieron un conjunto de 20 a 25 puntos de

validación bien definidos, identificados en el terreno y uniformemente distribuidos por toda la hoja (recomendado por Sevilla 1991).

4.3.10 Corrección Radiométrica

La orto-rectificación debe aplicarse después del proceso de corrección radiométrica (Mansourpour, et al., 2008), este último, tiene diferentes algoritmo que pueden aplicarse en función de los objetivos del análisis. Durante esta investigación se aplicaron diferentes filtros, sin embargo, la metadata de las imágenes filtradas resultantes no poseía los parámetros geométricos para poder realizar luego la orto-rectificación. Por esta razón se procedió a adjuntar la misma con la herramienta *SAR Metadata Editor* de Erdas Imagine, y al finalizar este paso, ésta se presenta incompleta, faltando el header relacionado a la calibración del Radarsat-2.

Finalmente, al realizar el proceso de orto-rectificación SAR, la rutina no corre por algún error interno que no se especifica que podría estar relacionada a esta ausencia y a la versión DEMO del paquete computacional.

Para este trabajo de investigación solo se requirió hacer la evaluación espacial del producto cartográfico que se realizará a partir de interpretación visual (análisis cualitativo) de los diferentes elementos sobre la imagen, y por esta razón se realizó filtro de la orto-imagen SAR resultante usando el algoritmo de Gamma-MAP para reducir el ruido speckle.

Cuando se desee realizar procesos previos a la orto-rectificación como filtros o conversión radiométrica de la Imagen SAR se sugiere evaluar las aplicaciones o necesidades que se le darán a la Imagen SAR. Por ejemplo, al aplicar cualquier método de conversión Radiométrica, que consiste en una calibración radiométrica sin disponer de un DEM, donde se caracterizan por usar valores específicos del header, los cuales están disponibles en la data original con la imagen de Magnitud o Intensidad y por esta razón no se podría aplicar una vez que la imagen haya sido orto-rectificada. Luego de realizar este proceso se procedería a copiar la metadata de imagen original a esta nueva imagen, que contiene todos los parámetros geométricos completos para proceder a la orto-rectificación de esta última.

V. RESULTADOS OBTENIDOS

5.1 Análisis estadísticos de los resultados

5.1.1 Análisis de la calidad visual

La tabla 5.1 muestra los parámetros de calidad visual sobre la base de la medida en el papel y su comparación con el valor real, que para un mapa específico a escala 1:50.000 estaría íntimamente relacionado a una resolución espacial de una imagen de cualquier Sensor Remoto. Para esta investigación, la imagen SAR con sus características de adquisición estaría referida a una escala específica, que a la vez, estaría vinculada a una aplicación en el campo de la Geomática. Ahora bien, debido a que este tipo de imagen resalta lineamientos en direcciones específicas asociadas a las características del objetivo y el modo de observación (geometría de adquisición y su polarización), ésta no aplicaría en un 100% para actualización cartográfica. En definitiva, las escalas mínima de representación (ver tabla 5.1) sobre la base de la resolución en la dirección del alcance y azimut, x y y respectivamente, aplicaría solo en Geomática desde 1:20.833, y para Cartografía Básica a 1:62.500 y Actualización Cartográfica a 1:32.500 (las dos últimas no aplica en una identificación al 100% de los elementos capturados por la imagen SAR).

Tabla 5.1. Parámetro de Calidad Visual – Valor gráfico vs valor real a escala 1:50.000 y diferentes escalas mínimas en función de la resolución espacial.

Aplicaciones	Parámetros del Mapa	Escala 1:50.000 = pixel mínimo	Escala mínima para resolución espacial de 6,25 m
Ingeniería, Catastro urbano y Cartografía Básica (IGVSB)	$\leq 0,1$ mm	5 m	1:62.500
Actualización, Catastro Rural, ASPRS	0,2 mm	10 m	1:32.250
Geomática precisa, ASPRS	0,3 mm	15 m	1:20. 833
Geomática según aplicación	0,5 mm	25 m	1:12.500

Fuente: Cálculos propios sobre la base de normas técnicas de calidad visual. 2013.

La norma cartográfica de la ASPRS establece que el menor elemento identificable de un mapa está comprendido entre 0,2 – 0,3 mm, y debido a la complejidad para su interpretación visual de las imágenes SAR se sugiere usar la más estricta que corresponde a 0,2 mm (1/5 mm) que para la escala 1:50.000 correspondería a 10 m estando la resolución de la imagen Radarsat-2

de esta investigación en cada una de sus componente x y y en 6,25 m, y sí se parte de esta última relación la escala mínima de trabajo sería 1:32.250.

5.1.2 Resultado del modelo orto-rectificación SAR en base del número de GCP

Siendo el objetivo de esta investigación, el de orto-rectificar la imagen SAR con puntos de control terrestre (GCP) medidos con la técnica GNSS Diferencial, podremos ver en la sección 4.3.3 que se lograron identificar con excelente nivel de detalle sobre la imagen como puntos de control terrestre (GCP), un total de 20 puntos, tomando estos como la mayor cantidad de puntos que se usó para este trabajo para ajustar los parámetros orbitales para el modelo de orto-rectificación y en su validación se usaron 7 puntos de verificación terrestre (GVP). Luego, se fue bajando de un punto a la vez la cantidad de GCP hasta llegar a 5 de estos (sugeridos por Mansourpour, et al., 2008), para cada nueva distribución de los GCP fue considerada primero con mayor grado de importancia la distribución de los puntos y como segundo se eliminaba el punto con mayor contribución en el error. Inversamente se iba aumentando la cantidad de GVP hasta llegar a 22 (tabla 5.2).

Tabla 5.2. RMS en X, Y y Total de los GCP's y GVP's para los diferentes ajustes en el modelo de orto-rectificación de la imagen SAR.

Cantidad		Control (m)			Verificación (m)		
GCP	GVP	RMS (X)	RMS (Y)	RMS (Total) E_{SAR}	RMS (X)	RMS (Y)	RMS (Total)
20	7	0,576	0,446	0,7285	0,7189	0,3299	0,791
19	8	0,5841	0,411	0,7143	0,5986	0,4553	0,7521
18	9	0,5923	0,3718	0,6994	0,5807	0,5398	0,7928
17	10	0,5904	0,3207	0,6718	0,5852	0,6122	0,8469
16	11	0,5978	0,3231	0,6795	0,5747	0,6022	0,8324
15	12	0,5869	0,2817	0,651	0,6511	0,6435	0,9154
14	13	0,5629	0,2915	0,6339	0,6148	0,6199	0,8731
13	14	0,5374	0,3021	0,6165	0,6814	0,601	0,9086
12	15	0,6005	0,2399	0,6466	0,5787	0,6596	0,8775
11	16	0,5718	0,2482	0,6234	0,5997	0,6468	0,882
10	17	0,5962	0,2603	0,6505	0,547	0,628	0,8328
9	18	0,5769	0,265	0,6348	0,5382	0,6617	0,853
8	19	0,5617	0,2562	0,6174	0,547	0,6487	0,8486
7	20	0,6005	0,2465	0,6491	0,5415	0,6703	0,8617
6	21	0,6281	0,2614	0,6803	0,5466	0,6707	0,8652
5	22	0,6944	0,2511	0,734	0,5036	0,6933	0,8569

Fuente: Elaboración propia. 2013

Al observar los resultados de la tabla 5.2 se ilustra que para cada caso planteado los errores medios cuadráticos (RMS) en X, RMS en Y y los Totales tanto para los GCP como los GVP, todos están por debajo de un pixel. Al relacionarlo con las resoluciones de la imagen SAR en la dirección de alcance y del azimut en su par de bandas, una con polarización HH y otra HV, cualesquiera estos RMS están por debajo de 6,25 m.

Para los 20 GCP el RMS Total fue de 0,7285 pixel, pasando en los 13 GCP con 0,6165 pixel hasta llegar a los 5 GCP con 0,734 pixel que corresponde a 4,55 m, 3,22 m y 4,59 m respectivamente. Los GVP en proceso de validación del modelo de orto-rectificación comenzaron con 7 puntos con un RMS total de 0,7910 pixeles, pasado con 0,9154 pixeles con 15 GCP hasta llegar con 22 puntos con 0,8569 pixeles, de igual forma equivaldría a 4,94 m, 5,72 m y 5,36 m.

Al realizar un estudio exhaustivo de los resultados de los modelos de ajustes de los parámetros orbitales para las diferentes cantidades de GCP y GVP se escogieron 4 casos particulares para su evaluación detallada de cada uno de los puntos usados, como se explica en las secciones siguientes.

5.1.2.1 Resultado con 20 GCP y 7GVP

En la Figura 4.4 se puede observar la distribución de los 20 GCP a lo largo de toda la imagen identificado con los colores amarillo y anaranjado. Para los puntos GVP la distribución es pobre en la imagen identificados de color azul oscuro y cyan, la mayoría de estos puntos se encuentra en la zona norte de la imagen y uno de estos puntos se encuentra muy cerca de un punto de control.

Al evaluar los errores individuales de cada uno de los GCP, como se detalla en la tabla 5.3, cada uno de estos puntos tienen residuales tanto en sus componentes x como y y el RMS de cada uno de estos están por debajo de 1,99 pixeles, apreciándose que el Residual máximo en su componente x fue de 0,91 pixel y en y fue de 0,863, y el RMS de 0,966 aportado respectivamente por los puntos 1217-B, 1002-H y 1215F. Ahora para los GVP se aprecia sus residuales en sus componentes x y y , y el RMS de los mismos punto están por debajo de 1,99 pixeles, apreciándose que el Residual máximo en x fue de 0,952 pixel y en y fue de -0,582, y el RMS de 0,99 aportado respectivamente por los puntos 1011-B, y 401_LA en el resto de las componentes.

Tabla 5.3. Residuales y RMS de cada punto de los 20 GCPs y 7 GVPs.

Nombre	Coordenadas Imagen		Coordenadas de Referencia GNSS			Tipo Punto	Residual		RMS E_{SAR}
	X	Y	X	Y	Z Ref		X	Y	
1001-A	35,623	-9827,53	642786,75	1078880,5	304,91	Control	0,377	0,647	0,749
218-aster	1936,253	-9246,02	655176,985	1080068,37	290,44	Check	0,747	-0,263	0,792
1003-B	4454,314	-8407,76	671574,46	1082071,63	353,84	Control	0,686	0,008	0,686
1002-H	6993,802	-9921,715	685444,96	1069582,21	199,62	Control	0,198	0,863	0,885
1005-B	361,179	-5970,092	649121,02	1102180,1	691,86	Control	-0,179	0,384	0,424
1009-A	259,206	-3621,339	651715,59	1116623,17	434,34	Control	-0,206	0,287	0,353
1010-B	2500,143	-4207,26	664620,63	1110269,96	520,58	Check	0,857	0,02	0,857
9010-A	3988,145	-3214,239	674863,36	1114520,69	602,8	Control	0,855	0,174	0,872
1011-B	5718,048	-2637,214	685907,49	1115960,28	816,91	Check	0,952	0,008	0,952
1_15aster	1108,274	-3510,457	657059,876	1116245,84	433,79	Check	0,726	0,167	0,745
turmero-	1736,016	-281,346	664806,554	1135257,39	516,77	Control	-0,016	0,059	0,061
202_LA	514,5	-1465,376	655970,295	1129500,69	421,099	Check	0,5	0,196	0,537
401_LA	1220,801	-1350,883	660412,673	1129334,92	439,289	Check	-0,801	-0,582	0,99
404_LA	1390,003	-1294,919	661518,12	1129467,27	443,469	Check	-0,003	-0,536	0,536
1214A	3086,608	-2630,03	670245,08	1119189,06	455,04	Control	0,392	-0,846	0,932
1219-A	5524,258	-72,727	688229,34	1131847,12	556,36	Control	0,742	-0,505	0,897
1217-B	251,09	-536,918	655460,09	1135520,46	463,37	Control	0,91	0,258	0,946
1208-B	8077,284	-4881,194	698162,11	1099157,67	354,69	Control	0,716	0,096	0,722
1220-A	6951,098	-309,846	696514,09	1128652,02	685,132	Control	0,902	0,247	0,935
9206-A	6459,642	-2129,821	691420,57	1118077,46	543,84	Control	0,358	0,091	0,369
1204-C	6323,174	-8306,107	683271,7	1080336,73	260,1	Control	0,826	0,163	0,842
1207-C	5496,233	-5700,135	681252,74	1097369,37	415,17	Control	0,767	0,282	0,817
1210-A	2702,635	-4215,071	665856,54	1109969,16	514,82	Control	0,365	0,023	0,365
9202-A	4930,841	-7171	676015,75	1089058	365,39	Control	0,159	-0,421	0,45
9008-A	1755,544	-1763,243	663181,33	1126142,48	441,14	Control	0,456	-0,122	0,472
1223	499,59	-2201,912	654972,45	1125015,25	414,43	Control	0,41	-0,773	0,875
1215F	4027,376	-1090,039	677824,96	1127469,74	532,382	Control	0,624	-0,737	0,966

Fuente: Elaboración propia. 2013.

5.1.2.2 Resultados con 12 GCP y 15GVP

En la Figura 5.1 se puede observar la distribución de los 12 GCP a lo largo de toda la imagen identificado con los colores amarillo y anaranjado. Para los puntos GVP presenta una mejor distribución en la imagen identificados de color aquamarine y cyan, gran parte de estos puntos se encuentra en la zona norte-oeste de la imagen.

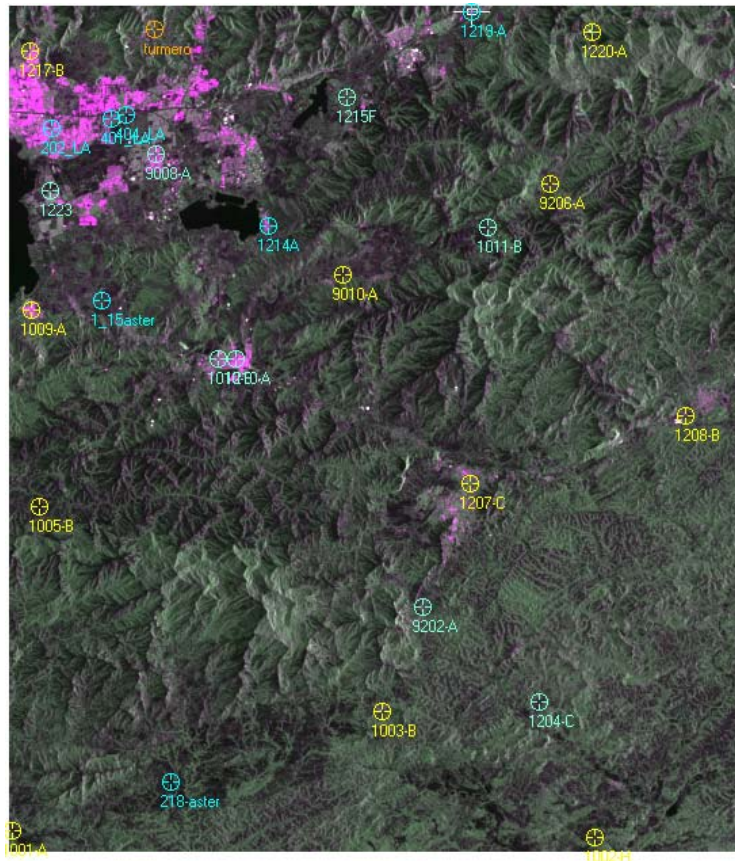


Figura 5.1. Distribución de los 12GCP y los 15 GVP.
 Fuente: Elaboración propia. 2013

Al evaluar los errores individuales de cada uno de los GCP, como se detalla en la tabla 5.4, cada uno de sus residuales para las componentes x y y , y el RMS de los mismo puntos están por debajo de 1,99 pixel, apreciándose que el Residual en su máximo valor la dirección x fue de 0,91 pixel y la y fue de 0,601, y el RMS de 0,91 aportado respectivamente por los puntos 1217-B, 1002-H y de nuevo por 1217-B. Ahora para los GVP se aprecia sus residuales en sus componentes x y y , y el RMS del los mismos punto están por debajo de 1,99 pixeles, apreciándose que el máximo valor de su Residual en x fue de 0,857 pixel y en y fue de -1,107, y el RMS de 1,177 aportado respectivamente por los puntos 1010-B, 1214A y 1215F.

Tabla 5.4. Residuales y RMS de cada punto de los 12 GCP's y 15 GVP's.

Nombre	Coordenadas Imagen		Coordenadas de Referencia GNSS			Tipo Punto	Residual		RMS E_{SAR}
	X	Y	X	Y	Z Ref		X	Y	
1001-A	35,623	-9827,53	642786,75	1078880,5	304,91	Control	0,377	0,385	0,539
218-aster	1936,253	-9246,02	655176,985	1080068,37	290,44	Check	0,747	-0,525	0,913
1003-B	4454,314	-8407,76	671574,46	1082071,63	353,84	Control	0,686	-0,253	0,731
1002-H	6993,802	-9921,715	685444,96	1069582,21	199,62	Control	0,198	0,601	0,633
1005-B	361,179	-5970,092	649121,02	1102180,1	691,86	Control	-0,179	0,122	0,217
1009-A	259,206	-3621,339	651715,59	1116623,17	434,34	Control	-0,206	0,025	0,207
1010-B	2500,143	-4207,26	664620,63	1110269,96	520,58	Check	0,857	-0,241	0,89
9010-A	3988,145	-3214,239	674863,36	1114520,69	602,8	Check	-0,145	-0,088	0,17
1011-B	5718,048	-2637,214	685907,49	1115960,28	816,91	Check	-0,048	-0,253	0,258
1_15aster	1108,274	-3510,457	657059,876	1116245,836	433,79	Check	0,726	-0,095	0,732
turmero	1736,016	-281,346	664806,554	1135257,394	516,77	Control	-0,016	-0,202	0,203
202_LA	514,5	-1465,376	655970,295	1129500,691	421,099	Check	0,5	-0,065	0,504
401_LA	1220,801	-1350,883	660412,673	1129334,924	439,289	Check	-0,801	-0,843	1,163
404_LA	1390,003	-1294,919	661518,12	1129467,27	443,469	Check	-0,003	-0,797	0,797
1214A	3086,608	-2630,03	670245,08	1119189,06	455,04	Check	0,392	-1,107	1,174
1219-A	5524,258	-72,727	688229,34	1131847,12	556,36	Check	0,742	-0,766	1,066
1217-B	251,09	-536,918	655460,09	1135520,46	463,37	Control	0,91	-0,003	0,91
1208-B	8077,284	-4881,194	698162,11	1099157,67	354,69	Control	0,716	-0,165	0,734
1220-A	6951,098	-309,846	696514,09	1128652,02	685,132	Control	0,902	-0,014	0,902
9206-A	6459,642	-2129,821	691420,57	1118077,46	543,84	Control	0,358	-0,171	0,396
1204-C	6323,174	-8306,107	683271,7	1080336,73	260,1	Check	0,826	-0,098	0,831
1207-C	5496,233	-5700,135	681252,74	1097369,37	415,17	Control	0,767	0,021	0,767
1210-A	2702,635	-4215,071	665856,54	1109969,16	514,82	Control	0,365	-0,238	0,436
9202-A	4930,841	-7171	676015,75	1089058	365,39	Check	0,159	-0,683	0,701
9008-A	1755,544	-1763,243	663181,33	1126142,48	441,14	Check	0,456	-0,383	0,596
1223	499,59	-2201,912	654972,45	1125015,25	414,43	Check	0,41	-1,034	1,112
1215F	4027,376	-1090,039	677824,96	1127469,74	532,382	Check	0,624	-0,998	1,177

Fuente: Elaboración propia. 2013

5.1.2.3 Resultados con 9 GCP y 18 GVP

En la Figura 5.2 se puede observar la distribución de los 9 GCP a lo largo de toda la imagen identificado con los colores amarillo y anaranjado. Para los puntos GVP están mejor distribución en la imagen identificados de color aquamarine y cyan.

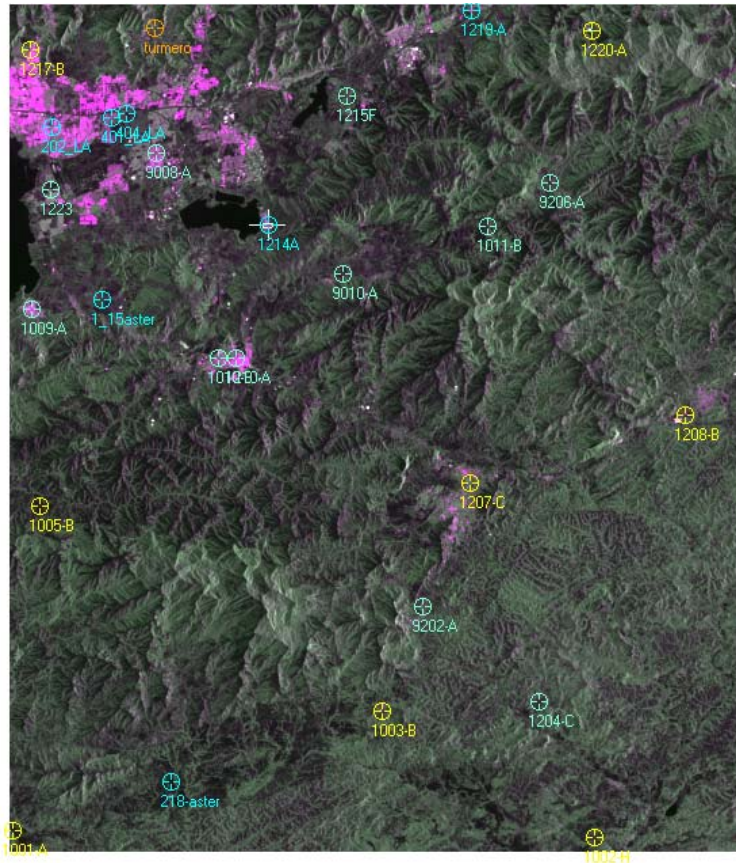


Figura 5.2. Distribución de los 9 GCP y los 18 GVP
 Fuente: Elaboración propia. 2013

Al evaluar los errores individuales de cada uno de los GCP, como se detalla en la tabla 5.5, cada uno de sus residuales para las componentes x y y , y el RMS de los mismo puntos están por debajo de 1,99 pixel, apreciándose que el Residual en su máximo valor en x fue de 0,91 pixel y en y fue de 0,556, y el RMS de 0,912 aportado respectivamente por los puntos 1217-B, 1002-H y de nuevo por 1217-B. Ahora para los GVP se aprecia sus residuales en sus componentes x y y , y el RMS del los mismos punto están por debajo de 1,99 pixeles, apreciándose que el Residual en su máximo valor en x fue de 0,857 pixel y en y fue de -1,152, y el RMS de 1,217 aportado respectivamente por los puntos 1010-B y en el resto de los errores por el 1214A.

Tabla 5.5. Residuales y RMS de cada punto de los 9 GCPs y 18 GVPs.

Nombre	Coordenadas Imagen		Coordenadas de Referencia GNSS			Tipo Punto	Residual		RMS E _{SAR}
	X	Y	X	Y	Z Ref		X	Y	
1001-A	35,623	-9827,53	642786,75	1078880,5	304,91	Control	0,377	0,341	0,508
218-aster	1936,253	-9246,02	655176,985	1080068,37	290,44	Check	0,747	-0,57	0,939
1003-B	4454,314	-8407,76	671574,46	1082071,63	353,84	Control	0,686	-0,298	0,748
1002-H	6993,802	-9921,715	685444,96	1069582,21	199,62	Control	0,198	0,556	0,59
1005-B	361,179	-5970,092	649121,02	1102180,1	691,86	Control	-0,179	0,077	0,196
1009-A	259,206	-3621,339	651715,59	1116623,17	434,34	Check	-0,206	-0,02	0,207
1010-B	2500,143	-4207,26	664620,63	1110269,96	520,58	Check	0,857	-0,286	0,903
9010-A	3988,145	-3214,239	674863,36	1114520,69	602,8	Check	-0,145	-0,132	0,197
1011-B	5718,048	-2637,214	685907,49	1115960,28	816,91	Check	-0,048	-0,298	0,302
1_15aster	1108,274	-3510,457	657059,876	1116245,836	433,79	Check	0,726	-0,139	0,739
turmero	1736,016	-281,346	664806,554	1135257,394	516,77	Control	-0,016	-0,247	0,248
202_LA	514,5	-1465,376	655970,295	1129500,691	421,099	Check	0,5	-0,11	0,512
401_LA	1220,801	-1350,883	660412,673	1129334,924	439,289	Check	-0,801	-0,888	1,196
404_LA	1390,003	-1294,919	661518,12	1129467,27	443,469	Check	-0,003	-0,842	0,842
1214A	3086,608	-2630,03	670245,08	1119189,06	455,04	Check	0,392	-1,152	1,217
1219-A	5524,258	-72,727	688229,34	1131847,12	556,36	Check	0,742	-0,811	1,099
1217-B	251,09	-536,918	655460,09	1135520,46	463,37	Control	0,91	-0,048	0,912
1208-B	8077,284	-4881,194	698162,11	1099157,67	354,69	Control	-0,284	-0,21	0,354
1220-A	6951,098	-309,846	696514,09	1128652,02	685,132	Control	0,902	-0,059	0,903
9206-A	6459,642	-2129,821	691420,57	1118077,46	543,84	Check	0,358	-0,216	0,418
1204-C	6323,174	-8306,107	683271,7	1080336,73	260,1	Check	0,826	-0,143	0,838
1207-C	5496,233	-5700,135	681252,74	1097369,37	415,17	Control	0,767	-0,024	0,767
1210-A	2702,635	-4215,071	665856,54	1109969,16	514,82	Check	0,365	-0,283	0,462
9202-A	4930,841	-7171	676015,75	1089058	365,39	Check	0,159	-0,727	0,745
9008-A	1755,544	-1763,243	663181,33	1126142,48	441,14	Check	0,456	-0,428	0,626
1223	499,59	-2201,912	654972,45	1125015,25	414,43	Check	0,41	-1,079	1,154
1215F	4027,376	-1090,039	677824,96	1127469,74	532,382	Check	0,624	-1,043	1,215

Fuente: Elaboración propia. 2013

5.1.2.4 Resultados con 5 GCP y 22GVP

En la Figura 5.3 se puede observar la distribución de los 5 GCP a lo largo de toda la imagen identificado con el color amarillo con cuatro orientados hacia las esquinas y un punto central. Para los puntos GVP están mejor su distribución en la imagen identificados de color aquamarine y cyan. A pesar de la poca cantidad de GCP el modelo de orto-rectificación queda validado por la gran cantidad de GVPs.

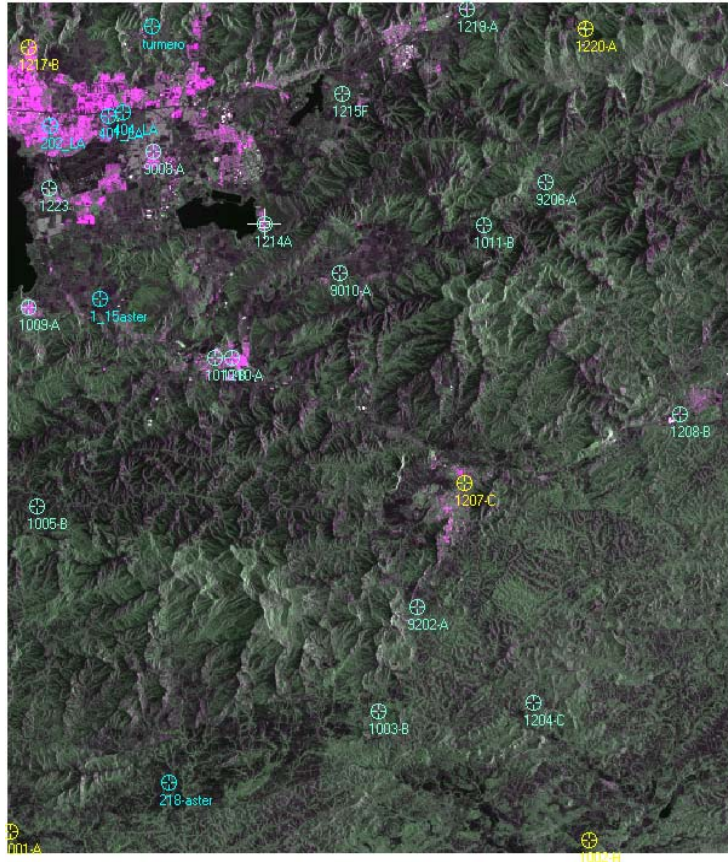


Figura 5.3. Distribución de los 5 GCPs y los 22 GVPs
 Fuente: Elaboración propia. 2013

Al evaluar los errores individuales de cada uno de los GCP, como se detalla en la tabla 5.6, cada uno de sus residuales para las componentes x y y , y el RMS de los mismo puntos están por debajo de 1,99 pixel, apreciándose que el Residual en su máximo valor en x fue de 0,91 pixel y en y fue de 0,414, y el RMS de 0,93 aportado respectivamente por los puntos 1217-B, 1002-H y de nuevo por 1217-B. Ahora para los GVP se aprecia sus residuales en sus componentes x y y , y el RMS del los mismos punto están por debajo de 1,99 pixeles, apreciándose que el Residual en su máximo valor en x fue de 0,857 pixel y en y fue de -1,294, y el RMS de 1,43 aportado respectivamente el primero por el punto 1010-B y en el resto de los errores con el punto 1214A.

Tabla 5.6. Residuales y RMS de cada punto de los 5 GCPs y 22 GVPs

Nombre	Coordenadas Imagen		Coordenadas de Referencia GNSS			Tipo	Residual		RMS
	X	Y	Este	Norte	Z Ref	Punto	X	Y	E_{SAR}
1001-A	35,623	-9827,53	642786,75	1078880,5	304,91	Control	0,377	0,199	0,426
218-aster	1936,253	-9246,02	655176,985	1080068,37	290,44	Check	0,747	-0,711	1,032
1003-B	4454,314	-8407,76	671574,46	1082071,63	353,84	Check	0,686	-0,44	0,815
1002-H	6993,802	-9921,715	685444,96	1069582,21	199,62	Control	0,198	0,414	0,459
1005-B	361,179	-5970,092	649121,02	1102180,1	691,86	Check	-0,179	-0,064	0,191
1009-A	259,206	-3621,339	651715,59	1116623,17	434,34	Check	-0,206	-0,161	0,262
1010-B	2500,143	-4207,26	664620,63	1110269,96	520,58	Check	0,857	-0,428	0,958
9010-A	3988,145	-3214,239	674863,36	1114520,69	602,8	Check	-0,145	-0,274	0,31
1011-B	5718,048	-2637,214	685907,49	1115960,28	816,91	Check	-0,048	-0,44	0,443
1_15aster	1108,274	-3510,457	657059,876	1116245,836	433,79	Check	0,726	-0,281	0,779
turmero	1736,016	-281,346	664806,554	1135257,394	516,77	Check	-0,016	-0,389	0,389
202_LA	514,5	-1465,376	655970,295	1129500,691	421,099	Check	0,5	-0,252	0,56
401_LA	1220,801	-1350,883	660412,673	1129334,924	439,289	Check	-0,801	-1,03	1,305
404_LA	1390,003	-1294,919	661518,12	1129467,27	443,469	Check	-0,003	-0,984	0,984
1214A	3086,608	-2630,03	670245,08	1119189,06	455,04	Check	-0,608	-1,294	1,43
1219-A	5524,258	-72,727	688229,34	1131847,12	556,36	Check	0,742	-0,953	1,207
1217-B	251,09	-536,918	655460,09	1135520,46	463,37	Control	0,91	-0,19	0,93
1208-B	8077,284	-4881,194	698162,11	1099157,67	354,69	Check	-0,284	-0,352	0,452
1220-A	6951,098	-309,846	696514,09	1128652,02	685,132	Control	0,902	-0,201	0,924
9206-A	6459,642	-2129,821	691420,57	1118077,46	543,84	Check	-0,642	-0,357	0,735
1204-C	6323,174	-8306,107	683271,7	1080336,73	260,1	Check	-0,174	-0,285	0,334
1207-C	5496,233	-5700,135	681252,74	1097369,37	415,17	Control	0,767	-0,166	0,785
1210-A	2702,635	-4215,071	665856,54	1109969,16	514,82	Check	0,365	-0,425	0,56
9202-A	4930,841	-7171	676015,75	1089058	365,39	Check	0,159	-0,869	0,884
9008-A	1755,544	-1763,243	663181,33	1126142,48	441,14	Check	0,456	-0,57	0,73
1223	499,59	-2201,912	654972,45	1125015,25	414,43	Check	-0,59	-1,221	1,356
1215F	4027,376	-1090,039	677824,96	1127469,74	532,382	Check	-0,376	-1,185	1,243

Fuente: Elaboración propia. 2013

5.1.2.5 Análisis de resultados

Los parámetros de precisión planimétrica propuesto por la ASPRS para aplicaciones de ingeniería en su Clase I plantea que el máximo residual de cada punto no podrá pasar de 0,25 mm, tanto en su ejes x como en el y , este valor grafico para la escala 1:50.000 corresponde en el terreno a 12,5 metros, recordando que al restar el error que podría arrastrarse por los puntos GNSS Diferenciales, dio que el residual máximo (E_{SAR}) no debe ser mayor a 12,47 m, que en unidades de imagen de este proyecto de investigación equivale a 1,99 pixeles independientemente en su dirección del alcance o del azimut. Al analizar las tablas 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6 cada uno de los puntos GCP's y en especial los puntos GVP's, que son los que

certifican el modelo matemático de orto-rectificación SAR y la calidad de los GCP's, están ambos y cada uno de ellos por debajo de esta especificación cartográfica para la escala establecida. Es de recordar que la distribución de los GCP's en toda la imagen (figuras 5.3), su proceso de identificación en campo versus la imagen SAR al nivel del sub-píxel (sección 4.3.2), y la precisión plani-altimétrica en el post-procesamiento de los puntos es vital para obtener un modelo preciso de orto-rectificación.

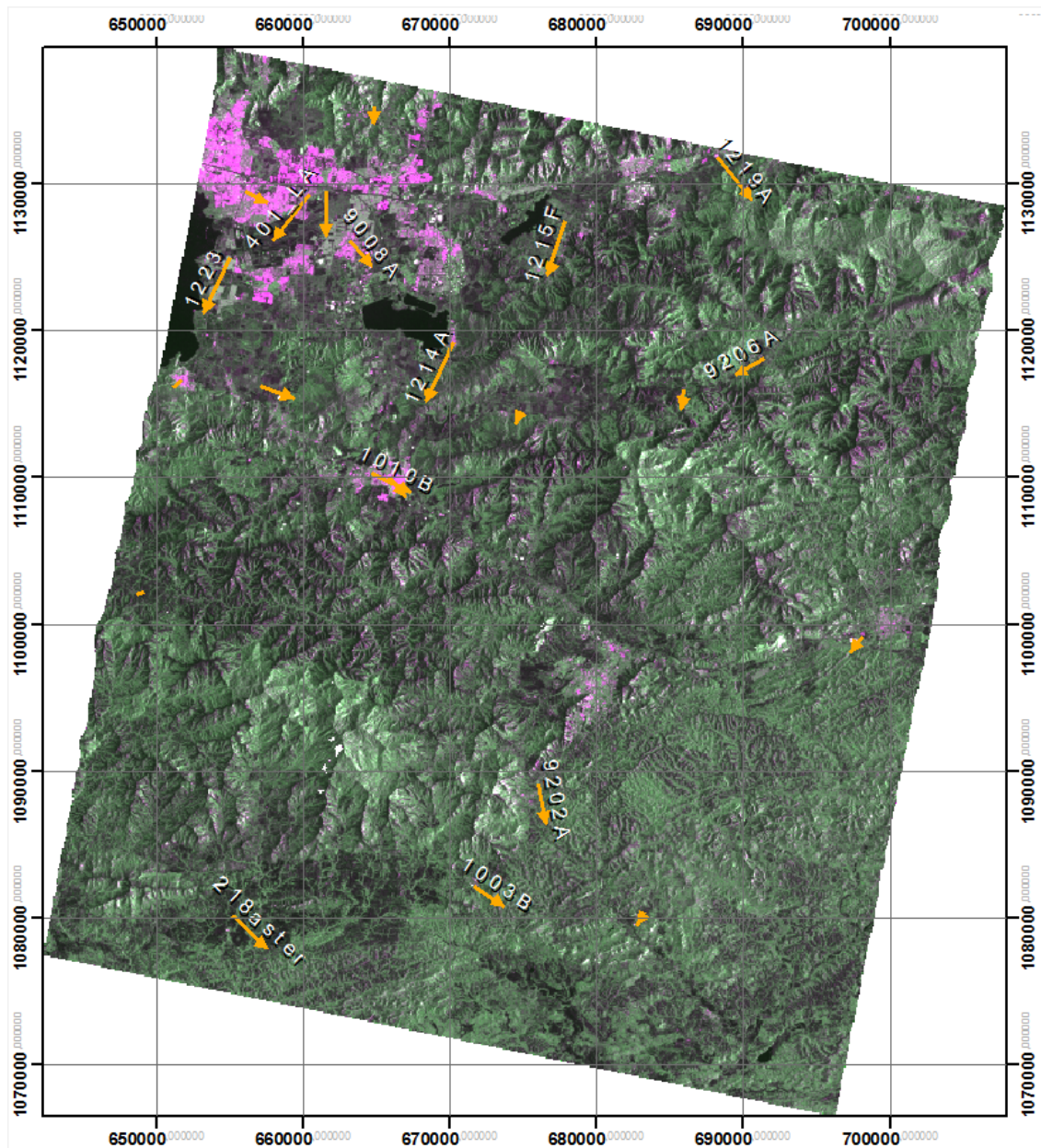


Figura 5.4. Imagen SAR resultante usando 5 GCP's y el DEM de *srtm-4*.
 Fuente: Elaboración propia. Los Vectores naranja representa el Error para cada GVP's con orientación y magnitud de la línea exagerada 500 veces. 2013

A partir de la selección de estos 5 GCP's, se tiene el modelo geométrico de orto-rectificación de la imagen SAR ya establecido y validado por los 22 GVP's, y al analizar la figura 5.4 y la tabla 5.6 se puede observar que las magnitudes de los vectores que representan el RMS de cada punto GNSS Diferencial donde se representa el Id de los puntos con mayor magnitud, en base a su orientación, la mayoría de los puntos de la zona norte de la imagen están orientados hacia el sur-oeste y los de la zona sur de imagen en su mayoría orientada hacia el sur-este.

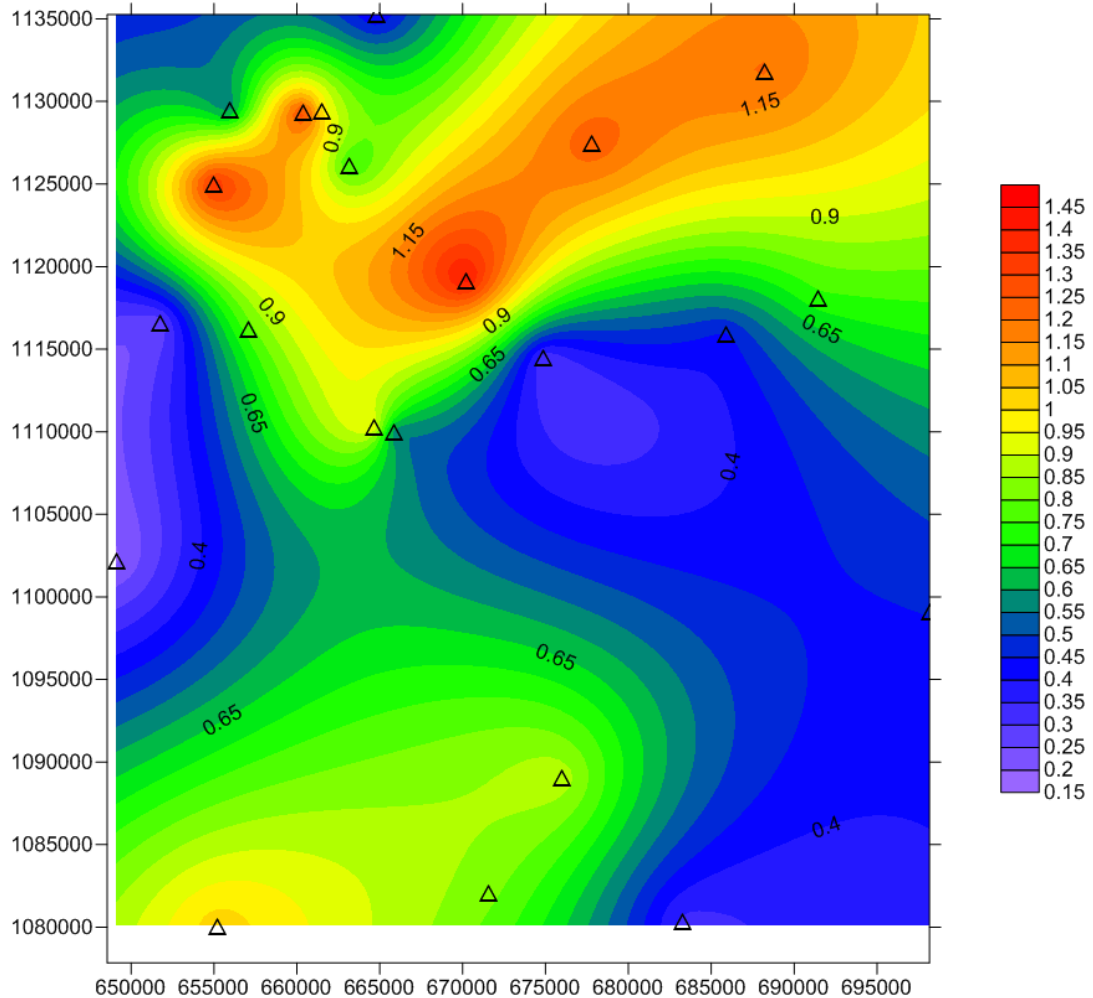


Figura 5.5. Estimación de la propagación de los Residuales de la orto-imagen SAR resultante usando 5 GCP's.

Fuente: Elaboración propia Los colores morados son errores que tienden a cero y los colores rojos tienden a 1,5 pixeles. 2013.

Ahora bien, al ver la figura 5.5 observamos el comportamiento de los errores interpolados de los RMS de cada GVP's por el método de krigging y de igual forma, no se observa algún valor que se pueda extralimitar de la norma cartográfica para la imagen SAR orto-rectificada.

Haciendo un paréntesis, al no usar puntos de control terrestres (demostrado para Radarsat-2 por Toutin, et al. 2011), no se estaría haciendo el ajuste de los parámetros orbitales, lo cual implica que se debe usar un procedimiento de validación como producto cartográfico más riguroso. Al orto-rectificar las imágenes SAR con parámetros orbitales originales y sin puntos de Control Terrestre, se debería escoger una cantidad de puntos de validación mucho mayor para el área de interés de la imagen, donde sus resultados de las diferencias posicionales entre la imagen nueva calculada y su referencia cartográfica deben cumplir con las especificaciones de precisión cartográfica, y por consiguiente, se recomienda esto como otro trabajo de investigación.

Finalmente, al analizar las tablas 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6, y las figuras 5.4 y 5.5, se determina que con un mínimo de 5 puntos de control terrestre bien distribuidos en toda el área de estudio para el proceso de ajuste de los parámetros orbitales que es empleado en el modelo orto-rectificación de imágenes SAR es más que suficiente, siendo el siguiente paso avalar la orto-imagen SAR según un DEM en diferentes condiciones de relieve.

Tabla 5.7. Parámetro de Precisión cartográfica– Errores permisibles a escala 1:50.000 y diferentes escalas mínimas en función del E_{OI} .

Aplicaciones	Parámetros del Mapa	Residual para la Escala 1:50.000	Escala mínima para el trabajo con E_{OI} de 8,122 m
Ingeniería(ASPRS I), Catastro urbano y Cartografía Básica	$\geq 0,25$ mm	12,5 m	1:32.488
Actualización, Catastro Rural	0,3 mm	15 m	1:27.074
Geomática precisa (ASPRS II)	0,5 mm	25 m	1:16.244
Geomática (ASPRS III)	0,75 mm	37,5 m	1:10.830

Fuente: Elaboración propia. 2013.

Es de considerar que el error definitivo se calculó a partir del error máximo del levantamiento Diferencial GNSS (E_{GNSS}) que fue de 0,738 m y al Residual Máximo del procesamiento de la imagen SAR en x o y (E_{SAR}) que fue de 1,294 pixel que corresponde a 8,088 m, y por consiguiente el error de la Orto-imagen (E_{OI}) dió 8,122 m. Ahora en base a lo anteriormente expuesto y a los parámetros de precisión cartográfica, tabla 5.7, se estima la escala mínima más estricta de la orto-imagen solo sobre la base a la precisión del modelo matemático de orto-rectificación es de 1:32.488. Al hacer la relación con la norma del NMAS al CMAS-90, y partiendo del RMS máximo de los GVP de 1,43 pixeles que equivale en el terreno a 8,938

m y aplicando de igual forma el máximo aporte al error del levantamiento DGNSS el Error máximo de la imagen SAR, queda en 8,968 m para un σ y ahora para el 90% resulta en 13,609 m y es conocido por ésta norma que el error en el mapa no debería ser mayor a 0,508 mm, y haciendo la relación entre valor real y valor grafico resultó que la escala mínima será 1:26.789.

Ahora al interceptar con la tabla 5.1, según la norma de la ASPRS más exigente de calidad visual y la precisión en su Clase I para la misma norma, se concluyó la escala mínima de este producto cartográfico según la precisión de los puntos de validación DGNSS con su respectiva altura cuasi-ortométrica es de 1:32.500.

5.1.3 Resultados de precisión cartográfica bajo diferentes condiciones de relieve

Esta sección validó las orto-imágenes SAR resultante en diferentes condiciones de relieve tomando puntos de verificación GVP identificados en las orto-fotos de PITSA y Cartocentro para establecer su referencia planimétrica. Solo se reflejaron tres condiciones de relieve genéricas en la zona de estudio que son la plana, ondulada y montañosa. Considerando que se tienen diferentes insumos de modelo de elevación digital (DEM), una de representación global (DEM del SRTM v2 y el ajustado *srtm-4*) y los generados de las cartas topográficas del IGVSb a una escala 1:25.000 que son de mayor detalle que la escala establecida para este estudio, cada uno de ellos se usarán para generar las diferentes orto-imágenes SAR como se explicó en la sección 4.3.7. Los GVP extrajeron los valores de altimetría de cada uno de los DEM según sea el caso, para el mismo punto su residual fue cambiando en función de la precisión altimétrica de su respectivo DEM, debido a que con la altura se determina el desplazamiento por relieve.

5.1.3.1 Zonas planas

Para esta zona se dispone de dos DEM a 1:25.000, el primero generado por métodos indirectos, donde se digitalizaron las curvas de nivel de los mapas topográfico 1:25.000 (DEM *SISDELAV*) y el otro por método directo de restitución digital fotogramétrica siendo el DEM de Pitsa *6646-I-SE*.

5.1.3.1.1 DEM de la Carta 6646-I-SE

En la figura 5.6 se aprecia la distribución de los 15 GVP identificados sobre el área cobertura correspondiente a la carta topográfica 1:25.000 de IGVSB con índice 6646-I-SE en color azul y cinco puntos GNSS de la misma área en color cian, todos con la altimetría del DEM 6646-I-SE.

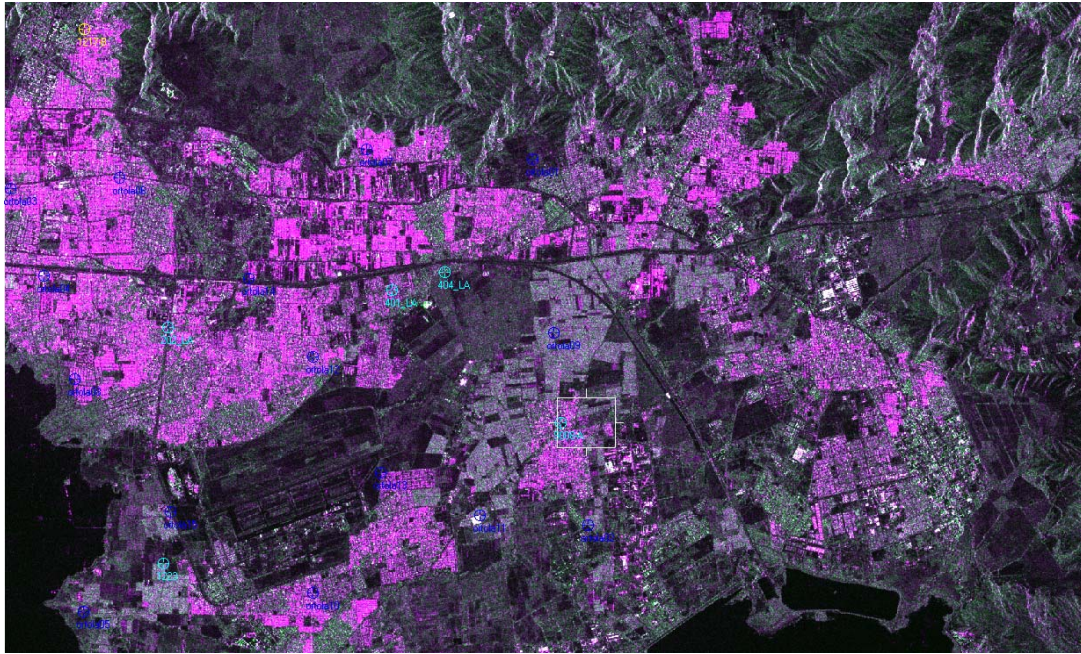


Figura 5.6. Distribución de los 20 GVPs en azul y cian. Los GCPs en amarillo.
Fuente: Elaboración propia. 2013.

En la tabla 5.8 se puede observar que el residual máximo X y Y es de -1,882 píxeles en el punto *ortola04* y el RMS máximo es de 2,168 píxeles en el punto *ortola09*.

Al observar la tabla 5.9 se puede ver para cada orto-imagen SAR los RMS de toda la muestra de los GVPs con la altimetría de los diferentes DEM's. Donde estos RMS tienen un mejor comportamiento en las cartas topográficas que con el modelo global. El DEM *SISDELAV* que fue generado por interpolación tiene un RMS mejor pero no significativo comparado con el DEM *6646-I-SE* con 1,341 y 1,4276 píxeles respectivamente. El DEM del SRTM mejorado por comparación estadística con puntos GNSS Diferencial (*srtm-4*) tiene un RMS más bajo comparado con el DEM original en su versión 2 con 1,468 y 1,958 píxeles respectivamente.

Tabla 5.8. Error de cada uno de los puntos de validación para la sección de la Imagen SAR usando el DEM 6646-I-SE en condiciones de relieve plano.

Nombre	Coordenadas Imagen		Coordenadas de Referencia Cartográfica			Residual		RMS
	X	Y	Este	Norte	Altura	X	Y	
202_LA	514,5	-1465,376	655970,295	1129500,69	421	0,5	-0,252	0,56
401_LA	1220,801	-1350,883	660412,673	1129334,92	440	-0,801	-1,03	1,305
404_LA	1390,003	-1294,919	661518,12	1129467,27	443,137	-0,003	-0,984	0,984
9008-A	1755,544	-1763,243	663181,33	1126142,48	445	0,456	-0,57	0,73
1223	499,59	-2201,912	654972,45	1125015,25	413	-0,59	-1,221	1,356
ortola01	1667,592	-942,005	663652,655	1131279,47	452,728	1,408	-0,261	1,431
ortola02	1840,009	-2081,267	663308,605	1124091,52	440	-0,009	-0,877	0,877
ortola03	18,774	-1033,106	653458,355	1132765,99	436	1,226	-0,49	1,32
ortola04	122,882	-1306,619	653747,461	1130961,66	429,211	-1,882	-0,051	1,883
ortola05	247,969	-2352,157	653260,885	1124406,44	405,925	1,031	-1,468	1,794
ortola06	361,256	-1001,113	655585,118	1132536	449,728	1,744	-0,031	1,745
ortola07	1141,934	-911,953	660473,045	1132123,24	439	-0,934	-1,512	1,777
ortola08	221,483	-1626,286	653991,459	1128876,8	411,073	0,517	-0,32	0,607
ortola09	1732,492	-1483,367	663386,373	1127891,13	449	1,508	-1,557	2,168
ortola10	971,227	-2292,639	657744,432	1123877,37	424	0,773	-1,614	1,789
ortola11	1498,375	-2051,794	661250,017	1124696,84	433,992	-1,375	-0,879	1,632
ortola12	971,259	-1558,717	658645,735	1128362,81	431	0,741	-0,143	0,754
ortola13	1186,953	-1920,046	659517,963	1125890,69	432	0,047	-1,337	1,338
ortola14	769,034	-1314,486	657716,213	1130117,57	430	0,966	-1,684	1,941
ortola15	522,269	-2040,358	655307,676	1125963,57	417,1	-0,269	0,865	0,906

Fuente: Elaboración propia. 2013.

Tabla 5.9. Error medio cuadrático de los puntos de verificación para las diferentes orto-imágenes usando diferentes DEM para el área de la carta 6646-I-SE en condiciones de relieve plano.

ORTO-SAR	RMS X	RMS Y	RMS Total
<i>sar_6646-I-se</i>	1,001	1,0179	1,4276
<i>sar_sisdelav</i>	0,8735	1,0179	1,3413
<i>sar_srtm_v2</i>	1,6725	1,0179	1,9579
<i>sar_srtm-4</i>	1,058	1,0179	1,4682

Fuente: Elaboración propia. 2013.

5.1.3.1.2 DEM del SISDELAV

En la figura 5.7 se aprecia la distribución de los 33 GVP identificados sobre el área de cobertura correspondiente a la carta topográfica 1:25.000 de IGVSB cuyos índices son 6646-I-SE, 6646-II-NE, 6746-III-NO y 6746-IV-SO en color azul y los 12 puntos DGNS de la misma área en color cian, todos con la altimetría del DEM *SISDELAV*.

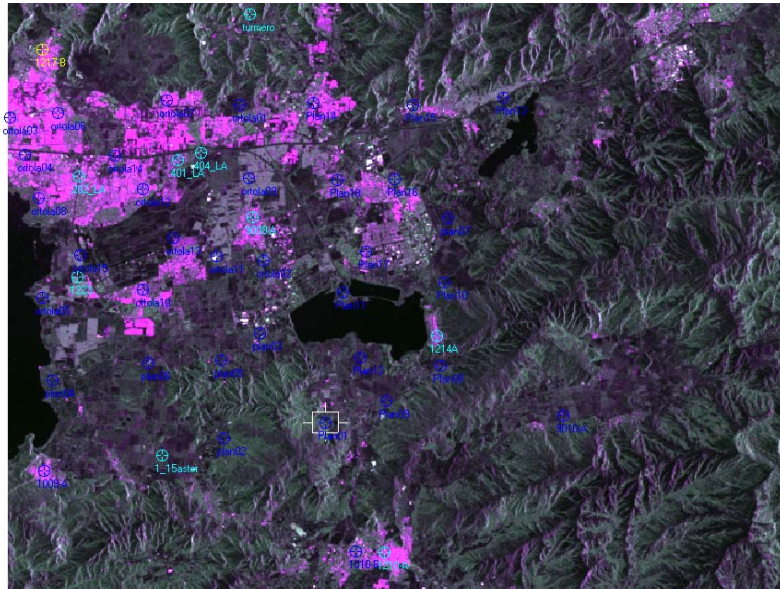


Figura 5.7. Distribución de los 45 GVPs en azul y cyan. Los GCPs en amarillo.
Fuente: Elaboración propia. 2013.

En la tabla 5.10 se puede observar que el residual máximo X y Y es de 1,984 píxeles en el punto *plan06* y el RMS máximo es de 2,534 píxeles con el punto *plan12*.

La tabla 5.11 permite observar que para cada orto-imagen SAR, sus respectivos RMS correspondiente a la zona plana que cubre el DEM de SISDELAV, donde cada uno de los GVP's calcula sus RMS con la altimetría de los diferentes DEM's. Teniendo los RMS de los GVP's un comportamiento mejor al DEM de las cartas topográficas que con los modelos globales. Al detallarlo el RMS de los GVP con altura del DEM *srtm-4* tiene un error más bajo comparado con el DEM del SRTM original en su versión 2, con 1,453 y 1,940 píxeles respectivamente. El *SISDELAV* tiene un RMS similar comparado con el *srtm-4*, con 1,368 y 1,453 píxeles respectivamente.

Tabla 5.10. Error de cada uno de los puntos de validación para esta sección de la Imagen SAR usando el DEM SISDELAV en condiciones de relieve plano.

Nombre	Coordenadas Imagen		Coordenadas de Referencia Cartográfica			Residual		RMS
	X	Y	Este	Norte	Altura	X	Y	
1223	499,59	-2201,912	654972,45	1125015,25	414,43	-0,59	-1,221	1,356
1_15aster	1108,274	-3510,457	657059,876	1116245,84	433,79	0,726	-0,281	0,779
1009-A	259,206	-3621,339	651715,59	1116623,17	434,34	-0,206	-0,161	0,262
1010-B	2500,143	-4207,26	664620,63	1110269,96	520,58	0,857	-0,428	0,958
1210-A	2702,635	-4215,071	665856,54	1109969,16	514,82	0,365	-0,425	0,56
1214A	3086,608	-2630,03	670245,08	1119189,06	455,04	-0,608	-1,294	1,43
202_LA	514,5	-1465,376	655970,295	1129500,69	421,099	0,5	-0,252	0,56
401_LA	1220,801	-1350,883	660412,673	1129334,92	439,289	-0,801	-1,03	1,305
404_LA	1390,003	-1294,919	661518,12	1129467,27	443,469	-0,003	-0,984	0,984
9008-A	1755,544	-1763,243	663181,33	1126142,48	441,14	0,456	-0,57	0,73
9010-A	3988,145	-3214,239	674863,36	1114520,69	602,8	-0,145	-0,274	0,31
turmero	1736,016	-281,346	664806,554	1135257,39	516,77	-0,016	-0,389	0,389
ortola01	1667,592	-942,005	663652,655	1131279,47	450,36	0,408	-0,261	0,484
ortola02	1840,009	-2081,267	663308,605	1124091,52	439,984	-0,009	-0,877	0,877
ortola03	19,236	-1033,537	653458,355	1132765,99	443,212	1,764	-0,921	1,99
ortola04	122,882	-1306,619	653747,461	1130961,66	432,091	-0,882	-0,051	0,884
ortola05	247,969	-2352,157	653260,885	1124406,44	402,148	0,031	-1,468	1,468
ortola06	361,256	-1001,113	655585,118	1132536	448,583	1,744	-0,031	1,745
ortola07	1141,934	-911,953	660473,045	1132123,24	449,916	1,066	-1,512	1,85
ortola08	221,483	-1626,286	653991,459	1128876,8	408,536	0,517	-0,32	0,607
ortola09	1732,492	-1483,367	663386,373	1127891,13	444,474	0,508	-1,557	1,638
ortola10	971,227	-2292,639	657744,432	1123877,37	425,364	0,773	-1,614	1,789
ortola11	1498,375	-2051,794	661250,017	1124696,84	439,275	-0,375	-0,879	0,955
ortola12	971,259	-1558,717	658645,735	1128362,81	432,111	0,741	-0,143	0,754
ortola13	1186,953	-1920,046	659517,963	1125890,69	435,278	1,047	-1,337	1,698
ortola14	769,034	-1314,486	657716,213	1130117,57	426,513	0,966	-1,684	1,941
ortola15	522,269	-2040,358	655307,676	1125963,57	416,586	-0,269	0,865	0,906
Plan01	2282,927	-3266,052	664508,911	1116293,4	472,666	0,073	-0,524	0,529
plan02	1553,646	-3381,699	659929,604	1116490,6	448,454	0,354	-1,305	1,352
plan03	1808,54	-2614,656	662461,938	1120867,47	424,761	-1,54	-1,529	2,17
plan04	318,511	-2958,186	652926,606	1120597,73	423,305	1,489	0,78	1,681
plan05	1532,405	-2815,005	660526,131	1119977,6	428,069	-0,405	-0,659	0,774
plan06	1010,816	-2831,788	657310,949	1120506,09	430,998	1,184	1,984	2,31
plan07	3161,158	-1774,974	671783,022	1124329	443,896	0,842	-1,394	1,629
Plan08	3109,497	-2853,292	670087,046	1117786,35	462,388	-1,497	0,494	1,576
Plan09	2717,715	-3111,07	667391,305	1116694,82	453,292	0,285	-0,269	0,392
Plan10	3138,868	-2242,804	671051,455	1121492,1	445,842	-0,868	-0,97	1,301
Plan11	2407,02	-2317,832	666487,965	1121927,97	439,348	-0,02	0,818	0,818
Plan12	2535,628	-2790,116	666673,592	1118872,44	442,943	-1,628	1,941	2,534
Plan13	3562,409	-887,878	675247,892	1129272,33	520,717	1,591	0,155	1,599
Plan14	2197,318	-932,103	666885,963	1130689,52	477,416	1,682	-0,589	1,782
Plan15	2908,61	-944,265	671201,931	1129741,59	495,272	0,39	-1,241	1,301
Plan16	2776,485	-1484,846	669766,644	1126585,81	460,54	1,515	-1,152	1,904
Plan17	2570,194	-2018,769	667853,15	1123572,44	450,107	0,806	-1,519	1,719
Plan18	2365,006	-1490,449	667231,94	1127060,83	462,109	0,994	-0,671	1,199

Fuente: Elaboración propia. 2013.

Tabla 5.11. Error medio cuadrático de los puntos de verificación para las orto-imágenes con diferentes DEM para el área del *SISDELAV* en condiciones de relieve plano.

ORTO-SAR	RMS X	RMS Y	RMS Total
<i>sar_sisdelav</i>	0,914	1,0179	1,3681
<i>sar_srtm_v2</i>	1,6518	1,0179	1,9402
<i>sar_srtm-4</i>	1,0369	1,0179	1,453

Fuente: Elaboración propia. 2013.

5.1.3.2 Zonas onduladas

En la figura 5.8 se aprecia la distribución de los 29 GVP, representados en color azul e identificados sobre el área de cobertura correspondiente a la intercepción espacial del DEM de *SISDELAV* con carta topográfica 1:25.000 de IGVSB con índice 6646-II-SE, 6746-III-SO y 6746-III-SE, y el DEM de *SIACARG* con las cartas 6745-IV-NE, 6745-IV-SE y 6745-IV-SO. También los 4 puntos DGNSS de la misma área en color cian con la altimetría del primero para los puntos 1010-B, 9010-A y 1210-A, y 9202A del último.

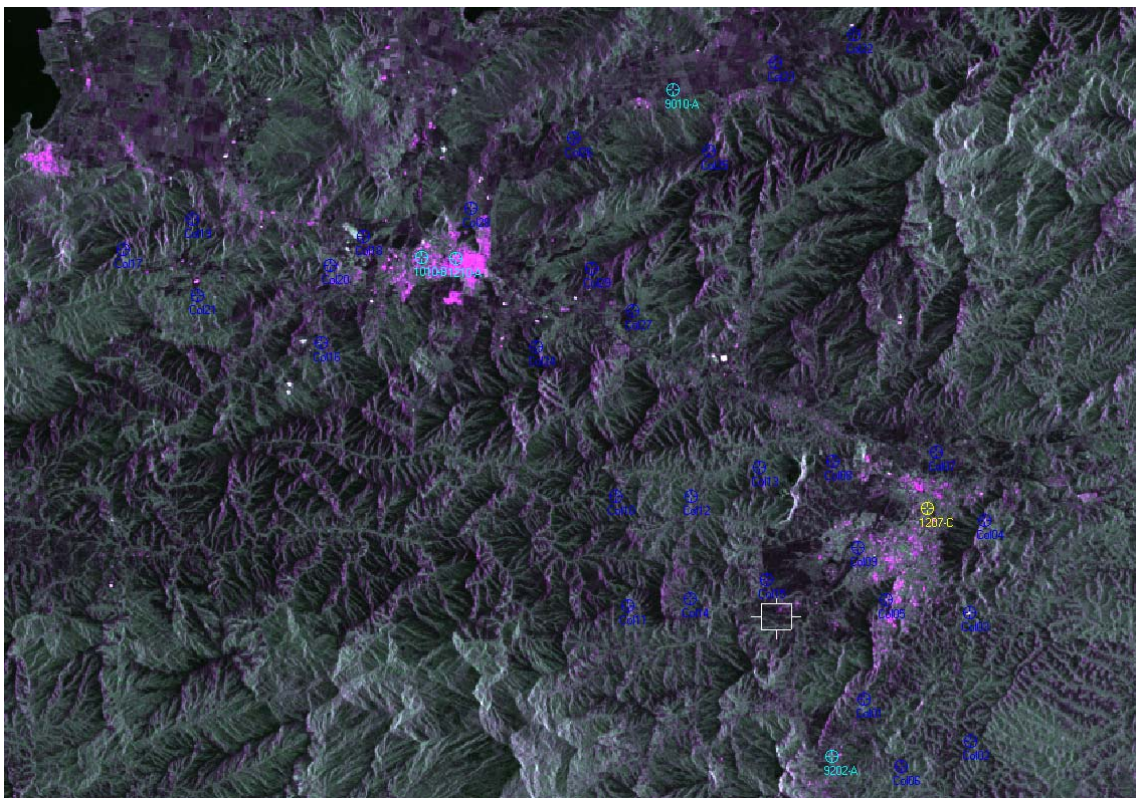


Figura 5.8. Distribución de los 33 GVPs en azul y cian. Los GCPs en amarillo.

Fuente: Elaboración propia. 2013.

En la tabla 5.12 se puede apreciar que el residual máximo X y Y es de 1,975 píxeles en el punto *col21* y el RMS máximo es de 2,669 píxeles en el mismo punto.

Tabla 5.12. Error de cada uno de los puntos de validación para la sección de la Imagen SAR usando el DEM SISDELAV y SIACARG en condiciones de relieve ondulado.

Nombre	Coordenadas Imagen		Coordenadas de Referencia Cartográfica			Residual		RMS
	X	Y	Este	Norte	Altura	X	Y	
1010-B	2500,143	-4207,26	664620,63	1110269,96	515,536	-0,143	-0,428	0,451
9010-A	3988,145	-3214,239	674863,36	1114520,69	603,931	-0,145	-0,274	0,31
1210-A	2702,635	-4215,071	665856,54	1109969,16	510,158	-0,635	-0,425	0,765
9202-A	4930,841	-7171	676015,75	1089058	361,754	-0,841	-0,869	1,209
Col02	5751,964	-7079,451	681100,616	1088594,12	401,732	-1,964	1,176	2,289
Col03	5744,717	-6314,729	681976,381	1093310,32	436,656	-0,717	-1,433	1,603
Col04	5834,68	-5769,946	682863,331	1096602	702,95	-1,68	-1,003	1,957
Col05	5247,783	-6238,607	678612,228	1094473,04	762,886	-1,783	-0,337	1,814
Col06	5337,226	-7231,064	678431,904	1088180,69	361,225	-1,226	-0,475	1,315
Col01	5117,701	-6828,159	677550,587	1090930,97	393,677	-0,701	-0,661	0,964
Col07	5550,217	-5363,569	681990,143	1099373,6	418,263	-1,217	-1,345	1,814
Col08	4937,793	-5414,622	677885,502	1099867,6	641,378	-1,793	0,96	2,034
Col09	5085,232	-5927,8	678417,764	1096489,11	440,273	0,768	0,562	0,952
Col10	3647,408	-5627,627	669595,864	1100205,42	761,1	1,592	-0,778	1,772
Col11	3721,696	-6273,999	668866,49	1096220,73	1060,559	-0,696	1,015	1,231
Col12	4094,662	-5627,018	672413,342	1099638,75	682,559	-1,662	-1,122	2,005
Col13	4502,641	-5453,474	675288,981	1100154,02	556,571	-0,641	-0,046	0,642
Col14	4088,877	-6235,028	671637,029	1095915,73	675,952	0,123	-0,543	0,556
Col15	4544,047	-6117,505	674795,03	1096023,33	499,416	0,953	-0,6	1,126
Col16	1902,233	-4715,155	660212,378	1107933,55	609,272	-1,233	-1,37	1,843
Col17	726,707	-4161,948	653341,733	1112852,48	915,081	-0,707	-0,937	1,174
Col18	2151,283	-4081,875	662647,924	1111476,16	520,492	1,717	-1,412	2,223
Col19	1138,339	-3981,098	656171,311	1113433,66	845,463	0,661	-1,415	1,561
Col20	1953,889	-4254,994	660900,85	1110724,14	769,544	-1,889	-0,906	2,095
Col21	1170,796	-4436,637	656155,178	1110511,74	535,117	-1,796	1,975	2,669
Col22	5062,949	-2883,669	681626,955	1115244,66	776,81	-1,949	1,51	2,465
Col23	4597,86	-3050,372	678782,39	1114778,23	626,947	1,14	-1,528	1,906
Col24	3178,866	-4740,246	667822,284	1106225,25	755,823	-0,866	-0,998	1,321
Col25	4203,05	-3575,859	674991,417	1112190,44	1201,126	-0,05	-0,513	0,515
Col26	3400,185	-3499,744	670980,775	1113495,92	552,561	1,815	-1,457	2,328
Col27	3750,316	-4521,822	671900,744	1106783,69	506,373	-0,316	-0,1	0,331
Col28	2790,653	-3914,116	666531,467	1111753,99	700,817	-1,653	-0,929	1,896
Col29	3503,738	-4275,879	670306,122	1108674,57	814,993	-1,738	0,083	1,74

Fuente: Elaboración propia. 2013.

Al observar la tabla 5.13 se evidencia para cada orto-imagen los RMS de toda la muestra de los GVP con la altimetría de los diferentes DEM's. Donde estos RMS tienen un comportamiento mejor con las cartas topográficas que con los modelos globales. El DEM *srtm_v2* original tiene un RMS más bajo comparado con el DEM *srtm-4* modificado con

3,954 y 4,367 píxeles respectivamente. El DEM de las cartas topográficas tiene un RMS considerablemente mejor con 1,7102 píxeles.

Tabla 5.13. Error medio cuadrático de los puntos de verificación para la Imagen SAR con diferentes Modelos Digitales de Elevación para el área en condiciones de relieve ondulado.

ORTO-SAR	RMS X	RMS Y	RMS Total
<i>sar_siacarg</i>	1,2687	1,0054	1,7102
<i>sar_sisdelav</i>	1,2687	1,0054	1,7102
<i>sar_srtm_v2</i>	3,8237	1,0054	3,9537
<i>sar_srtm-4</i>	4,25	1,0054	4,3673

Fuente: Elaboración propia. 2013.

5.1.3.3 Zona montañosa

En la figura 5.9 se aprecia la distribución de los 24 GVP, representados en color azul e identificados sobre el área de cobertura correspondiente a la intercepción espacial de la imagen SAR con las cartas topográfica 1:25.000 de IGVSB con índice 6746-II-NE, 6746-II-NO y 6746-II-SO, teniendo la primera un cubrimiento inferior del 10%.

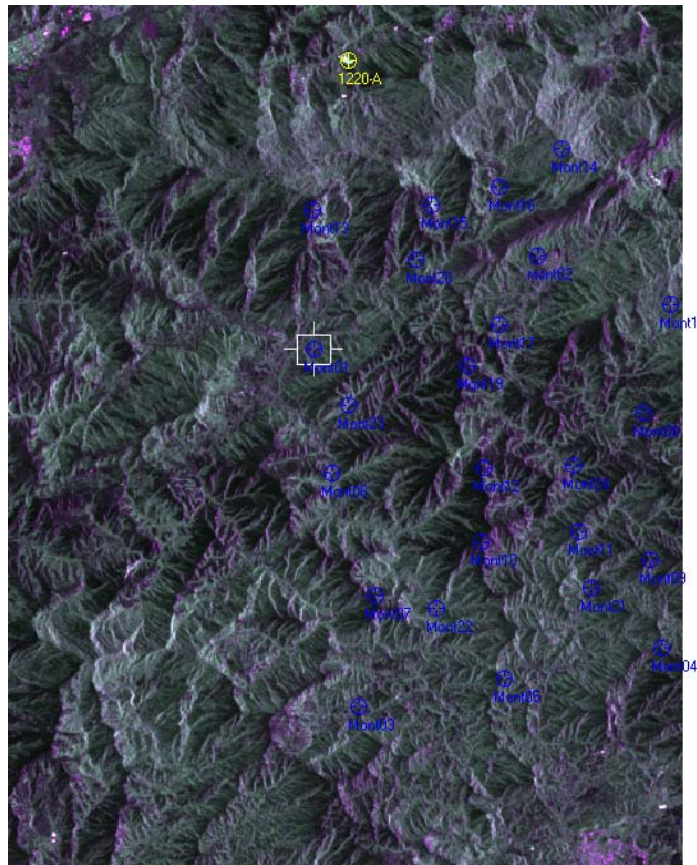


Figura 5.9. Distribución de los 24 GVPs en azul. Los GCPs en amarillo.
Fuente: Elaboración propia. 2013.

En la tabla 5.14 se puede observar que el residual máximo X y Y es de -1,920 pixeles en el punto *Mont11* y el RMS máximo es de 2,186 pixeles en el mismo punto.

Tabla 5.14. Error de cada uno de los puntos de validación para esta sección de la Imagen SAR usando el DEM de Cartocentro en condiciones de relieve montañoso.

Nombre	Coordenadas Imagen		Coordenadas de Referencia Cartográfica			Residual		RMS
	X	Y	Este	Norte	Altura	X	Y	
Mont01	6760,724	-1899,184	693520,188	1119118,49	572,641	1,276	0,301	1,311
mont02	7987,56	-1383,273	701396,379	1120807,54	778,084	-1,56	1,063	1,887
Mont03	7010,531	-3856,895	692710,442	1106788,74	489,097	-1,531	1,343	2,037
Mont04	8667,574	-3535,714	702888,471	1106767,74	780,554	-0,574	1,876	1,962
Mont05	7806,878	-3704,875	697507,155	1106788,74	702,21	-1,878	0,682	1,998
Mont06	6861,883	-2578,356	693379,208	1114808,29	502,705	0,117	1,363	1,368
Mont07	7099,045	-3250,502	693544,859	1110501,37	866,197	0,955	-0,844	1,275
Mont08	8570,068	-2248,183	704069,411	1114750,66	649,301	-0,068	0,607	0,611
Mont09	8607,721	-3050,713	703069,44	1109832,55	820,87	-1,721	0,75	1,878
Mont10	7683,52	-2953,487	697217,688	1111647,35	1066,445	-1,52	-0,336	1,557
Mont11	8212,92	-2897,85	700889,158	1111261,74	783,632	-1,92	-1,047	2,186
Mont12	7697,57	-2549,975	697940,033	1114081,87	961,894	-1,57	-1,438	2,129
Mont13	6754,261	-1129,251	693323,539	1124073,87	1438,34	-1,261	-0,447	1,338
Mont14	8123,562	-794,864	702294,474	1124397,02	1297,448	-0,562	-1,753	1,841
Mont15	7408,423	-1101,432	697817,832	1123335,23	1087,665	0,577	0,362	0,681
Mont16	7774,844	-1003,645	700443,202	1123428,29	877,118	-0,844	0,142	0,856
Mont17	7777,654	-1764,305	699689,67	1118735,89	752,54	1,346	-0,972	1,66
Mont18	8720,12	-1651,344	705391,598	1118300,53	908,217	-0,12	-1,004	1,011
Mont19	7603,717	-1989,385	698052,247	1117631,35	969,428	-0,717	-0,843	1,107
Mont20	7320,471	-1404,067	697470,237	1121480,48	644,487	0,529	-0,451	0,695
Mont21	8284,283	-3207,088	701386,772	1109184,97	443,574	-1,283	-0,59	1,412
Mont22	7434,837	-3320,751	696045,34	1109544,17	445,91	0,163	-0,604	0,626
Mont23	6952,364	-2201,257	694215,609	1117058,15	645,822	-1,364	-0,865	1,615
Mont24	8184,82	-2533,958	701553,38	1113445,1	500,997	1,18	-0,52	1,29

Fuente: Elaboración propia. 2013.

Al observar la tabla 5.15 es notorio para cada orto-imagen los diferentes RMS de toda la muestra de los GVP con la altimetría de los diferentes DEM's. Donde estos RMS tienen un comportamiento mejor con las cartas topográficas que con los modelos globales. El DEM *srtm* original tiene un RMS más bajo comparado con el DEM *srtm* modificado con 4,562 y 4,728 pixeles respectivamente. El DEM de las cartas topográficas tiene un RMS bastante mejor con 1,513 pixeles.

Tabla 5.15. Error medio cuadrático de los puntos de verificación para diferentes Modelos Digitales de Elevación en un área con condiciones de relieve montañosas.

ORTO-SAR	RMS X	RMS Y	RMS Total
<i>sar_caramacate</i>	1,1746	0,9532	1,5127
<i>sar_srtm_v2</i>	4,4611	0,9532	4,5618
<i>sar_srtm-4</i>	4,6312	0,9532	4,7283

Fuente: Elaboración propia. 2013.

5.1.4 Análisis de resultados

Como se ha mencionado anteriormente la ASPRS establece como parámetro de precisión cartográfica correspondiente para la imagen y escala de este trabajo de 2 píxeles en su Clase I, 4 píxeles en su Clase II y 6 píxeles en su Clase III, también se tiene otro estándar cartográfico dictado por el NMAS donde el error circular del mapa CMAS-90 debe estar en 25,4 m que al llevarlo a la muestra estadística correspondiente a un σ , este se traduce en que el RMS de las muestras de los GVP de la orto-imágenes SAR no debe ser mayor a 2,67 píxeles.

Al observar las tablas 5.8, 5.10, 5.12 y 5.14, y para cada orto-imágenes SAR que se generaron usando DEM de las cartas topográficas 1:25.000 del IGVSb cumplen con las normas de la ASPRS en su Clase I como producto cartográfico a escala 1:50.000, ya que cada uno de los puntos de verificación las certificaron como producto cartográfico a dicha escala al estar por debajo de 2 píxeles lineales en cualesquiera de sus componente X o Y, resultando como el máximo residual de todos los GVP's en 1,984 píxeles para todas las condiciones de relieve.

Al analizar las tablas 5.9, 5.11, 5.13 y 5.15, y todas las orto-imágenes SAR que se generaron usando DEM de las cartas topográficas del IGVSb también cumplen con las normas del NMAS como producto cartográfico a escala 1:50.000, ya que con la muestra estadística de todos los puntos de verificación las certificaron como producto cartográfico al estar por debajo de 2,67 píxeles, siendo el GVP *Col21* el de mayor RMS, esto de igual forma para las diferentes condiciones de relieve. Al observar las orto-imágenes generadas usando como insumos a los DEM's Globales original y ajustados en las zonas de relieve ondulado y montañoso, estos no cumplen con esta normas de precisión cartográfica de la del ASPRS ya que están muy por encima con valores máximos de casi 10 píxeles. En cambio, para la zona plana ambas orto-imágenes cumplen con ambas normas de precisión cartográfica y al analizar estadísticamente la orto-imagen *sar_srtm-4* tiene mejor calidad planimétrica que la orto-imagen *sar_srtm_v2* que para este ejercicio el procedimiento de ajuste del DEM del SRTM no

era necesario, pero para futuros ejemplo debería considerarse, ya que las condiciones geométrica de toma de las imágenes SAR son muy variables. Adicionalmente, al ver el comportamiento de cada uno de los RMS en la dirección Y, que corresponde a la que está orientada en el azimut, es similar para cada uno de las orto-imágenes con diferentes DEM's, y el RMS X, dirección del alcance, tienen pequeñas variaciones desde el DEM local al DEM Global al tratarse de zonas planas, pero al tratarse de zonas con relieve ondulado y montañoso el DEM Global no resuelve el efecto de desplazamiento por relieve en la dirección del Alcance, como lo son las sombras, y la inversión y contracción por relieve.

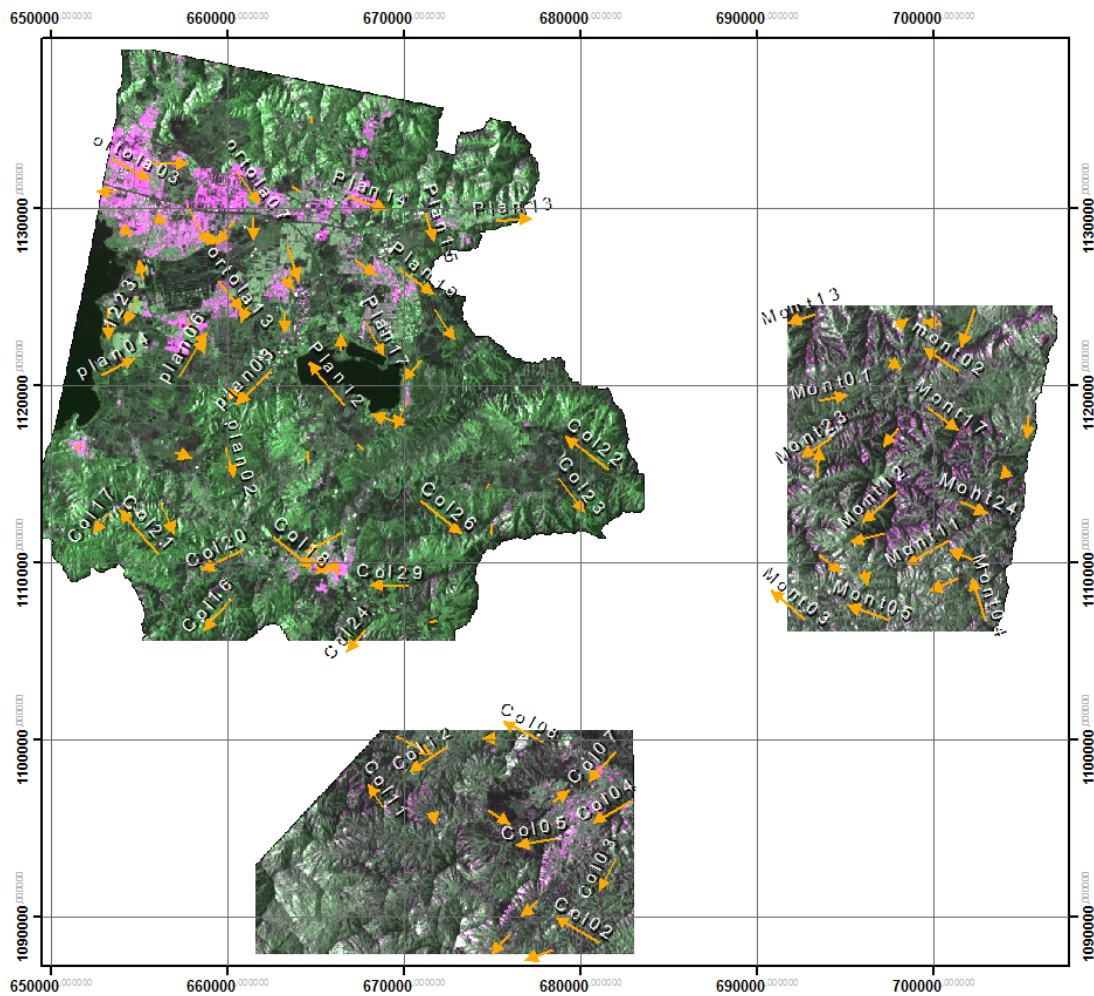


Figura 5.10. Imagen SAR resultante usando 5 GCP's, y el DEM de *SISDELAV* al nor-este, *SIACARG* al sur y Cartocentro al este. Con vectores que muestra el comportamiento del error de ésta (graficado por Daza, G., 2013). Fuente: Elaboración propia. Los Vectores naranja representa el Error para cada GVP's con orientación, y magnitud de la línea exagerada 200 veces. 2013.

Sumando a esto, en la figura 5.10 se podrá observar las tres orto-imágenes SAR obtenidas más la ubicación espacial de cada uno de los GVP's capturados sobre las cartas topográficas y

los DGNSS levantados con la altura correspondiente extraído de cada DEM de las cartas topográficas, se puede ver que las magnitudes de los vectores representa el RMS de cada punto GVP, las cuales no son mayores a la norma cartográfica establecida y las que representa mayor magnitud se ilustra el Id del punto sobre la misma, estando la mayoría de los puntos sin un patrón en su comportamiento.

Ahora bien, al ver la figura 5.11 observamos el comportamiento de los errores a interpolar por el método de krigging los RMS de cada GVP's y no se observa algún valor que se pueda extralimitar de la norma cartográfica para la coberturas de las imágenes SAR orto-rectificada, ya que no se presenta ese rojo intenso sobre la grafica.

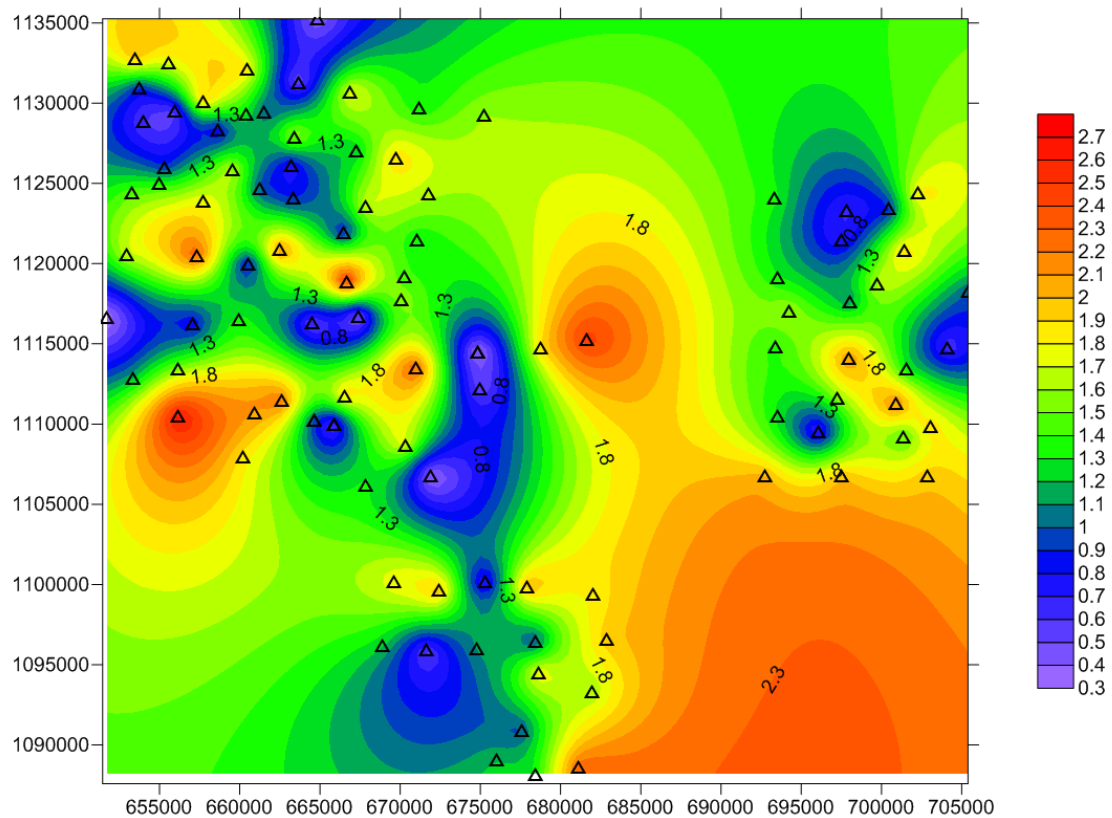


Figura 5.11. Estimación de la propagación de los Residuales de la orto-imagen SAR resultante validados con los GVP's como producto cartográfico 1:50.000.

Fuente: Elaboración propia. 2013. Los colores morados son errores que tienden a cero y los colores rojos tienden a 1,5 pixeles

Debido a esta verificación de la orto-imagen SAR, esta reforzado por un buen procedimiento basado en teorías matemáticas precisas, y para concluir, sí se usa un DEM adecuado de igual o mejor resolución al producto cartográfico a generar se garantiza las precisiones según la

norma cartográfica a escala 1:50.000, sea el de la ASPRS o el NMAS, independientemente si el ángulo de incidencia sea mayor o menor. Recalcando que el control de calidad del mapa se estableció con los valores máximos de los residuales por punto en la dirección x o y y del global planimétrico (CMAS-90) de toda la población de puntos de validación.

5.1.5 Análisis cualitativo

Previo al análisis cuantitativo de los resultados, se procedió a efectuar la comparación visual a un tercio de la escala de trabajo, en las tres zonas de validación de las orto-imágenes generadas con el DEM de detalle, y DEM Global solo en la zona plana. Observándose una buena correspondencia espacial de la información para determinar la presencia de deformaciones de píxeles, agujeros en la imagen, entre otras inconsistencias; una vez pasado el test de reconocimiento visual se revisó la calidad métrica de la imagen a un cuarto de la escala, entre los orto-fotos del proyecto PITSA y Cartocentro, y la imagen SAR orto-rectificada, en este caso se consiguió que no existían desplazamientos superiores a los estándares de tolerancia previamente conocidos. Se comprobó una total correspondencia en los elementos lineales (carreteras, vías pavimentadas, entre otros), que resulta una forma muy útil de realizar la verificación. Se comprobó también la correspondencia de relieve, causas de agua, ya que estos no deberían ser muy cambiantes por tratarse de un área montañosa.

La única diferencia significativa estuvo en el orden de 1 mm que corresponde a 50 m, y al analizar unas de la fuentes que corresponde al DEM de *SISDELAV*, se presenta una zona con una diferencia significativa cuando se comparó con el DEM de la carta *6646-I-SE* de Pitsa (ver figura 4.8), que al analizarlo corresponde a menos del 10% del área de mapa y que podría solventar a corregir los insumos con que se generó ese DEM.

Los valores de las diferencia visual medida de los orto-fotos y la imagen SAR orto-rectificada cumplen con la precisión requerida por la ASPRS y el NMAS para la escala 1: 50.000.

5.2 Sistematización de Procesos

El proceso de validación cartográfica realizada durante este trabajo de investigación, permite sistematizar criterios y procedimiento para la orto-rectificación de imágenes Radarsat-2, usando puntos de control terrestres levantados con la técnica GNSS Diferencial y un modelo matemático que estará condicionado por la herramienta de procesamiento, siendo en este

caso, el software propietario Erdas Imagine. De tal manera que garantice un producto cartográfico de calidad y se logre una homogeneidad en la generación del mismo. Por esta razón, es muy importante hacer la comprensión y el control, tanto del proceso geométrico completo y de los errores resultantes. Es así que se muestra (figura 5.12) una secuencia de pasos que son esquematizados en la forma siguiente:

1. Establecer el propósito que se le dará a la imagen como producto cartográfico que definirán directamente la escala del mapa.
 - 1.1. Ajustarse a criterios de precisión cartográficas establecido por el ente responsable en materia de cartografía del país o en su defecto a la norma internacional.
 - 1.2. Definir la Calidad Visual: La ASPRS establece que el menor elemento identificable de un mapa está comprendido entre 0,2 – 0,3 mm y relacionar con la resolución espacial de la imagen.
2. Verificar la calidad de cada uno de los insumos.
 - 2.1. Unificar los insumos a la proyección y datum del producto cartográfico a generar, ya que el uso de parámetros de transformación inadecuado aumenta la inexactitud del producto de salida. El Datum de salida debe ser SIRGAS-REGVEN.
 - 2.2. De la Imagen SAR:
 - 2.2.1. Verificar la apariencia de la imagen y el ángulo de toma para descartar la pérdida de datos debido al efecto de saturación, la cual podría interferir en la identificación de los puntos de control.
 - 2.2.2. Imagen Radarsat-2 en formato .xml con su correspondiente archivo Geotiff y auxiliares, donde se especifica toda su metadata. Fecha de adquisición, resolución espacial en la dirección del alcance y azimut, resolución radiométrica, polarización de cada banda, ángulo de incidencia local, longitud de la onda y el modelo de proyección sobre el plano del alcance terrestre.
 - 2.2.3. Conceptualizar espacialmente si la imagen fue adquirida en órbita descendente o ascendente y la dirección de emisión del pulso.
 - 2.3. Del DEM:
 - 2.3.1. En la medida de lo posible, el tamaño del píxel del DEM debe estar acorde a una precisión que esté vinculada a la escala del producto cartográfico a generar.

- 2.3.1.1. Un DEM de menor detalle para la orto-rectificación de la Imagen SAR, solo será válida para zonas planas, y si se poseen suficientes puntos DGNSS para hacer un ajuste y aumentar su precisión de la orto-rectificación.
 - 2.3.1.2. Según la precisión del producto resultante, las condiciones del terreno y la geometría de adquisición de la Imagen se podría usar la altitud media.
 - 2.3.2. Verificar los vacíos de información y definirlos como No Data. Se recomienda hacer interpolación con previa evaluación de las condiciones del relieve.
 - 2.3.3. Comprobar la calidad geométrica y visual del mismo, así como la cobertura completa de la imagen.
- 2.4. De los puntos de control y validación:
- 2.4.1. Distribuir los GCP uniformemente en toda la imagen y de igual forma los GVP pero manteniendo la distancia con los primeros.
 - 2.4.2. Caso ideal de la selección de los GCP en una imagen de radar, debido a su complejidad en su identificación, es planificar con anterioridad la toma de la imagen y utilizar conos reflectores. Si la imagen se ha tomado ya, pueden extraerse GCP usando como referencia un shadedrelief del DEM, imágenes de satélites ópticas orto-correctadas, puntos DGNSS.
 - 2.4.3. Conceptualizar los elementos geométricos y características de los elementos sobre terreno que permitirán distinguir las diferentes estructuras naturales y antrópicas sobre el área adquirida para un proceso de identificación de los puntos a nivel del sub-píxel.
- 2.5. Para el levantamiento de puntos en campo, estos deben cumplir las mínimas precisiones requeridas del mapa que dependerán de la escala de trabajo. Ajustados a criterios de precisión establecido por el ente responsable en materia de cartografía del país o en su defecto a la norma internacional.
- 2.5.1. Por ejemplo, ser menores a un tercio que los permitidos en las normas de precisión del mapa y los puntos de validación con precisión inferior a la especificación cartográfica del mapa a evaluar.
 - 2.5.2. Al realizar levantamiento DGNSS se debe transformar la altura elipsoidal a altura cuasi-ortométrica con un Modelo Geoidal de Ondulaciones.

3. De los Modelos Matemáticos de Orto-corrección para radar:
 - 3.1. Seleccionar un método que estará en función del objetivo a alcanzar del proyecto, las características topográficas del área de estudio, formato de la imagen, las características del sensor SAR, la resolución espacial (en la dirección del alcance y acimut), la precisión del DEM y la decisión de utilizar GCP, y que el software a emplear posea el modelo correspondiente.
 - 3.2. Seleccionar el píxel de salida de la imagen orto-rectificada que como mínimo corresponde a la resolución de la imagen original y también debe estar en función a la escala de trabajo según norma de calidad visual.
 - 3.3. Ejecutar la corrección radiométrica si el proceso solicita la activación de ésta opción.
 - 3.4. Realizar el filtrado durante esta etapa para evitar re-muestreos múltiples, si el software lo permite.
 - 3.5. Aplicar el modelo matemático de re-muestreo de convolución cubica.
 - 3.6. Efectuar el proceso de orto-rectificación, una vez seleccionado todos los parámetros de entrada dependiendo del modelo matemático requerido, imagen y software.
 - 3.7. Validar estadísticamente el modelo de orto-rectificación.
4. Procedimiento de verificación del producto final como producto cartográfico para su integración a un SIG o mapa digital y unificado a un sistema de referencia.
 - 4.1. Verificar los efectos de sombra, inversión y acortamiento del relieve; calidad radiométrica; calidad geométrica con una cartografía adecuada, puntos DGNSO o con imágenes ópticas orto-rectificadas; que la imagen se haya generado completa.
 - 4.2. Verificar la precisión evaluando una muestra estadística de 20 a 25 puntos de validación (GVP), los cuales, deben estar bien definidos e identificado, a nivel del sub-píxel, por cada área de cubrimiento de la carta a la escala de trabajo previamente definida, además deben estar bien distribuidos por toda la hoja.
 - 4.3. Usar como referencia planimétrica a las cartas topográfica e imágenes certificadas a la escala igual o superior al del producto cartográfico a generar, y/o puntos DGNSO que cumpla con las precisiones. Para cada punto extraer la altimetría de DEM seleccionado para la orto-rectificación.

4.4. Realizar el control planimétrico se basa en el análisis estadístico de los errores lineales en cada uno de sus componentes y/o un error circular que corresponde a un análisis del error global planimétrico.

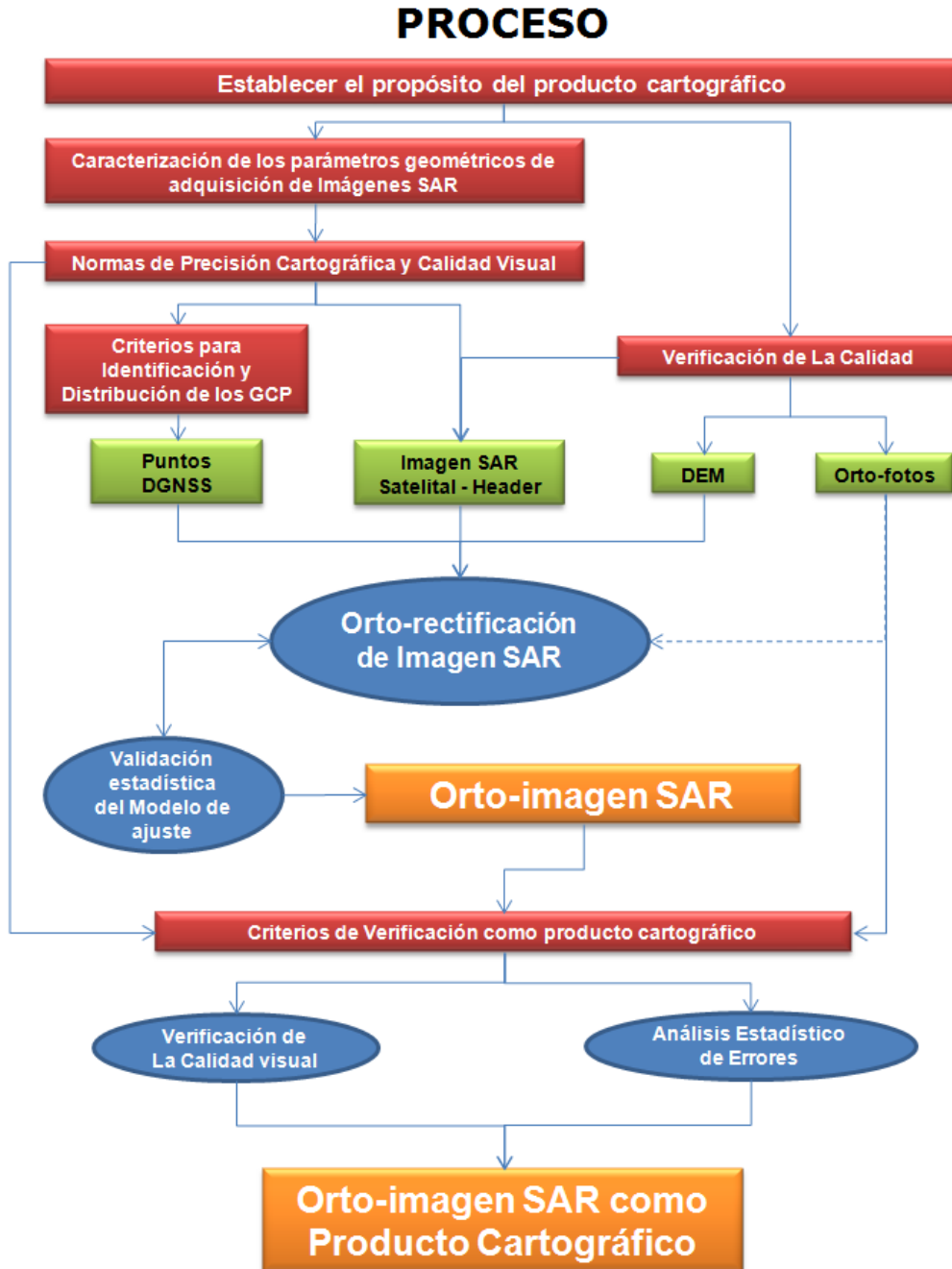


Figura 5.12. Esquema de la propuesta para el proceso de validación cartográfica de la Orto-Imagen SAR

Fuente: Elaboración propia 2013.

VI. CONCLUSION Y RECOMENDACIONES

- Cada uno de los criterios y procedimientos involucrados durante el desarrollo de este trabajo de investigación, arrojaron resultados meritorios para valorar la precisión, demostrando también que la selección y adecuación de los insumos y el modelo matemático fueron acertadas para las condiciones de relieve del área de estudio, gracias a un debido proceso de validación.

Se recomienda el estudio de la adopción de los criterios y procedimiento por parte de los organismos encargados de realizar trabajos con Imágenes SAR, cuando se tratan de satélites de 3era generación, debido a los buenos resultados obtenidos.

- La definición de la aplicación que se le dará al producto final como información cartográfica sobre la base de su escala, servirá como fundamento para establecer los parámetros de precisión cartográfica y calidad visual que deberán ajustarse al mapa, los cuales son establecidas por el ente responsable en materia de cartografía del país o en su defecto a una norma internacional.

Debido a la complejidad para su interpretación visual de la Imagen SAR, se recomienda la norma más estricta de calidad visual definida de la ASPRS que corresponde a 0,2 mm del mapa, vinculada a la resolución espacial de la imagen y a escala 1:50.000 corresponde a una resolución espacial máxima de la imagen de 10m.

De la misma forma, se recomienda valorar la precisión planimétrica lineal máxima en sus componentes x y y en base a las especificaciones de la ASPRS en su Clase I de 0,25 mm del plano para aplicaciones de ingeniería, que para escala 1:50.000 corresponde a la realidad a 12,5 m.

En el mismo orden de ideas se sugiere la norma del NMAS que usa el término de precisión planimétrica cartográfica que se expresa en error circular para el 90% de probabilidad como estadístico de comparación de 0,508 mm en el mapa que para la escala 1:50.000 corresponde a 25,4 m.

Finalmente se plantea que el organismo encargado en materia de cartografía en el país publique en un documento oficial los indicadores de calidad visual y precisión posicional del mapa para diferentes aplicaciones como ingeniería, actualización cartográfica, Geomática, etc.

- Por otra parte, al trabajar con datos de fuentes diferentes que se encuentran en distintos sistemas de referencia, es necesario homogeneizarlos, es decir, llevarlos al mismo sistema de referencia. Se observó que el sistema de transformación de 7 parámetros determinado por el modelo matemático de Bursa-Wolf y desarrollado por el LGFS-LUZ tiene precisiones intrínsecas limitadas, que son suficiente para la escala de este estudio pero podrían no ser para estudios que requieran de mayor precisión.

Se recomienda evaluar estos parámetros cuando se trabaje en un espacio geográfico diferente y a escalas superiores a 1:50.000, y en caso de que no se cumplan, desarrollar parámetros locales de transformación.

- Es importante al trabajar con datos secundarios hacer la verificación y validación de los mismos. Debido a que no se conoce con certidumbre la calidad del proceso de obtención de los mismos, más allá de la información suministrada por los autores en la obtención de dichos datos, se hace estrictamente necesaria su validación a través de los procesos de control de calidad. Estos procesos no están limitados a los datos secundarios, sino también deben ser aplicados a los datos obtenidos a través de cada uno de los procesos de cálculo, consumiendo una gran parte del tiempo del proceso general.

Se recomienda la optimización y constancia del control de calidad en cada una de las fases del proceso para garantizar un producto cartográfico confiable, eficiente y rápido.

- Existen diferencias entre los DEM locales y los DEM Globales, estando las alturas ortométricas de los primeros referidas a un Datum local altimétrico, definido por mediciones mareográficas en un momento determinado, y los últimos están referidos a una superficie equipotencial definida globalmente. De esta manera, la segunda clase de modelo se hace ideal para el establecimiento de superficies de referencia continental e incluso global, permitiendo a distintos países, tener una cartografía con la misma referencia vertical.
- En la evaluación visual de los DEM's no se detecto ninguna anomalía.

Se sugiere realizar una evaluación cualitativa y cuantitativa de la precisión del DEM.

- La comparación de los DEM's con puntos DGNSS arrojó una precisión de los mismos bastante buena, ya que éstos fueron levantados en una zona con pendiente plana debido a su factibilidad en logística y técnica de medición. Sin embargo, no resulta suficiente para determinar cómo se comporta la calidad del DEM entre los puntos.

Se recomienda comparar el DEM local con un DEM Global como el SRTM en zonas planas y si es posible, realizar la comparación con el ASTER GDEM o el ACE2 para cualquier condición de relieve.

- La cuantificación de precisión altimétrica del DEM interpolado de SISDELAV con el DEM del orto-foto, se detectó diferencias altimétricas importantes, siendo estas por posibles puntos de cota altimétricos con valor errado de las cartas topográficas usado para la interpolación.

Se recomienda hacer una revisión desde los datos originales de las curvas de nivel, puntos de cota e hidrografía con dirección de flujo del DEM de SISDELAV y realizar la interpolación nuevamente.

- Es primordial la identificación de los puntos con una ubicación al nivel del sub-píxel, que se logra calificando elementos culturales con características geométricas bien definida según las variables y características de las imágenes. Para ello:

Se analiza la retro-dispersión de la señal que está relacionada a la característica del objetivo y a la geometría de observación, ambas permiten definir la conformación de elementos geométricos ubicados sobre la superficie terrestre y su identificación en la imagen.

Se considera la longitud de onda, el ángulo de incidencia, la polarización, la dirección del alcance y de la trayectoria de la plataforma, todo este conjunto geométrico, permitió estudiar cualitativamente la rugosidad y la constante dieléctrica de los elementos sobre la superficie que se representan en la imagen de radar.

Se recomienda en alto grado, ubicar los objetos que se identificaron mejor sobre la imagen SAR como aquellos del tipo reflector de esquina y los que posean una alta constante dieléctrica que es influenciado por superficies metálicas. Cada uno de estos parámetros tiende a crear variaciones en el contraste de la imagen, lo cual, permitió diferenciar los elementos que conforman estructuras naturales y las desarrolladas por el hombre.

- El área que cubre la Imagen SAR es de aproximadamente 3.450 Km², la cual comprende zonas urbanas importantes y áreas rurales que se extienden sobre una topografía muy diversa en la zona central del país, lo cual influye por una parte en la distribución ideal de los puntos DGNSS y por otra, en los tiempos de accesibilidad a las zonas de levantamiento.

Para los puntos DGNSS se recomienda escoger los GCP y GVP de tal manera que puedan ser fácilmente accesibles y reconocidos, y que cumpla con las especificaciones técnicas para el levantamiento GNSS.

- La precisión de la orto-imagen SAR depende de:

La técnica de corrección geométrica, siendo la más precisa el de geocodificación precisa o rectificación diferencial de la imagen SAR, ya que considera el uso del modelo del sensor SAR, los parámetros orbitales y el DEM.

La precisión del DEM que es uno de los elementos que introduce el mayor error al trabajar bajo diferentes condiciones de relieve.

El ángulo de adquisición de la imagen sería un elemento controlado, pero cuando se va a programar una nueva toma hay que vincularla a la precisión del DEM. Si al considerar un único DEM y al incrementar el ángulo de vista fuera del nadir, se obtendría que el producto cartográfico final tendría una representación planimétrica cada vez más lejana a la realidad y solo hay que cuantificar hasta cuanto es aceptable para la escala de trabajo. Por ejemplo, para un DEM con precisión altimétrica de 10 m y un ángulo de observación de 45° se podría obtener un producto a escala 1:40.000.

La precisión plani-altimétrica de los puntos de control (orto-foto, en especial los DGNSS, etc) que serán usados para el proceso de definición del modelo matemático de ajuste.

La identificación de los puntos de control de terrestre y la distribución de los mismos a lo largo de toda la imagen SAR que influenciarán de igual forma en la definición del modelo matemático de ajuste.

Se recomienda para las Imágenes de Sensor Radarsat-2 solo 5 puntos de control bien identificados y distribuidos en toda la imagen.

Se recomienda hacer una selección adecuada de los datos en las zonas donde hay exceso de los mismos, utilizando sólo aquellos que permitan una mejor distribución. Así mismo, se recomienda la densificación de estaciones en las zonas de escasez de datos.

- A partir del análisis de los DEM's de las cartas topográficas adecuados a la escala requerida, se llega a la conclusión que no existe diferencias significativas para el proceso de orto-corrección cuando se usa como insumo un DEM que es generado por métodos directos o indirectos para el área de estudio.

- En el proceso de orto-rectificación, se puede considerar como última opción el uso de un DEM Global como el SRTM v-2 para corregir el efecto de relieve en la generación del producto cartográfico, claro está, aplicada a zonas planas y para imágenes con ángulo de toma igual o inferior a la de este estudio, el cual cumple con las especificaciones cartográficas exigida. La validación de las orto-imágenes *sar_srtm_v2* y *sar_srtm-4* con puntos GVP presentó una mejora de 1,958 a 1,468 pixeles respectivamente, siendo la última generada usando el DEM ajustado.

Se recomienda realizar un estudio exhaustivo de la precisión de producto final cuando se introduce el DEM Global (SRTM-4) mejorado usando puntos DGNS con altura cuasi-ortométrica, donde el ángulo de adquisición de las imágenes sea superior a la imagen de esta investigación. También se recomienda estudiar cuando se trate de zonas con diferentes condiciones del relieve y con ángulos más cercanos al nadir.

- Para el proceso de orto-rectificación de la imagen SAR completa con un DEM adecuado requiere de altos recursos de hardware, por eso es necesario el uso de Estaciones de Trabajo, p.e. Xeon con procesador Core 2 Duo de 3.00 GHz con 4,00 GB RAM.
- En general, la precisión geométrica de la orto-imagen SAR comparada estadísticamente con los puntos de verificación, y a la calidad visual con los orto-fotos, es aceptable para la escala 1:50.000, presentándose algunas características especiales debido al par de inconsistencias detectada en el DEM SISDELAV que no representa ni el 10% de toda el área evaluada.

Debido a las precisiones satisfactorias del Modelo matemático usado se recomienda adquirir el plus de la licencia para el procesamiento de la Imagen SAR.

- Evaluando la orto-imagen para la zona de estudio en el Centro del país, se concluyó que es importante tener un DEM preciso acorde con el nivel de detalle de la escala del producto cartográfico a generar. Por ello, se decide tomar como producto definitivo, donde se disponía, un DEM acorde con la escala.

Se recomienda la orto-imagen para el proceso de extracción de información cartográfica según las especificaciones del sensor y que podrán ser incluida en un SIG de acuerdo a las necesidades del usuario final.

- La evaluación de la calidad es una garantía de homogeneidad y equidad

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ariza F.J; James A. D. (2006) *Metodología de control posicional: visión general y análisis crítico*. Informe al CT-148 de AENOR. Grupo de investigación en Ingeniería Cartográfica. Universidad de Jaén. 39p.
- Castillos, D. (2007) *Actualización del Sistema de información de suelos de la depresión del Lago de Valencia SISDELAV* Tesis de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Maracay. 146 p.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental*. 3^{da} ed. Barcelona, España, Ariel Ciencias. 591p. ISBN 978-84-344-3498-1
- Corbelle Rico, E. Gil Docampo, M.L. Armesto González, J. Rego Sanmartín, T. (2006) La escala cartográfica de la imagen de satélite. Caso particular de las imágenes Ikonos y QuickBird. *Revista de Teledetección*, Número 26 p.p.18-24. Departamento de Enxeñería Agroforestal. Escola Politécnica Superior. Universidade de Santiago de Compostela.
- De Oliveira, N. (2001). Evaluation of the potential cartographic accuracy of RADARSAT and JERS-1 data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium - IEEE International* [Revista en línea], 6, 2662 – 2664. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=978122&contentType=Conference+Publicatio> [Consulta: 2010, mayo 02]
- Kapnias, D.; Milenov, P.; Kay, S. (2008) *Guidelines for Best Practice and Quality Checking of Ortho Imagery, Issue 3.0*. Institute for the Protection and Security of the Citizen, Joint Research Centre, European Commission. ISBN 978-92-79-10969-0
- Felicísimo, A. M. (1994) *Modelos Digitales del Terreno. Introducción y aplicaciones en ciencias ambientales*. [Documento en línea] Disponible: <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>. [Consulta: 2010, febrero 20]
- Guevara, V., Reyes, A. (2002) *Precisión en la Orto rectificación de Imágenes del satélite IKONOS en áreas Urbanas*. FIIDT – CPDI. Ponencia presentada en el Congreso Internacional de Geodesia y Cartografía, Caracas.
- Huang, G.M; Guo, J.K.; Lv, J.G.; Xiao, Z.; Zhao, Z. y Qiu, C.P. (2004, julio). *Algorithms and experiment on SAR image orthorectification based on polynomial rectification and*

height displacement correction [Documento en línea]. Ponencia presentada en XXth ISPRS Congress - Technical Commission II, Istanbul, Turkey. Disponible: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm2/comm2.aspx>, 139-143 [Consulta: 2010, mayo 02]

- Jacobsen, K. Konecny, G., Wegmann, M. (1997) High resolution sensor test comparison with SPOT, KFA1000, KVR 1000, IRS-1C and DPA in lower Saxony. *ISPRS*, vol. 32/4, pp. 260-269 [documento en línea] <http://www.isprs.org/proceedings/XXXII/part4/jacob43.pdf> [Consulta: 2012, enero 16]
- Jácome P., A. Aguerrevere W., G. López, M. (2001). *Sistema de Información Ambiental cuenca alta del Río Guárico (SIACARG)*. UCV-FAGRO, FII-CPDI y PDVSA-Palmaven.
- Koohaas, M. (2003) *Elementos del sistema de posicionamiento global (GPS)*. Versión 1.2. Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 36p.
- Lusch, D. (1999) *Introduction To Microwave Remote Sensing*. [Libro en línea] Center For Remote Sensing and Geographic Information Science. Michigan State University. Basic Science and Remote Sensing Initiative. 84p. Disponible: http://www.trfic.msu.edu/products/profcorner_products/Intro_Microwave.pdf [2010, Mayo 16]
- Machado, J. (2006). *Metodología para la ortocorrección y fusión de imágenes Landsat ETM+ con fines de actualización cartográfica*. Trabajo de Grado de Especialización, Universidad Central de Venezuela, Maracay, Venezuela. 158p.
- Main, J. D. (2000). Precise Ground Control Is Essential for Spatial Accuracy. *Imaging notes*, 15(04), 06-07.
- Márquez, S. Suarez, H. Gallucci N. Rivas, H. (2010) Metodología para evaluar la calidad altimétrica de los MDE globales: ASTER-GDEM, ACE2 y SRTM3 en regiones de interés petrolero en Venezuela. *Latin American Remote Sensing Week. LARS-ISPRS* pp 46-52
- Martín A., Rodríguez Y., y Hoyer M., (2001) *Impacto de la implantación del nuevo datum oficial de Venezuela (SIRGAS – REGVEN) en las actividades geodésicas de PDVSA EPM* [Documento en línea] Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas (SIRGAS), Disponible: <http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/regvenPDVSA.pdf> [Consulta: 2012, Marzo 14]

- Mansourpour, M.; Rajabi, M.A. y Rezaee; Z. (2008). *Radiometric and Geometric Correction Methods for Active Radar and SAR Imageries* [Documento en línea] National Cartographic Center, Iran. Disponible: http://www.ncc.org.ir/_DouranPortal/Documents/p8766.pdf [Consulta: 2010, Abril 01]
- Miguel, J. (2006). *Integración de ortoimágenes de Radar del proyecto Cartosur con datos ópticos provenientes de las imágenes Landsat con fines de interpretación visual*. Trabajo de Grado de Especialización no publicado, Universidad Central de Venezuela, Maracay, Venezuela. 101p
- Pernía E; Jurgenson O y López J. (1999) Nuevas Alternativas en la producción de mapas para el manejo forestal. *Revista Forestal Venezolana*. 43 (1). Universidad de Los Andes, Laboratorio de Fotogrametría y Sensores Remotos, Mérida, Venezuela. pp. 79-91.
- Prats P, Bara M, Broquetas A y Mittermayer J. (2001) Adaptación de variaciones de actitud durante el procesado SAR (Radar de Apertura Sintética) para sistemas aerotransportados. *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*, 528-532, ISBN 84-9743-001-8.
- Richards J. y Jia X (2006). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. 4^{ta} ed. Berlín, Alemania, Springer. 439p. ISBN-10 3-540-25128-6, ISBN-13 978-3-540-25128-6
- Rojas, M. y Lombardo, F. (2000). *Aplicabilidad de las imágenes Radarsat en la interpretación de la geomorfología de la cuenca del Río Tucupido, estado Portuguesa, con fines de diagnóstico físico-conservacionista*. Trabajo de Grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 105p.
- Sabino, C. 1992. *El Proceso de investigación: una introducción teórico – práctica*. ed. corr. y act. Caracas, Venezuela, Panapo. 210p.
- Salcedo, R. (1999). Estudio Piloto para la Generación de Cartografía por Sensores Remotos. “Venezuelan Cartographic Sensor Technology Study” *ESRI Proceeding* [en línea] Disponible en: <http://proceedings.esri.com/library/userconf/latinproc99/ponencias/ponencia02.html> [Consulta: 2010, mayo 05]
- Schiewe, J. (1995) Cartographical potential of MOMS-02/d2 image data. En Fritsch, D. & Hobbie, D. (eds.). *Photogrammetric Week '95*. 95-106. [documento en línea] <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo95/schiewe.pdf> [Consulta: 2012, junio 27]

- Sevilla, M. (1991, Abril) Criterios de Precisión Cartográfica. *Catastro*, Año III, Num. 8. Instituto de Astronomía y Geodesia. Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España. p.p 12-20.
- Toutin, T. (2006) *Sensor Orientation and Ortho-Rectification of High Resolution Satellite Images: Review and Application with FORMOSAT-2* [Documento en línea]. Canada Centre for Remote Sensing. http://www.gisdevelopment.net/technology/ip/thi_1.htm [Consulta: 2010, marzo 07]
- Toutin, T., Omari, K. (2011, Junio). *DTM generation with Radarsat-2 Data without GCP* [Documento en línea]. ISPRS Hannover Workshop 2011: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, Alemania, 38(4/W19), 331-339. Disponible: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-4-W19/331/2011/isprsarchives-XXXVIII-4-W19-331-2011.pdf> [Consulta: 2012, Agosto 02]
- Natural Resources Canada, Canada Centre for Remote Sensing [CCRS] (1995) *Material educativo para teledetección mediante radares* Disponible: http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/gsarcd/pdf/intro_s.pdf [Consulta: 2010, Marzo 09]
- Fundación Instituto de Ingeniería, Centro de Procesamiento Digital de Imágenes (2006) *Curso Introductorio de Geomática*. Caracas.
- Erdas 1997 – 2001. Erdas Tour Guide – Capitulo 12.
- Federal Geographic Data Committee –FGDC (1998). *Geospatial Positioning Accuracy Standards. Part 3: National Standard for Spatial Accuracy*. FGDC-STD-007.3-1998 [Documento en línea] Disponible <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>
- IGVSb (2002) Normas Técnicas para la Formación y Conservación del Catastro Nacional, Gaceta Oficial N° 5.590 Extraordinario del 10 de junio de 2002 <http://www.igvsb.gob.ve/documentos/cat007.pdf>
- IGVSb (2011) *Términos de Referencia contrato de servicios, Noviembre 2010 (Actualización 2011), Proyecto “Apoyo a la Cartografía y el Catastro Venezolanos CARCAVEN”/Unión Europea”, en base al Convenio de Financiación – DCIALA/2007/018-068* [Documento en línea] Disponible: <http://www.igvsb.gob.ve/documentos/carcaven/TERMINO.pdf> [Consulta: 2011, Septiembre 12]

- Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), Comité ISO/TC 211, Información Geográfica/Geomática, Grupo Consultivo de Desarrollo. (2010) *Guía de normas* Edición en Español. 541. ISBN: 978-607-7842-03-3
- European Petroleum Survey Group - EPSG (2003) *Coordinate Conversions and Transformations including Formulas*. Guide Note Number 7, ©EPSG, 1995-2003. [Documento en línea] Disponible: <http://www.ihenergy.com/epsg/guid7.pdf> [Consulta: 2012, Agosto 02]
- U.S. Geological Survey - USGS (1999, Noviembre) *Map Accuracy Standards Fact Sheet FS-171-99* [Documento en línea] Disponible: <http://egsc.usgs.gov/isb/pubs/factsheets/fs17199.html> [Consulta: 2012, Julio 17]

ANEXO:

**ORTO-RECTIFICACIÓN DE IMÁGENES RADARSAT - 2 CON ERDAS IMAGINE
USANDO PUNTOS DE CONTROL TERRESTRE**

1. ORTO-RECTIFICACIÓN DE IMÁGENES RADARSAT - 2 CON ERDAS IMAGINE USANDO PUNTOS DE CONTROL TERRESTRE.

Inicio

La Orto-rectificación de las imágenes de satélite RADARSAT-2 usando el ajuste de las efemérides del satélite, se ejecutará con el software propietario ERDAS IMAGINE ® 2010 del modulo de IMAGINE OrthoRadar en su versión 10.0 Demo desarrollado por ERDAS en cooperación con el Remote Sensing Technology Institute del German Aerospace Center (DLR) y GEOSYSTEMS GmbH. Este paquete de procesamiento digital de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) puede leer directamente el formato XML (prod*.xml) original de RADARSAT-2. Este tipo de formato que usan para este satélite es reconocido como un archivo maestro, el cual estructura un conjunto de datos, especificando sus efemérides, modo de adquisición, los datos raster en forma TIFF, polarización, modo de procesamiento de los datos, etc.

Este programa permite en principio realizar la geocodificación precisa o la orto-rectificación de las imágenes de SAR, usando el modelo del sensor SAR, los parámetros orbitales y el Modelo Digital de Elevaciones (DEM).

(<http://www.erdas.com/Products/ERDASProductInformation/tabid/84/currentid/1858/objectid/1858/default.aspx>).

La Orto-rectificación (OR) es el proceso mediante el cual se eliminan las distorsiones de la imagen producidas, tanto por la geometría de adquisición, como por las variaciones del terreno, ajustando las imágenes adecuadamente sobre el relieve y a una proyección cartográfica dada, donde cada punto de la imagen es visto desde el nadir. Los pasos de la orto-rectificación consiste de manera general en los siguientes pasos:

El método utilizado es de Intersección del Rango Esférico, del Cono Doppler y el Modelo de la Tierra (RDTC), que en español significa Corrección del

Terreno por el Alcance Doppler. Para la rectificación de imágenes SAR utiliza información del vector del estado de la órbita contenido en la metadata, datos del reloj del Radar (timing annotation), los parámetros de la conversión del alcance inclinado al alcance terrestre (slant to ground range) los cuales, son modelados y ajustados con los puntos de control terrestre, conjuntamente con el Modelo de Elevaciones de referencia, con la finalidad de derivar la información de geolocalización con precisión (relacionado al desplazamiento por relieve de los sensores ópticos).

En esta práctica en particular se va a realizar el ajuste de las efemérides del satélite usando los Puntos de Control Terrestres que se midieron en campo con la técnica GPS Diferencial y se seguirán los siguientes pasos:


I. Paso Apertura de Imagen RADARSAT-2:

Se procede entonces a cargar la imagen Radarsat-2, haciendo click en Menu → Open → Raster Layer

Se mostrará la interfaz *Select Layer to Add* (Figura 1) consta de tres pestañas, en la primera de *File* lo más importante es abrir el archivo a visualizar, donde primero se debe seleccionar el tipo de formato correspondiente a los datos de Radarsat-2

Files of type: RADARSAT-2 (product*.xml)

posteriormente se busca y selecciona la imagen mediante el explorador en *Look in* y siguiendo la ruta donde se encuentra almacenada la imagen, se selecciona la imagen a orto-rectificar, y en la segunda pestaña *Raster Options* se establece las opciones de despliegue del Raster y una

combinación de bandas (R,G,B)  en base a los criterios del intérprete y si la disponibilidad de la imagen SAR, es de múltiples polarizaciones, en este caso en particular la imagen tiene dos (2) polarizaciones.

Una vez abierta, aparecerá el nombre de la imagen de entrada y se desplegará la imagen Radarsat-2 en la ventana principal.

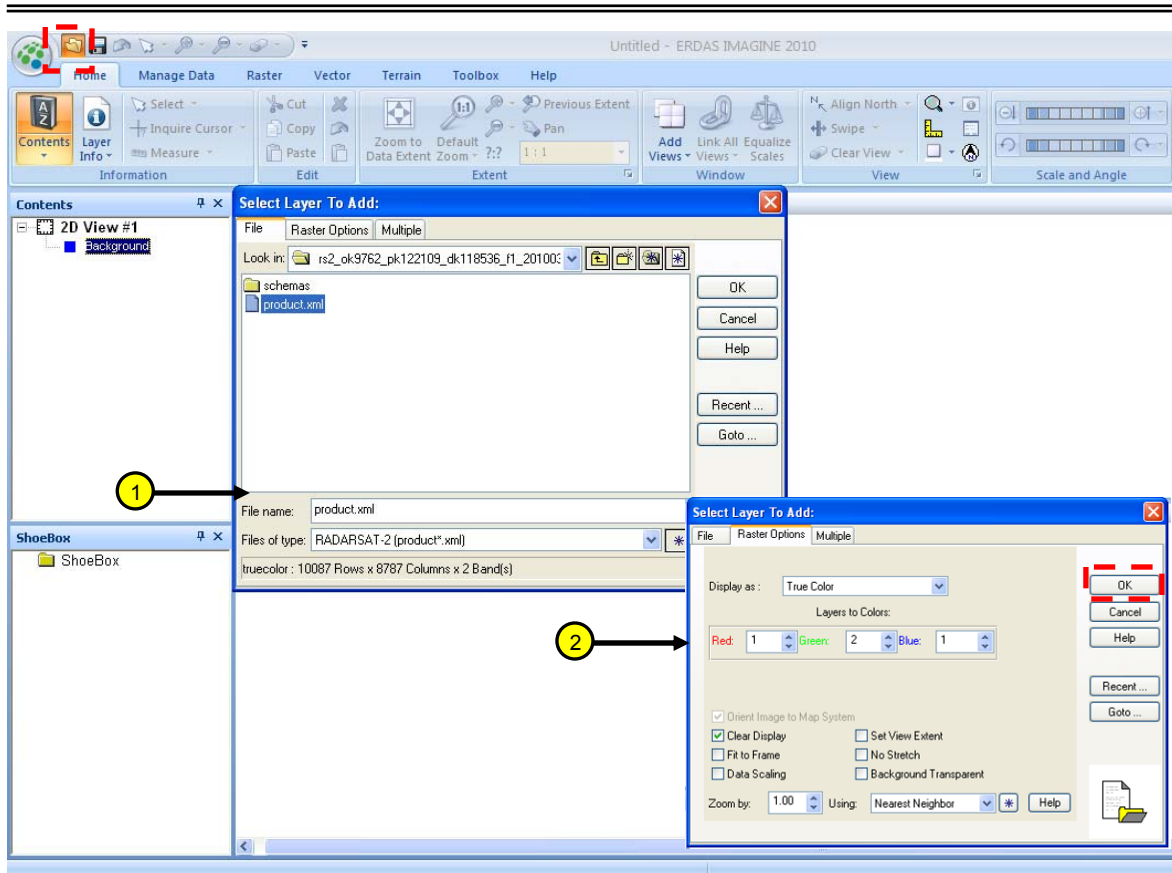


Figura 1. Apertura de Imagen RADARSAT-2

II. Paso de orto-rectificación:

Este software presenta diversas herramientas para el tratamiento de las imágenes de SAR, solo estarán disponibles algunas por tratarse de una versión Demo, como lo es el modulo de OrthoRadar que se requiere para la ejecución de este ejercicio. Y al igual que los demás se caracteriza en rectificar las Deformaciones Geométricas y del Relieve de la imagen SAR desde las coordenadas del sensor (coordenadas imagen) a unas coordenadas de proyección cartográfica.

Para ejecutar el proceso de ortorrectificación se procede acceder al menú *Raster* y luego a hacer click en la barra de herramientas sobre *Geometry Tools* → *OrthoRadar*.

Se obtiene una ventana de *Set Geo Correction Input File* se presiona el botón *Select Viewer* y luego se presiona sobre la ventana principal donde se tiene la imagen Radarsat -2 desplegada (Figura 2).

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA

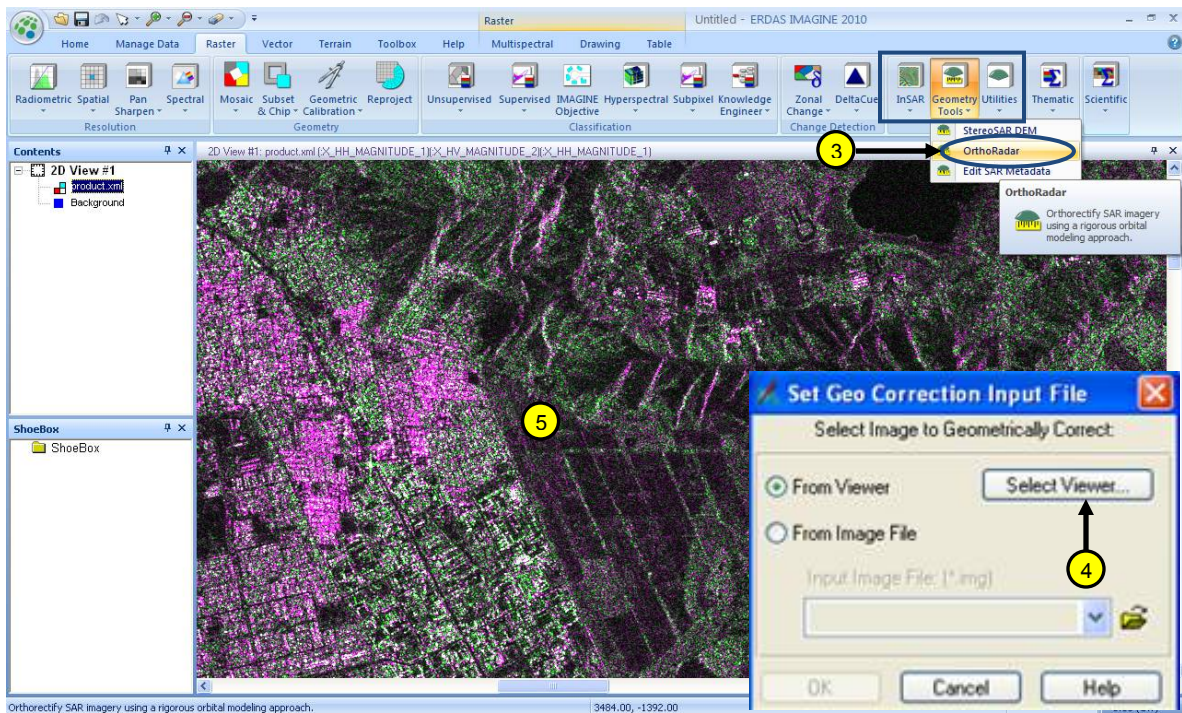


Figura 2. Menú Raster del ERDAS y de SAR.

Ahora se podrá visualizar la interfaz de herramienta de corrección geométrica *Geo Correction Tools* que se resumen en cuatro secuencias: Propiedades del modelo de Orto-rectificación para la imagen SAR, el Editor de los Puntos de Control Terrestre (GCP), Definición del Replanteo de la Nueva Imagen y por último la Calibración Geométrica.

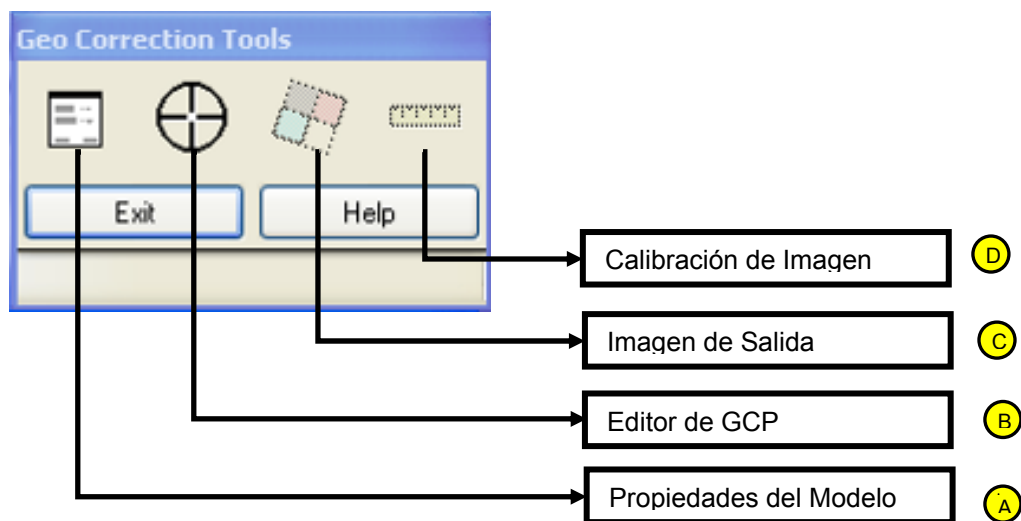



Figura 3. Herramienta para la orto-rectificación.

1. Propiedades del modelo de Orto-rectificación para la imagen SAR:

Al marcar el botón de Display Model Properties  (Figura3), se ejecutará la ventana *Generic SAR Model Properties* (Figura 4), el cual, permitirá definir las propiedades del Modelo Geométrico de Orto-corrección en cinco características relevantes representados en pestañas, correspondiente a las secciones Propiedades Generales *General*, Datum y Proyección *Projection*, el Área de Calculo *Sparse Map*, Modelo SAR *SAR Model*, y Efemérides del satélite *Ephemeris*. A continuación se describirá el uso de cada una de ellas requeridas para la Orto-rectificación.

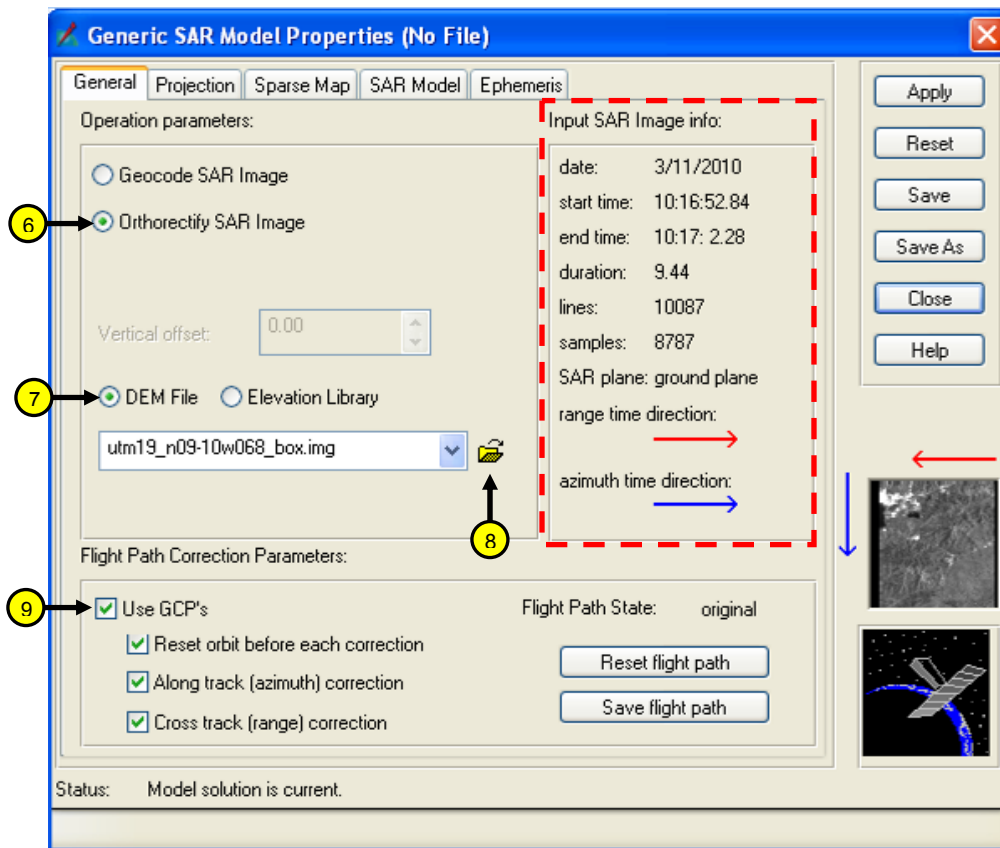


Figura 4. Definición de Parámetros del Modelo Geométrico.

a) Propiedades Generales

Esta sección (figura 4) se define el tipo de rectificación a usar en este ejercicio práctico, se activa la opción Orto-rectificación de Imagen SAR *Orthorectify SAR Image*, su desempeño primordial de esta simulación rigurosa son la corrección de altura y el efecto de lay-over producido por la imagen de RADAR. Esta opción requiere de un Modelo Digital de Elevaciones para corregir las distorsiones por

altura del terreno, haciendo click sobre la opción de *DEM File* para asignar un DEM desde una ruta específica, seleccionando el mismo para cada área de estudio de la Imagen que se considere en este proyecto. Para este ejercicio práctico se seleccionara el DEM del SRTM *utm19_n09-10w068_box.img*.

Otra selección importante se define en los parámetros de corrección del satélite en la parte inferior de la Figura 4 *Flight Path Correction Parameters*, siendo unos de elementos de mayor peso para la determinación precisa del ajuste de los parámetros orbitales y del cálculo de un modelo matemático del Sensor más preciso a partir de la lectura de los datos del header que podrán ver en la pestaña *SAR Model*. Es importante activar la opción de usar Puntos de Control Terrestres (GCP) *Use GCP's* y también las opciones de corrección de los errores en la dirección del azimut y/o dirección del rango *Along Track (azimuth) correction* y *Cross Track (range) correction* respectivamente.

Adicionalmente se puede observar los parámetros de la imagen en *Input SAR Image info*, con la fecha de adquisición *date*, hora de comienzo y terminación de la adquisición *start time* y *end time*, duración de la toma *duration*, número de líneas y columnas *lines* y *samples*. El plano de proyección de del sensor de la imagen SAR *SAR plane* que podría ser *slant* o *ground*. Dirección de la toma de la imagen *range time direction* y *azimut time direction*.

b) Definición de la Proyección:

La pestaña de proyección (Figura siguiente) es donde se especifican los datos de la proyección de la imagen resultante: Tipo de Proyección, Zona Geográfica, Datum y unidades de trabajo.

Se recomienda trabajar en el Datum geocéntrico WGS84, Proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) y las unidades del espacio de trabajo en metro.

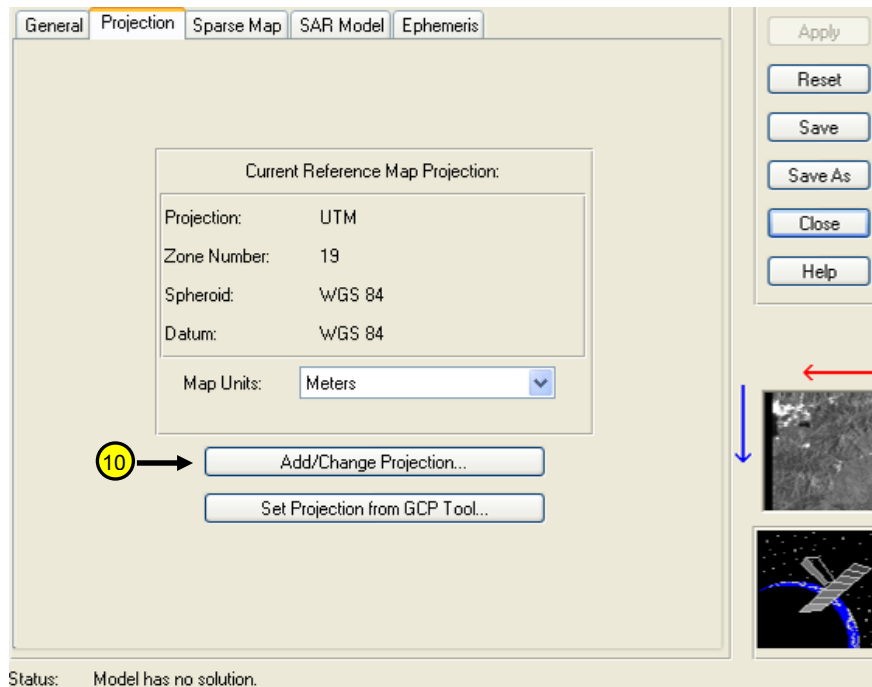


Figura 5. Proyecciones, Datum y unidades del Mapa

c) Área de Cálculo:

Esta área de cálculo considera la densidad de píxeles que se van a usar para el procesamiento de soluciones exactas para generar la nueva imagen.

La definición automática de los factores de muestra en la dirección del rango y el azimut *Range and Azimuth sampling factor* son por defecto de cálculos internos y son aceptables.

Se debe definir los Parámetros del Área de Cálculo *Sparse map parameters* que se pueden ajustar a valores (números de píxeles) bajos para definición de área pequeñas trayendo como consecuencia mejores exactitudes en la generación de la imagen nueva, o valores altos para replantear la imagen nueva a calculo de cuadrículas grandes pero se generaran con mayor error que con el anterior.

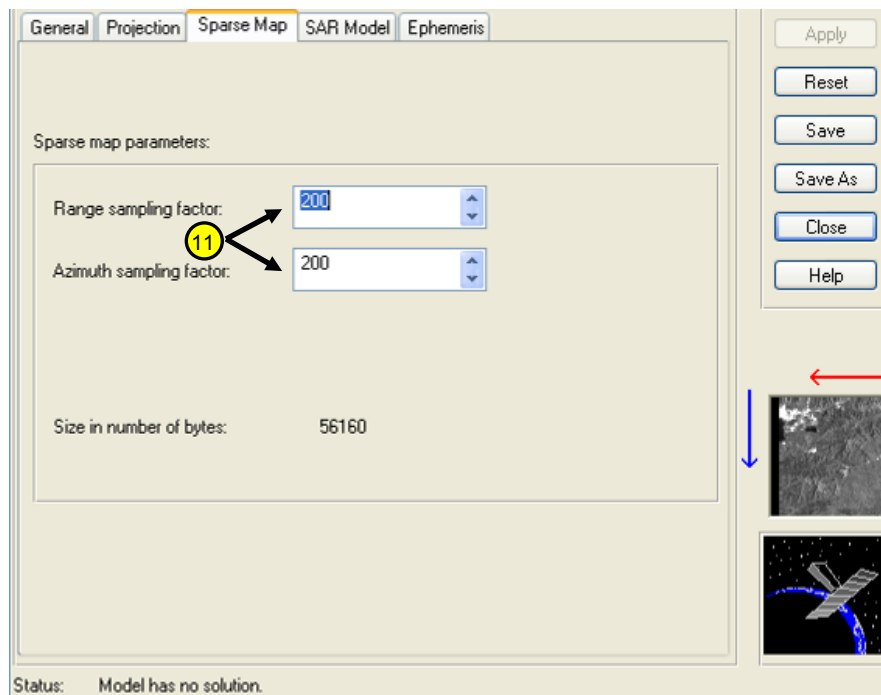


Figura 6. Área de Calculo

d) Modelo SAR:

La información de esta pestaña no es editable, solo se podrá ver algunos parámetros de la imagen SAR contenido en la metadata.

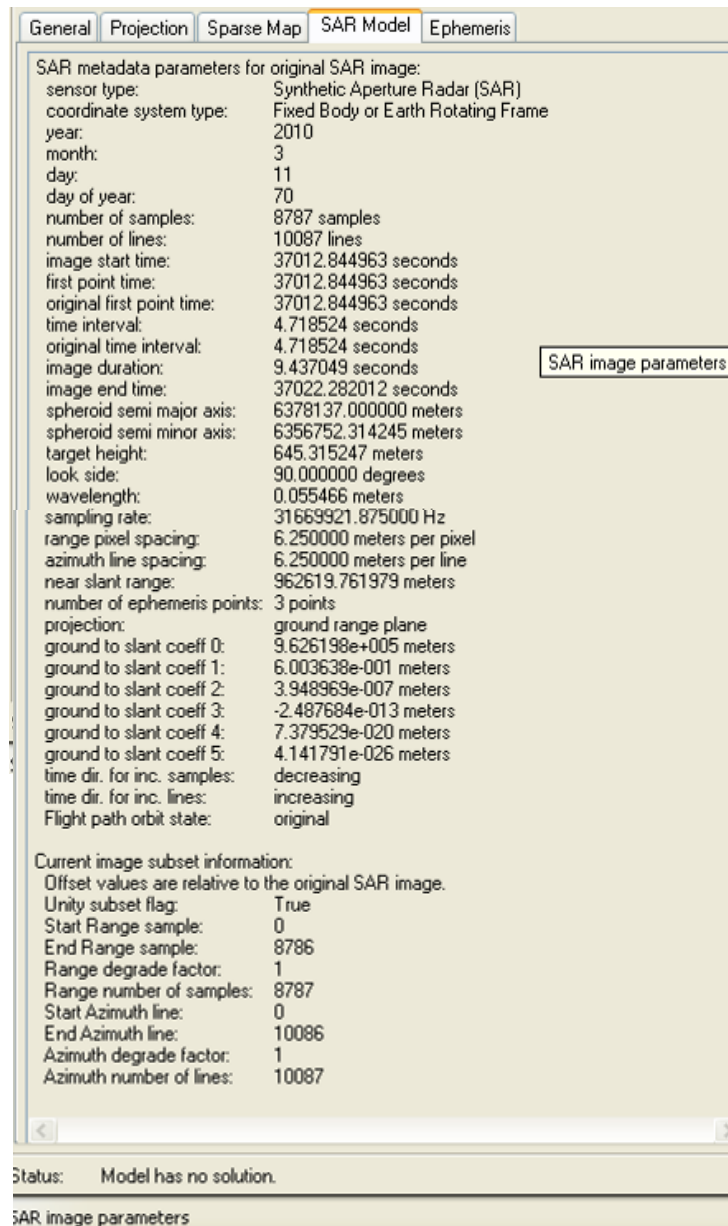


Figura 7. Metadata de la Imagen SAR

e) Efemérides del satélite:

Los datos de las efemérides se calculan en base a la posición y velocidad del satélite en el momento que la escena fue adquirida. Este dialogo es ventajoso cuando se corrigen el modelo orbital usando los puntos de control terrestre. Estos datos no son editables directamente. Donde podrá observar las efemérides de posición del satélite *Satellite ephemeris vectors* y los coeficientes del modelo del

sensor *Satellite ephemeris coefficients* que se fueron generados de un modelo matemático de los datos anteriores.

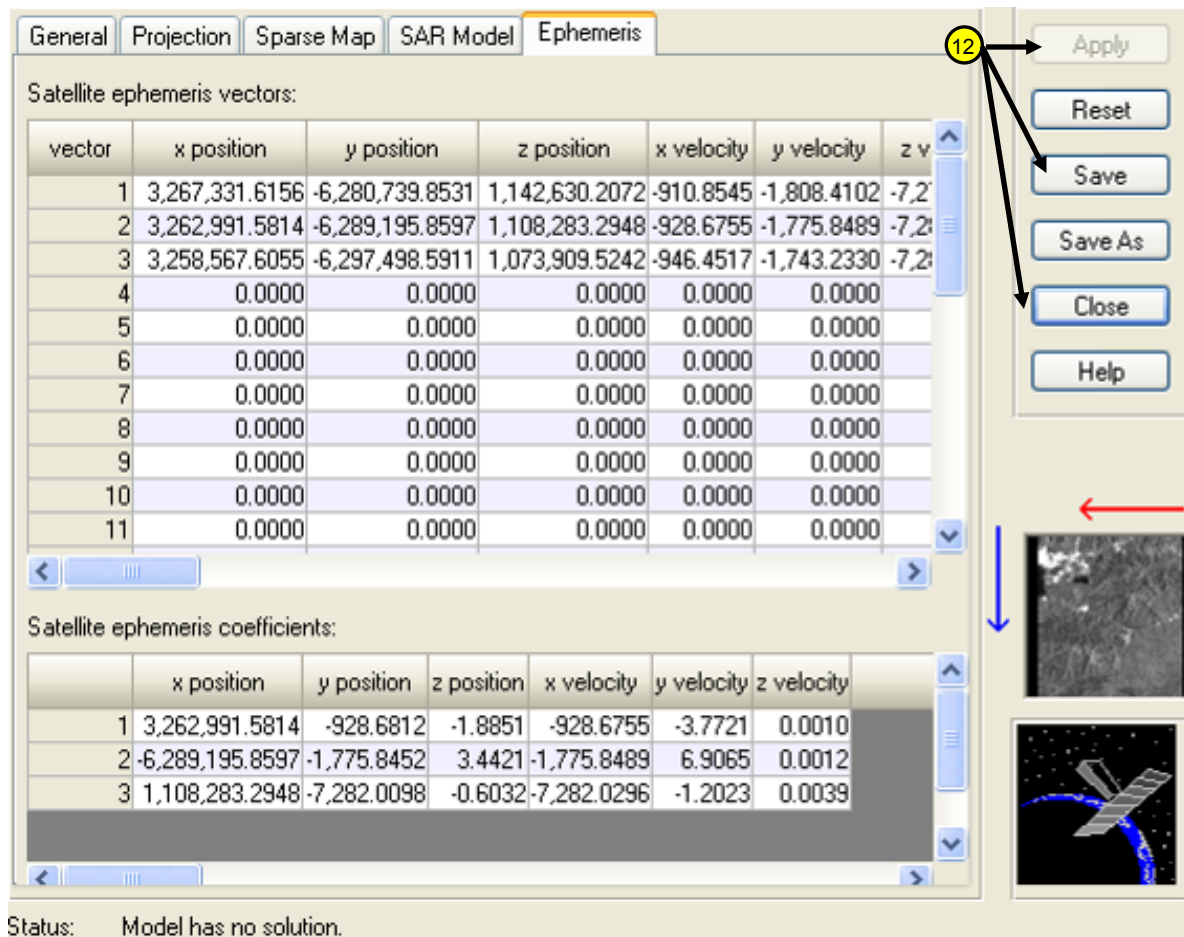



Figura 8. Parámetros orbitales.

Los parámetros seleccionados para la Orto-rectificación, los cuales podrán ser aplicados, guardados y leídos para trabajos posteriores en los botones Aplicar *Apply*, y guardar ajustes *Save* o *Save As*.

2. Editor de los Puntos de Control Terrestre (GCP)

Se recomienda marcar el botón de Editor GCP *Start GCP Editor*  (Figura3), posteriormente se ejecutará la ventana de dialogo para definir la fuente de referencia desde donde se cargaran los GCPs que serán usado para la orto-

rectificación de la imagen SAR (figura 9) y se define que los mismos serán cargados solo por Teclado *Keyboard Only*.

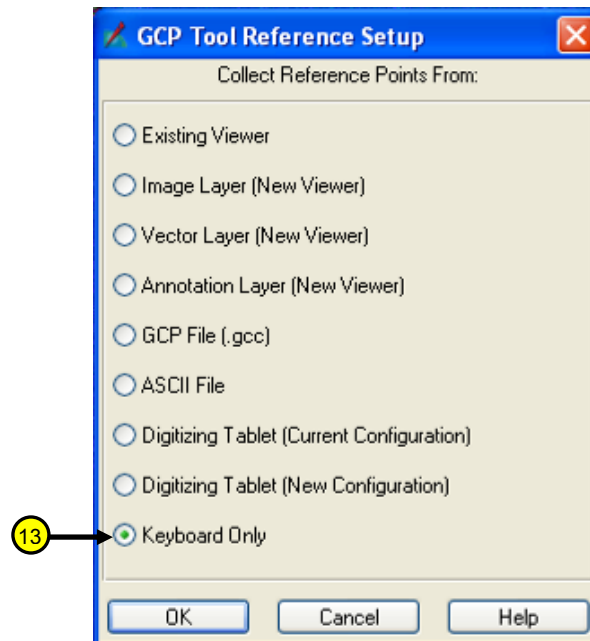



Figura 9. Modo de adquisición de los GCP.

El siguiente paso sería definir el Sistema de Coordenadas de Referencia y las unidades a la cual están definidos los Puntos de Control Terrestres. Este caso corresponde al datum y proyección definida previamente que es el mismo para los puntos medidos en campo con la técnica GPS Diferencial.

Luego se presentan las ventanas de referencia (figura 10) para ubicar los puntos sobre la imagen SAR que posee un sistema plano de referencia de entrada *X Input* e *Y Input*, cada uno será ubicado exactamente donde fue el levantamiento en campo según las características geométricas de las imágenes de Radar para su identificación a la perfección y seguidamente se transcribe las coordenadas tridimensionales de referencia sobre la tabla desde el teclado *X Ref*, *Y Ref* y *Z Ref*. Para cada punto nuevo se recomienda marcar el botón  en la ventana de herramienta para los GCPs *GCP Tool*.

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA

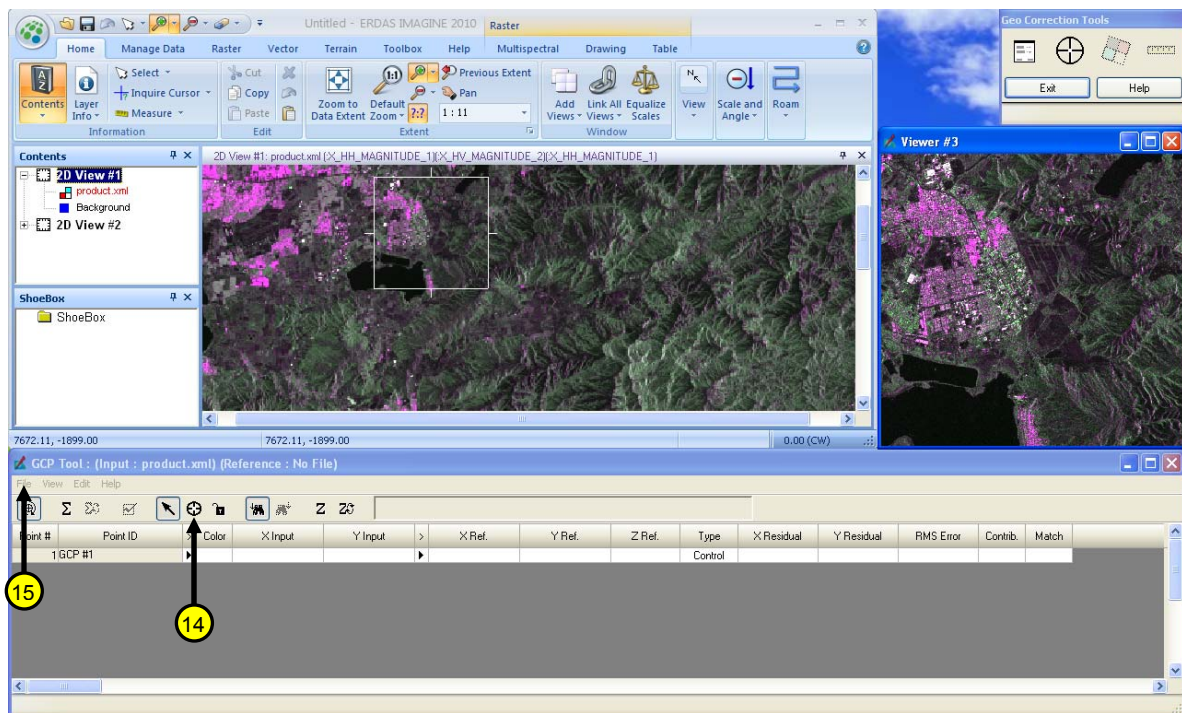


Figura 10. Ventanas interactivas para ubicación de GCP.

El paso anterior se realizo previamente, entonces en el *GCP Tool* se podría cargar estos puntos de entrada o de referencia previamente guardado y se realizará siguiendo la siguiente ruta:

Menu *File* de GCP Tool → Load Input y direcciona el archivo input.gcc

Menu *File* de GCP Tool → Load Reference y direcciona el archivo reference.gcc

Para ejecutar el calculo del modelo matematico se presionando el boton Σ que se muestra en la figura 11, y se procede al calculo del Error medio Cuadartico (RMS) de la solución. Si de igual forma se presiona el se determina la vericidad del modelo con puntos ajenos al modelo matematica calculado previamente, que cumple con la ventaja que correspondiente a una realidad fisica y nos ayuda a concluir sobre la vericidad del modelo matematica definitivo de la rectificación. Sumando a esto debemos revisar punto a punto su RMS de los Puntos de Control y Verificación Terretres *Control* y *Check* respectivamente.

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA

GCP Tool : (Input : product.xml) (Reference : reference05.gcc)

Control Point Error: (X) 0.5575 (Y) 0.4560 (Total) 0.7203

Point #	Point ID	Color	X Input	Y Input	X Ref.	Y Ref.	Z Ref.	Type	X Residual	Y Residual	RMS Error	Contrib.	Match
1	1001-A	Yellow	35.623	-9827.530	642786.750	1078880.500	304.910	Control	0.377	0.656	0.757	1.050	
2	218-aster_1	Cyan	1936.253	-9246.020	655176.985	1080068.370	290.440	Check					
3	1003-B	Cyan	4454.314	-8407.760	671574.460	1082071.630	353.840	Control	0.686	0.017	0.686	0.953	
4	1002-H	Yellow	6993.802	-9921.715	685444.960	1069582.210	199.620	Control	0.198	0.871	0.894	1.241	
5	1005-B	Yellow	361.179	-5970.092	649121.020	1102180.100	691.860	Control	-0.179	0.393	0.432	0.599	
6	1009-A	Yellow	259.206	-3621.339	651715.590	1116623.170	434.340	Control	-0.206	0.296	0.360	0.500	
7	1010-B	Blue	2500.143	-4207.260	664620.630	1110269.960	520.580	Check					
8	9010-A	Cyan	3988.145	-3214.239	674863.360	1114520.690	602.800	Check					
9	1011-B	Cyan	5718.048	-2637.214	685907.490	1115960.280	816.910	Check					
10	1_15aster	Blue	1108.274	-3510.457	657059.876	1116245.836	433.790	Check					
11	turnero-last65_aster_1	Yellow	1736.016	-281.346	664806.554	1135257.394	516.770	Control	-0.016	0.068	0.070	0.097	
12	202_LA	Blue	514.500	-1465.376	655970.295	1129500.691	421.099	Check					
13	401_LA	Blue	1220.801	-1350.883	660412.673	1129334.924	439.289	Check					
14	404_LA	Blue	1390.003	-1294.919	661518.120	1129467.270	443.469	Check					
15	1214A	Yellow	3086.608	-2630.030	670245.080	1119189.060	455.040	Control	0.392	-0.837	0.924	1.283	
16	1219-A	Yellow	5524.258	-72.727	688229.340	1131847.120	556.360	Control	0.742	-0.496	0.892	1.239	
17	1217-B	Yellow	251.090	-536.918	655460.090	1135520.460	463.370	Control	0.910	0.267	0.949	1.317	
18	1208-B	Yellow	8077.284	-4881.194	698162.110	1099157.670	354.690	Control	0.716	0.105	0.723	1.004	
19	1220-A	Yellow	6951.098	-309.846	696514.090	1128652.020	685.132	Control	0.902	0.256	0.937	1.301	
20	9206-A	Yellow	6459.642	-2129.821	691420.570	1118077.460	543.840	Control	0.358	0.100	0.371	0.516	
21	1204-C	Yellow	6323.174	-8306.107	683271.700	1080336.730	260.100	Control	0.826	0.172	0.843	1.171	
22	1207-C	Yellow	5496.233	-5700.135	681252.740	1097369.370	415.170	Control	0.767	0.291	0.820	1.138	
23	1210-A	Yellow	2702.635	-4215.071	665856.540	1109969.160	514.820	Control	0.365	0.032	0.366	0.508	
24	9202-A	Yellow	4930.841	-7171.000	676015.750	1089058.000	365.390	Control	0.159	-0.412	0.442	0.614	
25	9008-A	Yellow	1755.544	-1763.243	663181.330	1126142.480	441.140	Control	0.456	-0.113	0.470	0.653	
26	1223	Yellow	499.590	-2201.912	654972.450	1125015.250	414.430	Control	0.410	-0.763	0.867	1.203	
27	1215F	Yellow	4027.376	-1090.039	677824.960	1127469.740	532.382	Control	0.624	-0.728	0.959	1.331	

Figura 11. Cálculo del Modelo Matemático.

A medida que se edite, elimine o agregue un punto, el cuadro se irá actualizando y el RMS irá variando. La veracidad de los GCP usados influirá directamente en el cálculo de la solución del modelo geométrico.

NOTA: Guarde las modificaciones que realice en la ventana de Herramienta de GCP en la siguiente secuencia.

Menu *File* del GCP Tool → Save As Input y dirccione el nuevo archivo *. gcc

Menu *File* del GCP Tool → Save As Reference y dirccione el nuevo archivo *.gcc

Evalue la distribución de los puntos de control y de verificación según su criterio (ver Figura 12).

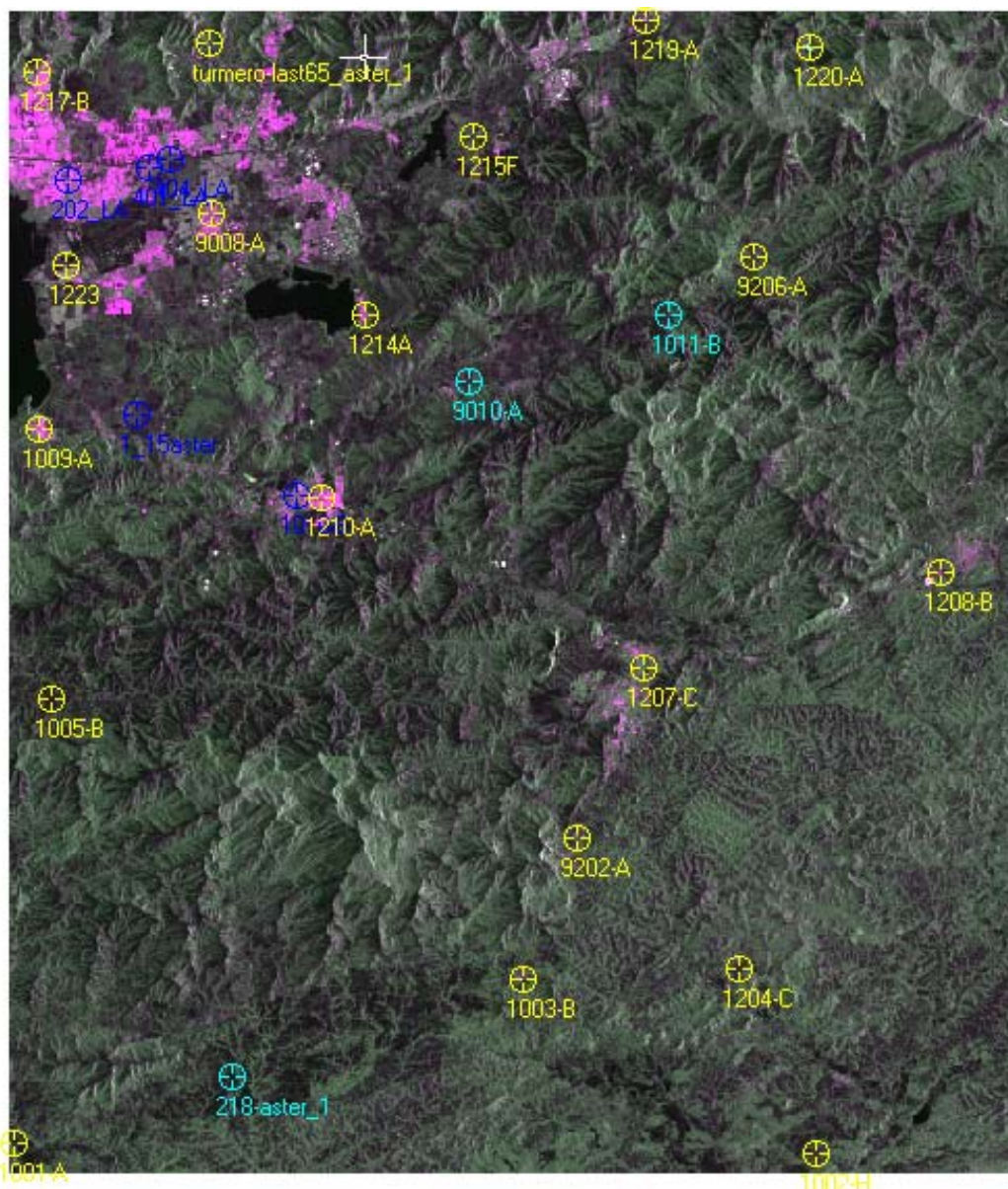



Figura 12. Evalué la distribución de los puntos de Control (amarillo) y puntos de Verificación (cyan y azul).

3. Definición del Replanteo de la Nueva Imagen

Se procede a marcar el botón de Dialogo de repanteo de la Imagen SAR *Display Resample Image Dialog*  (Figura3), luego se visualizará la ventana de dialogo (figura 13).

Aquí se podrá seleccionar una carpeta para el almacenamiento del producto y/o darle un prefijo o un sufijo al nombre del archivo de salida. Adicionalmente se

podrá verificar la proyección de la salida de la imagen a generar. Por defecto esta interface determina el área de la imagen a generada en base a la extensión de la imagen y el DEM, si lo desea se puede seleccionar una sub-escena según su interés. En este caso mmantenga el área de trabajo como el Erdas calcula por defecto.

Establecer el tamaño de la celda correspondiente a la imagen, según la metadata, en este caso a 6,25 metros.

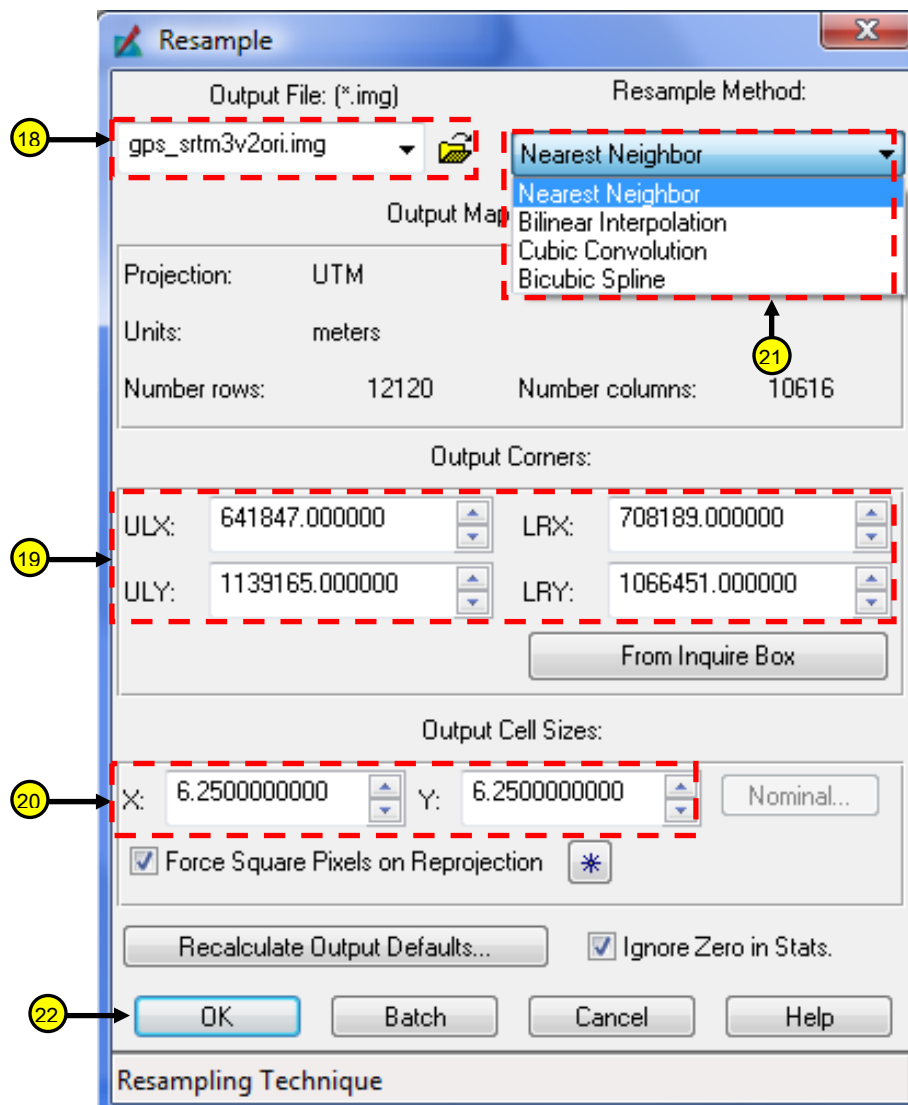


Figura 13. Replanteo de la nueva imagen orto-rectificada

PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA

Establezca el Método de replanteo de la nueva imagen desde la lista específica de *Resample Method*.

El uso del Vecino más cercano, interpolación Bilineal e interpolación bi-cubica está supeditado la relación del tamaño de la celda de los raster del DEM y de la imagen SAR a generar.

Sí se va usar el STRM de arco-segundo con esta imagen se recomienda usar las interpolaciones bilineal o bicubica pero debemos considerar el consumo computacional que esto trae con respecto a la otra técnica.

Nota: No se recomienda usar el método Bicubic Spline resampling con imágenes Radar (SAR) debido a que es extremadamente lento (horas de cálculo en el replanteo de la imagen)

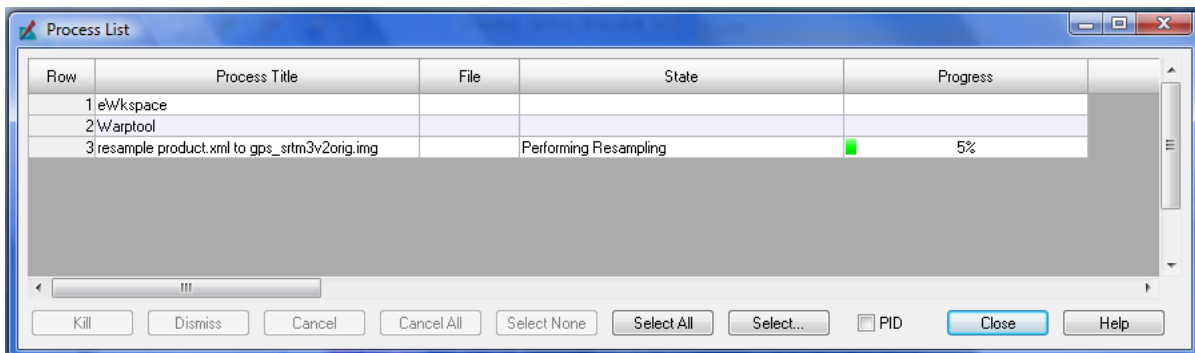


Figura 14. Proceso de ortorectificación.

Finalmente ejecute el proceso, una vez corrido el proceso aparecerá un mensaje sobre la evolución del mismo y dependiendo del caso podría observar los mensajes de error. Normalmente para una imagen Radarsat-2 demora alrededor de unos 10 minutos usando como DEM el SRTM de 3 arcosegundos y método de replanteo de vecino más cercano (esto puede variar dependiendo del tipo de imagen a orto-rectificar, el método de re-muestro y el DEM utilizado para dicha corrección).

Inmediatamente aparecerá el mensaje de ejecución de la rectificación de la nueva imagen corregida y se abre en la vista principal

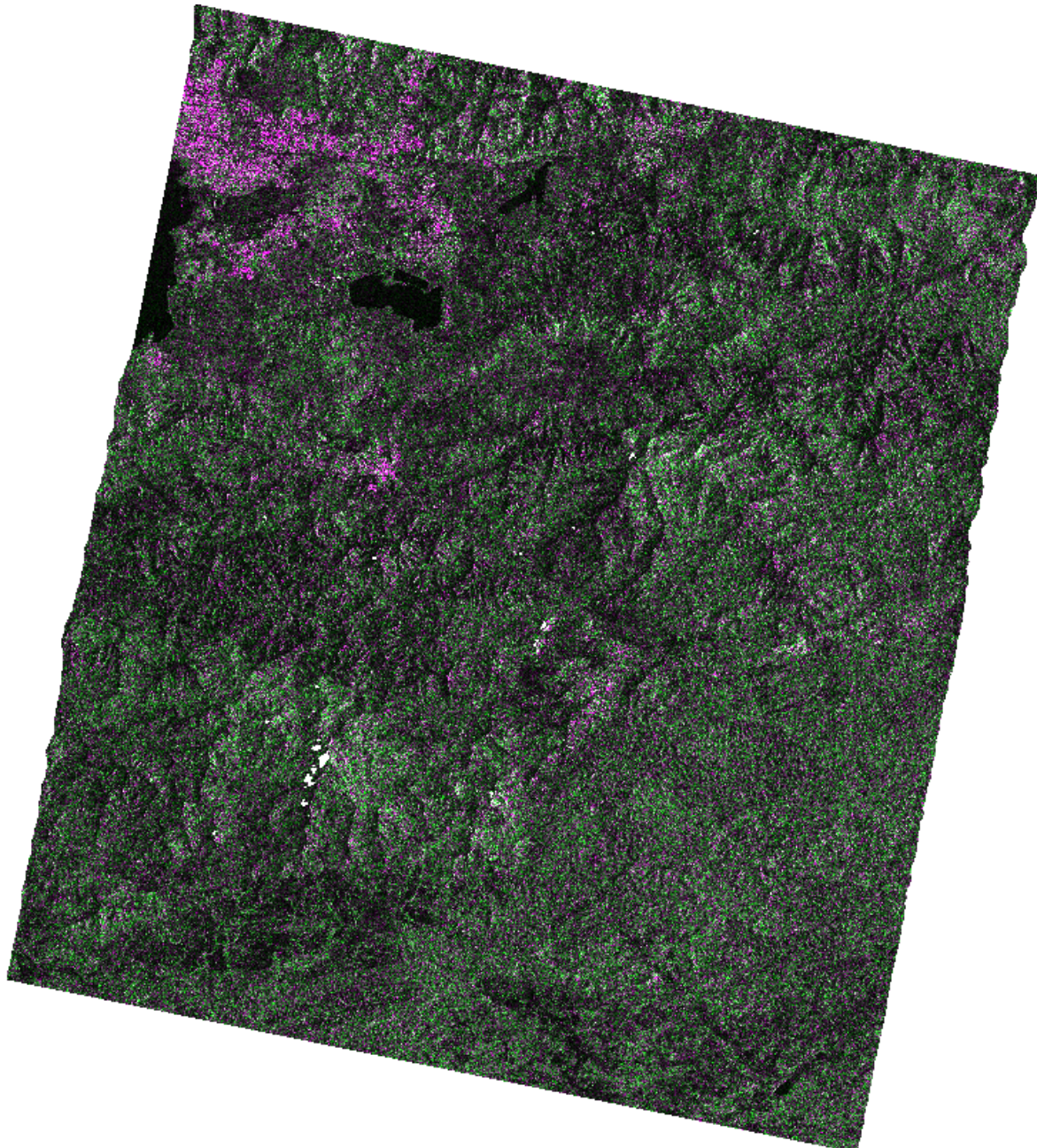


Figura 16. Imagen corregida cargada.

Finalmente deberá hacer el control de calidad de la imagen generada, ya sea con cartografía o imágenes previamente corregidas y validadas o con puntos de verificación con coordenadas conocidas, puede de igual forma hacer una revisión exhaustiva de la imagen corregida para verificar si presenta alguna irregularidad.