

LA TELEDETECCIÓN POR RADAR COMO FUENTE DE INFORMACIÓN LITOLÓGICA Y ESTRUCTURAL. ANÁLISIS ESPACIAL DE IMÁGENES SAR DE RADARSAT-1

RADAR REMOTE SENSING AS A SOURCE OF STRUCTURAL AND LITHOLOGICAL INFORMATION. RADARSAT-1 SAR SPATIAL IMAGE ANALYSIS

Daniela S. Marchionni¹, François Cavayas²

¹ INREMI Instituto de Recursos Minerales, Universidad Nacional de La Plata (UNLP) - Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CICBA). Calle 64 y 120 s/n, La Plata, Argentina.

² Département de Géographie, Université de Montréal, C.P. 6128, Succ. Centre-Ville, Montréal, Québec, Canada.

E-mail: dmarchi@inremi.unlp.edu.ar

RESUMEN

Las imágenes de radar se han convertido en los últimos años en una herramienta de uso frecuente para la extracción de información geológica, siendo cada vez más numerosos los sistemas de teledetección por radar que ponen a disposición una gran variedad de imágenes de gran utilidad en la cartografía geológica. Dada la geometría de observación de los sistemas de radar (observación lateral) y las características de la señal (microondas activas), los datos adquiridos por sensores de radar son sustancialmente diferentes a los obtenidos por los sensores óptico-electrónicos, pudiendo ser considerados como una fuente de información complementaria. Los procesos que intervienen en la formación de una imagen de radar son muy dependientes de las propiedades del haz de radar, en términos de las características de la señal (frecuencia y polarización) y la geometría de observación (ángulo de incidencia, dirección de visión). Los satélites que llevan a bordo sensores de radar, pueden tomar imágenes en órbita ascendente o descendente, con mirada a la derecha o a la izquierda y con distintos ángulos de inclinación, variando así las condiciones de iluminación, por lo cual imágenes de una misma zona pueden ofrecer información muy diferente. Por estos motivos, el criterio de selección de las imágenes para una aplicación particular se convierte en un paso esencial.

La sensibilidad de las microondas a las propiedades dieléctricas, al contenido de humedad y a la rugosidad superficial –en relación con la longitud de onda del haz de radar-, se verá reflejada en el tono y textura de las imágenes, dado que estos factores inciden directamente en la intensidad de la señal. Los sensores de radar permitirán poner en evidencia variaciones morfológicas sutiles en la micro topografía de los afloramientos, aún cuando las mismas se encuentren por debajo del límite de la resolución espacial. La morfología del terreno –sus pendientes y orientaciones- impactará significativamente en el retorno de la señal, puesto que condiciona el ángulo de incidencia local del haz de radar. Por otra parte, la geometría de visión lateral favorecerá el reconocimiento de lineamientos y rasgos estructurales en general, cuando estos presenten una expresión morfológica superficial y cuando la observación de los mismos sea realizada por la dirección de iluminación del haz de radar. Dada la gran variabilidad de los factores involucrados en la formación de una imagen de radar y de cómo todos estos factores interactúan con las características del territorio observado, es necesario tener estos elementos en cuenta para poder interpretar fielmente las características geológicas de un área. Se presentan aquí los fundamentos y resultados de algunas experiencias orientadas a analizar las potencialidades de las imágenes de radar de expresar variaciones litológicas y de favorecer la detección de rasgos estructurales y morfológicos.

Palabras Clave: sistemas de radar, análisis espacial, morfología, litología, estructuras

ABSTRACT

In recent years, radar imagery has become a frequently used tool for geological information extraction as more numerous radar remote sensing systems that make available a great variety of images of great utility to geological mapping have become available. Given these radar systems' observation geometry (side viewing) and signal nature (active microwave), the data acquired by these radar sensors are substantially different from those obtained by optical sensors, making them able to be considered as a complementary information sources. The processes involved in the formation of radar imagery are highly dependent on the properties of the radar beam in terms of both the signal character (frequency and polarization) and the observation geometry (incidence angle, look direction). The satellites carrying on-board radar sensors can acquire images in either ascending or descending orbit and in either right- or left-looking directions as well as with different inclination angles (thus varying illumination conditions). Therefore images of the same area taken by different systems can provide very different information. Thus, determining the criteria for image selection for a particular application is an essential step.

The microwave's sensitivity to dielectric properties, moisture content and surface roughness, particularly in relationship to the wavelength of the radar beam, will be reflected in the images tone and texture since these factors directly affect the signal intensity. Radar sensors can highlight subtle morphological variations in an outcrops' micro topography even when its size is below the limit of the spatial resolution of the imagery. The terrain morphology (its slope and aspect) will have a significant impact on the return signal since it affects the local radar beam incidence angle. Moreover, the side-viewing geometry will benefit the identification of lineaments and structural features in general when they have a morphological expression and if their observation is enhanced by the radar beam illumination. Given the great variability of the factors involved in formation of a radar image, and given how all these factors interact with the characteristics of the imaged area, all these elements must be taken into account to faithfully interpret the geological characteristics of a particular territory. The basis and results of some analyses of the potential of radar imagery to manifest lithological variations and to benefit the detection of structural and morphological features are presented here.

Key words: radar systems, spatial analysis, morphology, lithology, structures

INTRODUCCIÓN

Las imágenes espaciales –ópticas y de radar- entre sus múltiples aplicaciones, son utilizadas sistemáticamente para la cartografía geológica así como para la prospección y exploración minera, al ofrecer una visión sinóptica de las características geológicas, estructurales y morfológicas de un territorio, aún en áreas de difícil acceso. Los sistemas ópticos y de radar difieren entre sí por el tipo de datos que obtienen y cómo éstos se colectan, constituyendo fuentes de información complementarias. A diferencia de las frecuencias ópticas que interactúan con los materiales a nivel molecular y responden principalmente a su composición química y estructura física, las frecuencias de radar interactúan con los materiales a nivel estructural macroscópico y responden a sus propiedades eléctricas volumétricas y a la geometría del terreno (Elachi, 1987; Lillesand y Kiefer, 1987).

Por su naturaleza, las imágenes adquiridas por sensores óptico electrónicos -multiespectrales e hiperespectrales- permiten diferenciar tipos litológicos sobre la base de sus firmas espectrales características y detectar anomalías indicativas de la presencia de áreas de alteración hidrotermal y otras manifestaciones superficiales de la presencia de concentraciones minerales. Desde los primeros trabajos de Rowan et al. (1974), Abrams et al. (1977) y Hunt y Ashley (1979), estas imágenes han sido utilizadas como herramienta de prospección y exploración en distintos ambientes geológicos (Podwysocki et al. 1985; Spatz y Taranik, 1994; Sabins, 1999; Bedell, 2001; Kruse et al., 2003; Rowan et al., 2003 y Berger et al., 2003, entre otros).

Por su parte, las imágenes adquiridas por sensores de radar, de uso cada vez más difundido, son extremadamente ricas en información espacial vinculada a la rugosidad superficial y a la topografía, la que es realizada por la geometría de observación lateral propia de estos sistemas. Esta información ha demostrado ser de gran valor para la cartografía geológica en distintos territorios (JPL, 1980; Evans et al., 1986; De Sève et al., 1994; Harris, 1991; Deslandes y Gwyn, 1991; Lowman Jr., 1994; Mahmood et al., 1996; Price, 1999, etc.), favoreciendo la identificación de estructuras geológicas y rasgos geomorfológicos, aún en ambientes glaciarios y en zonas tropicales con frecuente nubosidad y densa cobertura vegetal (Müschen et al., 1997; Paradella et al., 2000).

El importante crecimiento en la disponibilidad de datos espaciales adquiridos por sistemas de radar en estos últimos años, pone al especialista habituado a la utilización de imágenes adquiridas por sensores óptico electrónicos, frente a la necesidad de conocer los factores que intervienen en la formación de una imagen de radar, tanto aquellos dependientes de las propiedades del haz de radar en términos de las características de la señal (frecuencia, polarización) y la geometría de observación (ángulo de incidencia, dirección de visión), como a los que responden a las características del terreno (propiedades eléctricas, contenido de humedad, rugosidad superficial, morfología del terreno, etc.) y conocer la complejidad de las interacciones que se producen cuando la señal de microondas llega a la superficie terrestre. Algunos de estos elementos van a condicionar las posibilidades de obtener información litológica y otros van a ser claves para la extracción de información estructural.

Dentro de este contexto, este artículo presenta, en una primera parte, una síntesis de las características de las misiones espaciales con sensores de radar y una revisión de los principales aspectos del funcionamiento de estos sistemas. En una segunda parte se analizan las potencialidades de las imágenes de radar de expresar variaciones litológicas y de favorecer la detección de rasgos estructurales, a partir de experiencias realizadas con imágenes RADARSAT-1 en la provincia geológica del Macizo del Deseado, en el sector austral de la República Argentina.

MISIONES ESPACIALES CON SENSORES DE RADAR

Los primeros programas espaciales equipados con sistemas de radar fueron impulsados por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y el Jet Propulsion Laboratory (JPL). El SEASAT (1978), diseñado para la observación de la superficie de los océanos y de los hielos polares, fue el primer satélite orbital equipado con un Radar de Apertura Sintética (SAR) Figura 1; adquirió imágenes en banda L (23.5 cm) con polarización HH sobre América del Norte, América Central y Europa (Ford et al., 1980). A este programa siguieron varias misiones experimentales con SAR a bordo de transbordadores espaciales: SIR-A (1981) del Columbia, SIR-B (1984) del Challenger y SIR-C del Transbordador Espacial Endeavour, con dos misiones (abril y octubre de 1994). Los dos primeros, adquirieron imágenes en banda L (23.5 cm) con polarización HH, en particular el SIR-B estaba equipado con una antena móvil que le permitió la adquisición de imágenes con distintos ángulos de incidencia (JPL, 1982; Ford et al., 1983). Por su parte, el SIR-C (Evans et al., 1997), proyecto conjunto de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), la German Space Agency (DARA) y la Italian Space Agency (ASI), estaba diseñado para tomar imágenes en distintas frecuencias: bandas L (23.5 cm), C (5.6 cm) y X (3.1 cm) y con distintas polarizaciones (HH, VV, VH, HV). Su cobertura fue más amplia, así como sus objetivos científicos, que incluían estudios oceanográficos, geológicos, de vegetación, humedad de suelo, erosión, desertificación, etc.

En 1992 fue lanzado el Japanese Earth Resources Satellite-1 (JERS-1), un programa de la agencia NASDA (National Space Development Agency of Japan) y el MITI (Ministry of International Trade and Industry), preparado para el estudio de los recursos naturales, la protección ambiental, la prevención de desastres y la vigilancia costera. Llevaba a bordo instrumentos ópticos y un SAR en banda L (23.5 cm), con polarización HH y ángulo de visión de 35°. Estuvo operativo durante seis años con un período de revisita de 44 días, logrando una cobertura global (Shimada, 2006). El sucesor del JERS-1 fue el satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite) que operó entre el 2006 y el 2011, con un período de revisita de 46 días. Fue un proyecto conjunto de JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) y JAROS (Japan Resources Observation System Organization) con un amplio rango de aplicaciones en ambientes continentales y marinos (Kimura y Ito, 2000; Rosenqvist et al., 2007). Además de instrumentos ópticos llevaba a bordo el primer sensor espacial en banda L polarimétrico, el PALSAR (Polarimetric Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar), con la capacidad de operar con un amplio rango de ángulos de inclinación (8° a 60°), con distintas resoluciones y varias opciones de polarización (en modo simple, dual y polarimétrico).

Entre los satélites de investigación equipados con SAR, la European Space Agency (ESA), puso en órbita los satélites de la serie ERS (European Remote Sensing Satellite), diseñados para suministrar datos sistemáticos de la superficie de la tierra, los océanos y de las áreas costeras (Jensen, 1995; Rast, 1995). La serie ERS se inició con el lanzamiento del ERS-1 en 1991 y continuó con el lanzamiento del ERS-2 en 1995, que dejaron de operar en los años 2000 y 2011 respectivamente. Ambos satélites llevaban a bordo un instrumento de microondas activas, el AMI (Active Microwave Instrument), que operando en modo imagen (SAR Image Mode) adquiría imágenes en banda C (5.6 cm) con polarización VV, un ángulo de incidencia de 23° y un período de revisita de 35 días. La continuidad de los datos adquiridos por ERS-2 fue asegurada por el proyecto ENVISAT (Environmental Satellite) de la ESA, iniciado en el 2002 y que finalizó en el 2012 (Attema et al., 2000; Desnos et al., 2000). Llevaba a bordo sofisticados instrumentos ópticos y de radar para la

observación continua de los continentes, la atmósfera, los océanos y los hielos y para el monitoreo de los distintos factores que afectan al cambio climático global. Su instrumento ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), utilizaba la misma frecuencia que el SAR de ERS-1 y ERS-2 (banda C), pero fue desarrollado con nuevas tecnologías que lo hicieron un instrumento más avanzado que los anteriores (ESA, 2007), con varios modos de operación, grandes capacidades en términos de cobertura (de hasta 400 km en modo Wide Swath: WS), ángulos de incidencia (15 a 45°) y opciones de polarización. El ASAR era un radar de polarización dual que podía operar tanto con polarización paralela (VV y HH) como cruzada (VH y HV) en el modo AP (Alternating Polarisation).

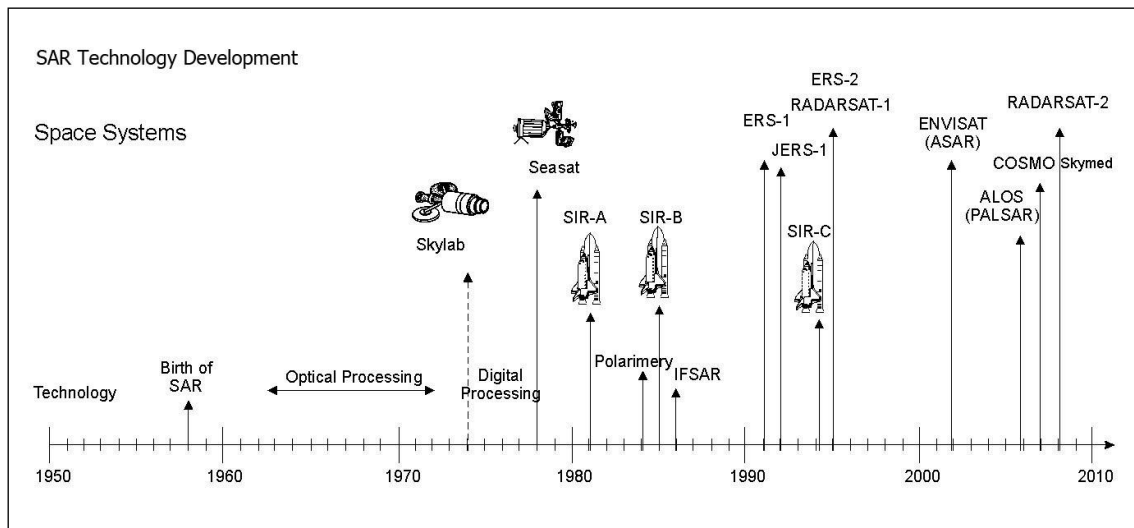


Figura 1. Evolución de los sistemas espaciales con Radares de Apertura Sintética (Modificado de Ulaby, 1998).
Figure 1. Development of space systems with Synthetic Aperture Radar (Modified from Ulaby 1998).

El primer satélite canadiense de observación de la Tierra, RADARSAT-1 (Raney et al., 1991; CASI, 1993), fue puesto en órbita en 1995 por la Canadian Space Agency (CSA), y fue seguido en el 2007 por el lanzamiento de RADARSAT-2 (CASI, 2004; Staples, 2005). RADARSAT fue concebido para proporcionar información del ártico canadiense, de las regiones polares -con largos períodos de oscuridad en el invierno- y del litoral canadiense -con elevada cobertura nubosa-, para ayudar a la navegación marítima y monitorear el medio ambiente. RADARSAT-1 fue el primer satélite con un sensor de radar orientado operacionalmente y con modo ScanSAR para barridos anchos (Figura 2). Su órbita permite una cobertura global cada 24 días y cada 5 días para las áreas ecuatoriales, mientras que el Ártico recibe una cobertura diaria. Opera en banda C (5.6 cm) con polarización horizontal (HH). Tiene 7 modos de haz (beam modes) que corresponden a distintas resoluciones (8 a 100 m) y áreas de cobertura (50 a 500 km) y 7 posiciones de haz (beam positions) que ofrecen un amplio rango de ángulos de incidencia (entre 10° y 59°). RADARSAT-1 es un sistema que mira hacia la derecha (right looking satellite) y que permite dos direcciones de visión (look directions): en órbita descendente mira al oeste (Left Looking) y en órbita ascendente al este (Right Looking). En zonas ecuatoriales la dirección de observación es de 78° para la órbita ascendente y de 282° para la órbita descendente. RADARSAT-2 tiene como innovación una antena que puede mirar a la izquierda o a la derecha en ambas órbitas, dando una mayor frecuencia de revisita; incorpora una resolución ultra fina (3 m) y distintas opciones de polarización: paralela (HH o VV) o cruzada (HV o VH), en modo simple, dual y polarimétrico, con múltiples aplicaciones (Van der Sanden, 2004; Touzi et al., 2004).

La Agencia Espacial Italiana (Agenzia Spaziale Italiana-ASI) concibió el programa COSMO-SkyMed integrado por una constelación de 4 satélites equipados con sensores de radar, para operar bajo cualquier condición meteorológica y con un periodo de revisita de 16 días. Los satélites de la constelación fueron lanzados entre el 2007 y el 2010, cada uno de ellos equipado con un instrumento SAR de alta resolución: el SAR-2000 (Synthetic Aperture Radar-2000) que opera en banda X (3,1 cm). COSMO-SkyMed es un programa con objetivos diversos: de investigación científica, militares y de defensa del territorio en áreas afectadas por catástrofes naturales: incendios, inundaciones, terremotos, deslizamientos de terreno, subsidencias, etc. El instrumento SAR ofrece un amplio rango de ángulos de incidencia (entre 20° y 60°) y polarizaciones en modo simple o dual. Puede operar en

diferentes modos de haz que incluyen: Spotlight, Stripmap (himage y pingpong) y Scansar (wide o huge), con resoluciones que van de 1 m a 100 m y anchos de barrido de entre 10 y 200 km. Los detalles de la misión y la descripción de los productos ofrecidos pueden encontrarse en ASI (2009).

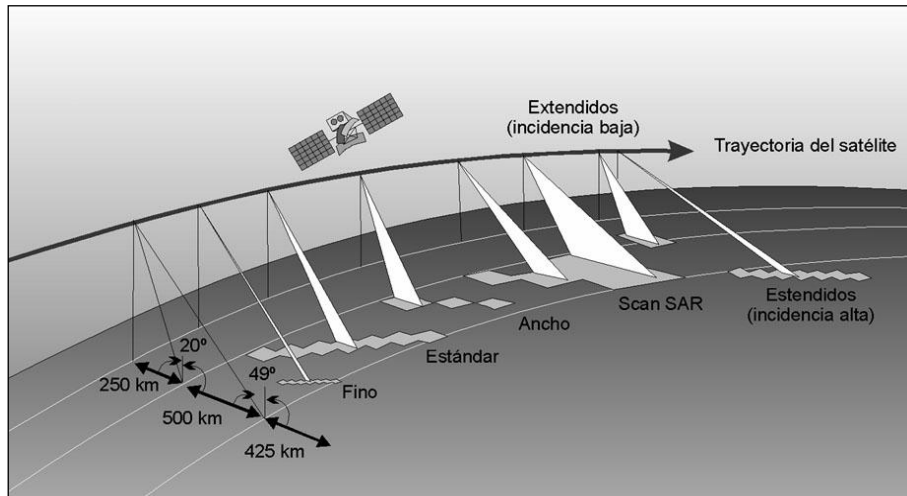


Figura 2. Distintos modos de operación del SAR de RADARSAT-1 (RADARSAT Int., 1997).
Figure 2. RADARSAT-1 SAR different operating modes (RADARSAT Int, 1997).

FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE RADAR

El radar es un sensor activo de microondas que se desplaza a bordo de una plataforma explorando la tierra, emitiendo pulsos de energía hacia la superficie terrestre y almacenando las señales de retorno. Por trabajar con haces de energía emitidos artificialmente, los sistemas de radar permiten controlar las condiciones de la adquisición -frecuencia, polarización y geometría de la observación- y pueden coleccionar datos tanto de día como de noche; esto es muy ventajoso en las regiones polares donde los prolongados períodos de oscuridad dificultan la adquisición de imágenes convencionales. Un sistema de teledetección por RADAR (Radio Detection And Ranging) transmite pulsos de microondas que van barriendo la superficie terrestre y recibe la porción de energía que es reflejada (retrodispersada) de vuelta hacia el sensor (Figura 3). El sistema registra la intensidad de la señal de retorno (radiación retrodispersada) y el retardo en tiempo entre la transmisión y recepción de cada pulso de energía, el cual se relaciona con la distancia de los objetos observados (CCRS, 1995).

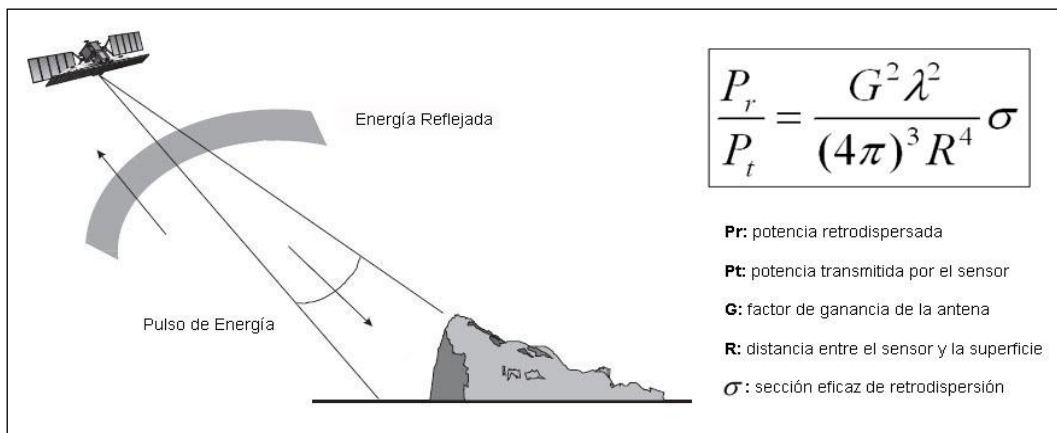


Figura 3. Funcionamiento de los sistemas de radar (RADARSAT Int., 1997). Ecuación fundamental del radar.
Figure 3. Radar systems operation (RADARSAT Int, 1997). Radar basic equation.

La relación fundamental entre las características del radar, el objeto observado y la señal recibida está definida en la ecuación del radar, que expresa la relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida por el sensor (Figura 3). La magnitud física medida directamente por el sensor es la intensidad de la radiación retrodispersada, la cual depende del Coeficiente de Retrodispersión o *backscattering* (σ^0) de cada superficie. Este coeficiente relaciona la energía retrodispersada con la recibida por unidad de área en la dirección del alcance terrestre. Cada tipo de cubierta tiene un Coeficiente de Retrodispersión o Reflectividad Radar promedio que depende principalmente de su conductividad o constante dieléctrica. Hay una serie de factores que introducen una variabilidad en torno a ese valor medio, condicionando la señal final que será recibida por el sensor. Algunos de ellos están directamente relacionados a las propiedades del haz de radar emitido (polarización, ángulo de incidencia), mientras que otros son dependientes de las características de las superficies observadas (contenido de humedad, rugosidad superficial, morfología del terreno) o de sus relaciones con el haz de radar (pendiente y orientación del terreno respecto del haz emitido). Cada píxel de una imagen radar tendrá asociado un valor numérico que codifica digitalmente la intensidad de la señal recibida por el sensor y que queda expresado en la Brillantez Radar (β^0), la cual se manifiesta en la imagen en forma proporcional a una escala de grises de intensidad creciente.

Características de la señal de radar

Los sistemas de teledetección por radar operan en longitudes de onda más largas que las de los sistemas ópticos, en el rango de las microondas, comprendidas entre 0.5 cm y 75 cm (Figura 4). Las frecuencias de las microondas permiten coleccionar datos independientemente de las condiciones atmosféricas, facilitando la obtención de imágenes de alta calidad aún en ambientes tropicales donde la cobertura nubosa es persistente. A los distintos intervalos de frecuencias de las microondas se han asignado bandas identificadas por letras (K, X, C, S, L, P). La más difundida de las bandas utilizadas por los radares formadores de imágenes es la banda C, empleada por varios radares satelitales como el SAR de ERS-1 y 2, RADARSAT-1 y 2 y ENVISAT. La banda L fue utilizada por el SESAT y por los radares de los satélites JERS-1 y ALOS. Por su parte, la banda X, está presente en los radares del programa COSMO-Skymed.

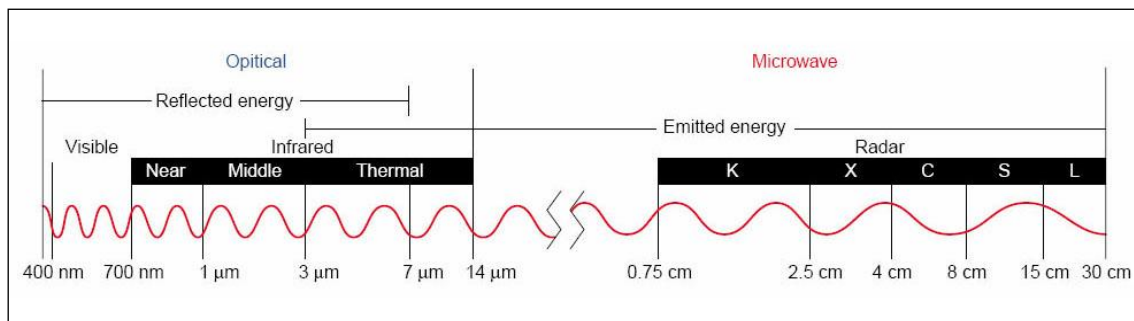


Figura 4. Espectro electromagnético. Dominio de frecuencias de las microondas y bandas.
Figure 4. Electromagnetic spectrum. Microwave frequencies domain and channels.

Los sistemas de radar están diseñados para transmitir y recibir radiación polarizada plana en distintas direcciones (Figura 5). La dirección con la que la señal esté polarizada influirá en sus interacciones con el medio y en el flujo de retorno que registrará el radar (Ulaby y Elachi, 1990). Los primeros radares satelitales sólo podían recibir radiación de igual polarización a la transmitida (polarización paralela), ésta es la configuración de los radares de los satélites ERS-1 y 2, JERS-1 y RADARSAT-1. Los radares satelitales a bordo de RADARSAT-2, ENVISAT, ALOS y COSMO Skymed, además de funcionar con polarización paralela, pueden recibir radiación en una polarización opuesta a la de la radiación transmitida (polarización cruzada). Estos sistemas ofrecen distintas combinaciones de polarizaciones para una misma imagen: *Single Pol* formada por una escena HH o VV, *Dual Pol* formada por dos escenas HH+HV o VV+VH, y *Quad Pol* (polarimétrica) formada por cuatro escenas, una para cada una de las polarizaciones posibles: HH+HV+VH+VV.

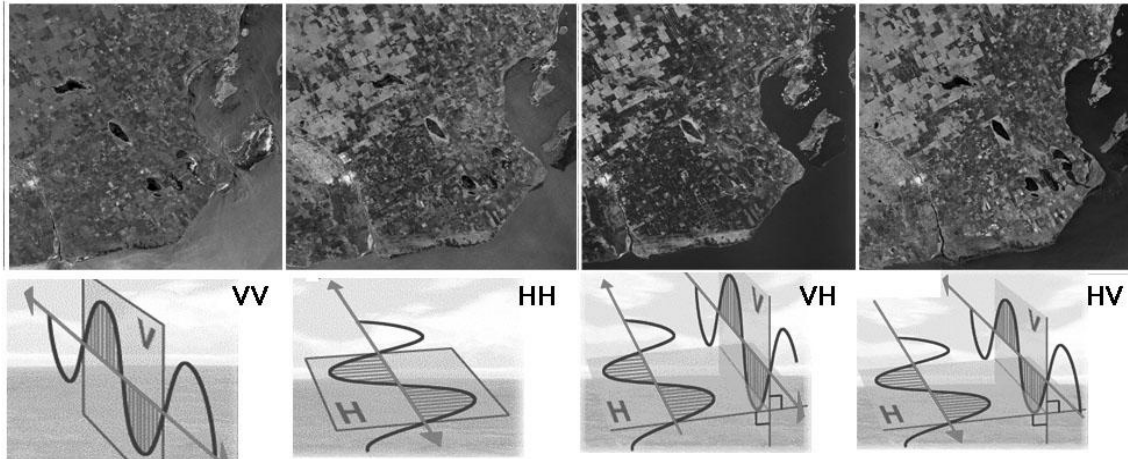


Figura 5. Imágenes SAR de RADARSAT-2 del sur de la provincia de Buenos Aires adquiridas con distintas configuraciones de polarización paralela y cruzada (Proyecto SOAR).
Figure 5. RADARSAT-2 SAR images from south of Buenos Aires province acquired with different configurations of parallel and cross polarization (SOAR Project).

Geometría de la Observación

La geometría de los sistemas de teledetección por radar se caracteriza por su observación lateral (Ford et al., 1998; Lewis et al., 1998). Estos sistemas calculan las distancias entre el radar y los elementos del terreno y representan esas distancias en una imagen bidimensional. Estas dos dimensiones se denominan alcance y azimut; el alcance sigue la dirección de observación del radar y el azimut la trayectoria de vuelo de la plataforma (Figura 6). La distancia entre el sensor y el objeto observado, siguiendo la dirección de la trayectoria del haz, es el alcance inclinado (*slant range*) y su proyección vertical sobre el terreno es el alcance terrestre (*ground range*).

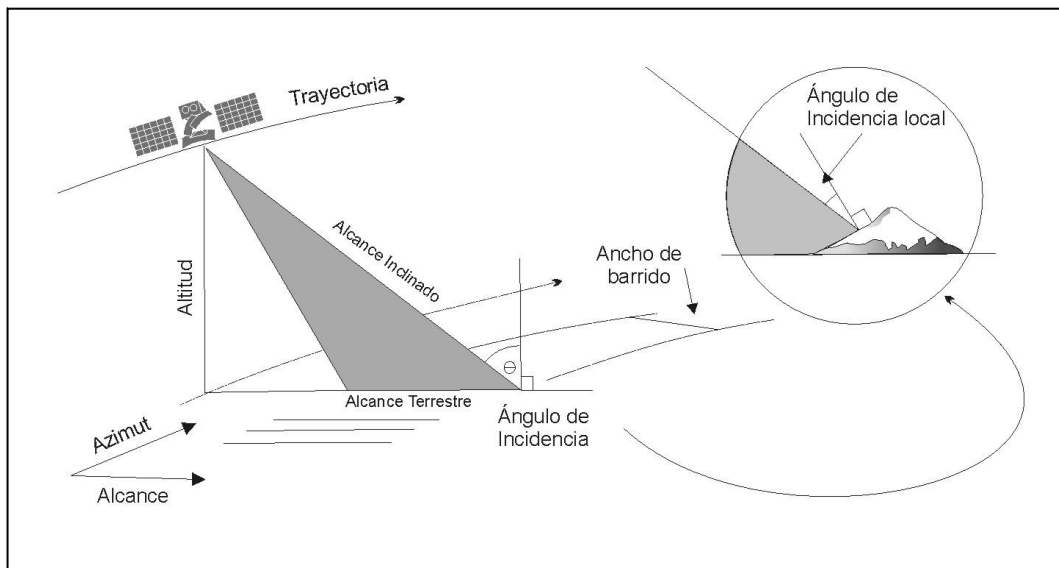


Figura 6. Geometría de la observación de un sistema de radar (Modificado de Raney, 1992).
Figure 6. Viewing geometry of a radar system (Modified from Raney 1992).

El *ángulo de incidencia* del radar en un punto determinado es el ángulo medido entre el haz del radar y la vertical a la superficie del terreno en ese punto; este ángulo va variando a lo largo del ancho de barrido aumentando desde el alcance cercano hacia el lejano. Por su parte, el *ángulo de incidencia local* es el ángulo medido entre el haz de radar y la perpendicular a la pendiente del terreno en ese punto (Figura 6). Este ángulo va influir en gran medida en el tono o brillantez de cada píxel de la imagen. En los satélites ERS-1, ERS-2 y JERS-1 el haz de radar tiene una sola posición, mientras

que RADARSAT, ALOS, ENVISAT y COSMO SkyMed pueden adquirir imágenes usando un amplio rango de ángulos de incidencia que corresponden a diferentes posiciones de haz (Figura 2), variando así las condiciones de iluminación de las superficies observadas (Figura 7). La posibilidad de adquirir imágenes tanto en órbita ascendente como descendente, con mirada hacia la derecha (*right looking*) o hacia la izquierda (*left looking*), hace posible además que una misma zona geográfica pueda observarse desde lados opuestos, bajo distintas condiciones de iluminación.

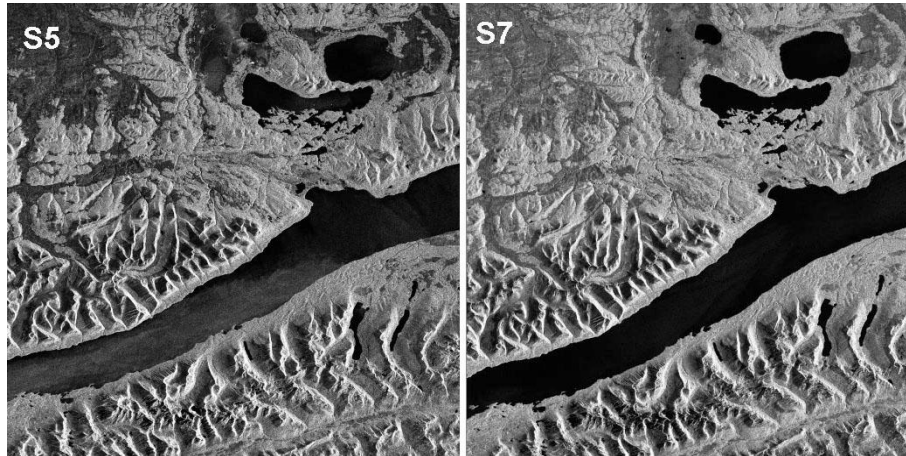


Figura 7. Imágenes RADARSAT-1 de Tierra del Fuego adquiridas en órbita descendente con distintos ángulos de incidencia. Modos S5 (36-42°) y S7 (45-49°). Gentileza de SEGEMAR (Programa GlobeSAR-2).

Figure 7. RADARSAT-1 images of Tierra del Fuego acquired in descending orbit with different incidence angles. Beam S5 (36-42 °) and S7 (45-49 °). Kindness of SEGEMAR (GlobeSAR-2 Program).

La cartografía de estructuras geológicas, unidades litológicas y geoformas se beneficiará de la selección adecuada del ángulo de incidencia en función de la topografía local (Figura 8). Singhroy and Saint-Jean (1999) sostienen que para el mapeo geológico superficial la visión ortogonal será la más apropiada, dependiendo el ángulo de incidencia más favorable del relieve del área observada.

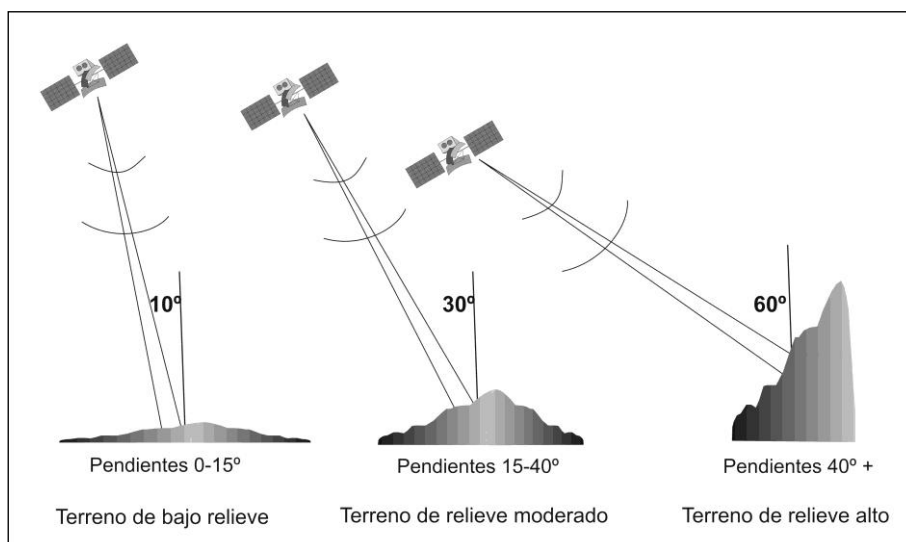


Figura 8. Ángulos de incidencia recomendados para aplicaciones geológicas de imágenes SAR de RADARSAT-1 (Modificado de Singhroy and Saint-Jean, 1999).

Figure 8. RADARSAT-1 SAR images recommended Incidence angles for geological applications (Modified from Singhroy and Saint-Jean, 1999).

Resolución espacial del sistema

La resolución espacial del radar es distinta en la dirección de la trayectoria del satélite (azimut) y en la dirección perpendicular (alcance). La resolución en alcance depende de la duración de los pulsos transmitidos. La resolución en azimut depende del ancho del haz transmitido el cual es función de la longitud de la antena (antenas más largas generan haces más delgados). Esta resolución va a estar condicionada también por la altura orbital que determina la distancia entre el sensor de radar y la superficie observada. En los Radares de Apertura Real o RAR (Real Aperture Radar) el ancho del haz transmitido y, en consecuencia, la resolución en el sentido del azimut, es inversamente proporcional al tamaño de la antena transmisora, por lo cual para obtener imágenes de alta resolución se requieren antenas muy largas. Para evitar esta limitación, los radares formadores de imágenes utilizan actualmente una antena virtual, simulada mediante la sucesión de señales recibidas por una antena real a lo largo de la trayectoria de vuelo. Esta antena virtual constituye la base de los Radares de Apertura Sintética o SAR (Synthetic Aperture Radar) y permite generar imágenes de alta resolución en el sentido del azimut.

Desplazamiento Topográfico

La geometría de observación lateral de los sistemas de radar, además de modificar el ángulo de incidencia a lo largo del ancho de barrido, provoca una serie de distorsiones geométricas (Figura 9). Los rasgos topográficos aparecen desplazados de su correcta posición ortográfica en las imágenes; desplazamiento que disminuye al aumentar el ángulo de incidencia (Lusch, 1999). En consecuencia, en una imagen de radar el terreno aparece con la misma perspectiva que si se hubiera observado a un ángulo de 90° respecto de la dirección del sensor. Hay varios efectos geométricos que son consecuencia de la relación entre el relieve local y el ángulo de incidencia del haz, al verse modificado el ángulo de incidencia local por efecto del relieve (Figura 10).

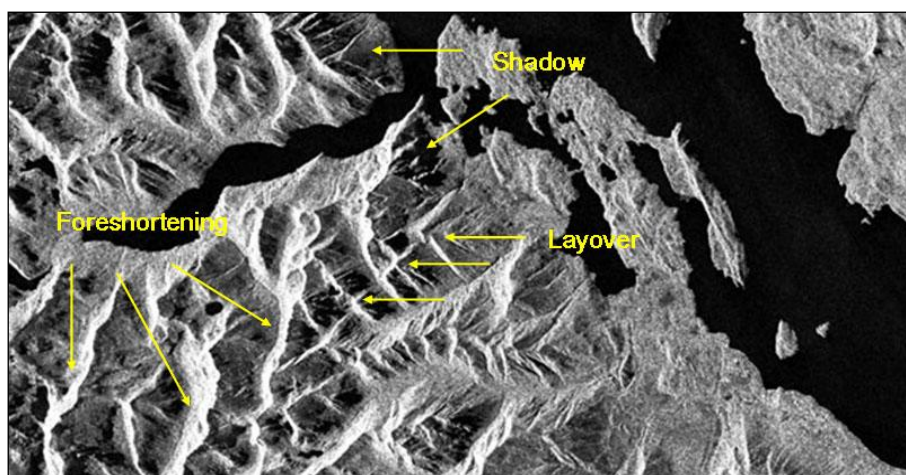


Figura 9. Efectos de *shadowing*, *foreshortening* y *layover* en una imagen SAR de RADARSAT-1 del área del Lago Nahuel Huapí, ascendente y con mirada a la derecha. Gentileza de SEGEMAR (Programa GlobeSAR-2).
Figure 9. Shadowing, foreshortening and layover effects in an ascending right-looking RADARSAT-1 SAR image of Nahuel Huapí Lake area. Kindness of SEGEMAR (GlobeSAR-2 Program).

El desplazamiento del relieve (*foreshortening*) es la apariencia de que se comprimen las laderas o pendientes que están inclinadas hacia el radar en las cuales la señal transmitida se refleja casi simultáneamente en toda su extensión, desde la cima hasta la base. Este efecto lleva a un acortamiento de la pendiente observada y a una apariencia relativamente más brillante en las imágenes. La inversión por relieve (*layover*) se produce cuando el desplazamiento del relieve se vuelve extremo y la energía reflejada por la cima de una elevación se recibe antes que el retorno de su base, por lo cual la cima, que está más cerca del radar, aparece como volcada o rebatida hacia él. Las sombras (*shadowing*) aparecen en casi todas las imágenes de radar por detrás de los objetos elevados o de laderas muy pronunciadas e indican las zonas de la superficie del terreno que no fueron iluminadas por el radar. Al no generar ninguna señal de retorno, estas zonas aparecen en tonos muy oscuros en las imágenes, realzando artificialmente los accidentes topográficos y el relieve.

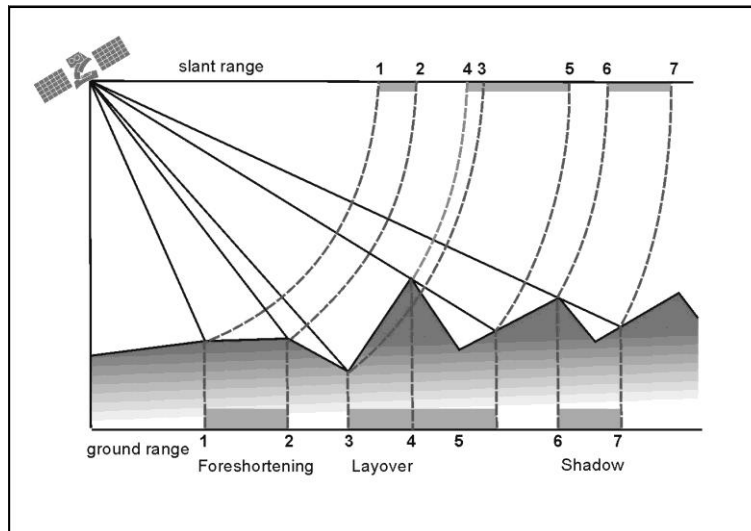


Figura 10. Distorsiones geométricas de las imágenes radar en función del relieve (Modificado de Lillesand y Kiefer, 1987).

Figure 10. Radar images geometric distortions according to the relief (Modified from Lillesand y Kiefer, 1987).

Visión estereoscópica

Las imágenes adquiridas usando diferentes posiciones del haz sobre una misma zona permiten obtener configuraciones apropiadas para la visión estereoscópica, la cual incrementa la interpretabilidad de los datos en comparación con la visión monoscópica (Toutin, 1996; 1997). La posibilidad de tener una visión tridimensional del terreno, a partir de la utilización de los pares estereoscópicos, favorece la interpretación geológica y puede ayudar a diferenciar rasgos lineales de origen estructural de otro tipo de rasgos y a atribuirles un significado geológico con un cierto grado de confianza (Drury, 1993; Singhroy y St-Jean, 1999). Asimismo, algunos rasgos geológicos sutiles que pasan desapercibidos en visión monoscópica, son puestos en evidencia por la observación tridimensional. Como complemento, el área común a cada par estereoscópico puede utilizarse también para la generación de modelos digitales de elevación (Toutin y Gray, 2000).

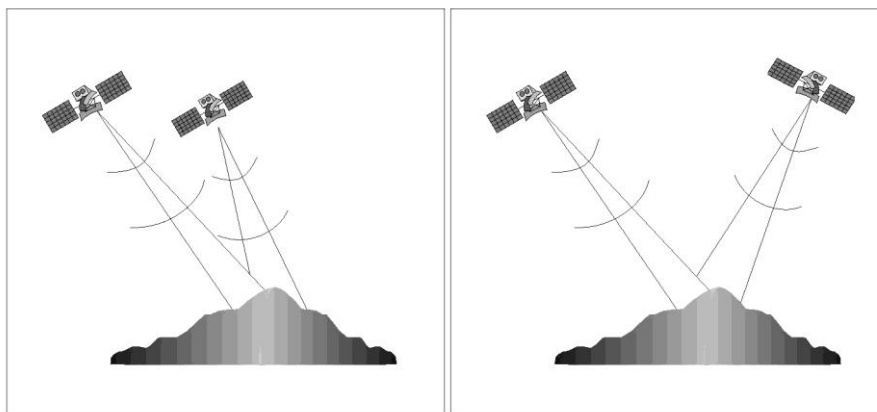


Figura 11. Distintos modos de adquisición de imágenes de un mismo territorio variando las condiciones de la iluminación: distintos ángulos de incidencia (izquierda) y distintas direcciones de mirada (derecha).

Figure 11. Different imaging modes of the same territory varying illumination conditions: different incidence angles (left) and different looking directions (right).

Hay dos tipos de configuraciones estereoscópicas para el SAR (Figura 11). La configuración *mismo lado* (same-side) se compone de dos imágenes tomadas con la misma dirección de visión –ambas con mirada a la derecha o a la izquierda-, en pasadas sucesivas del satélite y con distintos ángulos (Figura 14). Esta configuración presenta disparidades geométricas y radiométricas pequeñas y genera una pequeña exageración vertical. La configuración *lado opuesto* (opposite-side) se compone

de dos imágenes tomadas con distinta dirección de visión –mirada a la derecha y a la izquierda-. Esta configuración refuerza la exageración vertical pero las disparidades geométricas y radiométricas entre las imágenes son mayores por lo cual sólo se utiliza en áreas de bajo relieve donde las diferencias entre las imágenes del par no son tan grandes. Por otra parte, cuanto mayor sea la diferencia entre los ángulos de incidencia de las imágenes que componen el par estereoscópico, mayor será la exageración vertical del relieve (D'Iorio et al., 1997; Toutin, 1999).

ANÁLISIS ESPACIAL DE IMÁGENES SAR DE RADARSAT-1

Los atributos generales de las imágenes de radar -tono, textura y patrón- dan cuenta de las propiedades físicas del territorio observado en tanto reflejan cómo la superficie ha dispersado la energía electromagnética recibida en función de las interacciones producidas. Dada la variabilidad de factores que intervienen en la señal que es recibida por el radar, las relaciones entre la información que se puede extraer de las imágenes y las características geológicas de un área son complejas. Distintos ejemplos de la utilización de imágenes SAR de RADARSAT-1 en aplicaciones geológicas pueden encontrarse en CASI (1991 y 1994). En este trabajo se discuten los resultados del análisis realizado sobre dos pares estereoscópicos de imágenes SAR de RADARSAT-1 (Tabla 1) orientado a la extracción de información litológica y estructural. La extracción de información geológica a partir de estas imágenes se ha basado en criterios *espaciales* que tienen en cuenta las variaciones registradas en los valores radiométricos de los píxeles de la imagen (Marchionni, 2007).

RADARSAT-1/SAR	1° par estereoscópico		2° par estereoscópico	
Tipo de Órbita	Ascendente (<i>Right-looking</i>)		Descendente (<i>Left-looking</i>)	
Observaciones	Fin del invierno		Fin del verano	
Superficie	110 x 113 km	106 x 109 km	108 x 111 km	109 x 112 km
Modo del haz	Standard S2	Standard S6	Standard S3	Standard S7
Inclinación	24°-31°	41°-46°	30°-37°	45°-49°
Adquisición	03 Agosto 1998	23 Agosto 1998	17 Enero 2000	07 Febrero 2000
Resolución	12.5 m	12.5 m	12.5 m	12.5 m

Tabla 1. Características de los dos pares estereoscópicos de imágenes SAR de RADARSAT-1.
Table 1. Characteristics of the two stereo pairs of RADARSAT-1 SAR images.

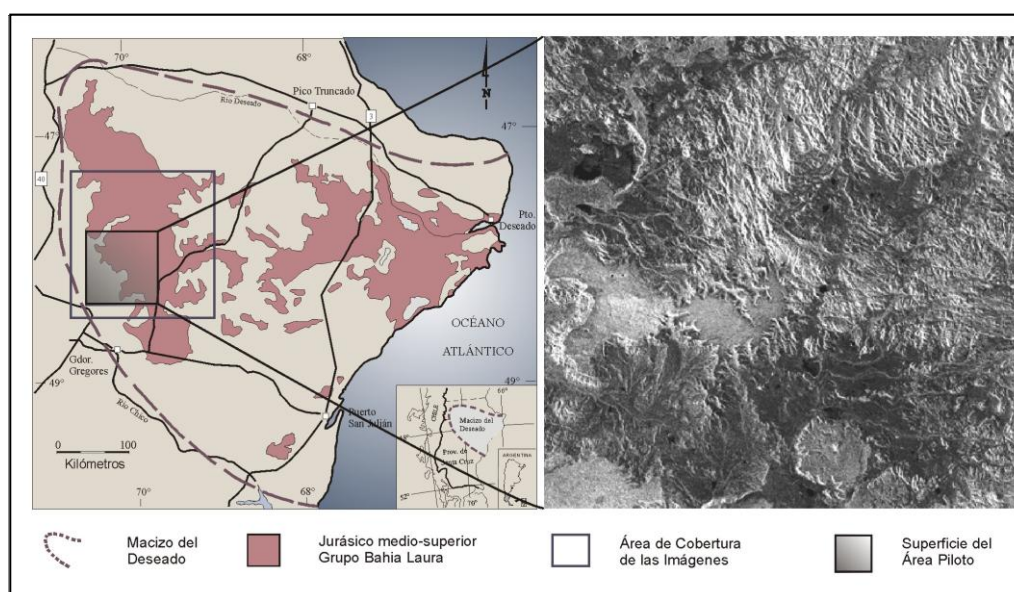


Figura 12. Ubicación de la zona de estudio en donde se señala el área de cobertura de las imágenes SAR de RADARSAT-1 utilizadas y el Área Piloto sobre la cual se realizaron algunos de los análisis.

Figure 12. Study area location where RADARSAT-1 SAR images coverage and Pilot Area on which some of the analyzes were performed, are indicated.

Las imágenes utilizadas cubren un pequeño sector de un territorio semidesértico ubicado en la Provincia de Santa Cruz, a los 48° 00' S - 69° 45' O (Figura 12). Esta región forma parte del Macizo del Deseado, unidad morfoestructural caracterizada por un volcanismo ácido jurásico de amplia extensión areal, relacionado con la presencia de concentraciones minerales de metales preciosos (Marchionni y Schalamuk, 2010), al que sobreyacen efusiones basálticas terciarias y cuartarias en alternancia con depósitos sedimentarios marinos y continentales, y relleno moderno. En la Figura 13 se ilustran las imágenes SAR de RADARSAT-1 utilizadas en esta investigación (dos pares estereoscópicos *mismo lado*: S2-S6 y S3-S7) y se señalan las principales unidades geológicas aflorantes en esta zona.

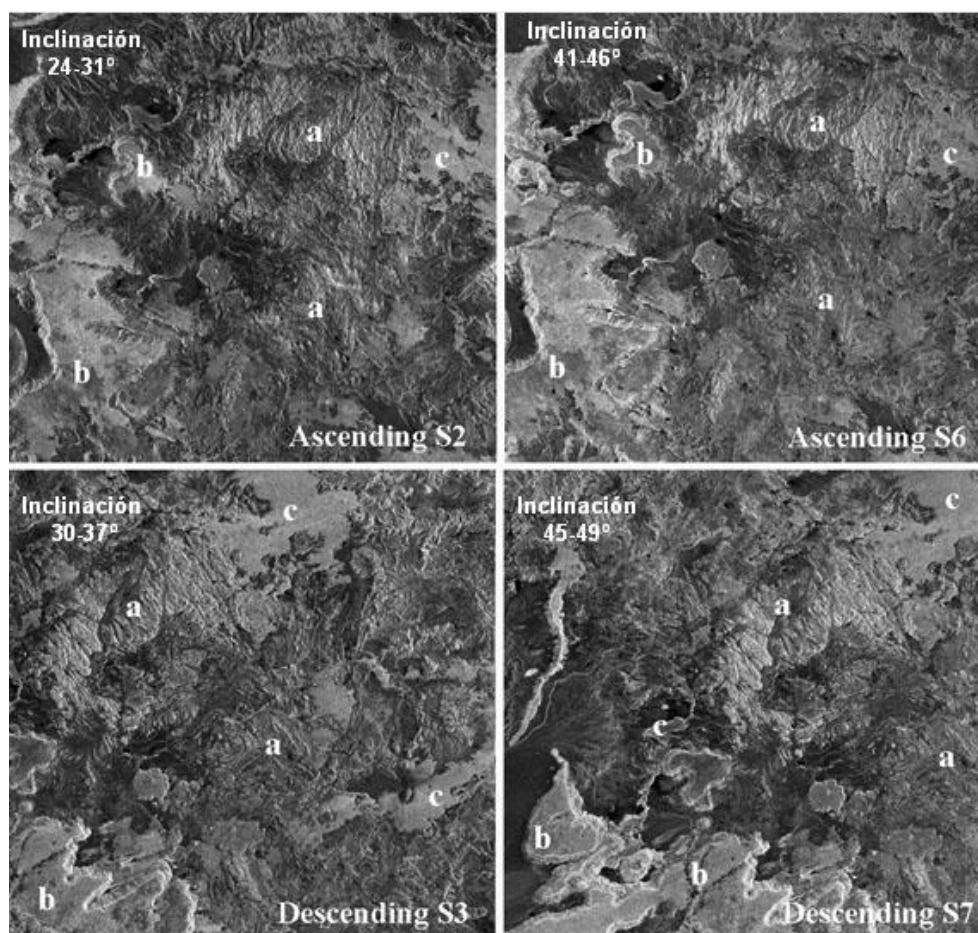


Figura 13. Imágenes SAR de RADARSAT-1: par ascendente (S2-S6) y descendente (S3-S7). Se señalan: a) depósitos volcanoclásticos jurásicos, b) mesetas de basaltos terciarios y c) planicies basálticas cuaternarias.

Figure 13. RADARSAT-1 SAR images: ascending (S2-S6) and descending (S3-S7) pair. Are indicated: a) Jurassic volcanoclastic deposits, b) Tertiary basalt plateaus and c) Quaternary basaltic plains.

LA INFORMACIÓN LITOLÓGICA EN LAS IMÁGENES RADAR

A diferencia de las imágenes ópticas que proveen una gran cantidad de información litológica dadas sus características espectrales, las imágenes de radar son limitadas desde el punto de vista espectral (una sola frecuencia). Sin embargo, varios autores plantean que existe una relación entre los patrones texturales de estas imágenes y la litología superficial (Blom y Daily, 1982; Stromberg y Farr 1986; He y Wang, 1990). En este apartado se analizan los atributos tonales y texturales de las imágenes SAR de RADARSAT-1 y su vinculación con las unidades litológicas del área de estudio mediante la interpretación visual y la utilización de distintos procedimientos de análisis digital: cálculo de variogramas experimentales, generación de imágenes de textura y clasificación textural. Asimismo se comentan los principales resultados de los trabajos de campo de validación, los que pueden leerse más extensamente en Marchionni et al. (2001) y Marchionni y Cavayas (2010).

Fundamentación

El Coeficiente de Retrodispersión (σ^0) de una roca se relaciona con la constante dieléctrica y el contenido de humedad y con características geométricas tales como la morfología y rugosidad de los afloramientos. La constante dieléctrica influye en la capacidad de los materiales de absorber, reflejar y transmitir la energía de las microondas. En general, la constante dieléctrica de los materiales secos varía entre 3 y 8, mientras que la del agua alcanza un valor de 80, por lo cual la presencia de humedad -ya sea retenida en el suelo o en la cubierta vegetal- contribuye a aumentar la constante dieléctrica, alterando significativamente la señal de retorno; la respuesta de las superficies observadas por el radar aumentará junto con el contenido de humedad. En consecuencia, de los factores arriba mencionados, la rugosidad superficial será el elemento de análisis de mayor potencial para la discriminación litológica en estas imágenes (Schaber et al., 1980).

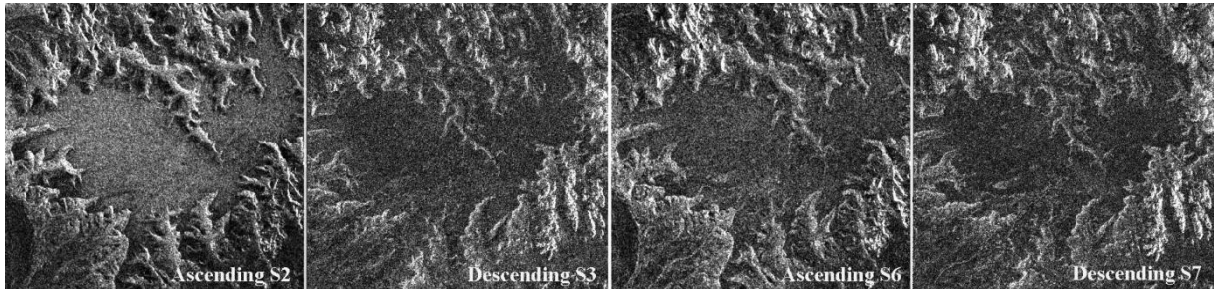


Figura 14. Set de imágenes RADARSAT-1 de distintas fechas, donde se observa un comportamiento diferencial en respuesta al contenido de humedad (la imagen S2 fue adquirida luego de una lluvia).

Figure 14. RADARSAT-1 images set of different dates, where a differential behavior in response to a moisture content (the S2 image was acquired after a rain) is observed.

Las propiedades eléctricas ocupan un lugar secundario dado que las variaciones en la constante dieléctrica de las rocas se mantienen dentro de un estrecho rango de valores (Ulaby et al., 1990) y el contenido de humedad modifica esta propiedad de manera significativa. En la Figura 14, se compara una ventana del set de imágenes RADARSAT-1 de diferentes fechas. Los datos registrados por una estación meteorológica relativamente cercana a la zona de estudio indicaron un evento de precipitaciones tan sólo en el momento de la adquisición de la imagen S2. Se puede observar que para una misma unidad litológica (conglomerados miocenos), la imagen S2 presenta un nivel general de brillo mucho mayor al observado en las otras imágenes.

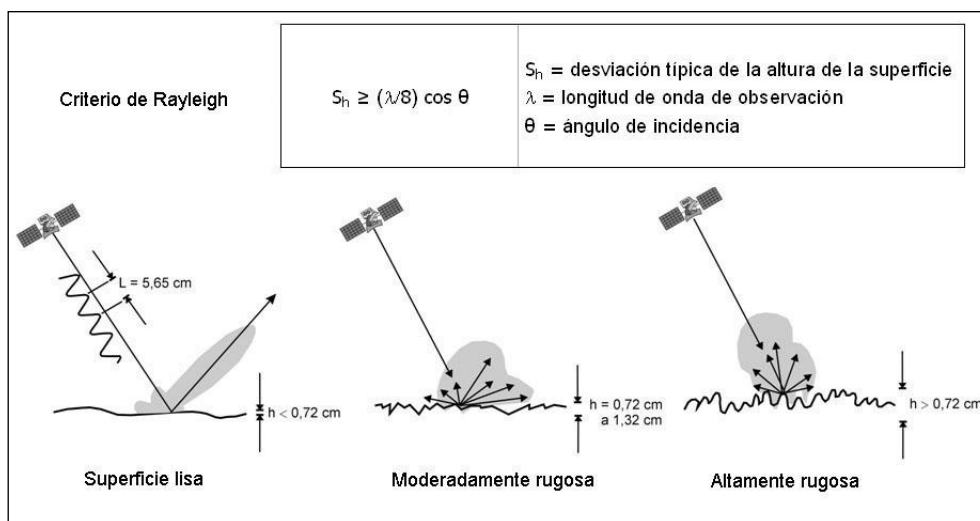


Figura 15. Respuesta radar de superficies de distinta rugosidad siguiendo el criterio de Rayleigh.

Figure 15. Radar response of different roughness surfaces according to the Rayleigh criterion.

Las imágenes de radar pueden revelar a través del tono y la textura, aspectos vinculados a la *rugosidad* de los materiales superficiales, dado que la rugosidad de la superficie incide directamente en la intensidad de la señal de retorno, la cual aumenta al aumentar la rugosidad. Esta rugosidad se resuelve en relación con la longitud de onda de la señal y el ángulo de inclinación del haz de radar. Siguiendo el criterio de Rayleigh (Figura 15), a igual rugosidad del terreno, éste aparecerá como más liso para longitudes de onda mayores y/o ángulos de incidencia mayores (observación más oblicua). Si una superficie es *lisa* para el radar, casi toda la energía incidente es reflejada hacia fuera (reflexión especular) y la señal de retorno es nula, por lo cual las unidades de grano más fino o más finamente disectadas aparecen carentes de textura y más oscuras en las imágenes. A medida que una superficie se vuelve *rugosa* la energía incidente comienza a dispersarse en todas direcciones (reflexión difusa) y parte de ella es retrodispersada de vuelta hacia el radar. A medida que el tamaño de grano o bloque aumenta, las unidades se vuelven más texturadas y brillantes en las imágenes. La rugosidad a distintas escalas de observación ha sido bien analizada por Lewis et al. (1998).

Variogramas experimentales

Para examinar las características espaciales y anisotropías de las unidades litológicas aflorantes, fueron realizados variogramas experimentales. El variograma experimental -calculado a partir de los datos de la imagen- relaciona la media de las diferencias (al cuadrado) entre los valores numéricos de pares de píxeles (varianza) con la distancia que los separa. La información espacial de la imagen es analizada mediante las propiedades de la función semi-variograma, $\gamma(h)$, definida por la fórmula de la Figura 16, en donde $B(x_i)$ es el nivel digital del píxel (x_i) , "h" es el paso o distancia en la imagen, expresado en número de píxeles y "n" es el número de observaciones requeridas para estimar $\gamma(h)$. Dado que las imágenes de satélite presentan un alto grado de correlación, las diferencias entre píxeles vecinos son por lo general más débiles que entre píxeles más alejados (St-Onge, 1994), lo que da a la curva su forma característica. Los valores de varianza aumentan progresivamente hasta un nivel (alcance) a partir del cual se vuelven relativamente constantes (meseta). La distancia a la ocurre este quiebre es directamente proporcional al grano de la textura. Más allá de esta distancia, la auto correlación espacial entre los píxeles se considera nula. La función $\gamma(h)$ debería ser nula cuando h es igual a cero, pero la existencia de ruido de fondo en la imagen genera un *efecto de pepita* por el cual $\gamma(h)$ nunca llega a ser cero. Cuando los variogramas son calculados para varias direcciones, las diferencias en la posición de la meseta y la forma de las curvas, son indicativas de anisotropías texturales.

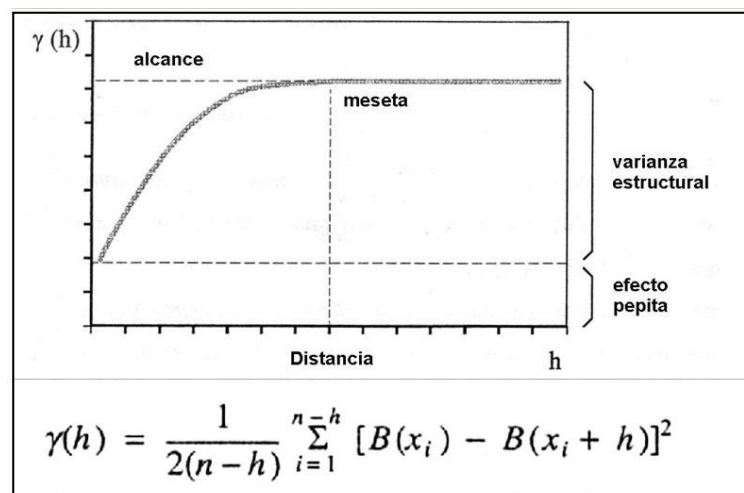


Figura 16. Función semi-variograma y principales componentes de la curva.
Figure 16. Semi-variogram function and curve components.

En esta investigación fueron seleccionadas ventanas representativas de las unidades litológicas aflorantes en el área cubierta por las imágenes SAR de RADARSAT-1. El análisis de las características espaciales de las correspondientes unidades fue realizado a partir del cálculo de los semi-variogramas de estas ventanas, computados en cuatro diferentes direcciones (cada 45°). El examen de estos semi-variogramas permitió analizar la anisotropía de las escenas y definir el *paso de muestreo*, parámetro a ser utilizado en el análisis de texturas (Marchionni, 2007). Para el cálculo

de la función semi-variograma se utilizaron los algoritmos de Deutsch y Journel (1998). Dado que las anisotropías observadas pueden estar relacionadas tanto a patrones de orientación de los objetos en la imagen como a las distintas direcciones de iluminación (Brivio et al., 1994), el mismo análisis fue realizado sobre las imágenes S2 y S6 de RADARSAT-1, de distinta geometría. Fueron seleccionadas para el análisis 18 ventanas (de 256 líneas x 256 columnas) sobre cada una de estas imágenes, incluyendo las siguientes unidades: distintos tipos de ignimbritas jurásicas, depósitos de gravas y areniscas terciarias, basaltos terciarios y cuaternarios y relleno moderno. En la Figura 17, se presentan algunos de los semi-variogramas calculados y las ventanas utilizadas para su cálculo.

Como puede observarse en la Figura 17, no se revelan diferencias muy significativas entre las distintas direcciones consideradas, excepción hecha de algunas ignimbritas donde la presencia de fuertes patrones direccionales, perpendiculares a la dirección de iluminación del haz de radar, relacionados a la estructura y morfología de los afloramientos, es responsable de intensas variaciones tonales que se reflejan en las anisotropías de las curvas (Figura 17c-d). Asimismo, la varianza a la cual es alcanzada la meseta en las unidades ignimbríticas, en cualquier dirección, es mucho mayor que la de las otras unidades examinadas, por lo que se puede suponer que estas unidades se van a diferenciar claramente de las restantes a partir de análisis texturales. Las otras unidades analizadas (basaltos, materiales sedimentarios y de relleno) presentan varianzas inferiores a las observadas para las unidades ignimbríticas y curvas muy similares en todas las direcciones consideradas (Figura 17a-b).

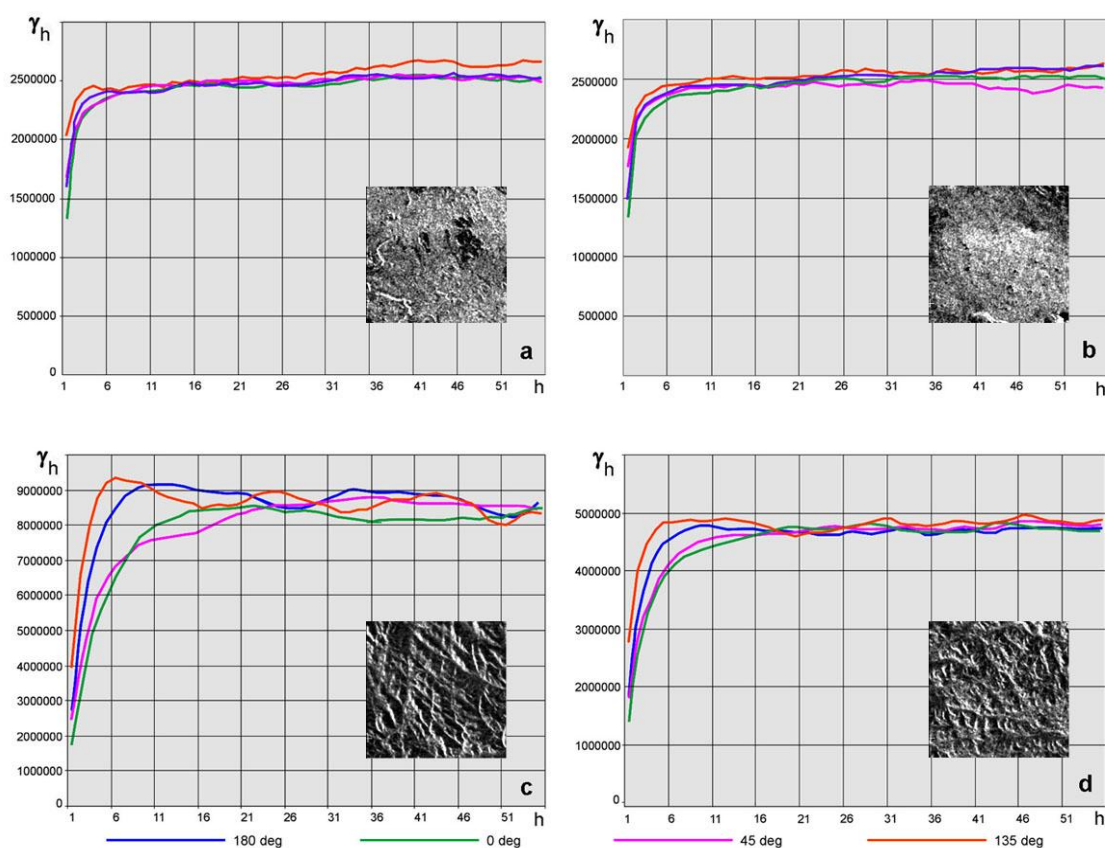


Figura 17. Semi-variogramas calculados para distintas unidades litológicas: a). basaltos cuaternarios, b). basaltos terciarios, c). ignimbritas con fuerte patrón direccional, d). ignimbritas con un patrón menos definido.
Figure 17. Semi-variograms calculated for different lithological units: a). Quaternary basalts, b). Tertiary basalts, c). ignimbrites with strong directional pattern, d). ignimbrites with a less defined pattern.

Haciendo un análisis comparativo de los semi-variogramas calculados para las distintas ventanas de S2 y S6, se observó que, si bien las curvas generadas para las distintas unidades presentan una forma similar, los valores de varianza son, por lo general, mayores para las ventanas de S2 que para las correspondientes de S6. Sobre esta base, sólo la imagen S2 fue retenida para los análisis texturales posteriores, dado que la misma puede ofrecer mayor variabilidad de información que la imagen S6. En todos los casos los semi-variogramas calculados para las distintas unidades mostraron una curva de varianza de pendiente regular, que alcanza su meseta a una distancia de

entre 5 y 11 píxeles y sigue sin cambios significativos luego de ese quiebre, para distancias mayores. Por este motivo, para la generación de los canales de textura, fueron elegidos *pasos de muestreo* de 5 y 11 píxeles, para distintos tamaños de ventanas (matrices).

Clasificación textural

Existen diversas aproximaciones para la generación de imágenes de textura y para la segmentación de las mismas en unidades de textura homogénea (He y Wang, 1990 y 1992; Pietikainen et al., 1999). El procedimiento más corriente se basa en la aplicación de distintas operaciones estadísticas sobre la imagen original para la generación de *imágenes de textura*, en las cuales cada píxel adquiere un nuevo nivel digital o valor que representa el atributo de la textura en esa ubicación. Las imágenes de textura así generadas pueden ser luego sometidas a algoritmos de clasificación para la separación de clases o unidades texturales homogéneas.

GLCM	Fórmulas	
Promedio	$\mu = \frac{1}{2} \sum_i i \times S(i)$	S y D son los histogramas de las sumas y diferencias de los valores de los píxeles (en 8 bits). La abscisa del histograma S representa todas las sumas posibles de valores de píxeles en una dirección y distancia específicas (de 0 a 512). La abscisa del histograma D representa todas las posibles diferencias de valores de píxeles en una dirección y distancia específicas (de -255 a +255). Los histogramas son calculados para una matriz de dimensiones arbitrarias centradas en cada píxel (de posición i, j).
Contraste	$\sum_j j^2 \times D(j)$	
Homogeneidad	$\sum_j \frac{1}{1+j^2} \times D(j)$	
Entropía	$-\sum_i S(i) \times \log(S(i)) - \sum_j D(j) \times \log(D(j))$	
Energía	$\sum_i S(i)^2 \times \sum_j D(j)^2$	

Tabla 2. Estadísticas de GLCM según los operadores de textura (Parker 1997).
Table 2. GLCM Statistics according texture operators (Parker 1997).

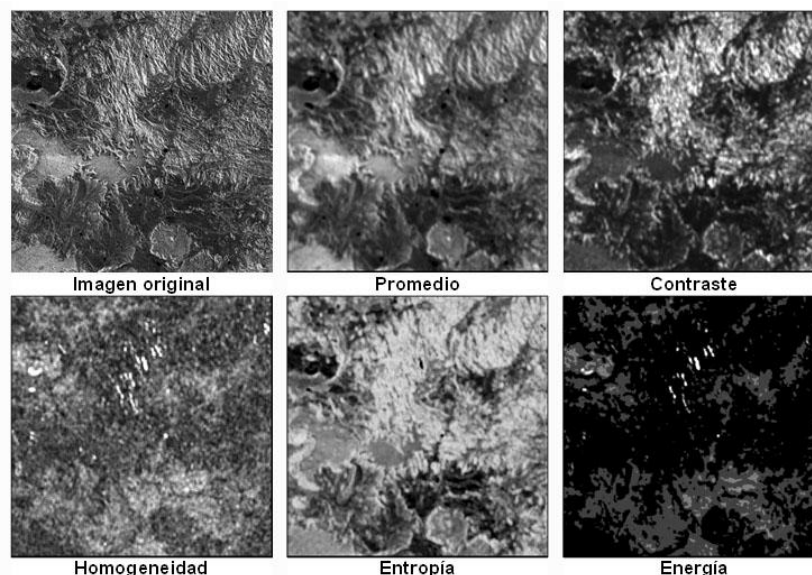


Figura 18. Imágenes de textura del Área Piloto para S2 de RADARSAT-1 generadas a partir de las matrices GLCM con un paso de muestreo de 5 píxeles. La imagen que se ilustra cubre un área de 45 km x 45 km.
Figure 18. Texture Images of RADARSAT-1 S2 Pilot Area generated from the GLCM matrices with sampling step of 5 pixels. The illustrated image covers an area of 45 km x 45 km.

Para la generación de las imágenes de textura se puede recurrir a medidas de textura locales de diferencias de niveles de gris -derivadas de estadísticas de primer orden-, o a medidas basadas en la dependencia espacial de las diferencias de nivel de gris -derivadas de las estadísticas de segundo orden-, tal el caso de las matrices de co-ocurrencia de nivel de gris o GLCM (Grey Level Co-Occurrence Matrices), propuestas por Haralick et al. (1973) y Haralick (1979). Un estudio comparativo de algunos métodos de análisis textural para la discriminación litológica fue realizado por Mather et al. (1998), quien demostró las ventajas del uso de las matrices de co-ocurrencia de nivel de gris GLCM.

En esta investigación fueron generadas imágenes de textura para el Área Piloto de la imagen S2 (Figura 12), utilizando los algoritmos de GLCM de Unser (1986, en Parker, 1997). Las matrices GLCM fueron calculadas en cuatro direcciones (cada 45°) y con un paso de muestreo fijo definido sobre la base de los parámetros espaciales de los semi-variogramas. Fueron generadas 5 imágenes de textura (promedio, contraste, homogeneidad, entropía y energía), con matrices de 13 líneas x 13 columnas (con un paso de muestreo de 5 píxeles) y de 21 líneas x 21 columnas (con un paso de muestreo de 11 píxeles). Los algoritmos utilizados se presentan en la Tabla 2.

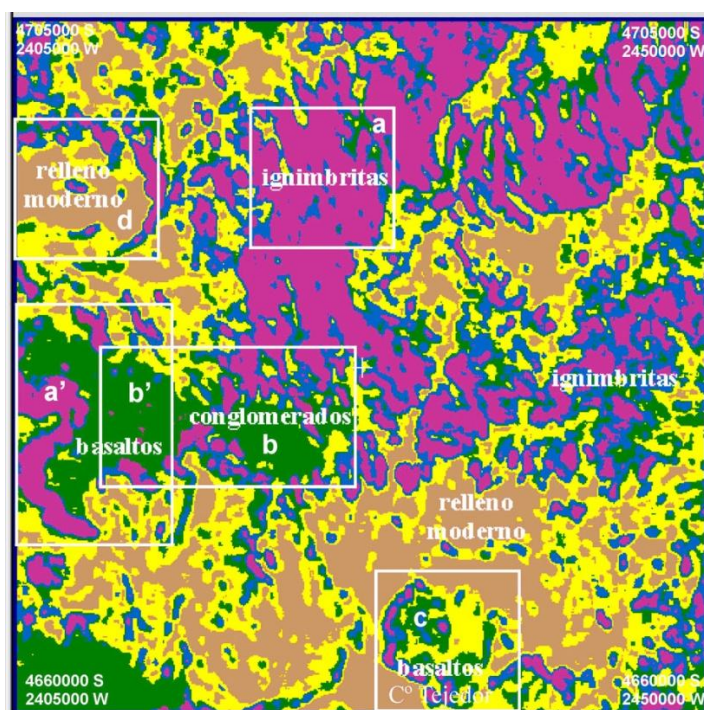


Figura 19. Resultado de la clasificación no supervisada de canales de textura de la imagen S2 de RADARSAT-1. Cada color corresponde a una *clase textural*. El significado de las letras se describe en el texto.

Figure 19. Unsupervised classification result of RADARSAT-1 S2 texture channels. Each color corresponds to a *textural class*. The meaning of the letters described in the text.

Entre las imágenes derivadas de los distintos operadores de textura, fueron retenidas las imágenes de promedio, contraste y entropía, con un paso de muestreo de 5 píxeles por su mayor variabilidad textural y su potencialidad de discriminación (Figura 18). Estas tres imágenes fueron sometidas a una clasificación *no supervisada* y un control geológico para analizar la capacidad de las mismas de discriminar regiones de textura homogénea que pudieran vincularse a unidades litológicas (Figuras 19 y 20). Del análisis comparativo entre clases texturales (unidades de textura derivadas de las imágenes) e informativas (unidades litológicas) se desprende que: a-a') existen confusiones entre las ignimbritas con fuerte patrón estructural y otras unidades litológicas (como los basaltos) que tienen pendientes escarpadas orientadas hacia el radar, b-b') algunas unidades que corresponden a litologías diferentes (basaltos y conglomerados) son agrupadas en la misma clase por similitudes texturales, c) se pueden diferenciar clases texturales dentro de unidades de litología homogénea, como puede observarse en los basaltos de la meseta del C° Tejedor y d) las zonas deprimidas ocupadas por relleno moderno son las unidades que se diferencian más fácilmente del resto. Estas observaciones motivaron un análisis más profundo de las relaciones entre los patrones texturales observados en las imágenes y las características de las unidades litológicas presentes.

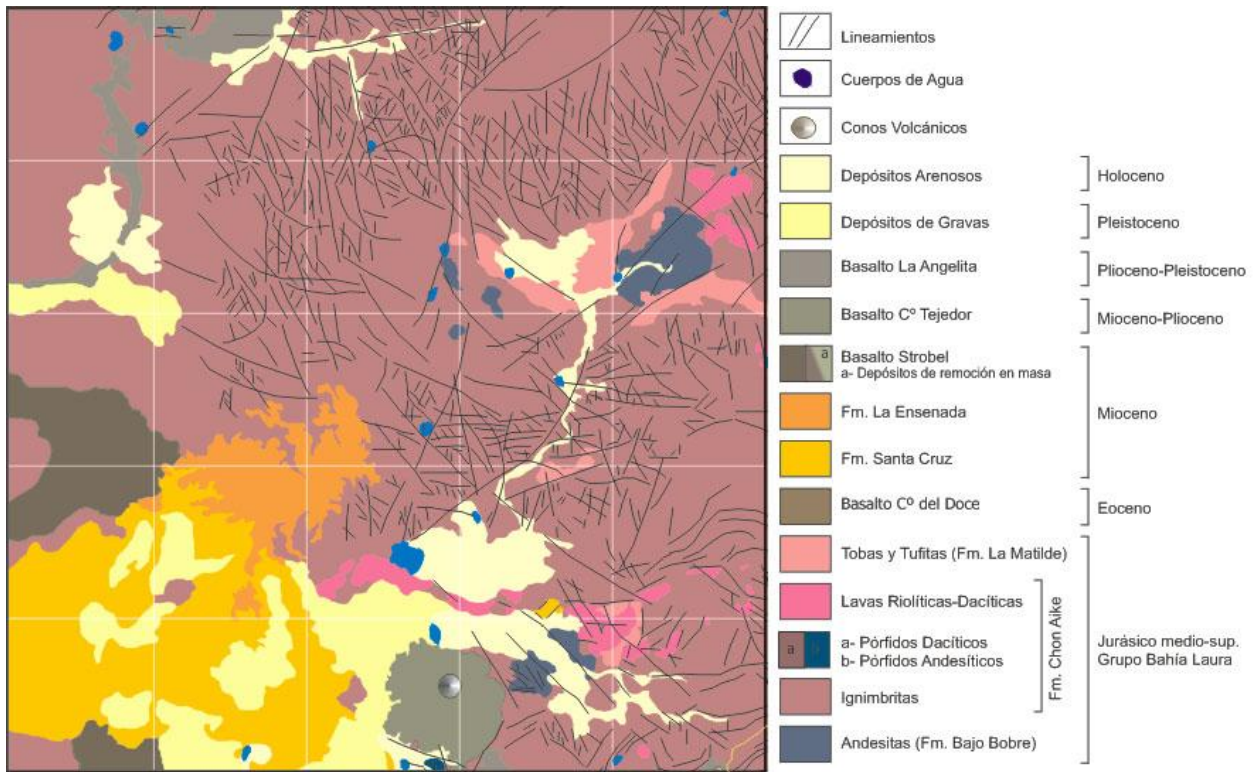


Figura 20. Mapa geológico simplificado del área piloto utilizado para la validación de la clasificación textural (Modificado de Marchionni, 2007).

Figure 20. Simplified geological map of the pilot area used for textural classification validation (Modified from Marchionni, 2007).

Validación de campo

Con la finalidad de establecer las relaciones entre los patrones tonales-texturales de las imágenes y las unidades litológicas aflorantes, se realizaron observaciones de campo a nivel de los afloramientos (tipo litológico, porcentaje de roca expuesta, grado de disección, tipo, tamaño y densidad de la cobertura vegetal, etc.) y mediciones de rugosidad de superficie *in situ* con un *rugosímetro*. A partir de ellas se calcularon parámetros de rugosidad de superficie (altura promedio, máxima variación de altura, coeficiente de variación, desviación estándar de la altura y porcentaje de reducción). Los datos de campo fueron contrastados con los niveles de brillo y retrodispersión de las distintas unidades en las imágenes SAR de RADARSAT-1 y sometidos a distintos análisis estadísticos (Marchionni et al., 2001; Marchionni y Cavayas, 2010).

Entre los resultados, el análisis de agrupamiento realizado indicó una marcada asociación entre tipo de cubierta vegetal, grado de disección y nivel de gris, asociación que no se manifiesta entre estas características y los tipos litológicos. Los factores tamaño de grano o de bloque y cubierta vegetal mostraron un cierto grado de correlación: una unidad con gran tamaño de bloques no favorece una cubierta vegetal densa; una unidad finamente disectada con una cubierta vegetal de alta densidad puede aparecer en la imagen con las mismas características tonales y texturales que una unidad de bloques grandes. Los resultados del análisis textural realizado sobre las imágenes fueron consistentes con los obtenidos a partir de las observaciones de campo y las medidas de rugosidad de superficie, en donde no se encontró una relación directa y clara entre los niveles de brillo y retrodispersión calculados a partir de las imágenes y las unidades litológicas aflorantes, sino más bien con sus características de rugosidad superficial relacionadas al tamaño de grano o bloque en materiales sedimentarios, y al grado de disección de los afloramientos en las rocas masivas. A menor escala, las unidades presentan patrones más marcados, derivados de su estructura, que pueden ser acompañados por una configuración particular de la red de drenaje. Una cubierta vegetal, aún dispersa, ejerce también su influencia en el tono y la textura de las imágenes.

PERCEPCIÓN RADAR DE RASGOS ESTRUCTURALES

Las imágenes de radar son particularmente útiles para la identificación de rasgos lineales que puedan estar indicando la presencia de estructuras geológicas, debido a la geometría de observación lateral de estos sistemas y la fuerte direccionalidad del haz de radar (D'Iorio et al., 1995; Singhroy y St-Jean, 1999; Mahmood et al. 2000). Los lineamientos estructurales pueden ser identificados directamente por la presencia de figuras características de ruptura, discontinuidad o desplazamiento de los afloramientos o ser inferidos a partir de la presencia de indicadores indirectos. Estos últimos pueden corresponder a discontinuidades radiométricas (alineaciones o cambios abruptos de tono o textura originados por cambios litológicos, de vegetación o de humedad), a rasgos hidrológicos (linealidad de la red hidrográfica, alineación de cuerpos de agua, anomalías de drenaje) o bien a elementos morfológicos los que son resaltados por la presencia de sombras de radar (cambios de pendiente, escarpas de falla, facetas triangulares, presencia de valles y depresiones). En este apartado se analiza la percepción radar de rasgos direccionales en imágenes SAR de RADARSAT-1 y se discuten algunos procedimientos de análisis digital que pueden optimizar la extracción de rasgos y patrones lineales por métodos automáticos (Marchionni et al., 2000 y Marchionni y Cavayas, 2010).

Fundamentos

Las imágenes de radar de una misma zona pueden ofrecer información muy diferente en función de la dirección de iluminación (modo ascendente o descendente, mirada a la derecha o a la izquierda) y de la inclinación del haz de microondas que modifican las condiciones de iluminación de las superficies observadas. Asimismo, la geometría del terreno -sus pendientes y orientaciones- condiciona el ángulo de incidencia local de la señal del radar con un efecto significativo en la señal de retorno.

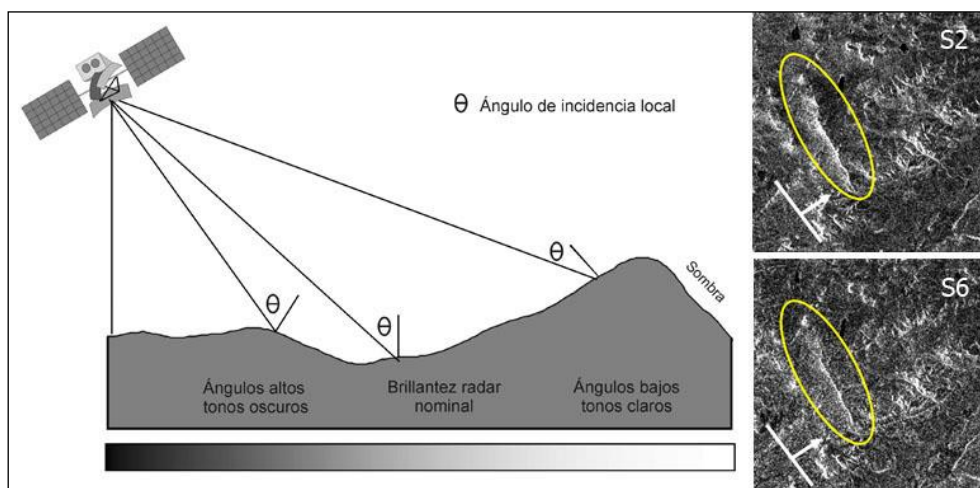


Figura 21. Efecto de la topografía y del ángulo de incidencia local en la señal de retorno del radar. Visualización de una escarpa en Imágenes SAR de RADARSAT-1 con distinto ángulo de incidencia: S2 (24-31°) y S6 (41-46°).

Figure 21. Effect of topography and local incidence angle on radar return signal. Viewing an escarpment in RADARSAT-1 SAR Images with different incidence angle: S2 (24-31°) and S6 (41-46°).

La observación de los cambios de pendientes asociados a la morfología de las zonas de falla se ve enriquecida por la geometría de observación lateral de los sistemas de radar. La percepción de estos rasgos en las imágenes dependerá de la capacidad de los sensores de registrar las variaciones sutiles de respuesta asociadas a los mismos (De Sève et al., 1994). Las pendientes orientadas hacia el radar adquieren tonos más claros, efecto que varía en función del ángulo de inclinación del haz de radar en relación con la topografía local (Figura 21).

Asimismo, un ángulo de observación adecuado, facilita la detección de rasgos estructurales aún cuando las dimensiones de los mismos estén por debajo del límite de resolución del radar. La presencia de varias superficies lisas y continuas perpendiculares entre sí o superficies inclinadas hacia el radar se comportan como reflectores angulares que modifican la trayectoria del haz incidente y lo devuelven en la misma dirección de origen, provocando reflexiones muy intensas (Figura 22).

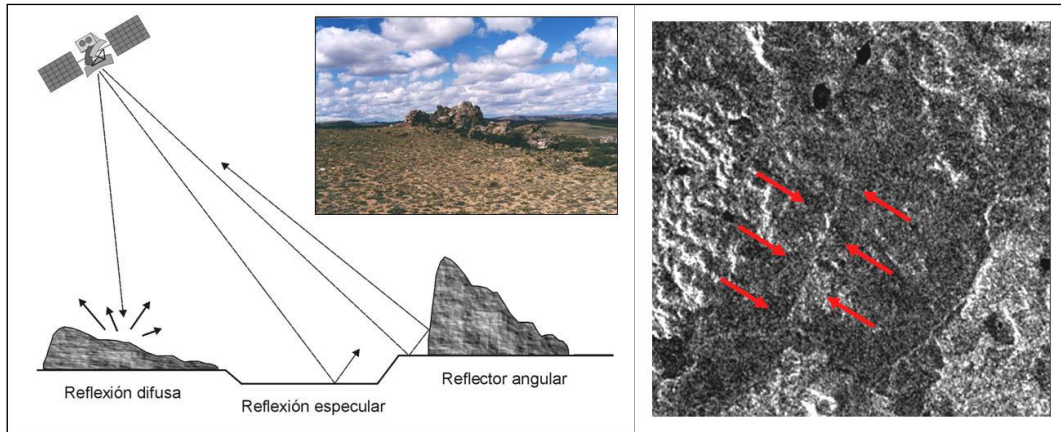


Figura 22. Filones de cuarzo mineralizados detectados en el área de La Manchuria en una imagen SAR de RADARSAT-1 ascendente adquirida en modo S2 (24-31°). La imagen de la figura cubre un área de 6 x 6 km.
Figure 22. Mineralized quartz veins detected in La Manchuria area in an ascending RADARSAT-1 SAR image acquired on S2 (24-31°) mode. The image of figure covers an area of 6 x 6 km.

Este comportamiento se ha observado en diques, filones, vetas de cuarzo, cuerpos de reemplazo y otras estructuras mineralizadas asociadas a zonas de falla, que se presentan frecuentemente en el terreno como elementos tabulares discontinuos con crestas de expresión convexa o aguda, simétricas (verticales) o asimétricas (inclinadas). La visibilidad de estos rasgos dependerá de su expresión morfológica y de la relación entre el ángulo de incidencia del haz del radar y la inclinación de las mismas, manifestándose en las imágenes como *líneas claras* (Marchionni y Cavayas, 2010).

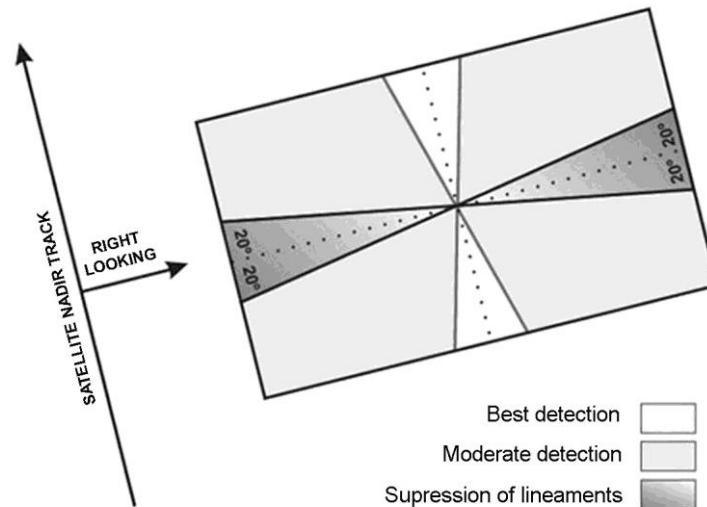


Figura 23. Visualización de rasgos lineales en las imágenes radar (RADARSAT Int., 1997).
Figure 23. Visualization of linear features in radar images (RADARSAT Int, 1997).

En todos los casos, la visibilidad de los patrones direccionales se verá condicionada por el ángulo de aspecto (Harris, 1985). El ángulo de aspecto describe la orientación relativa del haz de radar incidente con respecto a la dirección de las características lineales del terreno. Cuando existen rasgos lineales con expresión morfológica, tal el caso de algunas estructuras geológicas, la orientación de estos rasgos en relación con la dirección de iluminación del haz de radar condiciona su respuesta en las imágenes. En líneas generales, las imágenes tomadas desde direcciones opuestas de observación contendrán información geológica complementaria (Deslandes y Gwyn, 1991, Lowman Jr., 1994) y los rasgos estructurales normales a la iluminación serán realizados dado que la señal de retorno de los mismos será mayor, al igual que el efecto de sombra (Figura 23), mientras que aquellos que estén orientados en el sentido de la iluminación del haz de radar y hasta 20° pueden tornarse invisibles (Lowman et al., 1987; Harris, 1991). Así lo corroboraron las interpretaciones

estructurales realizadas sobre imágenes SAR de ERS-1 y ERS-2 con distintas direcciones de observación en un sector del Macizo del Deseado (Marchionni et al., 1997 y 1998) y las realizadas con los pares estereoscópicos SAR de RADARSAT-1 (Marchionni, 2007; Marchionni y Cavayas, 2010) donde las estructuras se hicieron más visibles cuando el ángulo de aspecto era el adecuado.

Extracción automática de rasgos lineales

La extracción automática de rasgos lineales que pueden ser relacionados eventualmente a elementos estructurales a menudo facilita la identificación de los mismos, sobre la base de la presencia de los indicadores indirectos mencionados. Estas operaciones pueden ser realizadas por una variedad de métodos y técnicas de filtrado, que tienen en cuenta que tales rasgos lineales (rectos o curvos, positivos o negativos) se manifiestan generalmente en las imágenes como variaciones más o menos súbitas de nivel digital o de brillo. Estos rasgos pueden ser detectados mediante la aplicación de operadores de detección de *líneas* o de *bordes* (James, 1987; Pratt, 1991), filtros morfológicos (Parker, 1977), operadores estadísticos (Bovik, 1988; Adair y Guindon, 1990) o métodos que recurren a la transformada de las imágenes (Deslandes y Gwyn, 1991; Karineli et al., 1996). Los usados más frecuentemente son los operadores de detección de líneas y de bordes (filtros de convolución) y, en este sentido, la mayor parte de las aplicaciones geológicas han sido realizadas sobre imágenes ópticas (Budkewitsch et al., 1994), mientras que la utilidad de su aplicación en imágenes de radar está en continuo análisis (De Sève et al., 1994).

En esta investigación fueron aplicados, sobre las imágenes de radar, distintos tipos de filtros para la detección de rasgos lineales (filtros espaciales y de frecuencias) sobre la imagen S2 de RADARSAT por ser la que presenta la mayor amplitud de contraste radiométrico, revelando con mayor claridad la presencia de discontinuidades radiométricas y rasgos lineales con expresión morfológica. Sobre esta imagen se aplicaron filtros direccionales para la detección de *líneas* y de *bordes* en el dominio espacial y filtros selectivos de frecuencias espaciales (filtros de paso-bajo, paso-alto y paso-banda) en el espacio de Fourier (Marchionni et al., 2000), para aislar las frecuencias espaciales vinculadas a patrones estructurales. Los resultados obtenidos fueron comparados con los lineamientos estructurales definidos a partir de la interpretación visual del par estereoscópico S2-S6 de RADARSAT/SAR (Marchionni y Cavayas, 2010). Si bien los operadores de detección de bordes y de líneas son eficientes en la mayoría de los casos, su aplicación en las imágenes de radar se ha visto complicada por la presencia del ruido multiplicativo. El fuerte *speckle* de las imágenes de radar determina la generación de una cantidad de artefactos y bordes falsos que dificultan el reconocimiento de los bordes y líneas verdaderos (Raucoules y Thomson, 2000).

Análisis de frecuencias espaciales

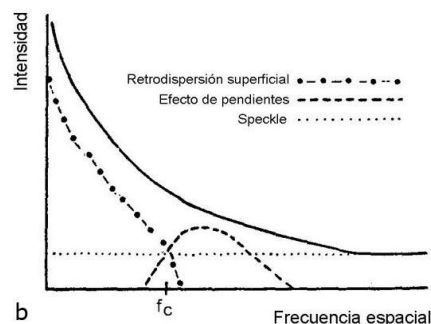
Cuando hablamos de las frecuencias espaciales de una imagen nos referimos a un parámetro definido por el número de cambios en el nivel de brillo (o nivel digital) por unidad de distancia (Jensen, 1996). El espectro de frecuencias espaciales de una imagen numérica (de dimensión finita y valores discretos) se obtiene aplicando a la misma la ecuación de la Transformada de Fourier, bajo la forma matricial de la Figura 24a. En esta investigación se han aplicado filtrados interactivos de frecuencias espaciales en el espacio de Fourier para minimizar la incidencia del *speckle* de las imágenes y mejorar así la performance de los operadores de detección de líneas y bordes. La utilización de filtrados de frecuencias ha permitido asimismo aislar las componentes espaciales vinculadas a los cambios de pendiente asociados a rasgos morfológicos lineales de aquellas componentes espaciales provocadas por cambios en la retrodispersión relacionados a variaciones litológicas (Marchionni et al., 2000; Marchionni y Cavayas, 2010).

Según Bloom y Daily (1982) y Daily (1983), las variaciones tonales que se observan en las imágenes radar son consecuencia de distintos mecanismos físicos que se producen a escalas diferentes y que se corresponden con frecuencias espaciales distintas (Figura 24b): a) los rasgos de gran escala, que se corresponden con las bajas frecuencias espaciales, están dominados por variaciones *lentas* en la retrodispersión de la superficie (y en los niveles de brillo), relacionadas a cambios en la vegetación y variaciones litológicas o de rugosidad, b) las variaciones tonales más *rápidas* que se corresponden con las altas frecuencias espaciales, están moduladas por la existencia de planos inclinados orientados hacia el radar y se relacionan con los efectos de la pendiente local y la topografía, y c) una tercera componente, que muestra las frecuencias espaciales más elevadas, es consecuencia de la presencia de ruido de estas imágenes (*speckle*). El punto de transición entre altas y bajas frecuencias es f_c y varía según la morfología del territorio.

$$F(m,n) = 1/N^2 \left(\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} f(i,k) \exp[-j2\pi(mi+nk)/N] \right) \quad f_0 = 1/Nd$$

N = tamaño de la imagen (en píxeles) j = √-1
d = dimensión del píxel m,n = frecuencia en la dirección x e y
k,i = ubicación del píxel según ejes x e y respectivamente, medida en unidades
de la frecuencia de base f₀

a



b

Figura 24. a). Ecuación de la Transformada de Fourier para las imágenes numéricas. b). Componentes del espectro de una imagen de radar. La línea continua indica el espectro total de la imagen.

Figure 24. a). Numerical images Fourier Transform equation. b). Radar image spectrum components. The solid line indicates the total spectrum of the image.

El análisis de Fourier es una técnica matemática que permite separar los componentes de distinta frecuencia espacial de una imagen. El filtrado de frecuencias espaciales en el espectro de Fourier ha sido utilizado por varios autores para aislar las componentes litológicas de una imagen (Bloom y Daily, 1982; Stromberg y Farr, 1986) y para la detección de estructuras geológicas sutiles (Daily, 1983). Deslandes y Gwyn (1991) lo han utilizado para cuantificar las frecuencias espaciales de una imagen y observar las direcciones predominantes de los rasgos lineales.

Para analizar las frecuencias espaciales de las imágenes RADARSAT-1 hemos aplicado la Transformada de Fourier a cada una de ellas lo que nos ha permitido generar un diagrama cartesiano de frecuencias, de forma simétrica, donde las frecuencias aumentan, en las direcciones x e y, desde el centro del diagrama hacia fuera (Figura 25) La distribución de la nube de puntos muestra la presencia de fenómenos periódicos en la imagen y la orientación dominante de los mismos. En la Figura 25 se muestran los espectros de frecuencias de las cuatro imágenes radar de la misma zona, adquiridas bajo distintas condiciones de iluminación. Las imágenes ascendentes (S2 y S6) se mostraron más ricas en altas frecuencias espaciales que las imágenes descendentes (S3 y S7), respondiendo a los patrones estructurales dominantes de la escena (de orientación ONO-ESE), los que fueron iluminados perpendicularmente por el haz de radar en las imágenes ascendentes.

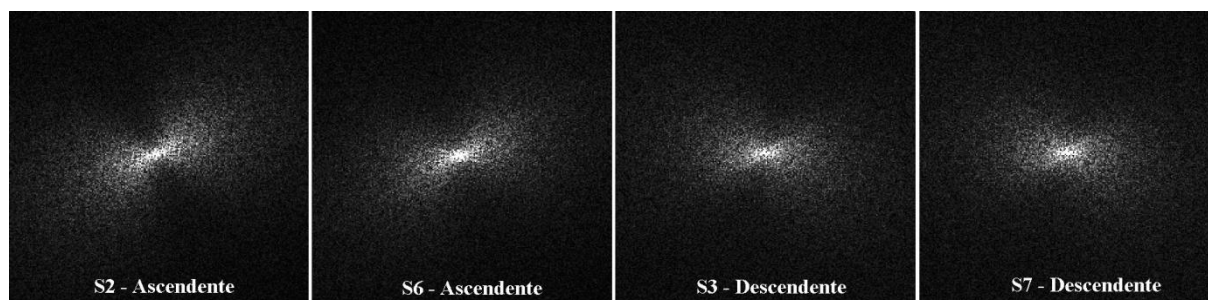


Figura 25. Espectro de Fourier de imágenes SAR de RADARSAT adquiridas con distintas condiciones de iluminación, donde se observan diferencias en el contenido y orientación de las frecuencias espaciales.

Figure 25. Fourier spectrum of RADARSAT SAR images acquired with different illumination conditions, where differences are observed in the content and direction of spatial frequencies.

Siguiendo estos conceptos, hemos intentado localizar el punto de transición (f_c) entre las altas y bajas frecuencias, para aislar los efectos de pendiente -por su probable vinculación con rasgos estructurales- de las variaciones relacionadas al ruido del radar y a cambios litológicos. Para este propósito fueron generadas, a partir de la imagen S2 de RADARSAT-1, una serie de ventanas sobre unidades geológicas de distinto patrón estructural. Luego de la aplicación de la Transformada de Fourier sobre estas ventanas, se generaron filtros circulares (paso alto, paso bajo y pasa banda) para eliminar y retener determinadas frecuencias espaciales. La aplicación posterior de la función inversa de la Transformada de Fourier permitió volver al espacio original de la imagen para su análisis visual o para la aplicación de filtros de detección de bordes y/o de líneas (Marchionni et. al, 2000).

El filtrado de frecuencias espaciales en el espectro de Fourier resultó de gran utilidad para mejorar la performance de la aplicación de los operadores de líneas y de bordes sobre las imágenes de radar, eliminando los rasgos espurios originados por efecto del ruido del radar. En la Figura 28a se ilustra una ventana de la imagen S2 de RADARSAT cubriendo unidades geológicas diferentes, básicamente flujos ignimbríticos y relleno moderno. La Figura 26b muestra la imagen resultante de la aplicación de un filtrado circular de frecuencias (pasa banda) de sobre el espacio de Fourier de la imagen original. Las Figuras 26c y 26d ilustran el resultado de la aplicación de operadores de detección de líneas (ventana de 7 x 7 píxeles) sobre ambas imágenes. En la primera imagen (Figura 26c) fueron detectados numerosos rasgos de distinto origen y magnitud, mientras que en la segunda se preservaron los principales rasgos de pendiente, más continuos y de mayor magnitud (Figura 26d).

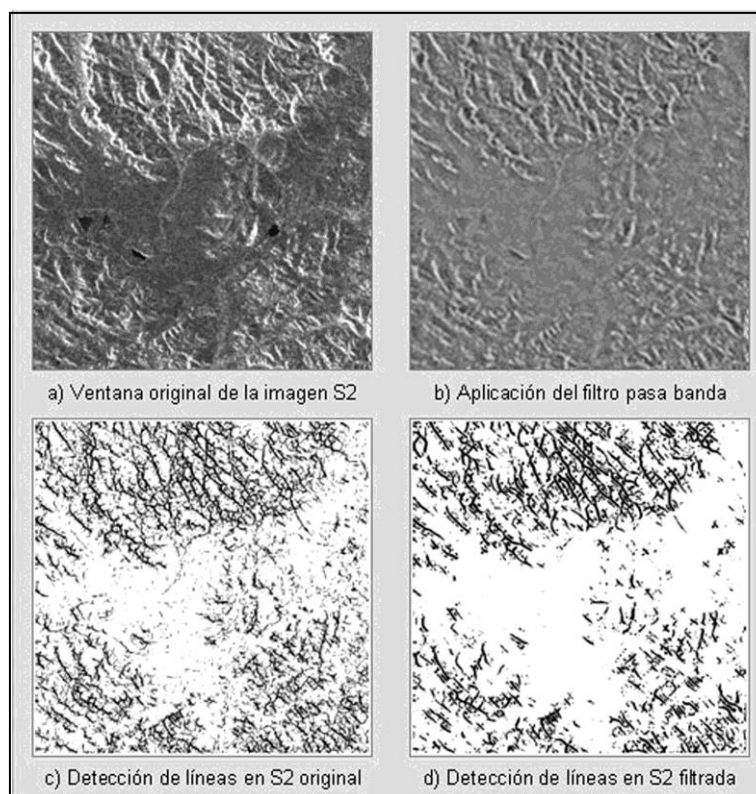


Figura 26. Resultados de la aplicación de un operador de detección de líneas sobre una ventana de la imagen S2 de RADARSAT original y sobre la misma ventana luego de la aplicación de un filtrado de frecuencias espaciales (pasa banda) mediante el análisis de Fourier.

Figure 26. Results of the application of a detection lines operator on a RADARSAT S2 original window image and on the same window after application of spatial frequency filter (pass band) by a Fourier analysis.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A la luz de las investigaciones realizadas, la flexibilidad de las imágenes RADARSAT-1/SAR (variedad de ángulos de incidencia, direcciones de observación, posibilidad de visión estereoscópica, etc.), las convierte en una importante fuente de información geológica, teniendo en cuenta que el conocimiento de las características de la señal (frecuencia y polarización) y de la geometría de la observación (ángulo de incidencia, dirección de visión) es fundamental para deducir las interacciones que se producen a nivel de los afloramientos y bien interpretar las características geológicas de un área. Algunos parámetros van a ser claves para la extracción de información litológica y otros para la extracción de información estructural. Dentro de este contexto, esta investigación estuvo orientada a analizar dos cuestiones fundamentales de la cartografía geológico-estructural con imágenes radar: la identificación de rasgos lineales que puedan estar manifestando la presencia de lineamientos estructurales y la discriminación de unidades texturales posiblemente vinculadas a distintas litologías.

En el caso de los rasgos lineales de probable origen estructural, la expresión morfológica superficial de los mismos -sus pendientes y orientaciones- impacta significativamente en el retorno de la señal al

condicionar el ángulo de aspecto y el ángulo de incidencia local del haz de radar. En este punto se ha comprobado el importante efecto que tiene el ángulo de aspecto sobre la visualización de los rasgos, lo que pone de relevancia la necesidad de contar con imágenes de distinta dirección de observación para realizar una interpretación estructural completa. Hay que destacar también que la geometría de observación de las imágenes de radar con un ángulo de visión adecuado, facilita la detección de rasgos estructurales en general, aún cuando estos rasgos son de reducidas dimensiones, muchas veces inferiores a la resolución espacial de las imágenes. En cuanto a las herramientas de análisis digital, el análisis de Fourier ha demostrado ser una herramienta muy efectiva para explorar las direcciones estructurales dominantes de una imagen, tal es así que el espectro de frecuencias espaciales de imágenes de distinta geometría (modo ascendente o descendente y distintos ángulos de incidencia) pone en evidencia la direccionalidad de los rasgos lineales en relación con la dirección de observación del radar (*right looking* o *left looking*). Respecto a los procedimientos de análisis digital utilizados frecuentemente para la extracción de rasgos y patrones lineales (filtrados de bordes y de líneas), la aplicación de filtros pasa banda de frecuencias espaciales en el espacio de Fourier, previamente a la aplicación de los algoritmos de detección de líneas y bordes, ha permitido minimizar la presencia de los rasgos espurios motivados por la presencia del *speckle*, por lo cual el filtrado de frecuencias espaciales en el espacio de Fourier se vislumbra como una herramienta muy apropiada para optimizar la aplicación de los otros operadores.

En el caso de los rasgos tonales y texturales, los análisis digitales realizados (variogramas experimentales, generación de imágenes de textura y clasificación textural) y las correspondientes observaciones de validación de campo indican que tales atributos están influenciados por varios factores, no siempre relacionados a la litología. La sensibilidad de las microondas a las propiedades dieléctricas, al contenido de humedad y a la rugosidad superficial, se ve reflejada en el tono y textura de las imágenes, dado que estos factores inciden directamente en la intensidad de la señal. La sensibilidad de las microondas a la morfología y rugosidad de las superficies permite distinguir unidades que presentan un distinto grado de disección o tamaño de grano o bloque o que han mostrado frente a la erosión una respuesta diferente, así como unidades de distinta edad. La combinación de estos factores, tan condicionada por los parámetros de la señal de radar, ha dado lugar a la discriminación de unidades texturales, que no siempre están relacionadas con la litología. El análisis de los resultados de la clasificación textural ha demostrado que las clases texturales corresponden en general a distintas unidades litológicas; sin embargo dentro de una misma unidad litológica dos o tres clases texturales diferentes pueden estar presentes. Las variaciones en el grado de disección de los afloramientos, en el tamaño de grano o de bloque, en el tipo y densidad de la cubierta vegetal, en el contenido de humedad y las variaciones de la topografía local dieron lugar a distintas clases texturales. Aún si el clasificador es sensible a las variaciones de textura, la relación entre esta observación y la litología de la superficie no es muy directa. Este resultado fue confirmado por las observaciones de campo, las medidas de rugosidad de superficie y sus análisis estadísticos, que resaltan la complejidad de la relación entre los parámetros de superficie a nivel de afloramiento y los datos provenientes de la imagen. Consideramos que la integración de la información textural de las imágenes radar con información espectral proporcionada por datos ópticos puede proporcionar un conjunto de herramientas mucho más completo para resolver los problemas de asignación litológica.

Para concluir, la efectividad del uso de las imágenes de radar en geología radica en la selección adecuada de los datos en función de los objetivos geológicos planteados, la escala de trabajo y las características geológicas, estructurales y morfológicas del territorio a estudiar. Asimismo, dada la complejidad y variabilidad de los factores que intervienen en la formación de estas imágenes, la realización de trabajos de campo de validación mejoran significativamente la comprensión de las interacciones producidas a nivel de los afloramientos optimizando la utilización de estas imágenes para la cartografía geológica y el análisis estructural en cualquier territorio.

Agradecimientos: Las imágenes SAR de RADARSAT fueron provistas por el Centro Canadiense de Sensores Remotos (CCRS) y la Agencia Espacial Canadiense (CSA) en el marco de los Programas GlobeSAR2 y SOAR (Science and Operational Applications Research for RADARSAT-2). Algunas de estas imágenes fueron facilitadas por la Unidad Sensores Remotos y SIG del SEGEMAR.

REFERENCIAS

Abrams, M.J., Ashley, R., Rowan, L., Goetz, A., Kahle, A., (1977). Mapping of hydrothermal alteration in the Cuprite Mining District, Nevada, using aircraft scanner images for the spectral region 0.46 to 2.36 μm . *Geology*, (5): 713-718.

- Adair M. y Guindon B., (1990). Statistical edge detection operators for linear feature extraction in SAR images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 16 (2): 10-19.
- Attema, E., Desnos, Y-L., Duchossois, G., (2000). Synthetic Aperture Radar in Europe: ERS, Envisat, and Beyond. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 21 (1): 155-161.
- ASI, (2009). COSMO-SkyMed Mission and Product Description. Italian Space Agency. 119 p.
- Bovik, A.C., (1988). On detecting edges in speckled images. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 36 (10): 1618-1627.
- Bedell, R.L., (2001). Geological mapping with ASTER satellite: new global satellite data that is a significant leap in remote sensing geologic and alteration mapping. *Special Publication Geology Society of Nevada*, (33): 329–334.
- Berger, B.R., King, T.V.V., Morath, L.C., Phillips, J.D., (2003). Utility of high-altitude infrared spectral data in mineral exploration: Application to northern Patagonia Mountains, Arizona: *Economic Geology*, (98): 1003–1018.
- Bloom, R.G. y Daily, M., (1982). Radar image processing for rock-type discrimination. En: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-20 (3): 343-351.
- Brivio, P. A., Doria, I. and Zilioli, E., (1994). Structure function analysis of natural scenes from Landsat TM data. *ITC Journal*, (1): 1-6.
- Budkewitsch, P., Newton G., Hynes, A., (1994). Characterization and extraction of linear features from digital images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 20 (3): 268-279.
- CASI, (1993). Special Issue: RADARSAT. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 19 (4), entire issue.
- CASI, (1994). Special Issue on Radar Geology. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 20 (3), entire issue.
- CASI, (1999). Special Issue on the Applications of RADARSAT-1 Data in Geology. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25 (3), entire issue.
- CASI, (2004). *Canadian Journal of Remote Sensing*, RADARSAT-2 Special Issue, 30 (3), 365 p.
- CCRS, (1995). Conceptos básicos de teledetección por radar. Proyecto ProRADAR. Canada Centre for Remote Sensing, Ottawa, Canadá. Octubre de 1995, 89 p.
- Daily, M., (1983). Hue-Saturation-Intensity Split-Spectrum Processing of Seasat Radar Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49 (3): 349-355.
- De Sève, D., Desjardins, R., Toutin, T., (1994). Contribution des données radar d'ERS-1 dans l'appréhension de l'organisation des linéaments: Le cas de l'astrobleme de Charlevoix. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 20 (3): 233-244.
- Deslandes, S. y Gwyn, Q., (1991). Evaluation de SPOT et SEASAT pour la cartographie des linéaments: comparaison basée sur l'analyse de spectres de Fourier. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 17 (2): 98-110.
- Desnos, Y.-L., Buck, C., Guizarro, J., Levrini, G., Suchail, J.L., Torres, R., Laur, H., Closa, J., Rosich, B., (2000). The ENVISAT advanced synthetic aperture radar system. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 (Jul 2000), 3: 1171 – 1173.
- Deutsch, C.V. y Journel, A.G., (1998). *Geostatistical Software Library and User's Guide (GSLIB)* (2nd. Ed.) Applied Geostatistics Series. Oxford University Press. 369 p.
- D'Iorio, M., Budkewitch A, P., Mahmood, N.N., (1997). Practical considerations for geological investigations using RADARSAT-1 stereo image pairs in tropical environments. *GER'97*. 8 p.
- Drury, S.A., (1993). *Image Interpretation in Geology* (2nd. Ed.). Chapman & Hall Eds. London. 283 p.
- Elachi, C., (1987). *Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Society. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., New York. 231 p.
- Evans, D.L., Plant, J.J., Stofan, E.R., (1997). Overview of the Spaceborne Imaging Radar C/X band Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR) Missions. *Remote Sensing of Environment*, (59): 135-140.
- Evans, D.L., Farr, T.G., Ford, J.P., Thompson, T.W., Werner, C.L., (1986). Multipolarization Radar Images for Geologic Mapping and Vegetation Discrimination. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24 (2): 246-257.
- ESA, (2007). *ASAR Product Handbook*. European Space Agency. Issue 2.2. 564 p.
- Ford, J.P., Cimio, J.B., Elachi, C., (1983). Space Shuttle Columbia views the World with Imaging Radar: the SIR-A Experiment. Jet Propulsion Laboratory Publication 82-95, Pasadena. 179 p.
- Ford, J.P., Bloom, R.G., Bryan, M.L., Daily, M.I., Dixon, T.H., Elachi, C., Xenos, E.C., (1980). Seasat views North America, the Caribbean, and Western Europe with Imaging Radar. Jet Propulsion Laboratory Publication 80-67, Pasadena. 141 p.

- Ford, J.P., Blom, R.G., Coleman Jr., J.L., Farr, T.G., Plaut, J.J., Pohn, H.A., Sabins Jr., F.F., (1998). Radar Geology. En: P.M. Henderson & A. J. Lewis (eds.). Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing. Am. Soc. Phot. and Rem. Sens. New York: 511-565.
- Haralick, R.M., (1979). Statistical and structural approaches to texture. Proceedings of IEEE, 67 (5): 786-804.
- Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein, I., (1973). Textural features for image classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-3 (6): 610-621.
- Harris, J.R., (1985). Lineament Mapping of Central Nova Scotia using Landsat MSS and SEASAT SAR data. Proceedings of the Ninth Canadian Symposium on Remote Sensing: 359-373.
- Harris, J.R., (1991). Mapping of Regional Structure of Eastern Nova Scotia using remotely sensed imagery: implications for regional tectonics and gold exploration. Canadian Journal of Remote Sensing, 17 (2): 122-135.
- He, D.C. y Wang, L., (1990). Recognition of lithological units in airborne SAR images using new textural features. International Journal of Remote Sensing, 11 (12): 2337-2344.
- He, D.C. y Wang, L., (1991). Textural filters based on the texture spectrum. Pattern Recognition, 24 (12): 1187-1195.
- He, D.C. y Wang, L., (1992). Unsupervised textural classification of images using the texture spectrum. Pattern Recognition, 25 (3): 247-255.
- Hunt, G.R. y Ashley, R.P., (1979). Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. Economic Geology, 74: 1613-1629.
- James, M., (1987). Pattern Recognition. BSP Professional Books. London. 144 p.
- Jensen, W., (1995). ERS-1/2 and its data used in operational systems. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995.IGARSS '95.Quantitative Remote Sensing for Science and Applications, 2: 1044-1046
- Jensen, J.R., (1996). Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 271 p.
- JPL, (1980). Radar Geology: An Assessment. Reptort of the Radar Geology Workshop, Snowmass Colorado (July 1979). Jet Propulsion Laboratory Publication 80-61, Pasadena. 513 p.
- JPL, (1982). The SIR-B Science Plan. Jet Propulsion Laboratory Publication 82-78, Pasadena. 90 p.
- Karnieli, A., Meisels, A., Fisher, L., Arkin, Y., (1996). Automatic extraction and evaluation of geological linear features from digital remote sensing using a Hough Transform. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 62 (5): 525-531.
- Kimura, H., Ito, N., (2000). ALOS/PALSAR: the Japanese second generation spaceborne SAR and its applications, Proc. SPIE, 2000, 4152: 110-119.
- Kruse, F.A., Bordman, J.W., Huntington, J.F., (2003). Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping. IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing, 41 (6): 1388-1400.
- Lewis, A.J., Henderson, P.M., Holcomb, D.W., (1998). Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective. In: P.M. Henderson & A. J. Lewis (eds.). Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing, New York, Am. Soc. Photogrammetry and Remote Sensing: 131-181.
- Lillesand, T.M. y Kiefer, R.W., (1987). Remote Sensing and Image Interpretation. Wiley, New York.
- Lowman Jr., P., (1994). Radar Geology of the Canadian Shield: a 10-Year Review. Canadian Journal of Remote Sensing, 20 (3): 198- 209.
- Lowman, P. Jr., Harris, J., Masuoka, P. M., Singhroy, V. H., Slaney, V. R., (1987). Shuttle Imaging Radar (SIR-B) Investigations of the Canadian Shield: Initial report. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE 25: 55-66.
- Lusch, D.P., (1999). Introduction to Microwave Remote Sensing. BSRSI. Basic Science and Remote Sensing Initiative. Department of Geography, Michigan State University. 84 p..
- Mahmood, A., Carboni, S., Muller, J., Parashar, S., (1996). Potential use of RADARSAT-1 in geological remote sensing. Proc. 11th Thematic Conference and Workshops: Applied Geologic Remote Sensing, February 27-29, Las Vegas, Nevada, I: 475-484.
- Marchionni, D., (2007). Caracterización volcano-tectónica y detección de áreas mineralizadas en el Sector Central del Macizo del Deseado (Provincia de Santa Cruz). Aplicación de la Teledetección espacial óptica y de radar. Trabajo de Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP), 317 p. (inédito)
- Marchionni, D. y Cavayas, F., (2010). Utilización de imágenes de radar (ERS y RADARSAT) para la discriminación litológica y la cartografía estructural del sector central del Macizo del Deseado, Provincia de Santa Cruz, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 66 (4): 576-591.

- Marchionni, D. y Schalamuk, I., (2010). Aplicación de la teledetección espacial óptica y de radar para el análisis geológico y la detección de áreas mineralizadas en el sector central del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 66 (4): 592-607.
- Marchionni, D., Cavayas, F. et Roller. E., (2000). Potentiel de Détection des Traits Structuraux d'un Territoire Semi-Désertique sur des Images RADARSAT: Le cas du Macizo del Deseado, Argentina. CEOS-SAR Workshop (October 1999). Proceedings: 479-484. Toulouse, France.
- Marchionni, D., de Barrio, R., Tessone, M. y Karszenbaum, H., (1997). Aportes de la información de ERS-1 en el reconocimiento de rasgos estructurales del sector central del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz, Argentina. Su implicancia metalogénica. *International Seminar on The Use and Applications of ERS in Latin America*. Proceedings: 133-141. Viñas del Mar, Chile.
- Marchionni, D., Cavayas F., Alperín, M., Del Blanco, M., (2001). RADARSAT Images Validation from field Surface Roughness Measures in a Semi-Desertic Territory: The Case of the Macizo del Deseado, Argentina. 8° Symposium International "Mesures physiques et signatures en teledetection". Aussois, Francia. Actas: 161-166.
- Marchionni, D., Tessone, M., de Barrio, R., Gagliardini, A. y Schalamuk, I., (1998). Patrones estructurales y morfológicos reconocidos sobre las imágenes SAR de ERS-1 y ERS-2 y vinculados a mineralizaciones hidrotermales, Macizo del Deseado, Provincia de Santa Cruz, Argentina. *Actas Jornadas Argentinas de Teleobservación*. Buenos Aires.
- Mather, P. M., Tso, B., Koch, M. 1998. An evaluation of Landsat-TM spectra data and SAR-derived textural information for lithological discrimination in the Red Sea Hills, Sudan. *International Journal of Remote Sensing*, 19 (4): 587-604.
- Müschen, B., Böhm, C., Roth, A., Schwäbisch, M., Holz, A., (1997). Monitoring of subglacial volcanic eruption and glacial flood in southern Iceland using ERS-1/2 SAR data. *Proceedings of an International Seminar on the Use and Applications of ERS in Latin America*. Viña del Mar, Chile, November 1996 (ESA SP 405): 263-271.
- Paradella, W. R., Dos Santos, A. R., Veneziani, P., De Morais, M. C., (2000). Synthetic Aperture Radar for geological applications in the moist tropics: experiences from the Brazilian Amazon region. *Revista Brasileira de Geociências* 30 (3): 538-542.
- Parker, J.R., (1997). *Algorithms for image processing and computer vision*. Wiley Computer Publishing. John Wiley & Sons, Inc. United States of America. 417 p.
- Pietikainen, M., Ojala, T., Silven, O., (1998). Approaches to texture-based classification, segmentation and surface inspection, In: *Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision* (2nd Ed.), Eds. C.H.Chen, L.F. Pau and P.S.P. Wang, World Scientific Publishing Company, Singapore, 711-736.
- Podwysocki, M.H., Power, M.S., Jones, O.D., (1985). Preliminary evaluation of Landsat 4 Thematic Mapper data for mineral exploration. *Advances in Space Research*, 5: 47-55.
- Pratt, W.K., (1991). *Digital Image Processing*, John Wiley & Sons, 2nd edition, Toronto.
- Price, M.H., (1999). Integration of Landsat TM and SIR-C polarimetric radar for lithological mapping near Goldfield, Nevada. *Proceeding of the Thirteenth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing*, Vancouver, British Columbia, I: 452-4559.
- RADARSAT Int., (1997). *RADARSAT Geology Handbook*. RADARSAT International, Richmond, British Columbia, Canadá. 70 p.
- Raney, R.K., (1992). Course notes (unpublished notes). Canada Centre for Remote Sensing. Ottawa, Ontario. Canadá.
- Raney, R.K., Luseombe, A.P., Langham, E.J., Ahmed, S., (1991). RADARSAT. *Proceedings of IEEE*, 79 (6): 839-849.
- Rast, A., (1995). ERS 1/2 overview of scientific results over land. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995. IGARSS '95. Quantitative Remote Sensing for Science and Applications, International*, 2: 1038-1040.
- Rosenqvist, A., Shimada, M., Ito, N., Watanabe, M., (2007). ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of the Environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45 (11): 3307-3316.
- Raucoules, D., y Thomson, K. P. B., (2000). Edge detection on SAR images using local Fourier Transforms and multiscale approach. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26 (1): 12-17.
- Rowan, L.C., Hook, S.J., Abrams, M.J., Mars, J.C., (2003). Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflected Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system: *Economic Geology*, 98: 1019-1027.

- Rowan, L.C., Wetlaufer, P.H., Goetz, A. F.H., Billingsley, F.C., Stewart, J.H., (1974). Discrimination of rock types and detection of hydrothermally altered areas in south-central Nevada by the use of computer-enhanced ERTS images. U.S. Geological Survey Prof. Paper 883: 35 p.
- Sabins, F.F., (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14: 157-183.
- Schaber, G.G., Elachi, Ch., Farr, T.G., (1980). Remote Sensing Data of SP Mountain and SP Lava Flow in North-Central Arozina. *Remote Sensing of Environment*, 9: 149-170.
- Shimada, M., (2006). SAR programmes in JAXA: from JERS-1 to the future. Source: IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, 153 (2): 122-128.
- Singhroy, V.H. y Saint-Jean, R., (1999). Effects of Relief on the Selection of RADARSAT-1 Incidence Angle for Geological Applications, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25 (3): 211-217.
- Spatz, D.M. y Taranik, J.V., (1994). Exploration for cooper-molybdenum-gold porphyry deposits using multispectral and hyperspectral aerospace remote sensing techniques. *SELPER* 10: 41-52.
- Staples, G., (2005). RADARSAT-2: Program Overview and Applications. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil. INPE: 4501-4506*
- St-Onge, B., (1994). L'apport de la texture des images numériques de haute résolution à la cartographie forestière automatisée. Trabajo de Tesis Doctoral. Université de Montréal.
- Stromberg, W.D. y Farr, T.G., (1986). .A Fourier-based textural feature extraction procedure. In: *IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing*, GE-24 (5): 722-731.
- Toutin, Th., 1996. Opposite side ERS-1 SAR stereo mapping over rolling topography. *I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34: 543-549.
- Toutin, Th., (1997). Single versus stereo ERS-1 SAR imagery for planimetric features extraction. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (18): 3909-3914
- Toutin, Th., (1999). Error Tracking of Radargrammetric DEM from RADARSAT Images. Special Issue on the 1998 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'98). *Remote Sensing and Managing the Environment. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37 (5): 2227-2238
- Toutin, Th. y Gray, L., (2000). State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data (Review Paper). *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 55: 13-33
- Touzi, R., Boerner, W.M., Lee J.S., Lueneburg, E., 2004. *Canadian Journal of Remote Sensing, RADARSAT-2 Special Issue*, 30 (3): 380-407.
- Ulaby, F.T., (1998). SAR Biophysical Retrievals: Lessons Learned and Challenges to Overcome, *Proceedings of the 2nd. International Workshop on Retrieval of Bio- and Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications, ESTEC, Noordwijk, Netherlands.*
- Ulaby, F.T. y Elachi, C. (ed.), (1990). *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*, Artech House, Inc., Dedham, Massachusetts. 365 p.
- Ulaby, F.T., Bengal, T.H., Dobson, M.C., East, J.R., Garvin, J.B., Evans, D.L., (1990). Microwave dielectric properties of dry rocks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28 (3): 325-335.
- Unser, M., (1986). Sum and difference histograms for texture classification. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI-8* (1): 118-125.
- Van der Sanden, J.J., (2004). Anticipated applications potential of RADARSAT-2 data. *Canadian Journal of Remote Sensing, RADARSAT-2 Special Issue*, 30 (3): 369-379.

Recibido: 15-8-2013

Aceptado: 25-3-2014