



Escuela de Agrimensura  
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura  
Universidad Nacional de Rosario

# Huella urbana de la ciudad de Rosario - Santa Fe, Argentina - Año 2013

**Autora:** Florencia Tazzioli (T-2719/7)

**Director/es del Proyecto:** Laura Rita Balparda (Directora)  
Diego López (Codirector)

**Asesores Técnicos:** Héctor Peña  
Dardo Delorenzi

**Fecha:** septiembre 2018 - octubre 2019

## Resumen

La utilización de las imágenes radar y sus aplicaciones están siendo investigadas intensamente los últimos tiempos. El estudio de la huella urbana permite entre otras cosas identificar la expansión de una ciudad y detectar cambios de uso del suelo de rural a urbano. Dado el crecimiento y el dinamismo territorial que existe en la ciudad de Rosario, la detección de la huella urbana a través de imágenes satelitales radar podría responder a necesidades referentes al desarrollo urbanístico e incluso su relación con las localidades satélites que conforman la Región Metropolitana. Para la identificación de la huella urbana en la ciudad de Rosario (Provincia de Santa Fe, Argentina) se utiliza una metodología propuesta por la EO-College e imágenes satelitales de radar de la misión COSMO-SkyMed (junio, 2013), cuya resolución espacial es tres metros. El primer análisis relaciona la huella urbana obtenida con el proyecto Global Urban Footprint (GUF) (Centro Aeroespacial Alemán -DRL-), y para el segundo análisis se seleccionan sitios testigos donde se relacionan ambas máscaras con el área edificada en planta digitalizada a partir del fotomosaico del distrito Rosario (Instituto Geográfico Nacional -IGN-), año 2013. Se concluye que el producto obtenido se ajusta de distinta manera según existan o no construcciones y el tipo del que se trate.

**Palabras claves:** huella urbana, teledetección radar, COSMO-SkyMed, GUF.

## Agradecimientos

A mi directora, Laura Rita Balparda, y a mi codirector, Diego López, por su capacitación, guía y supervisión durante el proceso de realización del trabajo.

Al Área de Sensores Remotos<sup>1</sup> por el aporte de datos e infraestructura fundamentales para la realización de este trabajo.

A mis asesores técnicos, Héctor Peña y Dardo Delorenzi, por su predisposición y apoyo en todas las instancias de consulta.

A Daiana Bravo, como futura licenciada en Matemáticas, y a Gabriela Reyero y Elina Mancinelli, como Doctoras en Matemática, por su asesoramiento.

Expreso mi gratitud a mis profesores por su guía en mi formación durante la carrera.

A mis queridos compañeros que me brindaron su amistad y apoyo.

A la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario que como institución me dio mucho más que una formación académica.

Agradezco infinitamente a mi familia que con su apoyo y cariño me apoyaron incondicionalmente en este camino de crecimiento.

---

<sup>1</sup> Área de Sensores Remotos – Escuela de Agrimensura – Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario – Argentina

# Índice

Lista de Acrónimos	5
1. Introducción	7
1.1. Objetivos	7
1.2. Estado actual del conocimiento	8
2. Marco teórico	10
2.1. Huella urbana	10
2.2. Teledetección	14
2.2.1. Generalidades	14
2.2.2. Resoluciones de los sistemas sensores	20
2.2.3. Sensores pasivos y activos	22
2.2.3.1. Sensores radar	25
2.2.3.2. Sensores Radar de Apertura Sintética	28
2.2.4. Principios básicos del funcionamiento de un radar	29
2.2.4.1. Interacción de la radiación electromagnética con los blancos	30
2.2.4.2. Distorsiones geométricas en la imagen SAR	32
2.2.4.2. Distorsiones radiométricas en la imagen SAR	34
2.2.5. Misiones satelitales radar	36
2.3. Sistemas de información geográfica	41
2.3.1. Modelo de representación de los Sistemas de Información Geográfica	42
3. Metodología de trabajo	44
3.1. Área de estudio	44
3.2. Materiales	44
3.3. Método	46
3.3.1. Procesamiento de imágenes radar	47
3.3.1.1. Georreferenciación y calibración	47
3.3.1.2. Reducción de speckle	47
3.3.1.3. Cálculo de coherencia	48
3.3.1.4. Agrupamiento espacial de los resultados parciales	49
3.3.1.5. Ajuste en x,y	49
3.3.1.6. Depuración de datos	49
3.3.1.7. Análisis textural por matriz de ocurrencia	49
3.3.1.8. Cálculo de Huella Urbana	50
3.3.2. Procedimiento de validación	51
3.3.2.1. Procesamiento en un sistema de información geográfica	51
3.3.2.2. Relación entre GUF y huella urbana	52
3.3.2.3. Relación entre la digitalización del área edificada, GUF y huella urbana	52

4. Resultados	55
4.1. Huella urbana	55
4.2. Relación entre GUF y la huella urbana	56
4.3. Relación entre la digitalización del área edificada, GUF y huella urbana.	57
4.4. Discusión	73
5. Conclusiones	75
6. Referencias bibliográficas	77
Anexos	
Anexo 1: Parámetros de procesamiento en ENVI	80
Anexo 2: Resultados intermedios del preprocesamiento	90
Anexo 3: Parámetros de procesamiento en QGIS	93

## Lista de Acrónimos

ASI	Agencia Espacial Italiana (Agenzia Spaziale Italiana)
CCRS	Canadian Centre for Remote Sensing
COSMO-SkyMed	COntellation of Small Satellites for Mediterranean basin Observation
DEM	Modelo de elevación digital "Digital Elevation Model"
DGM	Detected Ground Multi-look
DLR	Centro Aeroespacial Alemán "Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt ef.."
ESA	European Space Agency
ESS	European Soil Sealing
EUA	European Urban Atlas
GEC	Geocoded Ellipsoid Corrected
GHSL	Global Human Settlement Layer
GML	Geography Markup Language
GPS	Sistemas de Posicionamiento Global "Global Positioning System"
GTC	Geocoded Terrain Corrected
GUF	Global Urban Footprint
HBASE	Human Built-up And Settlement Extent
HI	Stripmap Himage
HR	ScanSAR HugeRegion
IDERosario	Infraestructura de Datos Espaciales de la Municipalidad de Rosario
IGN	Instituto Geográfico Nacional
LIDAR	Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging
MASADA	Massive Spatial Automatic Data Analytics
MD	Ministerio de Defensa de Italia "Ministero della Difesa"
MIUR	Ministerio de Educación, Universidades e Investigación de Italia " Ministero dell'Istruzione dell'Università e ella Ricerca"
NASA	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio "National Aeronautics and Space Administration"
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
OGC	Open Geospatial Consortium

ONU	Organización de las Naciones Unidas
OSM	OpenStreetMap
POSGAR	Posiciones Geodésicas Argentinas
PP	Stripmap PingPong
QGIS	Quantum GIS
RADAR	RADio Detection And Ranging
RAR	Radar de Apertura Real "Real Aperture Radar"
RHSeg	Software Recursive Hierarchical Image Segmentation
S2	Spotlight 2
SAR	Radar de Apertura Sintética "Synthetic Aperture Radar"
SCS	Single-look Complex Slant
SEDAC	Socioeconomic Data and Applications Center

# 1. Introducción

La capa externa rocosa de la Tierra, denominada corteza terrestre, se divide en dos tipos: la corteza oceánica y la corteza continental (Anguita Virella, F. et. al., 1991). Normalmente, los asentamientos humanos se sitúan sobre esta última presentando características diferenciadas entre las áreas urbanas y las rurales.

Existe un fenómeno conocido como la transición urbana global que indica que la mayoría de las personas sobre la Tierra habitan en algún tipo de entorno urbano (Esch *et al.*, 2017). En consecuencia, los entes gubernamentales se ven obligados a plantear reorganizaciones en distintos ámbitos, sea transporte, infraestructura, etc. En este contexto Esch *et al.* (2017) plantean incógnitas sobre la dimensión espacial de las urbanizaciones: ...“¿qué proporción de la superficie terrestre global está cubierta por áreas urbanizadas? ¿cuál es la relación entre el área de asentamientos urbanos y rurales? ¿cuántas ciudades hay en la Tierra?”....

La importancia del mapeo de áreas urbanas radica en detectar cambios de áreas rurales a urbanas en el tiempo, análisis del estado de los asentamientos irregulares, planeamiento del ordenamiento territorial y en cuanto a temas catastrales, distribución, usos y detección de mejoras, entre otros (Voltersen *et al.*, 2017).

La extensión espacial de las áreas edificadas, considerando como tal a los objetos tridimensionales construidos es considerada como huella urbana. Independientemente de la metodología que se utilice para obtener la huella urbana, se representa mediante una máscara de asentamiento urbano siguiendo un modelo ráster binario de presencia/ausencia (Esch *et al.*, 2017).

Ante los enigmas mencionados, en el presente trabajo se planteó el desafío de identificar la huella urbana de la ciudad de Rosario, Provincia de Santa Fe, Argentina, para el año 2013, utilizando recursos que permitan superar adversidades tales como condiciones climáticas, contaminación de las ciudades, disponibilidad de luz natural, etc. Teniendo en cuenta los avances científicos en la temática, las necesidades a nivel local y la disponibilidad de datos actualizados podría aplicarse a fechas próximas a la actualidad. Por otra parte, para una validación de tales datos se utilizan imágenes ópticas obtenidas con el vuelo aero fotogramétrico.

## 1.1. Objetivos

### Objetivos generales

Identificar la huella urbana de la ciudad de Rosario, provincia de Santa Fe, Argentina, utilizando imágenes satelitales de radar COSMO-SkyMed para el año 2013.

### Objetivos específicos

- Analizar visualmente la huella urbana obtenida con el vuelo fotogramétrico del Instituto Geográfico Nacional del año 2013, disponible en la Infraestructura de Datos Espaciales de la Municipalidad de Rosario.
- Analizar cuantitativamente la huella urbana identificada a partir de imágenes de radar COSMO-SkyMed en relación al producto obtenido en el marco del proyecto Global Urban Footprint.

- Analizar cuantitativamente en sitios testigos la huella urbana identificada a partir de imágenes de radar COSMO-SkyMed en relación al área que surge de la vectorización de lo edificado en planta (fotomosaico del vuelo del Instituto Geográfico Nacional) y en relación al proyecto Global Urban Footprint.

### 1.2. Estado actual del conocimiento

Los orígenes del radar se sitúan a mediados de la década del 30, donde la tensión internacional ante la segunda guerra mundial provocó que los países que contaban con tecnología propia en radio impulsaran el desarrollo de los primeros radares (Pérez Gutiérrez *et al.*, 2006).

La gran ventaja de adquirir datos a través de sensores Radar de Apertura Sintética (SAR) reside en que se obtienen datos tanto de día como de noche e independientemente de las condiciones climáticas y ambientales. Sin embargo, existe cierta limitación en las imágenes de los sistemas SAR, en función de la resolución espectral al trabajar con una única banda, la presencia de ruido o moteado y las características específicas de estas imágenes, presentando mayor desafío a la hora de realizar la interpretación de estas (Esch *et al.*, 2011).

Existe gran diversidad de aplicaciones en lo que respecta a las imágenes de SAR. A modo de ejemplo se puede mencionar: deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (Mayorga Torres, 2013), diseño de un sistema de alerta y respuesta temprana a incendios de vegetación (Mari, 2012), control de vegetación y humedad del suelo (Lyalin *et al.*, 2018), detección del patrón de asentamientos basados en la clasificación de la huella urbana (Taubenbock *et al.*, 2011), entre otros.

La detección de la huella urbana puede ser realizada con diferentes fines, como por ejemplo caracterizar los distintos tipos de coberturas (Esch *et al.*, 2011), monitorear el crecimiento urbano global (Marconcini *et al.*, 2014) y diferenciar entre áreas residenciales e industriales (Garzelli *et al.*, 2018).

Este desafío de inventariar la presencia humana en la Tierra surge frente a los datos y estimaciones realizadas en función de la cuantificación de las personas que habitaban, la población mundial actual y las previsiones futuras. En 1950, la población rural mundial era dos veces más grande que la población urbana. Desde entonces la población rural ha ido disminuyendo constantemente, mientras que la población urbana ha aumentado drásticamente. Alrededor del 2008 la población urbana superó a la rural por primera vez en la historia de la humanidad. Este fenómeno conocido como la transición urbana global indica que, la mayoría de las personas sobre la tierra habitan en algún tipo de entorno urbano (Esch *et al.*, 2017).

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en el año 2018 habitaban la Tierra 7.6 billones de personas (2018 World Population Data Sheet With Focus on Changing Age Structures – Population Reference Bureau, 2019). En tanto Esch *et al.* (2017) referencian estadísticas del año 2017, donde aproximadamente 7.2 billones de personas habitaban la Tierra, previendo que para el 2050 este número habrá aumentado a unos nueve mil millones, de los cuales aproximadamente el 70% estará viviendo en ciudades. En este contexto las incógnitas que se plantean están vinculadas al conocimiento sobre la dimensión espacial de la urbanización.

Existen diferentes métodos para la obtención de tal producto. Como ser, el método de desagregación que consiste en filtrar los datos derivados de la observación de la Tierra que describen el entorno construido a partir de datos de redes viales, luces nocturnas, etc. a fin de investigar sistemáticamente tales datos logrando mejorar el modelado de distribución de la población (Palacios-Lopez *et al.*, 2018), el método Global Human Settlement Layer (GHSL) que consiste en obtener una capa de asentamiento a partir del complemento de información de censos de población con lo construido ("Global Human Settlement - Data overview - European Commission", 2019).

Otra investigación, consigue la identificación del área urbana a partir de la caracterización de los tipos de cobertura terrestre básica, considerando además, agua, tierra abierta (tierras de cultivo, pastizales, suelo desnudo) y bosque. La distinción se realiza por medio de un análisis no supervisado sobre la base de imágenes de la misión TerraSAR-X (Esch *et al.*, 2011).

Hay estudios que trabajan más a fondo dentro de la detección de la huella urbana en función de los objetivos planteados. Un trabajo realizado por la Universidad de Siena<sup>2</sup> consta en diferenciar entre áreas residenciales e industriales a partir del procesamiento de imágenes TerraSAR-X y TanDEM-X. Posteriormente, para discriminar dentro de las áreas construidas detectadas se aplican operadores morfológicos (Garzelli *et al.*, 2018). Otro estudio consiste en el procesamiento de imágenes ópticas utilizando indicadores predictivos (ubicación, accesibilidad, etc.) de datos de observación de la Tierra para la identificación de barrios populares (Soukup *et al.*, 2018).

Actualmente, uno de los proyectos de monitoreo del crecimiento urbano global de mayor relevancia es el llevado a cabo por el Centro de Datos de Sensores Remotos Alemán (German Remote Sensing Data Center - DFD) del Centro Aeroespacial Alemán (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. - DLR); cuyo objetivo es mapear asentamientos permitiendo analizar los patrones y las estructuras urbanas (distribución regional de la población y organización de las áreas urbanas y rurales) (Agencia Espacial Alemana, 2018). Este producto se obtuvo a partir de un sistema de procesamiento completamente automatizado de imágenes mediante el análisis de la cobertura global de imágenes TerraSAR-X y TanDEM-X<sup>3</sup>, recopiladas en el contexto de la misión TanDEM-X; a fin de obtener un único inventario de asentamientos urbanos llamado Global Urban Footprint (GUF) y producir un mapa mundial (Esch *et al.*, 2017).

Siguiendo a los autores Voltersen *et al.* (2017), se define el concepto de huella urbana como la extensión espacial de las áreas urbanizadas, dominadas por construcciones, calles y superficies impermeables (motivo por el cual las superficies naturales que se encuentren dentro de las ciudades no deben ser tomadas en cuenta).

---

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería de Información y Matemáticas

<sup>3</sup> Imágenes TerraSAR-X y TanDEM-X: productos single look complex (SLC) obtenidos en su mayoría en 2011 y 2012 (93%) en Modo Stripmap con una resolución de 3 m. Para completar los datos, se incluyeron escenas recogidas en 2013 y 2014.

## 2. Marco teórico

En lo que respecta al marco teórico del presente trabajo se plantean tres ejes principales. Para comenzar se introduce el término huella urbana y productos que buscan arribar a este resultado con ciertas diferencias en su concepción. Luego, comenzando por la teledetección espacial se ahonda en conceptos que facilitan la comprensión del procedimiento aplicado para la obtención del producto buscado y sus características. Este desarrollo dará sustento teórico al momento de utilizar datos y aplicar criterios. El tercer eje refiere al Sistema de Información Geográfica (SIG) que se utiliza a fines de analizar la huella urbana obtenida.

### 2.1. Huella urbana

Huella urbana, conocido en inglés como *urban footprint*, carece de una definición concreta ya que existen antecedentes y autores que refieren al mismo concepto pero los productos finales reflejan distintas características. La importancia y las ventajas de contar con este tipo de información es indiscutible teniendo en cuenta el crecimiento y la dinamicidad vertiginosa global.

Algunos de los proyectos más relevantes a nivel mundial son GUF del DLR, el GHSL llevado a cabo por la European Commission y el Global Human Built-up And Settlement Extent (HBASE) de la Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC) de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA).

La metodología empleada para la obtención de GUF se basa en el cálculo de una medida de textura y en una clasificación que se centra en el análisis combinado de las características locales de retrodispersión (amplitud) y heterogeneidad local (textura) (Esch *et al.*, 2014). Es importante notar que estas características típicas de las construcciones están relacionadas con la ubicación de las estructuras de edificios verticales, y, en consecuencia, las máscaras de GUF resultantes reflejan más bien la distribución detallada de edificios y no la superficie impermeable, que normalmente incluye el total de edificios, carreteras y superficies pavimentadas. Esta característica representa una diferencia distinta a los mapas de asentamiento derivados de imágenes satelitales (multi-) espectrales (Esch *et al.*, 2017).

En la etapa de validación de los resultados GUF, el área de análisis se circunscribe a los límites de Alemania y las fuentes de referencia son: el atlas urbano europeo (European Urban Atlas - EUA), la capa de sellado de suelos europeo (European Soil Sealing - ESS), una capa de construcciones de referencia, la clase urbana de MODIS 500<sup>4</sup> y la de GlobCover 2009<sup>5</sup>. Finalmente, esta primera comparación relativa entre GUF y los productos de asentamientos humanos existentes, muestran una alta correspondencia como también desviaciones en ciertas áreas tales como zonas rurales de baja densidad (Esch *et al.*, 2014).

---

<sup>4</sup> "Schneider, A, Friedl, M. A., & Potere, D. (2010). Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: New methods and datasets based on 'urban ecoregions'. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1733-1746."

<sup>5</sup> "Bontemps, S., Defourny, P., Van Bogaert, E., Arino, O., Kalogirou, V., & Ramos Perez, J. (2011). GLOBCOVER 2009. UCLouvain & ESA Team."

El producto GUF resultante consiste en una máscara blanco y negro donde los píxeles poseen valores 0/255 correspondientes a ausencia/presencia de la huella urbana (referenciados en tonos de negro/blanco en la figura 1) (Esch *et al.*, 2011; 2017).



Figura 1. Máscara GUF en la ciudad de Rosario. Fuente: Esch *et al.* (2017).

GUF provee datos uniformes aplicables en todo el mundo sobre la localización, el tamaño y la forma de los asentamientos urbanos, resultando una ventaja crucial especialmente en regiones remotas y subdesarrolladas de la Tierra, donde los datos geográficos disponibles son frecuentemente escasos. Por este motivo los datos GUF son muy valorados por un amplio espectro de usuarios, organizaciones de desarrollo, instituciones no gubernamentales y gubernamentales, e incluso por el sector empresarial (Esch *et al.*, 2017). Existen dos conjuntos de datos GUF sin cargo, uno de uso abierto y sin cargo para aplicaciones sin fines de lucro cuya resolución general es de 84m y otro con fines científicos, donde los píxeles son de 12m, a los cuales se puede acceder a través de una solicitud al Centro Aeroespacial Alemán; ambos productos se pueden utilizar para fines comerciales a través de un cargo (Esch *et al.*, 2017).

La capa GHSL (figura 2) se obtuvo a partir de imágenes del satélite radar Sentinel 1 para el producto del año 2015, mientras que los de años previos se basan en imágenes del satélite óptico Landsat. Las mismas fueron ortorectificadas, georreferenciadas, se calibraron espectralmente y se le hicieron correcciones radiométricas. Los asentamientos humanos se caracterizan por lo construido, objetos hechos por el hombre incluyendo construcciones, estructuras asociadas y trabajos civiles; en consecuencia, el análisis de los asentamientos, la ubicación y el tamaño espacial del área edificada - referido como área de huella de construcciones - se modela en áreas edificadas (built up areas). Finalmente, esta capa se expresa con valores continuos que

representan la proporción de área edificada en relación al tamaño total de la celda. Los productos principales son tres, uno referente a lo edificado, otro poblacional (densidad por pixel) y el modelo de ciudad; se puede acceder de manera gratuita<sup>6</sup>, disponible en formato TIF con pirámides de cobertura global y a una resolución temporal referente a los años 1975, 1990, 2000 y 2015 ("Global Human Settlement - Data overview - European Commission", 2019).

Este producto, se puede visualizar (figura 2) y provee distintos tipos de datos debidamente referenciados, entre ellos se puede mencionar época, ciudad/pueblo ("Global Human Settlement - Data overview - European Commission", 2019).

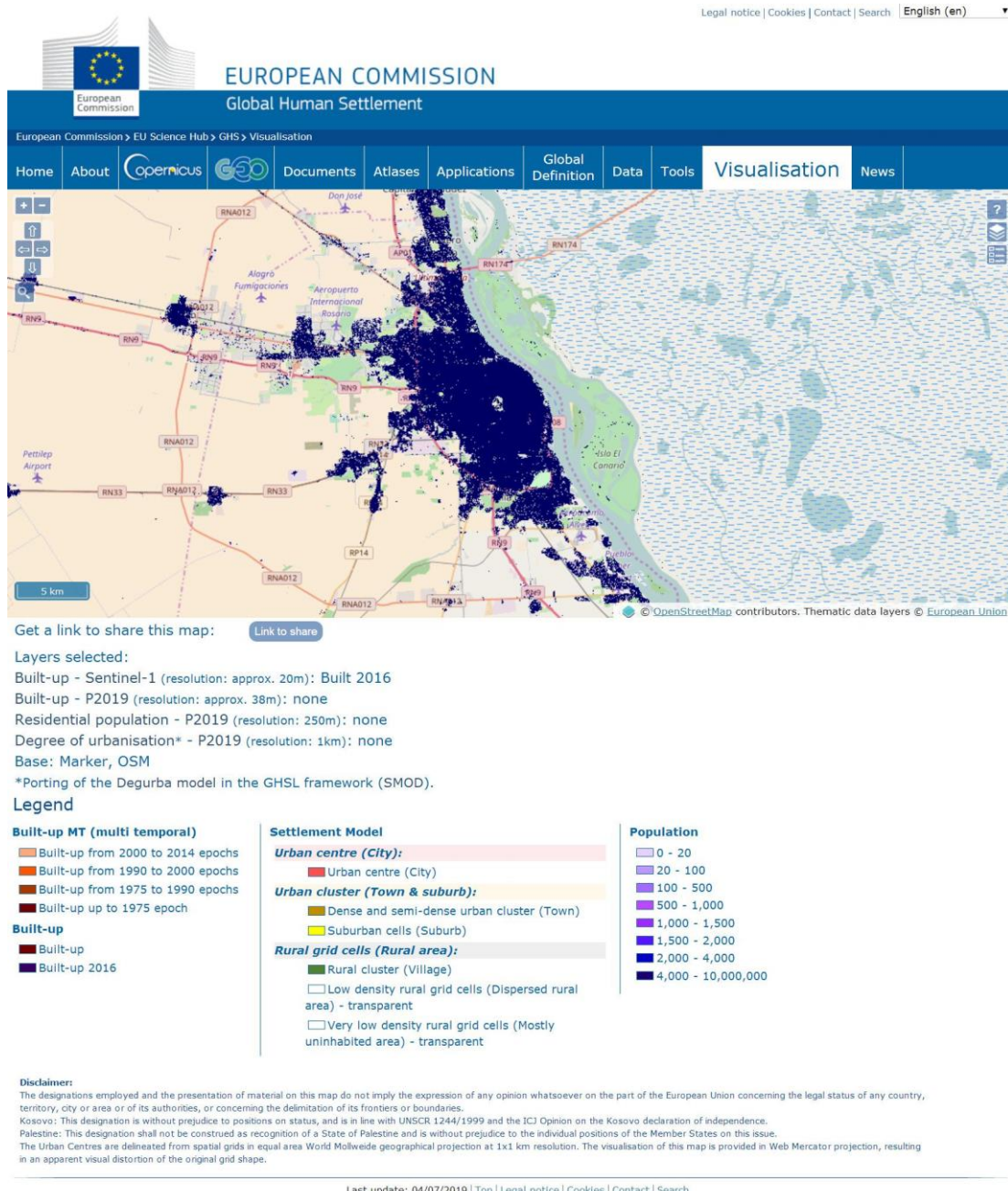


Figura 2. Visualización de la capa de asentamientos humanos en la ciudad de Rosario. Fuente: "Global Human Settlement - Data overview - European Commission" (2019).

<sup>6</sup> Disponible en web: [ghsl.jrc.ec.europa.eu/visualisation.php#](http://ghsl.jrc.ec.europa.eu/visualisation.php#). Consulta: 26 de agosto de 2019.

En el mosaico (Mercator esférico) obtenido, a partir de los datos de percepción remota y utilizando Massive Spatial Automatic Data Analytics (MASADA)<sup>7</sup>, se visualizan capas de asentamiento mediante la clasificación automática de imágenes satelitales de alta y muy alta resolución (versión v2.0: datos Copernicus Sentinel-1 y Sentinel-2). Para ello implementaron dos flujos de trabajo utilizando Symbolic Machine Learning (SML) pero adaptados a las características de cada uno de los dos sensores. SML es el procesamiento automático, análisis y extracción de una gran cantidad de datos espaciales heterogéneos. MASADA es una herramienta diseñada para el procesamiento de escenas individuales por lotes de una serie de escenas.

El HBASE (figura 3) se obtiene a partir de imágenes ópticas Landsat con la colaboración conjunta de la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Estas imágenes se corrigieron atmosféricamente y se convirtieron en reflectancia de superficie y se segmentaron en tres niveles<sup>8</sup>. Luego de una serie de cálculos y de considerar características de múltiples fuentes (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada -NDVI- MODIS, estadísticas de datos de día/noche de la serie de radiómetros de imágenes infrarrojas visibles -VIIRS DNB-) se determinó la textura basada en objetos (unidad espacial). La base de datos globales inicial se basa en un modelo de “bosques aleatorios” y continúa el proceso con muestras de entrenamiento halladas luego de pasos iterativos de clasificación teniendo en cuenta nubes/sombras y bosques. Dadas las limitaciones de la resolución espacial, la detección de la mayoría de las carreteras no fue captada; por tal motivo utilizaron fuentes como OpenStreetMap<sup>9</sup> (OSM) de la cual se tomaron solo las carreteras principales, secundarias y pistas de aeropuerto (Wang *et al.*, 2017).

Esta máscara consta de cuatro valores diferenciados, uno correspondiente a la ausencia de HBASE, presencia de HBASE incluyendo carreteras y hay pixeles de áreas que no se pudieron mapear debido a la presencia de nubes/sombras (Wang *et al.*, 2017).

---

<sup>7</sup> MASADA: herramienta desarrollada en el marco del proyecto GHSL del European Commission’s Joint Research Centre.

<sup>8</sup> Software Recursive Hierarchical Image Segmentation (RHSeg)

<sup>9</sup> OpenStreetMap: conjunto de datos disponible públicamente destinado a proporcionar información actualizada sobre la red global de carreteras mediante la incorporación de datos de gobierno abierto y datos aportados por los usuarios (colaboradores de OpenStreetMap, 2016).



Figura 3. Visualización de la capa HBASE en la ciudad de Rosario. Fuente: Wang *et al.*, (2017).

Finalmente, el producto de huella urbana buscado en el presente trabajo responde a una máscara de edificación semejante al GUF dado que la energía retrodispersada proviene de reflectores angulares, donde inevitablemente las características típicas de las construcciones están relacionadas con la ubicación de las estructuras de edificios verticales. Es decir, la huella urbana obtenida es una máscara binaria que responde al concepto de presencia/ausencia de edificaciones, asumiendo tales como asentamientos urbanos.

## 2.2. Teledetección

Teledetección es la traducción latina del término inglés remote sensing ideado al principio de los 60 para designar cualquier medio de observación remota. Esta técnica engloba los procesos de captura de imágenes por métodos aéreos y satelitales, y su posterior tratamiento realizado para una determinada aplicación (Chuvieco, 2010).

### 2.2.1. Generalidades

Según Chuvieco (1995), un sistema de teledetección espacial (figura 4) incluye los siguientes elementos:

1. Fuente de energía: refiere al origen de la energía detectada por un sensor. La misma puede provenir de un foco externo al dispositivo (teledetección pasiva), o bien, puede ser emitida por el mismo sensor (teledetección activa).

2. Cubierta terrestre: la cobertura puede ser vegetal, distintos tipos de suelos, agua o construcciones antrópicas. Cual sea la cubierta, recibe la señal energética y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.
3. Sistema sensor: el sistema está compuesto por el sensor y la plataforma que lo transporta. Su misión es captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.
4. Sistema de recepción - comercialización: recibe la información, la graba en un formato apropiado, y, tras un proceso de correcciones, se distribuye a los intérpretes.
5. Intérprete: analiza la información (normalmente en forma de imágenes analógicas o digitales) y la traduce cualitativa y/o cuantitativamente a fin de facilitar la evaluación del problema en estudio.
6. Usuario final: analiza el documento fruto de la interpretación y dictamina consecuencias que de él se derivan.

El sistema de teledetección espacial se puede entender haciendo una analogía con la visión humana, a saber: el ojo humano (3) recibe una haz energética procedente de los objetos exteriores (2) por reflejo de la luz solar (1) y se transmite esta señal al cerebro (4), que forma una serie de imágenes sobre el mundo real que lo circunda permitiendo al individuo que observa ser intérprete (5) y usuario final (6) de tal imagen, resultando capaz de tomar decisiones sobre su propio comportamiento (Chuvieco, 1995).

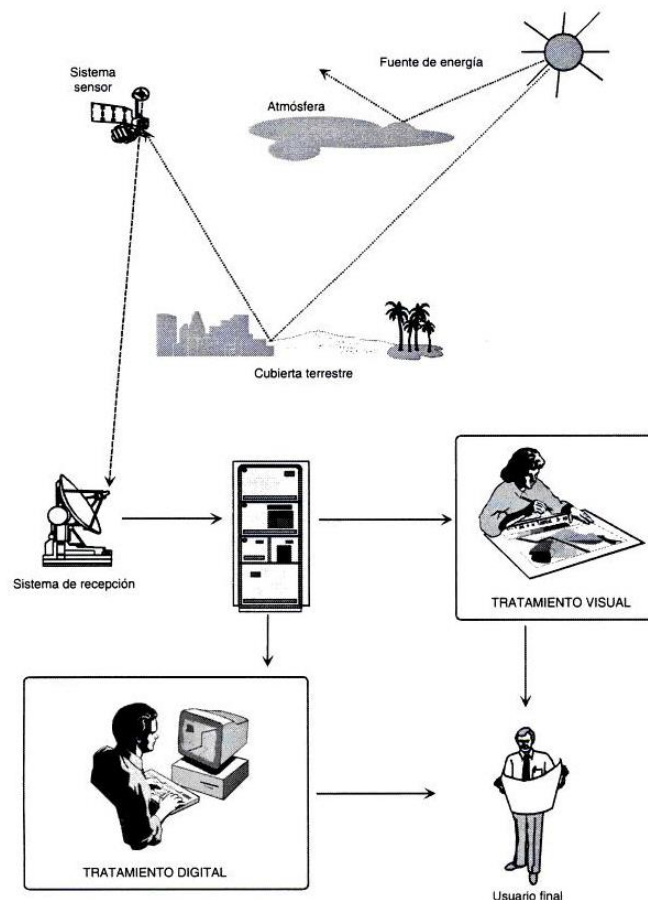


Figura 4. Componentes de un sistema de teledetección. Fuente: Chuvieco (2007).

Las fuentes energéticas emiten energía electromagnética que, según la teoría ondulatoria, se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz ( $c = 3 \times 10^8$  m/s) y conteniendo dos campos de fuerza ortogonales entre sí: eléctrico y magnético (figura 5). Las características de este flujo energético pueden describirse en dos elementos: longitud de onda ( $\lambda$ ) y frecuencia ( $F$ ). El primero hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda mientras que la frecuencia designa el número de ciclos que pasan por un punto fijo en una unidad de tiempo. Ambos elementos están inversamente relacionados por la siguiente fórmula:

$$c = \lambda F$$

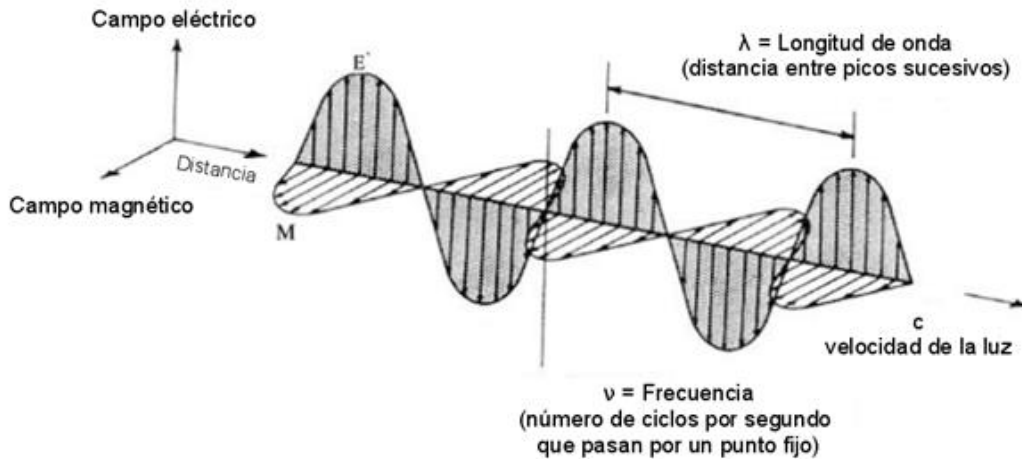


Figura 5. Onda electromagnética y sus componentes. Fuente: Mayorga Torres (2013).

La sucesión de valores de longitud de onda es continua. No obstante, con fines prácticos, se establece una serie de regiones donde la radiación electromagnética tiene un comportamiento similar; se denomina espectro electromagnético al conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas (figura 6).

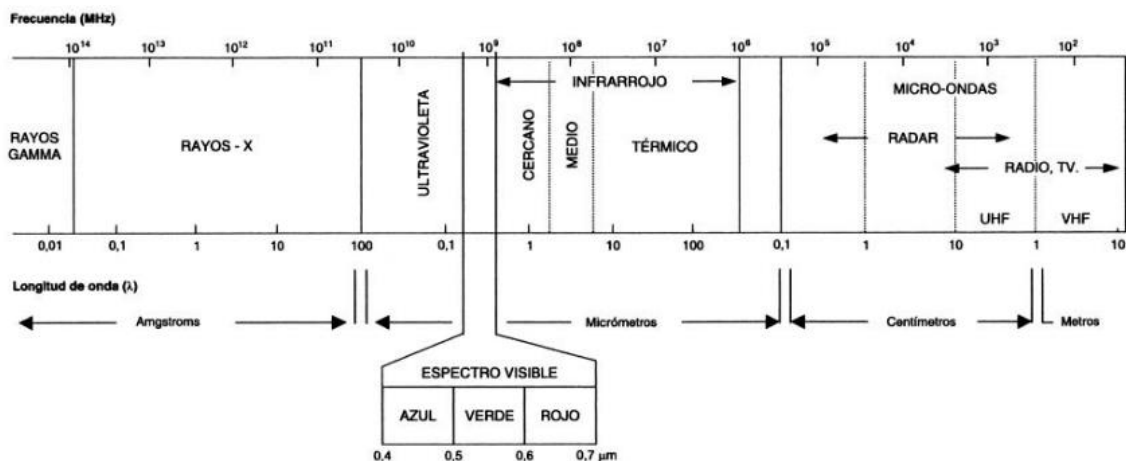


Figura 6. Espectro electromagnético. Fuente: Chuvieco (2007)

El espectro visible (0,4 a 0,7 μm) corresponde a la porción de radiación electromagnética que perciben nuestros ojos, longitudes de onda donde es máxima la radiación solar. Dentro de este rango se distinguen tres bandas elementales, azul (0,4 - 0,5 μm), verde (0,5 - 0,6 μm) y rojo (0,6 - 0,7 μm) (Chuvieco, 2010).

En lo que respecta al intervalo infrarrojo, se distinguen tres rangos. Primero, el infrarrojo cercano (0,7 a 1,2 $\mu$ m) conocido también como infrarrojo próximo reflejado o fotográfico donde se logra discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad. Segundo, el infrarrojo medio (1,2 a 8  $\mu$ m) donde existen dos procesos, por un lado, el de reflexión de luz solar (infrarrojo de onda corta hasta los 2,5  $\mu$ m) apta para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos, y por otro el de emisión de la superficie terrestre (infrarrojo medio) determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios, volcanes activos, etc.) y estimación de algunos gases atmosféricos. En tercer lugar, se halla el infrarrojo lejano o térmico (8 a 14  $\mu$ m) que detecta el calor proveniente de la porción de la mayor parte de la cubierta terrestre (Chuvieco, 2010).

Por último, el rango de las microondas (por encima de 1mm) posee una mayor virtud dado que cuentan con la posibilidad de penetrar a través de nubes, precipitaciones o de capas superficiales de suelo seco, incrementando sus capacidades a mayor longitud de onda. Al igual que en la región del espectro visible, se distingue una serie de bandas con características equiparables que se acotan en cinco rangos de frecuencia y son identificadas mediante letras, a saber: X (2,4 a 3,8 cm), C (3,8 a 7,5 cm), S (7,5 a 15 cm), L (15 a 30 cm) y P (30 a 100 cm) (Chuvieco, 2010).

Tabla 1. Nomenclatura estándar de frecuencia de bandas radar, sensores y detalle de la aplicación típica. Fuente: Mayorga Torres (2013) y Flores-Andersen (2019).

Banda	Longitud de onda [cm]	Frecuencia [GHz]	Principales sensores	Aplicaciones típicas
Ka	0,75 - 1,10	26,5 - 40		- Vigilancia de aeropuerto
K	1,10 - 1,67	18 - 26,5	Uso militar	- Absorción de H <sub>2</sub> O
Ku	1,67 - 2,40	12,5 - 18		- Altimetría satelital
X	2,40 - 3,75	8 - 12,5	TerraSAR-X-1; COSMO-SkyMed	- Monitoreo urbano - Hielo y nieve
C	3,75 - 7,50	4 - 8	ERS-1/2; RADARSAR-1/2; ENVISAT ASAR; RISAT-1	- Mapeo global - Detección de cambios - Monitoreo de áreas con vegetación baja a moderada - Hielo, océano, navegación marítima.
S	7,50 - 15	2 - 4	Almaz-1	- Monitoreo agrícola

Banda	Longitud de onda [cm]	Frecuencia [GHz]	Principales sensores	Aplicaciones típicas
L	15 - 30	1 - 2	JERS-1 SAR; SEASAT; ALOS PALSAR; SAOCOM	- Monitoreo geofísico - Biomasa y mapeo de vegetación
P	30 - 100	0,3 - 1	AIRSAR de JPL/NASA	- Biomasa - Mapeo y evaluación de la vegetación

Frente a la radiación que incide en los objetos e interacciona con la superficie terrestre, se analiza el comportamiento de sus principales coberturas donde el flujo incidente puede ser reflejado, absorbido o transmitido según las características de la cobertura y de la longitud de onda con la que se observa. Para poder caracterizar una determinada cubierta resulta de importancia conocer su comportamiento reflectivo en algunas regiones del espectro electromagnético, ya que esto facilitará discriminarlo frente a cubiertas espectralmente diferentes (Chuvienco, 2007).

A partir de medidas de laboratorio se obtienen curvas de reflectividad espectral para las principales cubiertas terrestres denominadas firmas o firmas espectrales (figura 7). Algunas cubiertas tienden a presentar una respuesta más bien uniforme, como el cemento o el agua, mientras que otras ofrecen un comportamiento mucho más selectivo, tal como es el caso de la vegetación. Una alta reflectividad en un determinado rango de longitud de onda implica que refleja la mayor parte de la energía recibida dentro de tal intervalo (Chuvienco, 2007).

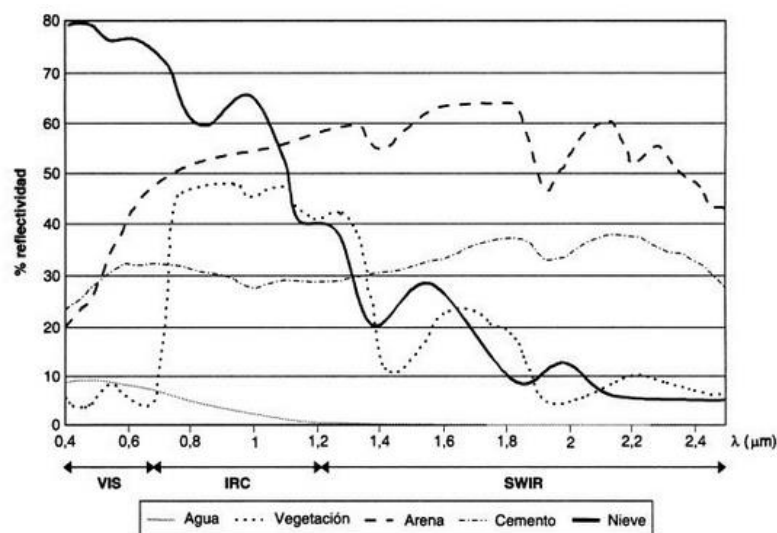


Figura 7. Signaturas espectrales típicas para distintas cubiertas (datos adquiridos con un espectro-radiómetro GER-2600). Fuente: Chuvienco (2007).

El flujo de energía recibido por el sensor depende de la reflectividad de la cubierta y de factores externos, tales como: las condiciones atmosféricas, el emplazamiento ambiental de la cubierta y la geometría de observación. Otros factores

que modifican la respuesta espectral son: la orientación de la pendiente, su gradiente, el sustrato edafológico o litológico, condiciones fenológicas, y por último la altura del sol (figura 8), cuya repercusión es directa en las imágenes ópticas y todos aquellos datos que sean obtenidos con sensores capaces de captar longitudes de onda cortas que no pueden penetrar ciertos obstáculos (Chuvieco, 2007).

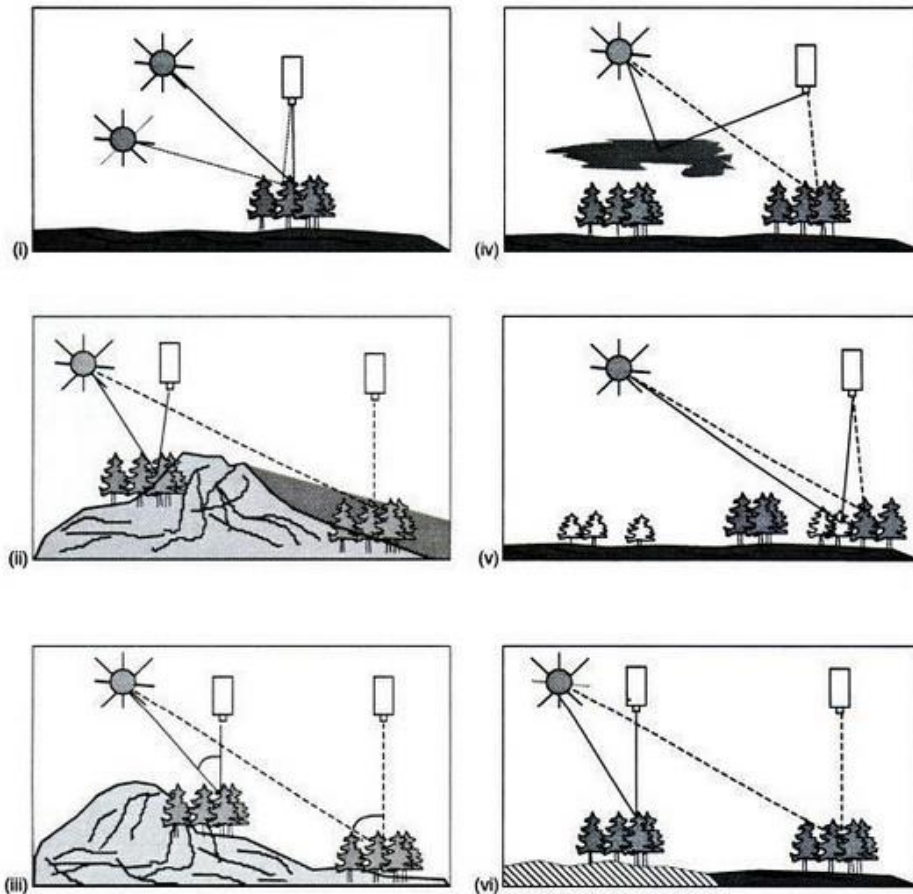


Figura 8. Factores que modifican la signatura espectral: (i) variaciones de la altura solar; (ii) orientación de la vertiente; (iii) pendiente; (iv) atmósfera; (v) condición fenológica; (vi) sustrato edáfico. Fuente: Chuvieco (2007).

En lo que respecta a la geometría de observación, cabe mencionar que, la cantidad de energía que llega al sensor depende del ángulo con que la superficie refleja la energía incidente y del ángulo que forme el haz incidente con la posición del sensor. Esta geometría de observación está estrechamente ligada a la rugosidad que presenta la superficie pudiéndose distinguir dos tipos de cubiertas: las especulares que reflejan la energía con el mismo ángulo del flujo incidente respecto a la vertical, y las lambertianas que la reflejan uniformemente en todas las direcciones (figura 9). Habitualmente, las cubiertas poseen un comportamiento de modo intermedio que depende de sus características y de la longitud de onda en la que se trabaje. A longitudes de onda menores, las rugosidades del terreno tenderán a difundir mucho más la energía incidente que si se trata de longitudes de onda mayores, en donde esos rasgos pueden no impedir un comportamiento especular (Chuvieco, 2007).

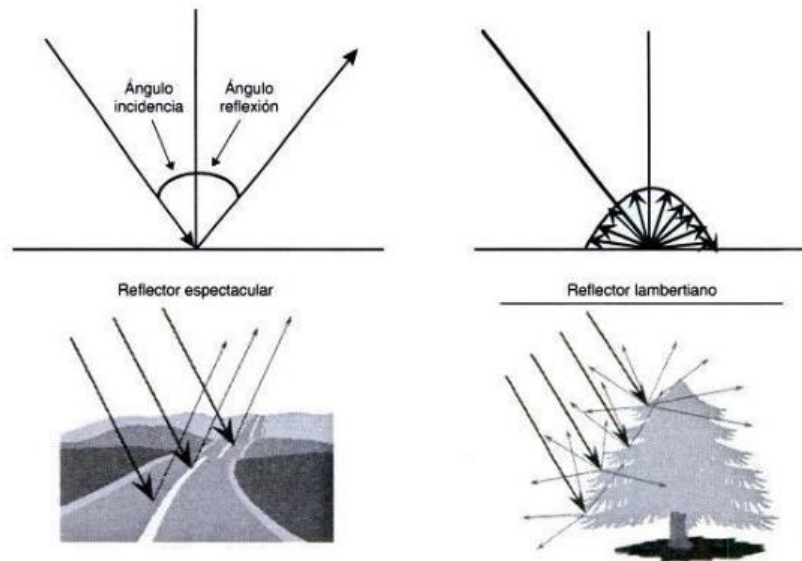


Figura 9. Tipos de comportamiento reflectivo. Fuente: Chuvieco (2007).

El proceso de percepción remota se basa en la detección y medición de radiación electromagnética emitida ya sea de manera natural o a partir de una fuente artificial emisora. La energía se capta por sensores y pueden identificarse blancos<sup>10</sup> o elementos sobre la cubierta terrestre en función de sus propiedades físicas y sustancias componentes. De esta manera, este proceso facilita el conocimiento de la distribución espacial de objetos, fenómenos y coberturas terrestres o del entorno circundante (Fernández Ordóñez *et al.*, 2015).

La captura de datos puede ser realizada a través de sistemas pasivos, donde los sensores captan la energía proveniente del sol reflejada por la superficie terrestre, o bien a través de sistemas activos en cuyo caso la energía retrodispersada por la superficie proviene del propio sensor.

### 2.2.2. Resoluciones de los sistemas sensores

Todo sistema sensor posee características específicas que surgen como efecto de la combinación de los distintos componentes del equipo. La capacidad que tiene este equipo para discriminar información de detalle se denomina resolución, y puede referirse a una simple determinación de que está ahí (detección) o a una delimitación precisa de su contorno (identificación), donde en la segunda tarea se requiere mayor resolución de detalle que en la primera. En cuanto a la información de detalle se refiere a un detalle espacial, al número y rango de las bandas en el espectro electromagnética, frecuencia temporal y a la capacidad para distinguir variaciones en la energía que detecta. Todas estas dimensiones son de interés para discriminar cubiertas o establecer modelos de significado físico. En definitiva, el concepto de resolución implica manifestaciones espaciales, espectrales, radiométrica, temporal y angular (Chuvieco, 2007). Cada una de ellas se definen en función de distintos parámetros y características que se detallan a continuación:

<sup>10</sup> En este escrito se usan indistintamente blanco, target, objetivo o cobertura.

- Resolución espacial: representa la capacidad de distinción del objeto más pequeño posible. En un sistema fotográfico suele medirse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la fotografía. Se mide en milímetros sobre la foto -o metros sobre el terreno-, o bien como es el caso de los sensores óptico-electrónicos donde se usa el concepto de campo de visión instantáneo, donde éste se define como la sección angular, que luego se traduce en distancia sobre el terreno conociendo la altura del sensor sobre el suelo. Esa distancia se corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen, que se denomina pixel. Sin embargo, la resolución de un sensor, según el tipo, depende de varios factores. Por ejemplo, en el caso de los sensores óptico-electrónico depende de la altura orbital, la velocidad de exploración y el número de detectores, mientras que los sensores de antena, la resolución depende del radio de abertura, la altura de la plataforma y la longitud de onda a la que trabajen, entonces cuanto mayor sea el radio, y menor sea la altitud y la longitud de onda, la resolución será tanto más detallada (Chuvieco, 2007).

Un punto por considerar es la estrecha relación que existe entre la resolución, la escala de trabajo y la precisión que se obtiene en la interpretación (figura 10) (Chuvieco, 2007).

En el caso concreto de algunas cubiertas, tal como es el caso de las de áreas urbanas, se ha comprobado que al mejorar la resolución espacial se facilita el análisis visual de la imagen y resulta más certero el resultado. Sin embargo, cuando la interpretación se realiza digitalmente, se incrementa excesivamente la heterogeneidad interna en algunas categorías resultando contraproducente (Chuvieco, 2007).

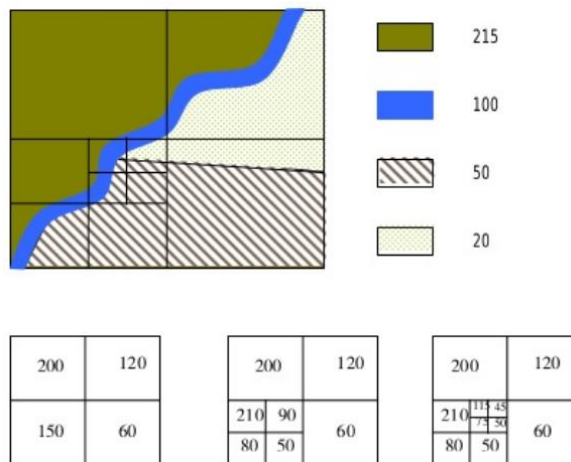


Figura 10. Al aumentar la resolución espacial, la señal recogida por el sensor resulta más cercana de las condiciones reales de la cubierta. Fuente: Torres Perdigón *et al.*, 2007.

- Resolución espectral: indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. La importancia de contar con información multiespectral, radica en registrar simultáneamente el comportamiento de los objetos en distintas bandas del espectro facilitando la caracterización de las distintas cubiertas. Además, es conveniente que esas bandas sean

suficientemente estrechas a fin de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro pues, bandas muy amplias suponen valores promedios que pueden encubrir diferencias espectrales (Chuvieco, 2007).

El radar y los sistemas fotográficos poseen la menor resolución espectral ya que el primero normalmente trabaja con una sola banda y el segundo utiliza películas que pueden ser del tipo pancromático, de color natural o infrarrojo color. En cuanto a los sensores óptico-electrónicos brindan un mayor rango de bandas, desde las 3 correspondientes al verde, rojo e infrarrojo cercano en el caso de los multispectrales, llegando hasta las 220 bandas en el caso de los hiperespectrales (Chuvieco, 2007).

El número, anchura y localización de las bandas de un sensor debe establecerse en función de los objetivos para los que ha de ser diseñado (Chuvieco, 2007).

- Resolución radiométrica: refiere a su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral. En los sistemas fotográficos está dado por los niveles de gris captados por la película, mientras que en los óptico-electrónicos se identifica con el rango de valor que codifica el sensor, valores que van desde 128 (7 bits) hasta 65.536 (16 bits). Una mayor resolución resulta de notable ayuda en la interpretación de imágenes, especialmente cuando se realiza análisis digital ya que permite discriminar objetos con niveles muy similares de reflectividad (Chuvieco, 2007).
- Resolución temporal: indica la frecuencia de captura o revisita proporcionada por el sensor. Es decir, refiere a la periodicidad con la que adquiere las imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura se relaciona con las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación) y al diseño del sensor (ángulo de observación y abertura, entre otros) (Chuvieco, 2007).

Dependiendo de los objetivos para los cuales el sensor fue diseñado, la resolución temporal varía de 30 minutos (órbita geoestacionaria) hasta 16 a 31 días (órbita polar) (Chuvieco, 2007).

- Resolución angular: es la capacidad de un sensor para observar la misma zona desde distintos ángulos. En algunos tipos de cubiertas que presentan el fenómeno de fuerte efecto de reflectividad bidireccional resulta de gran utilidad práctica disponer de imágenes con diferentes ángulos (clasificación, identificación, entre otras) (Chuvieco, 2007). Otra utilidad es la de acortar los tiempos de revisita de uso frecuente en sistemas de alerta temprana, así como también en la obtención de modelos digitales tridimensionales.

Los primeros cuatro aspectos de la resolución están íntimamente relacionados pues a mayor resolución espacial, disminuye la temporal, y es previsible que se reduzcan la espectral. El aumento en cualquiera de ellos implica un crecimiento en el volumen de datos que deben procesar tanto el sensor como la estación receptora (Chuvieco, 2007; Chuvieco, 1995).

### *2.2.3. Sensores pasivos y activos*

Los sensores pasivos captan la energía electromagnética procedente de la cubierta terrestre, siendo ésta reflejada de los rayos solares o emitida debida a la

temperatura de la misma. Se dividen en sensores fotográficos (cámaras fotográficas), óptico-electrónico (exploradores de barrido y de empuje y cámaras de vidicon) y de antena (conocidos como radiómetro de microondas) (Chuvieco, 2007).

Según Chuvieco (2007) las cámaras fotográficas son el medio más utilizado de teledetección aérea pero cuando se utilizan en las plataformas espaciales se encuentra limitada la adquisición a la carga de película. La cámara registra la energía reflejada por un objeto sobre emulsiones fotosensibles, con el apoyo de un sistema óptico que permite controlar las condiciones de exposición. Existen numerosas variantes en función de cuatro elementos: tipo de película<sup>11</sup>, número de objetivos, ángulo de observación<sup>12</sup> y altura de la plataforma (Chuvieco, 2007).

La fotografía aérea permite distinguir entre fotografía aérea y espacial, otorgando diversidad de aplicaciones dado que hace variar notablemente resolución espacial, nitidez, cobertura del terreno y precisión geométrica (Chuvieco, 2007).

Los programas de exploración fotográfica desde plataformas espaciales comenzaron en la década del 60, incrementándose ante la calidad de los resultados obtenidos. Estos sensores fueron incorporados a diversas misiones, complementándose con otros instrumentos como el barredor multispectral, sensores microondas, entre otros. Además, se perfeccionaron con distintos fines como, por ejemplo, obtención de cartografía básica mundial, morfología metropolitana, expansión urbana, estudio de recursos naturales, hídricos y minerales, etc. (Chuvieco, 2007).

Por otra parte, los sensores óptico-electrónicos combinan una óptica semejante a la fotografía con un sistema de detección electrónica que evita la dependencia de una superficie sólida de grabación.

Dentro de este grupo de sensores, los más habituales en teledetección espacial son los exploradores o rastreadores de barrido (*scanners*) que consisten en un espejo móvil, que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria permitiendo explorar una franja de terreno a ambos lados de la traza del satélite. La radiancia recibida se dirige a una serie de detectores, que la amplifican y convierten a una señal eléctrica que se transforma a un valor numérico digital, que puede almacenarse a bordo o transmitirse a la red de antenas receptoras que graban la información en soportes magnéticos para su posterior proceso y distribución a los usuarios. La estructura interna del producto obtenido consiste en fotografías digitales, donde cada valor numérico se puede traducir en niveles de reflectividad o temperatura (coeficientes de calibrado del sensor y las condiciones de adquisición), es decir que estos sensores facilitan la representación gráfica y la medición física de la superficie que observan. En cuanto a las ventajas de los equipos de barrido multispectral se puede mencionar, detección de longitudes de onda entre 0,4 a 12,6  $\mu\text{m}$ , facilidad en la calibración y en la corrección radiométrica de los datos, posibilidad de realizar coberturas sistemáticas y de grandes

---

<sup>11</sup> Tipos de películas (Chuvieco, 2007):

- Pancromática (blanco y negro): recoge todo el espectro visible sobre una sola emulsión;
- Color: se mezclan distintas capas foto-químicas, cada una de las cuales es sensible a una banda del espectro visible. Más certera para la discriminación de objetos;
- Infrarrojas (blanco y negro y color o falso color): hace variar los tonos de registración de la radiación correspondiente al IRC.

<sup>12</sup> Según el ángulo de observación la fotografía puede ser vertical (tomada perpendicularmente al terreno con hasta  $\pm 5^\circ$  de desviación) u oblicua (ángulo de visión sensiblemente inferior a  $90^\circ$ ) (Chuvieco, 2007).

espacios, y grabación digital de la información asegurando fiabilidad y capacidad de tratamiento asistido por ordenador. (Chuvieco, 2007).

Por otra parte, se encuentran los exploradores de empuje (pushbroom), tecnología que consiste en una cadena de detectores que cubre todo el campo de visión del sensor, donde la calibración de la cadena presenta la mayor dificultad para su uso pues requiere complejos mecanismos de ajuste para que se traduzcan en señal recibida. Los detectores se excitan con el movimiento orbital del satélite explorando en cada momento una línea completa que se desplaza simultáneamente con la plataforma. Al igual que los exploradores de barridos, registran los datos captados en formato digital en regiones del espectro electromagnético más allá del visible (Chuvieco, 2007).

En cuanto a las cámaras de vídeo pancromática o multibanda, utilizada principalmente para el estudio de recursos naturales y como fuente de imágenes en proyectos de gran escala, permite obtener información calibrada con gran nivel de detalle y bajo coste, con inmediata disponibilidad y facilidad de manejo. El principal inconveniente es la baja resolución, motivo por el cual los datos deben ser tomados desde baja altura (Chuvieco, 2007).

Por último, los radiómetros de microondas operan en el rango del espectro correspondiente a longitudes de onda milimétricas, normalmente entre 6,8 y 90 GHz. Por tal motivo no está afectado por la situación atmosférica ni por las condiciones de iluminación. El equipo se compone de un receptor direccional que permite la detección y amplificación de las microondas y un detector. La desventaja reside en la pobre resolución espacial que proporciona, sin embargo, sus datos han resultado de gran aprovechamiento para diversos estudios medioambientales, detección de movimientos de icebergs, cartografía de mapas de hielo, etc. (Chuvieco, 2007).

En contraposición a los sistemas pasivos se encuentran los activos que son aquellos que proporcionan su propia fuente de energía, dirigida al objetivo a investigar; luego detecta la radiación reflejada y la mide. El equipo de captura más conocido es el RADAR (RADio Detection And Ranging - Radio detección y telemetría), además se pueden mencionar altímetros, dispersómetro de vientos y sistemas LIDAR (Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) (Canadian Center for Remote Sensing -CCRS-, 2001; Chuvieco, 2007).

Los sensores de radar trabajan en una banda comprendida entre 0,1 cm y 1m. La imagen radar se compone de píxeles, donde cada uno posee un valor que representa el coeficiente de retrodispersión de esa área sobre el terreno, resultando tanto mayor cuanto más intensa sea la señal de retorno. Presenta gran ventaja en la obtención de datos ya que puede trabajar en cualquier condición atmosférica. La principal limitación del producto que se obtiene es la baja resolución anulando su utilidad en plataformas espaciales.

Independientemente de la portabilidad del sensor, el radar observa la superficie de manera lateral que, combinado con las posibles variaciones en los ángulos de emisión e incidencia del flujo, implica notables deformaciones geométricas en las imágenes generadas por estos sistemas. En cuanto a la capacidad de diferenciar objetos cercanos depende de la longitud de onda pues cuanto más larga sea, la señal retrodispersada por tales objetos tienden a mezclarse. Por otra parte, la geometría de adquisición de imágenes radar se encuentra altamente influenciada por el relieve que modifica el

ángulo de incidencia, por este motivo se requiere un modelo digital de terreno de precisión (Chuvienco, 2007).

El radar de apertura sintética o Synthetic Aperture Radar (SAR) ha sido uno de los sensores de mayor desarrollo en las últimas décadas, dado a su gran versatilidad de observación, ya que el producto resultante es satisfactorio independientemente de las condiciones atmosféricas y de la iluminación solar. El proceso de adquisición de datos de este sistema se basa en el efecto Doppler. Registra los pulsos de un mismo punto de la superficie terrestre en dos momentos distintos de la trayectoria logrando obtener productos con resoluciones satisfactorias con lo cual existen numerosas aplicaciones.

Los sistemas SAR proveen amplias posibilidades para el análisis de vegetación. Por ejemplo, estimación de algunos atributos forestales (alturas promedio, área basal, biomasa, volumen maderero) y seguimiento de la regeneración vegetal tras un evento catastrófico. Además, permite generar cartografía de la cobertura del suelo (basada en la rugosidad) y detectar alteraciones producidas por inundaciones o talas. También se pueden obtener modelos digitales de terreno de gran precisión e incluso detectar diferencias de altura del terreno o movimientos de la superficie a partir de técnicas de interferometría<sup>13</sup>(Chuvienco, 2007).

Los altímetros son instrumentos que miden con mucha fidelidad la distancia entre el satélite y la superficie marina (Chuvienco, 2007).

El dispersómetro de vientos mide los campos de vientos (dirección y velocidad) sobre el océano (Chuvienco, 2007).

En cuanto a los sistemas lidar existen distintas variedades de acuerdo a los principales tipos de dispersión en función de la orientación de la aplicación específica. El sensor lidar emite pulsos muy cortos de luz polarizada modulada que interacciona con las partículas atmosféricas o el suelo, causando su dispersión dependiendo del tipo de elemento encontrado. La energía que retorna es recogida por un telescopio que la transmite a través de un filtro óptico a un foto-detector. Esta señal eléctrica se graba y almacena en un ordenador. Luego, se puede deducir información sobre el tipo de cubierta de la zona de estudio en función del tiempo y la intensidad de la señal de retorno. Además, son utilizados para detección de aerosoles y partículas contaminantes del aire, medición de la humedad, presión y temperatura del aire, y estimación de la velocidad del viento; así como también, detección de manchas de aceite, algas y contaminantes del agua, condiciones de humedad en la vegetación y contenido de pigmentos. Además, es un sensor de gran potencialidad para estudios topográficos y de biomasa vegetal. El principal problema radica en la dependencia de las condiciones atmosféricas y que requiere un consumo de energía bastante elevado para su funcionamiento (Chuvienco, 2007).

#### 2.2.3.1. Sensores radar

Los sistemas radar son una fuente de recopilación de datos de gran importancia dado que las microondas que emiten se propagan en la atmósfera con escaso deterioro de sus propiedades, por tal motivo sus sensores pueden generar imágenes de manera

---

<sup>13</sup> Interferometría: estudio de la diferencia de fase entre dos pulsos próximos en el tiempo, detectando diferencias de la variación de altura sobre el terreno o de movimientos de la superficie aplicando el principio de superposición.

prácticamente independiente de perturbaciones por nubosidad, lluvia, niebla, bruma y humo. Además el análisis de imágenes de radar puede tomar en cuenta condiciones ambientales y sociales útiles para diversas aplicaciones como son: la determinación de fronteras agrícola/urbana, el avance de manchas urbanas, la identificación de cultivos y el seguimiento de su condición, la humedad, la labranza del suelo y los residuos post-cosecha, el mapeo de áreas forestales de corte y siniestradas por incendios, la identificación de especies forestales, la estimación de biomasa, la deforestación e incluso los cambios en el relieve terrestre, entre otras. Por sus capacidades de aplicación la percepción remota de radar está siendo cada vez más requerida, en particular la obtenida con SAR (Fernández Ordóñez *et al.*, 2015).

Los sensores radar poseen una geometría de observación lateral para evitar los problemas de ambigüedad en la conformación de la imagen. Esta geometría de observación se presenta en la figura 11 y 12 donde se identifican los siguientes ítems:

- $r$  distancia sensor-blanco
- $h$  altura de observación
- $t$  tiempo que demora la señal en regresar al sensor
- $c$  velocidad de la luz
- $\tau$  duración del pulso
- $\Phi$  diámetro de la abertura
- D y L dimensiones de la antena

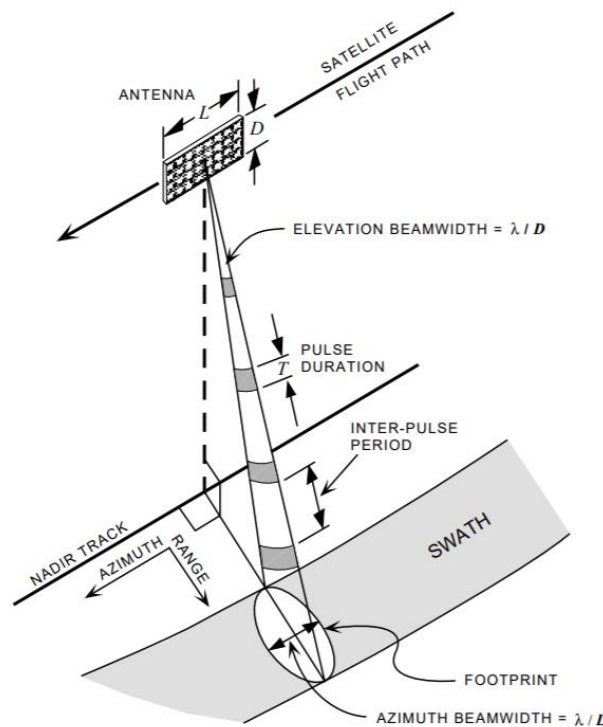


Figura 11. Geometría de observación y toma de datos. Fuente: Olmsted (1993)

El rango o distancia, desde el sensor al objeto se calcula en función del tiempo transcurrido entre que la energía emitida llega al objeto y regresa al sensor, en

consecuencia, tal tiempo es proporcional a la distancia recorrida. Finalmente se obtiene la siguiente ecuación (Mayorga Torres, 2013).

$$t = 2 \frac{r}{c}$$

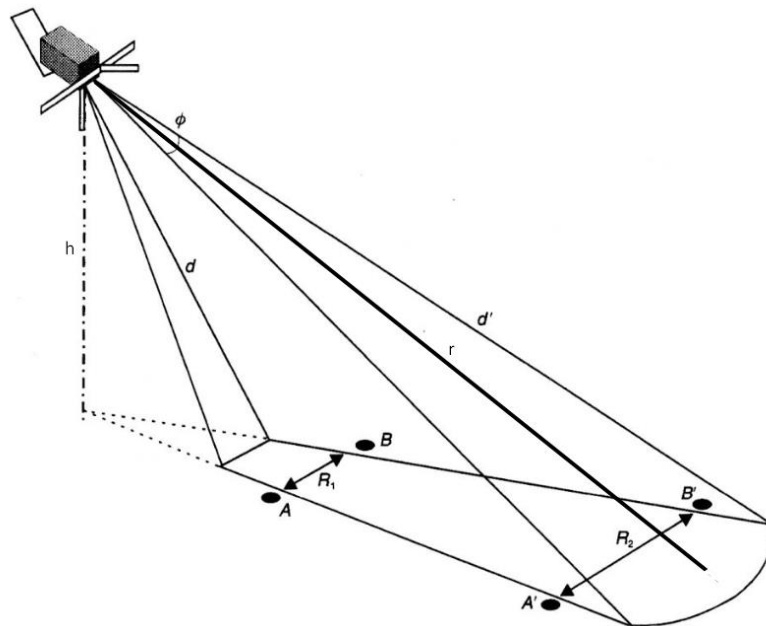


Figura 12. Resolución en acimut de un sistema radar. Fuente: Adaptado de Chuvieco (2007)

La resolución espacial de un sistema de abertura circular puede calcularse como:

$$R_s = \frac{\lambda h}{\Phi}$$

Esta relación refleja que el tamaño del mínimo objeto identificable sobre la imagen es directamente proporcional a  $\lambda$  y a  $h$ , e inversamente proporcional a  $\Phi$ . Así, queda en evidencia que para lograr una resolución aceptable sería necesario contar con antenas de enormes proporciones (Mayorga Torres, 2013).

La ecuación fundamental del radar es la siguiente:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4}$$

Donde,  $P_r$ : indica la potencia retrodispersada

$P_t$ : potencia emitida por el radar

$G$ : factor de ganancia de la antena

$\lambda$ : longitud de onda del radar

$r$ : indica la distancia entre el sensor y la superficie

$\sigma$ : sección eficaz de retrodispersión

La resolución espacial en radar se obtiene por el rango o acimut, o ambos. La resolución en rango depende del ancho de banda, y la resolución en ángulo o acimut depende del tamaño de la antena. En el caso un Radar de Apertura Real (Real Aperture Radar - RAR) convencional, la resolución en acimut se determina por el ancho angular

del haz en la dirección del acimut; mientras que un Radar Lateral Aero-transportado (Side Looking Airborne Radar - SLAR), ambas resoluciones están relacionados con las dimensiones de la antena (D y L) (figura 11). Las resoluciones en acimut ( $\delta_{az}$ ) y en rango ( $\delta_{ra}$ ) resultan:

$$\delta_{az} = r \frac{\lambda}{L}; \delta_{ra} = r \frac{\lambda}{D}$$

De acuerdo con lo desarrollado, es evidente que es imposible crear antenas radar con dimensiones propicias para la obtención de productos con resoluciones satisfactorias para todas aplicaciones posibles. En consecuencia, se potencia la utilidad del SAR.

### 2.2.3.2. Sensores Radar de Apertura Sintética

Los sensores radar de apertura sintética tienen un diseño que permite simular una antena de mayor tamaño que el real. Los SAR más versátiles operan en modalidad polarimétrica, emitiendo y recibiendo energía polarizada (Fernández Ordóñez *et al.*, 2015).

Los radares polarimétricos funcionan considerando la polaridad de la señal electromagnética que emiten y las propiedades de polarización de la señal que captan al retorno. Esta señal de retorno contiene implícita información sobre la cobertura de la tierra, pues tendrá amplitudes, frecuencias y fases características que dependen de la geometría de observación del satélite respecto del punto en tierra y de las propiedades dieléctricas de la superficie (Fernández Ordóñez *et al.*, 2015; Mayorga Torres, 2013).

El SAR es un radar de dimensiones relativamente pequeño, cuyo proceso de adquisición de datos se basa en el efecto Doppler. Es capaz de obtener imágenes a partir del registro de pulsos (del orden de 1000) de un mismo punto de la superficie terrestre (figura 13) entre dos momentos distintos de la trayectoria, con lo que la resolución obtenida sería equivalente a la que se obtendría con una antena de similar longitud a la distancia existente entre ambos puntos (Mayorga Torres, 2013; Chuvieco, 2007).

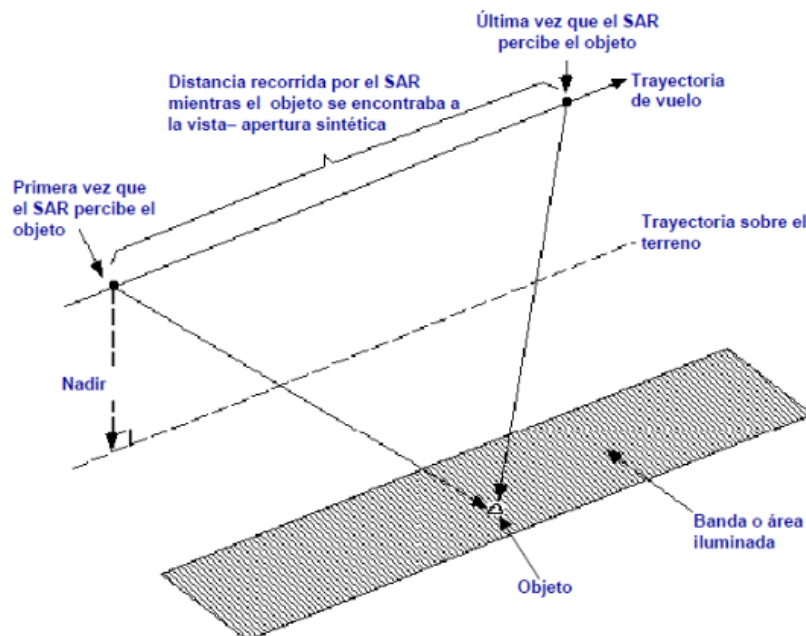


Figura 13. Apertura sintética en SAR. Fuente: CCRS (2001).

En la percepción remota SAR es necesario conocer conceptos básicos de la naturaleza de los datos para realizar una elección apropiada de los métodos de análisis y procurar una interpretación de la información cercana a la realidad observada (Fernández Ordóñez *et al.*, 2015).

#### 2.2.4. Principios básicos del funcionamiento de un radar

Siguiendo a Mayorga Torres (2013), el proceso de detección de un radar se basa en tres principios tecnológicos que son:

1. Una antena capaz de transmitir un pulso corto en una dirección precisa.
2. Capacidad para enviar y detectar en una dirección precisa el eco retrodispersado, muy atenuado, de un blanco y examinar blancos en áreas grandes.
3. Capacidad de medir el tiempo de retardo entre la emisión y la detección, y así la distancia al blanco.

Según las características constructivas del radar se pueden controlar condiciones de adquisición como son el ángulo de incidencia, la distancia sensor-blanco, la orientación de observación, la polarización de la señal, entre otros (Mayorga Torres, 2013).

La orientación de la onda en relación a la superficie de la Tierra, es decir, el plano a lo largo del cual viaja refiere a la polarización. Una onda polarizada horizontalmente (H) o verticalmente (V) (figura 14) al incidir sobre un blanco produce otra onda de retorno que puede tener contribuciones en ambas polarizaciones H y V (Mayorga Torres, 2013; Fernández Ordóñez *et al.*, 2015).

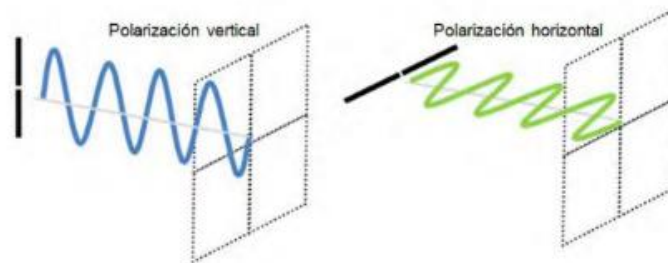


Figura 14. Polarización de las ondas electromagnéticas, campo eléctrico. Fuente: Mayorga Torres (2013).

La polarización permite una medida de la forma o geometría del blanco y para ello se toma en cuenta la orientación, fase relativa y periodicidad de los campos eléctricos y magnéticos de las ondas. Cuando la energía transmitida es polarizada en la misma dirección que la recibida se trata de una polarización similar (HH, VV), mientras que cuando varía la polarización entre la señal emitida y la recibida se está en presencia de polarización cruzada (HV o VH). La dirección con la que la señal está polarizada influye en el haz de retorno, porque el eco del radar es selectivo a la dirección de propagación. El retorno de polarización cruzada HV o VH es débil y se lo asocia con diferentes reflexiones debido a la rugosidad de la superficie (Mayorga Torres, 2013).

2.2.4.1. Interacción de la radiación electromagnética con los blancos

Los sensores activos emiten una secuencia de pulsos muy cortos con una frecuencia y duración muy precisa, y posteriormente captan su retrodispersión. Cada pixel en una imagen de radar representa el coeficiente de retrodispersión ( $\sigma$ ) de esa área sobre el terreno. Este coeficiente ( $\sigma$ ) es complejo porque depende de muchos factores como la rugosidad o aspereza de la superficie, su constante dieléctrica y la geometría del terreno (pendiente y orientación respecto del ángulo de incidencia del haz), el ángulo de incidencia del haz, la polarización y la longitud de la onda (Mayorga Torres, 2013; Podest, 2018).

La rugosidad del terreno incide directamente en la intensidad de la señal de retorno, resultando mayor cuanto más elevada es la rugosidad. Este concepto depende de la estructura de la superficie, la longitud de onda ( $\lambda$ ) de observación y la variación altitudinal de la cubierta ( $h$ ) (figura 15) (Mayorga Torres, 2013).

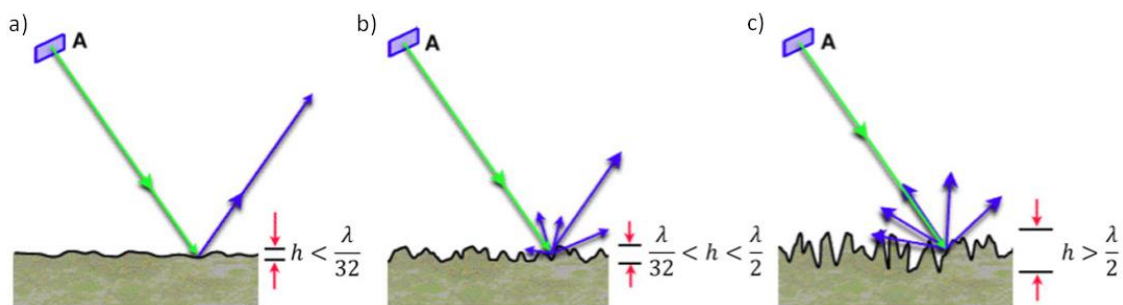


Figura 15. Esquema conceptual de la relación entre la variación altitudinal de la cubierta y la longitud de onda. a) Superficie lisa: reflejo especular, retorno nulo; b) Retorno moderado: rugosidad intermedia; c) Retorno fuerte: superficie rugosa, dispersión difusa. Fuente: Flores-Andersen (2019).

Cuando se emite un haz de microondas desde un radar a la superficie terrestre, la mayor parte de ese haz es dispersado al contacto con la superficie. Según la naturaleza de la cobertura, el haz se dispersa de diferentes maneras. Por ejemplo, en el caso del suelo, tiende a hacerlo hacia el exterior, cuando se trata de vegetación se dispersa dentro del propio objeto, o cuando hay agua se refleja especularmente (caso del agua sin rugosidad debida al efecto del viento) (Mayorga Torres, 2013).

Las superficies con pendiente hacia el sensor tienen una dispersión más fuerte que las superficies con pendiente contraria al sensor, por lo que aparecen más brillantes en una imagen de radar. Por el contrario, las áreas en sombra, es decir que no son iluminadas por el sensor, aparecen oscuras (figura 16).

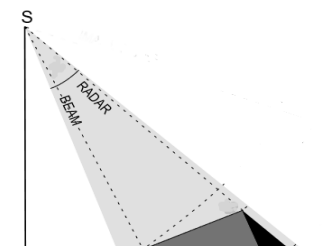


Figura 16. La pendiente que se orienta hacia el sensor emite provoca una fuerte dispersión hacia el sensor, por el contrario que la pendiente opuesta no. Fuente: Olmsted (1993).

En un ambiente donde se presenta una estructura con calles y edificios hacen que el pulso de radar incidente rebote en tales superficies (figura 17) lo que se denomina doble rebote (Double Bounce), retornando al radar con una apariencia muy brillante (blanca) en la imagen de radar. En contraposición, las carreteras y ferrovías, como son superficies planas, se da una reflexión especular y aparecen oscuras (Mayorga Torres, 2013).



Figura 17. Mecanismos de retrodispersión: doble rebote. Fuente: SARMAP (2008).

Dependiendo de la frecuencia y polarización de la observación, las ondas pueden penetrar la vegetación e incluso el suelo seco, como nieve seca o arena, en ciertas condiciones. Generalmente, a mayor longitud de onda, más fuerte es la penetración en los objetos (figura 18) (Mayorga Torres, 2013).

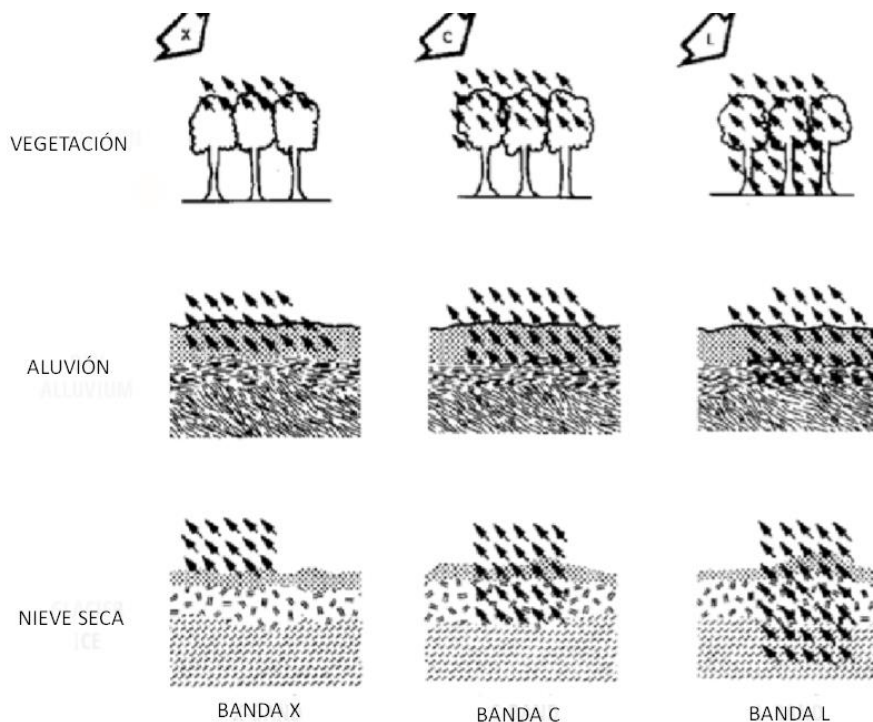


Figura 18. Penetración del pulso de radar en las bandas X (3cm), C (6cm) y L (23cm). Fuente: SARMAP (2008).

En la geometría del terreno, el ángulo de incidencia local toma en cuenta la inclinación local (pendiente) de la superficie iluminada, por lo que su valor influye de forma determinante en la brillantez de la imagen (Mayorga Torres, 2013).

El ángulo de incidencia ( $\theta$ ) es el ángulo entre la dirección de iluminación del radar y la normal a la superficie de la Tierra, cambiando a lo largo de la dirección en rango. A

mayor ángulo, en general menor pulso de retorno pues tiende a manifestar un comportamiento especular ante la disminución de la rugosidad. Por otro lado, si se combina un ángulo de incidencia bajo con una longitud de onda larga, el pulso de radar puede penetrar a una cierta profundidad. Normalmente, la reflectividad de la señal de retorno es fuerte en pequeños ángulos de incidencia, y decrece ante su incremento (Mayorga Torres, 2013).

Otro factor que influye en el retorno de la señal es la característica eléctrica de la cubierta. Una de las medidas de este comportamiento es la constante dieléctrica, que caracteriza la conductividad y la reflectividad de un tipo de material. En el caso los materiales secos este valor se halla entre 3 y 8, mientras que en el de los objetos metálicos y el agua corresponde a un valor alto de 80; para microondas. En consecuencia, la presencia de agua en el suelo o la vegetación puede alterar significativamente el pulso de retorno tal es así que la humedad de la cobertura es una variable que interviene en las propiedades dieléctricas de la superficie en general; según el contenido de humedad, los objetos muy húmedos aparecen brillantes, mientras que los muy secos aparecen oscuros. Sin embargo, los cuerpos de agua sin olas son una excepción ya que como se trata de una superficie plana, la retro dispersión es muy baja y aparecen en la imagen en color negro (Mayorga Torres, 2013).

2.1.4.2. Distorsiones geométricas en la imagen SAR

La interpretación de las imágenes de radar es compleja, por tal motivo es importante tener en cuenta las características de las mismas a la hora de analizarlas. Uno de los factores más importantes refiere al desplazamiento del relieve que genera la dirección de observación de los radares ya que ilumina lateralmente. Esta distorsión del terreno en las imágenes es perpendicular a la trayectoria del vuelo (o trayectoria del satélite), es decir que los objetos más altos se observan desplazados hacia el sensor, mientras que, en el caso de fotos aéreas, los objetos altos se observan desplazados radialmente alejándose del nadir (figura 19) (CCRS, 2001).

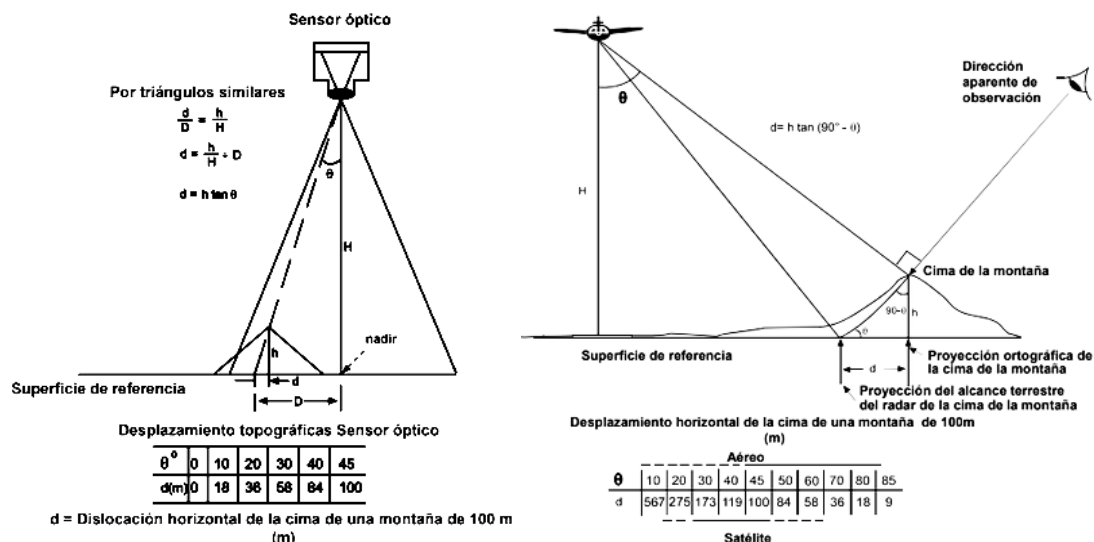


Figura 19. Desplazamiento del relieve en una fotografía óptica y una imagen radar. Fuente: CCRS (2001).

El tipo y grado de desplazamiento del relieve en las imágenes de radar depende del ángulo de incidencia local. En cuanto a la región de la superficie del terreno que no se ilumina por el radar se representa como sombra en la imagen (figura 20), pues como no se recibe energía retrodispersada de estas regiones, aparecen con tonos oscuros. Las sombras se presentan detrás de las cumbres, en la dirección del alcance, y resultan indicadoras de la dirección de iluminación del radar. El ángulo de incidencia aumenta al alejarse del radar en la dirección del alcance, es decir que la iluminación del terreno es más oblicua. Como resultado, las sombras se acentúan más cuanto más alejadas del radar este la región en cuestión. Por otra parte, las sombras proporcionan información sobre la escena. Tal es el caso de la altura de un objeto, facilitando la interpretación del relieve del terreno (CCRS, 2001).

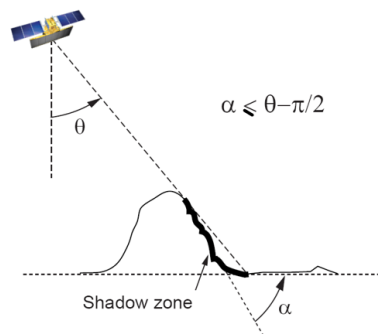


Figura 20. Zona de sombra: áreas que no son alcanzadas por los pulsos del radar.  
Fuente: Lopez-Sanchez (2014).

El escorzo en las imágenes de radar se manifiesta como la compresión o expansión de la superficie en los píxeles dependiendo de la pendiente de la escena (figura 21). En las escenas que están inclinadas hacia el radar se refleja con una apariencia de compresión, es decir que la retrodispersión provocada por una determinada porción de superficie se reduce a menor cantidad de píxeles de lo que corresponde teóricamente. Su máxima expresión se pone de manifiesto cuando el declive es pronunciado y ortogonal a la dirección de iluminación del radar, es decir que el ángulo de incidencia local es igual a cero. El resultado es que la base, el declive y la cima de una colina se presentan de manera simultánea en la señal que se recibe y, por lo tanto, ocupan la misma posición en la imagen. Este efecto disminuye al aumentar el ángulo de incidencia, en tanto que los efectos de escorzo prácticamente se eliminan cuando el ángulo de incidencia se aproxima a  $90^\circ$ , no obstante, se puede presentar en este caso un sombreado severo (CCRS, 2001).

El ángulo de incidencia debe ser seleccionado por el usuario de manera tal de alcanzar un equilibrio entre la presencia de escorzo y de sombras en la imagen (CCRS, 2001).

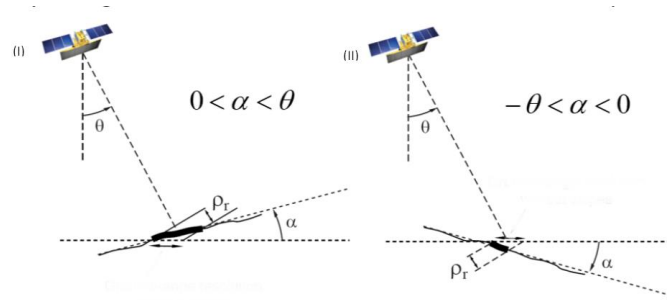


Figura 21. (I) Las pendientes de frente al radar aparecen como "comprimidas" en unos pocos píxeles. (II) Las pendientes invertidas al otro sentido aparecen como "expandidas", ocupando muchos píxeles. Fuente: Lopez-Sanchez (2014).

La inversión por relieve ocurre cuando la energía reflejada por la porción superior de un objeto se recibe antes que la proveniente de la porción inferior (figura 22). Tal es el caso de pendientes muy pronunciadas. En este caso, al procesar la imagen, la parte superior del objeto se verá desplazada, o "por encima" de su base, comprimiendo toda la colina en un solo píxel. En general se da en geometrías de visualización con ángulos de incidencia pequeños.

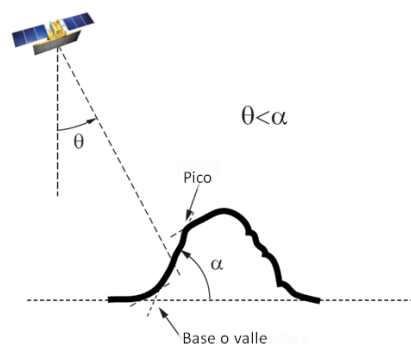


Figura 22. Inversión por relieve. Fuente: Lopez-Sanchez (2014).

#### 2.2.4.2. Distorsiones radiométricas en la imagen SAR

Teniendo en cuenta la influencia de la topografía en la señal retrodispersada captada por el sensor, el analista debe de corregirla. Este proceso consta de eliminar valores altos en áreas de topografía compleja (Podest, 2018).

La mayoría de las escenas naturales corresponden a un conjunto de blancos, es decir, muchos dispersores. En consecuencia, la suma de todas las respuestas individuales de los blancos dentro de la celda de resolución cambia pixel a pixel, incluso para una parte homogénea de la escena. Estas fluctuaciones producidas de pixel a pixel producen el aspecto granular de las imágenes que se denomina moteado (speckle). Se trata de un 'ruido' que degrada la calidad de las imágenes SAR (Lopez-Sanchez, 2014; Podest, 2018).

Otro proceso que ocasiona 'ruido' es el desvanecimiento. Esto se debe a la variación en el retraso de la fase de la señal que se recibe, ocasionado por la presencia de varios reflectores en una misma celda de resolución con diferencias de posición en la dirección del alcance, menores a una longitud de onda (CCRS, 2001).

La interferencia local constructiva aparece en la imagen como moteado brillante en tanto que la destructiva en tonos oscuros. La imagen de radar se forma a partir de distintos conjuntos de datos de la misma porción de terreno, muestras independientes que se promedian y permiten reducir el deterioro de la calidad de la imagen por desvanecimiento y moteado (CCRS, 2001). A tales fines se puede proceder de acuerdo a dos alternativas posibles:

- **Procesamiento Multi-Look:** consiste en dividir el haz del radar en varios sub-haces más angostos, donde cada uno proporciona una vista (“look”) independiente al área iluminada. Cada “look” contiene speckle, pero al sumar los “looks” y promediarlos, finalmente el speckle es menor en el producto final (figura 23). Este procesamiento no resulta apropiado en escenas cambiantes (Podest, 2018; Lopez-Sanchez, 2014).

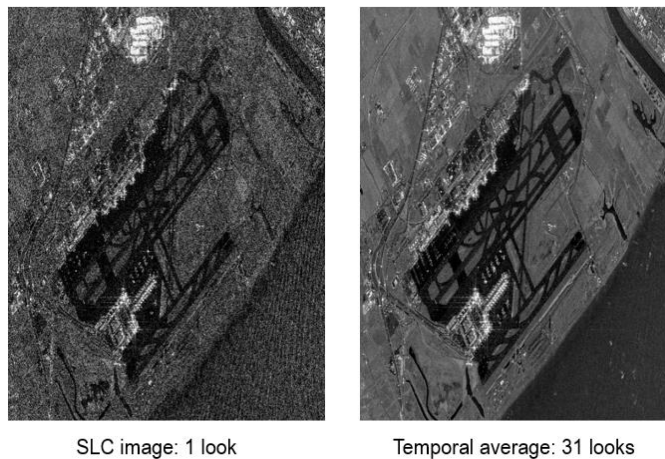


Figura 23. Reducción de moteado por medio del procesamiento Multi-Look. Fuente: Lopez-Sanchez (2014).

- **Filtro Espacial:** se parte de una ventana que abarca un conjunto de pixeles a los que se aplican cálculos matemáticos a fin de que el pixel central adquiera un nuevo valor. Esta ventana se desplaza a lo largo de las dimensiones X e Y, un pixel a la vez. Como resultado se obtiene una imagen con un efecto suavizado como consecuencia de la reducción visual del moteado (figura 24) (Podest, 2018).

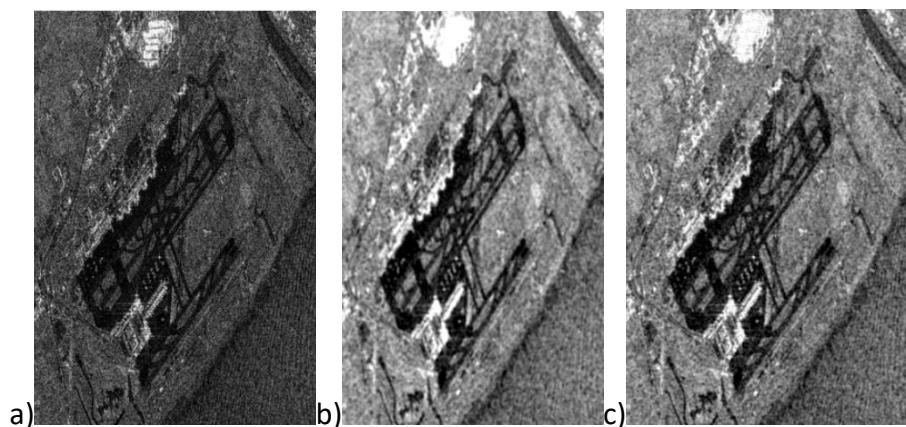


Figura 24. Reducción de moteado por medio de filtro espacial; a) Imagen SLC (1 look), b) Filtro box-car (7x7 looks), c) Filtro Enhanced Frost (5x5). Fuente: Lopez-Sanchez (2014).

Al reducir estos efectos se mejora la resolución radiométrica pero se degrada la resolución espacial.

### 2.2.5. Misiones satelitales radar

Los distintos sensores son transportados en plataformas satelitales o aviones y tienen la capacidad de captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia (Chuvieco, 2007).

Las plataformas satelitales se clasifican en función de su órbita distinguiéndose dos tipos, los geosíncronos o geoestacionarios y los heliosíncronos. Los primeros se ubican en órbitas muy alejadas lo que les permite sincronizarse al movimiento de rotación de la tierra y observar siempre la misma zona con un amplio campo de visión y una resolución temporal inmejorable. El segundo caso refiere a las plataformas móviles que orbitan siguiendo una trayectoria circular y a una velocidad tal que cada porción de tierra observada se capture a una hora solar fija, a fin de obtener imágenes comparables. La elección de la órbita depende de las características de la misión del satélite (Chuvieco, 2007).

Existen gran diversidad de proyectos satelitales, por ejemplo: Landsat, SPOT, Sentinel, COSMO-SkyMed, DORIS, IRS, SAOCOM, IKONOS, EROS, NOAA, MODIS, TerraSAR-X, ENVISAT, RADARSAT, etc.

Teniendo en cuenta los objetivos del trabajo, se desarrollará en detalle el sistema COSMO-SkyMed (CONstellation of Small Satellites for Mediterranean basin Observation).

COSMO-SkyMed es una constelación de cuatro satélites para la observación de la cuenca mediterránea, concebida por la Agencia Espacial Italiana (Agenzia Spaziale Italiana, ASI) y financiada por el Ministerio de Educación, Universidades e Investigación de Italia (Ministero dell'Istruzione dell'Università e della Ricerca - MIUR) y el Ministerio de Defensa de Italia (Ministero della Difesa, MD). El primer satélite fue lanzado en junio de 2007, completando su constelación a mediados del año 2010. Cada uno de los satélites está equipado con un instrumento SAR y es capaz de operar en todas las condiciones de visibilidad, en alta resolución y en tiempo real. El objetivo general de este programa es la observación global de la tierra y la explotación de datos relevantes para las necesidades de la comunidad militar y civil (eoPortal, 2018).

Según Italian Space Agency (2016) los productos estándar SAR del sistema COSMO-SkyMed se dividen en cinco tipos:

- Datos RAW de nivel 0, sin procesar asociado con datos auxiliares (por ejemplo: trayectoria, coordenadas precisas del satélite y vector de velocidad, modelo de sensor geométrico, estado de la carga útil, datos de calibración, etc.) y de calibración;
- Level 1A, Single-look Complex Slant (SCS) que contiene datos enfocados en formato complejo, en rango inclinado y proyección doppler cero. El procesamiento realizado a los datos de entrada L0 son: compensación de la ganancia del receptor, calibración interna, enfoque de datos, estimación estadística de los datos de salida y formateo de datos en salida;
- Level 1B, Detected Ground Multi-look (DGM) obtenido a partir de la detección, búsqueda y proyección de los datos de inclinación compleja en una cuadrícula

regular en terreno, contiene datos enfocados, detectados, ecualizados radiométricamente y en proyección de rango de terreno / acimut. El procesamiento realizado a los datos de entrada L1A son: multi-looking para la reducción de speckle, detección de imagen (amplitud), proyección en el elipsoide, evaluación estadística, formateo de datos;

- Level 1C, Geocoded Ellipsoid Corrected (GEC) es un producto obtenido después del procesamiento L1C, contiene datos enfocados, detectados geográficamente ubicados en el elipsoide de referencia y representados en una presentación cartográfica preseleccionada uniforme. El procesamiento realizado a los datos de entrada L1B son: multi-looking para la reducción de speckle, proyección de mapa elipsoide, evaluación estadística y formateo de datos
- Level 1D, Geocoded Terrain Corrected (GTC) obtenido después del procesamiento L1D, contiene datos proyectados sobre una superficie de elevación de referencia en una cuadrícula regular obtenida de un sistema de referencia cartográfica. La escena de la imagen se ubica y se rectifica con precisión (x, y, z) en una proyección de mapa, mediante el uso de puntos de control y el modelo de elevación digital (Digital Elevation Model - DEM). El procesamiento realizado en los datos de entrada L1B es en realidad un procesamiento GEC con el uso del DEM para la proyección del mapa.

La segunda parte de esta sub-nomenclatura refiere a la disponibilidad como Balanced (\_B) o Unbalanced (\_U). El primer caso contiene por cada modo de adquisición del sensor los datos en formato complejo, las compensaciones, calibración interna, enfoque de datos y se aplica un procesamiento en términos de compensación y reescalado. Y el segundo caso proporciona, con un enfoque lo más conservador posible, la representación enfocada de la señal sin procesar que se repite en la escena observada; producto concebido como partida para una producción de mayor nivel de procesamiento. Productos en formato complejo, en rango inclinado y con proyección Doppler cero (Italian Space Agency, 2016).

Los sistemas de radar cuentan con tres modos de adquisición (figura 25). El primer caso corresponde al modo Stripmap, el más convencional, donde el apuntamiento de la antena es fijo obteniendo un mapeo continuo, de buena resolución y cobertura espacial. El segundo caso refiere al modo Spotlight donde la antena varía su direccionamiento a fin de apuntar a un lugar fijo, se trata de un mapeo discontinuo a fin de obtener un producto de alta resolución acotado a una pequeña cobertura. Por último, el modo ScanSAR consiste en cambios de dirección de antena, un escaneo de haz múltiple en elevación. Se trata de un mapeo continuo, de baja resolución, con una amplia cobertura y un procesamiento complejo (Lopez-Sanchez, 2014).

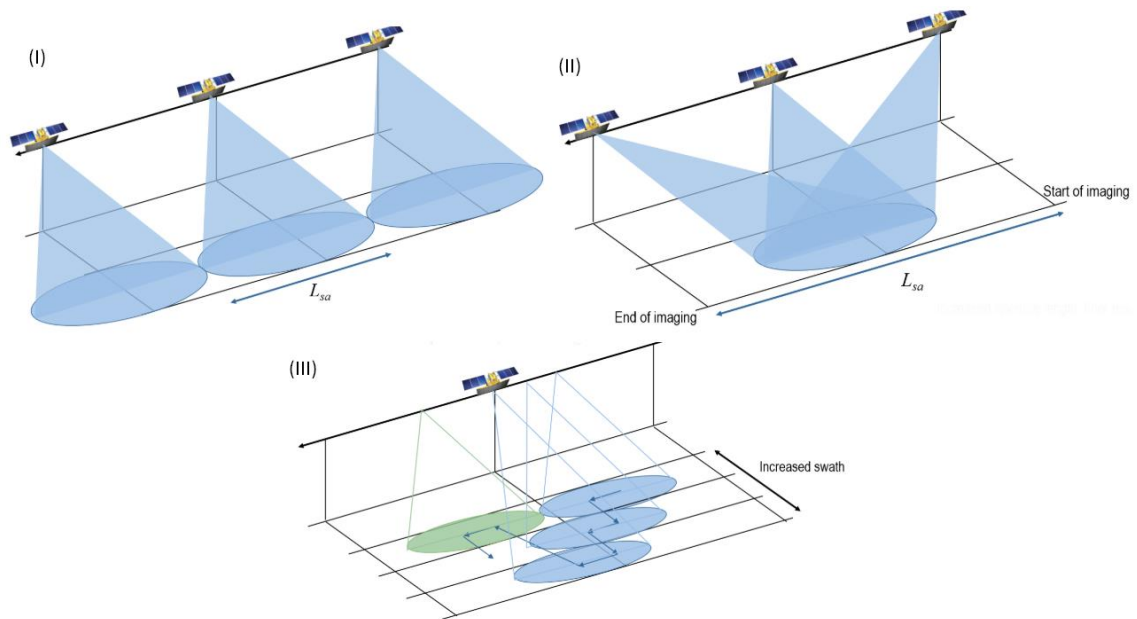


Figura 25. Modo de adquisición: (I) Stripmap; (II) Spotlight; (III) ScanSAR. Fuente: Lopez-Sanchez (2014)

COSMO-SkyMed posee cinco modos de adquisición. Puede ser Stripmap Himage (HI), Stripmap PingPong (PP), ScanSAR WideRegion (WR), ScanSAR HugeRegion (HR) y Spotlight 2<sup>14</sup> (S2). Las características correspondientes a cada modo se describen en la tabla 2 (Italian Space Agency, 2016).

Tabla 2. Características de los modos de adquisición COSMO-SkyMed según el nivel de procesamiento (Italian Space Agency, 2016).

Modo de adquisición	Nivel de procesamiento:	Nivel 1A (SCS)	Nivel 1B (DGM)	Nivel 1C (GEC)	Nivel 1D (GTC)
Spotlight-2	Resolución en rango (m)	1,1 ÷ 0,9	1	1	1
	Resolución en acimut (m)	0,91	1	1	1
	Ancho de faja (km)	10			
	Longitud de la escena (km)	10			
	Duración de la escena (seg)	7			
	Número de looks	-	1	1	1

<sup>14</sup> En el manual citado utiliza Spotlight 2 o Enhanced\_Spotlight indistintamente.

Modo de adquisición	Nivel de procesamiento:	Nivel 1A (SCS)	Nivel 1B (DGM)	Nivel 1C (GEC)	Nivel 1D (GTC)
STRIPMAP HIMAGE	Resolución en rango (m)	3 ÷ 2,6	5	5	5
	Resolución en acimut (m)	2,4 – 2,6	5	5	5
	Ancho de faja (km)	40			
	Longitud de la escena (km)	40			
	Duración de la escena (seg)	7			
	Número de looks	-	~ 3	~ 3	~ 3
STRIPMAP PING PONG	Resolución en rango (m)	11 ÷ 10	20	20	20
	Resolución en acimut (m)	9,7	20	20	20
	Ancho de faja (km)	30			
	Longitud de la escena (km)	30			
	Duración de la escena (seg)	6			
	Número de looks	-	~ 3	~ 3	~ 3
SCANSAR WIDE REGION	Resolución en rango (m)	13,5	30	30	30
	Resolución en acimut (m)	23,0	30	30	30
	Ancho de faja (km)	100 – 160			
	Longitud de la escena (km)	100			
	Duración de la escena (seg)	15			
	Número de looks	-	~ 4 - 9	~ 4 - 9	~ 4 - 9

Modo de adquisición	Nivel de procesamiento:	Nivel 1A (SCS)	Nivel 1B (DGM)	Nivel 1C (GEC)	Nivel 1D (GTC)
SCANSAR HUGE REGION	Resolución en rango (m)	13,5	100	100	100
	Resolución en acimut (m)	38,0	100	100	100
	Ancho de faja (km)	170 – 240			
	Longitud de la escena (km)	200			
	Duración de la escena (seg)	30			
	Número de looks	-	~ 25 - 66	~ 25 - 66	~ 25 - 66

El formato de nombre genérico de las imágenes generadas por esta misión responde a la siguiente nomenclatura (1) cuya descripción se detalla en la tabla 3.

(1) CSKS<i>\_<YYY\_Z>\_<MM>\_<SS>\_<PP>\_<s><o>\_<D><G>\_<YYYYMMDDhhmmss>\_<YYYYMMDDhhmmss>.h5

Tabla 3. Convención de nombre del archivo (Italian Space Agency, 2016).

Código de subcadena	Descripción	Valores permitidos
<i>	Identificación del número de satélite que adquirió la escena	1; 2; 3; 4
<YYY_Z>	Tipo de producto básico	RAW_B; SCS_B; SCS_U; DGM_B; GEC_B; GTC_B
<MM>	Modo del instrumento durante la adquisición	HI (Himage); PP (PingPong); WR(WideRegion); HR (HugeRegion); S2 (Spotlight 2)
<SS>	Identificación de franja (o combinación de subfranjas en el caso del modo ScanSAR) utilizada para la adquisición de los datos	[0A-0B-01-...-24] → HI [0A-0B-01-...-23] → PP [00-...-07] → WR [00-...-05] → HR [0A-...-0D-01-...-33] → S2

Código de subcadena	Descripción	Valores permitidos
<PP>	Polarización utilizada durante la adquisición	HH; VV; HV; VH; CO (HH/VV); CH (HH/HV); DV (VV/VH)
<s>	Identificador de dirección de observación	L (izquierda); R (derecha)
<o>	Identificación de la orientación de la órbita	A (ascendente); D (descendente)
<D>	Modo de entrega	F (entrega rápida); S (entrega estándar)
<G>	Estado de la disponibilidad selectiva durante el proceso de adquisición, afectado por los datos orbitales derivados de instrumentos GPS	N (activa); F (inactiva)
<YYYYMMD Dhhmmss>	Fecha y tiempo de inicio de detección redondeado al segundo entero más cercano	YYYY→año; MM→mes; DD→día hh→hora; mm→minuto; ss→segundo
<YYYYMMD Dhhmmss>	Fecha y tiempo de finalización de detección redondeado al segundo entero más cercano	YYYY→año; MM→mes; DD→día hh→hora; mm→minuto; ss→segundo

### 2.3. Sistemas de información geográfica

Según el National Centre of Geographic Information and Analysis (1990) de los Estados Unidos un Sistema de Información Geográfica (SIG) es “un sistema compuesto por hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión”.

Un SIG es una tecnología de integración de información que agrupa información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente (figura 26), permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, facilitando al profesional la posibilidad de relacionar los datos existentes a través de la topología de los objetos, con el fin de generar nueva información a partir de la realización de un análisis complejo utilizando una gama variada de geoprocusamientos (análisis, visualización, edición, etc.) (Miraglia *et al.*, 2010).

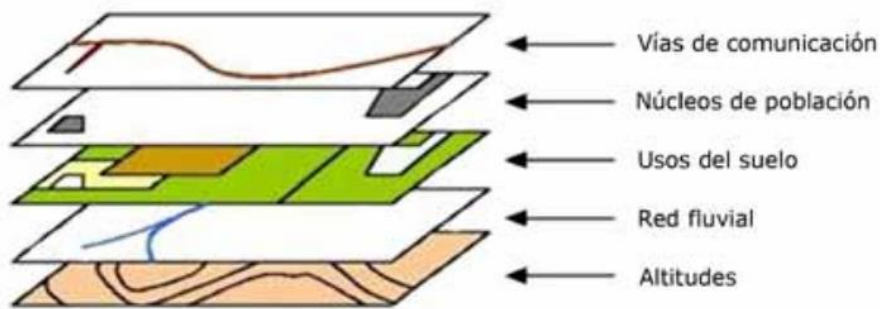


Figura 26. Capas temáticas. Fuente: Miraglia *et al.* (2010).

Se usan para cualquier aplicación cuyo objetivo sea gestionar información georreferenciada referida a elementos y/o fenómenos que tienen lugar sobre la superficie terrestre. Funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos, tales como nombres, direcciones, etc.) asociada a objetos gráficos que componen un mapa digital, donde seleccionando un objeto se pueden conocer sus atributos e, inversamente, seleccionando un registro de la base de datos permite conocer su localización espacial (Miraglia *et al.*, 2010). Teniendo en cuenta las capacidades de esta herramienta, será de utilidad para el procesamiento y análisis de los datos y productos intervinientes en el presente trabajo.

### 2.3.1. Modelo de representación de los Sistemas de Información Geográfica

Existen diversas formas de modelizar las relaciones entre los objetos geográficos o topología<sup>15</sup>. El abordaje de la información geográfica se basa en tres modelos de representación: el discreto o ráster, el continuo o vectorial y el orientado a objetos. Cada modelo tiene sus especificidades, que serán detalladas a continuación. Sin embargo, en la actualidad, los dos primeros son los más utilizados (figura 27) (Miraglia *et al.*, 2010).

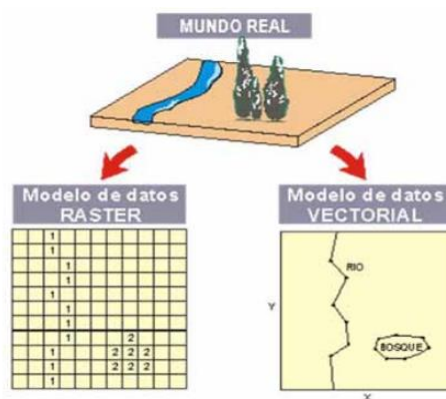


Figura 27. Modelo ráster y vectorial. Fuente: Miraglia *et al.* (2010).

<sup>15</sup> Topología: elemento particular del modelo de representación vectorial a partir del cual mediante un método matemático-lógico se establecen relaciones (al lado de, debajo de, detrás de, etc). A nivel geográfico las relaciones entre los objetos son muy complejas, pues son muchos los elementos que interactúan sobre cada aspecto de la realidad. La topología de un SIG reduce sus funciones a cuestiones mucho más sencillas, como por ejemplo saber qué agrupación de líneas forman una determinada ruta, o bien, si una ciudad está dentro de una determinada provincia en un determinado mapa, no existe forma de distorsionarla para lograr que dicha ciudad se encuentre fuera de tal (Miraglia *et al.*, 2010; Olaya, 2014).

El modelo de SIG ráster o de retícula se centra en las propiedades del espacio, más que en la precisión de la localización siendo el más apropiado cuando se deben describir objetos geográficos con límites difusos, por tal motivo es considerado el más apto para el análisis espacial y para el ingreso de datos a un SIG de imágenes satelitales. Divide el espacio en celdas regulares o píxeles donde cada una de ellas representa una unidad de información, un único valor. Consiste en un cuadrículado de celdas contiguas de igual superficie donde cada una de las cuales contiene información sobre la porción del espacio geográfico referida a ella y puede mostrar el rasgo dominante que se encuentra en esa unidad, o la distribución porcentual de todos los atributos que se encuentran en la misma celda. El conjunto de celdas constituye una matriz numérica que puede transformarse en colores o grafismos para su representación (figura 28). Cuanto mayor sean las dimensiones de las celdas (resolución), menor es la precisión o detalle en la representación del espacio geográfico (Miraglia *et al.*, 2010).

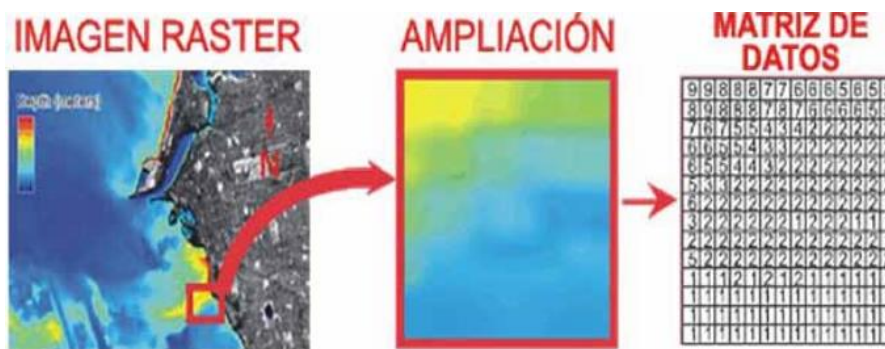


Figura 28. Organización de la información en el modelo de datos ráster. Fuente: Miraglia *et al.* (2010).

En el caso del modelo de SIG vectorial, el interés de las representaciones se centra en la precisión de localización de los elementos sobre el espacio. Este modelo se utiliza para la descripción de los objetos geográficos que se basan en vectores definidos por pares de coordenadas relativas a algún sistema geográfico, que ocupan un espacio continuo. Es decir que, refieren toda la información como puntos (datos puntuales), líneas (lineales) o polígonos (datos areales) y asignan un conjunto único de coordenadas XY a cada objeto (Miraglia *et al.*, 2010).

Los SIG vectoriales son más populares en el mercado. No obstante, los SIG ráster son muy utilizados en estudios medioambientales (contaminación atmosférica, distribución de temperaturas, localización de especies marinas, análisis geológicos, etc.) (Miraglia *et al.*, 2010).

Por último, el modelo orientado a objetos se basa en la descomposición del espacio geográfico en unidades elementales denominadas objetos que contienen información de atributos y comportamiento. Plantean un cambio en la concepción de la estructura de las bases de datos geográficas ya que organizan la información geográfica a partir del propio objeto geográfico y sus relaciones con otros. La ventaja fundamental que presenta este modelo es la dinamicidad de los datos. Es decir, a partir de una serie de parámetros establecidos en el comportamiento de los objetos geográficos, se puede simular su evolución futura, lo que constituye un gran avance si se trabaja en entornos en los que se requiere simulación de situaciones potenciales (Miraglia *et al.*, 2010).

### 3. Metodología de trabajo

#### 3.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a la ciudad de Rosario, ubicada en la zona sur de la provincia de Santa Fe, República Argentina, entre 32° 52' 18" y 33° 02' 22" latitud Sur y entre 60° 36' 44" y 60° 47' 46" longitud Oeste. Su altitud sobre el nivel del mar oscila entre los 22,5 y 24,6 metros. El distrito posee una superficie total de 178,69 km<sup>2</sup>, de la cual el 67,36% está urbanizada. Limita al este con el Río Paraná y con las localidades de: Soldini, Piñeiro y Villa Gobernador Gálvez al sur, Funes y Pérez al oeste, y Granadero Baigorria e Ibarlucea al norte (Municipalidad de Rosario, 2018).

#### 3.2. Materiales

En el presente trabajo se utilizaron datos ráster y vectoriales cuya caracterización y especificaciones técnicas se describen a continuación.

- Imágenes COSMO-SkyMed<sup>16</sup> (figura 29):
  - a) CSKS2\_SCS\_B\_HI\_04\_HH\_RA\_SF\_20130619102933\_20130619102940\_hh\_slc
  - b) CSKS2\_SCS\_B\_HI\_04\_HH\_RA\_SF\_20130627102929\_20130627102938\_hh\_slc

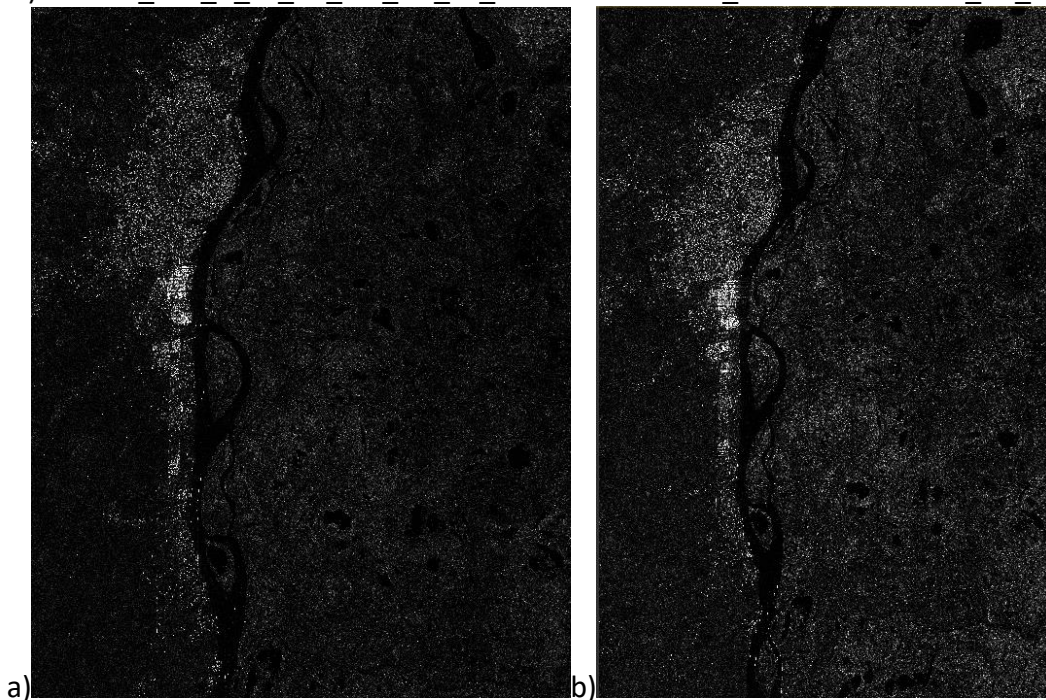


Figura 29. Imágenes COSMO-SkyMed correspondientes a las fechas: a) 19 de junio de 2013; b) 27 de junio de 2013.

---

<sup>16</sup> Provistas en el marco del Anuncio de Oportunidad AO-SAOCOM Proyecto N° 4 "Clasificación del Uso y Cobertura del suelo urbano de las Ciudades de Rosario, Gran Rosario, San Juan y Gran San Juan. - Argentina, utilizando polarizaciones y bandas de plataformas SARAT/SAOCOM, Radarsat-2, COSMO-SkyMed y PALSAR."

Tabla 4. Caracterización de las imágenes utilizadas

Característica	Valor
Numeración del satélite	2
Tipo de producto básico	Single-look Complex Slant Balanced (SCS_B)
Modo del instrumento durante la adquisición	Stripmap Himage
Polarización utilizada durante la adquisición	horizontal-horizontal (HH)
Dirección de observación	R (derecha)
Orientación orbital	A (ascendente)
Modo de entrega	S (estándar)
Estado de la disponibilidad selectiva durante el proceso de adquisición	F (inactivo)
Fecha de adquisición de las imágenes	19 y 27 de junio de 2013
Resolución espacial	3 metros

- Producto GUF: máscara blanco y negro que refleja la presencia de asentamientos urbanos sobre planeta. Producto científico, otorgado previa solicitud de la DLR. GUF cuenta con resolución de 12 metros, con valores 0/255 correspondientes a ausencia/presencia de la huella urbana (referenciados en tonos de negro/blanco), marco de referencia WGS84 y se halla en formato GeoTIFF<sup>17</sup>.
- Fotomosaico del distrito Rosario producto del vuelo fotogramétrico del IGN del año 2013, disponible en la Infraestructura de Datos Espaciales de la Municipalidad de Rosario (IDERosario). Accesible a través del servicio WMS<sup>18</sup>.
- Tres bases cartográficas:

<sup>17</sup> Formato GeoTIFF: estándar de metadatos de dominio público que permite que información georreferenciada sea encajada en un archivo de imagen de formato TIFF.

<sup>18</sup> URL del servicio WMS: [www.rosario.gob.ar/wms/planobase?](http://www.rosario.gob.ar/wms/planobase?)

- Límites del distrito Rosario, archivo vectorial en formato Geography Markup Language (GML)<sup>19</sup>. Disponible en Datos Abiertos de la Municipalidad de Rosario (RosarioDatos).
- Manzanas, archivo vectorial en formato GML. Disponible en Datos Abiertos de la Municipalidad de Rosario (RosarioDatos).
- Parcelas: veintiún archivos vectoriales en formato GML correspondientes a las secciones catastrales de la ciudad de Rosario. Disponible en Datos Abiertos de la Municipalidad de Rosario (RosarioDatos).

### 3.3. Método

Inicialmente la metodología utilizada para la identificación de la huella urbana se remite a la propuesta educativa de la EO-Collage<sup>20</sup>, modificada y adaptada en función de las imágenes utilizadas, el software y el producto buscado teniendo en cuenta las características constructivas del área en cuestión. A continuación, se describen los pasos del método a utilizar para la obtención de la huella urbana.

Obtenido tal producto se procede a un proceso de validación. El procesamiento se lleva a cabo en un software libre utilizado para el tratamiento de información geográfica a fin de realizar una relación tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo concluyendo en un análisis estadístico descriptivo. Estos programas son conocidos como Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El primer proceso de validación consiste en comparar la máscara obtenida en relación con el producto GUF partiendo de la cuantificación y relación de la superficie identificada por cada huella, estableciendo como unidad de análisis espacial a la capa manzanas completas, que se obtiene adicionando a la capa de manzanas el complemento entre la capa de parcelas y la misma.

En segundo lugar, el estudio se remite a la digitalización de construcciones en función de una selección de sitios testigos en base a un análisis exploratorio. Tal digitalización permite calcular la superficie edificada en planta para su posterior relación con la superficie edificada según la máscara obtenida y GUF, cuantificando a estas últimas dentro de los límites de la unidad de análisis espacial correspondiente. Desde este punto de vista, se analiza la concordancia del resultado obtenido en relación a la realidad en el terreno.

Para el procesamiento de las imágenes de radar se utiliza ENVI Classic versión 5.1<sup>21</sup>. Para llevar a cabo este trabajo se utiliza un módulo llamado SARscape. En

---

<sup>19</sup> Formato Geography Markup Language (GML): sublenguaje de XML descrito como una gramática en XML Schema para el modelaje, transporte y almacenamiento de información geográfica.

<sup>20</sup> Curso Echoes in Space. EO-College. European Space Agency. Metodología para el mapeo de la huella urbana con datos Sentinel-1 .

<sup>21</sup> ENVI Classic versión 5.1: software que permite visualizar, analizar y presentar todos los tipos de imágenes digitales. Incluye herramientas espectrales, correcciones geométricas, análisis de terreno, análisis radar, capacidades GIS raster y vectoriales, extenso soporte de imágenes de una amplia variedad de fuentes, y mucho más.

consecuencia, se aplican diferentes técnicas de procesamiento para los distintos modos (interferométrico y polarimétrico).

Tanto el análisis cualitativo como cuantitativo se realizó con el software libre (QGIS)<sup>22</sup> versión 3.4.8. Esta aplicación permite interactuar entre distintas capas y realizar una serie de operaciones a fin de lograr el análisis planeado con su correspondiente representación cartográfica.

### 3.3.1. *Procesamiento de imágenes radar*

El procesamiento comienza con la importación de imágenes COSMO-SkyMed. El primer paso consiste en calibrar y georreferenciar las imágenes a las que luego se les aplica un proceso de reducción de speckle o moteado. Posteriormente se realiza un cálculo de coherencia entre las imágenes intervinientes y se agrupan espacialmente a fin de garantizar las dimensiones y coincidencia de píxeles. Los tres productos obtenidos se ajustan en (x,y), y se procede a depurar aquellos datos no válidos como pueden ser píxeles sin dato o con alguna anomalía. Para concluir con el procesamiento, se realiza un análisis textural por matriz de ocurrencia y por último se obtiene la máscara de la huella urbana.

#### 3.3.1.1. *Georreferenciación y calibración*

El primer paso consiste en georreferenciar (GEO), proceso que dota a cada píxel de una coordenada en un sistema de referencia seleccionado. En el presente trabajo se selecciona el sistema de proyección UTM Zona 20 Sur y marco de referencia WGS84, con un tamaño de píxel de 3 metros, y como método de resampleo una convolución cúbica de 4º orden. Luego, se procede a calibrar radiométricamente (CAL) a los fines de obtener un producto codificado a un parámetro físico, valores de retrodispersión (backscattering) en este caso, conocido técnicamente como Sigma Nought ( $\sigma^0$ ). Además, el área de dispersión se calcula considerando el ángulo de incidencia local, en función de que no se requieren datos precisos de topografía dadas las características del área de estudio (zona de llanura). Por último, se selecciona una salida adicional del resultado en decibeles.

A tales fines en ENVI se utiliza el comando *geocoding and radiometric calibration* (Anexo 1: figura 2) y se obtienen los productos:

CSKS2\_20130619\_GEO\_CALdB

CSKS2\_20130627\_GEO\_CALdB

#### 3.3.1.2. *Reducción de speckle*

En la etapa de reducción de speckle se busca suavizar el efecto debido al proceso de captura de los datos; a tales fines se aplica el filtro Frost (FRT), que se trata de un filtro de promedios adaptable y ponderado exponencialmente basado en el coeficiente de variación (relación entre la desviación estándar local y la media local de la imagen degradada). Como resultado se reemplaza el píxel de interés con una suma ponderada

---

<sup>22</sup> Quantum GIS o QGIS: software de código libre para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS y Microsoft, Windows. Permite manejar formatos ráster y vectoriales así como bases de datos.

de los valores dentro del núcleo en movimiento de  $n \times n$ . Los factores de ponderación disminuyen con la distancia del píxel de interés (Moya Lozano, 2019).

El filtro Frost responde a la siguiente ecuación (Jaybhay and Shastri, 2015):

$$DN = \sum_{n \times n} K \alpha e^{-\alpha |t|}$$

donde,  $\alpha = \left(\frac{a}{n\sigma^2}\right) \left(\frac{\sigma_l^2}{l^2}\right)$

$K$ : constante normalizada

$l$ : promedio local

$\sigma_l$ : varianza local en la ventana

$\sigma$ : varianza del coeficiente de variación

$|t| = |X - X_0| + |Y - Y_0|$

$n$ : tamaño del kernel de movimiento

Para este proceso se define un tamaño de píxel en rango y azimut de 3 metros y el número equivalente de looks que es la cantidad de valores de intensidad independientes promediados por píxel durante el proceso de multi-looking. A tales fines en ENVI se utiliza el comando *filtering single image* (Anexo 1: figuras 3 y 4) y se obtienen los productos:

CSKS2\_20130619\_GEO\_CALdB\_FRT

CSKS2\_20130627\_GEO\_CALdB\_FRT

### 3.3.1.3. Cálculo de coherencia

En la presente sección se procede al cálculo de la coherencia (COH) entre dos imágenes en modo SLC, que permite obtener un valor para cada píxel que está en función de su relación, indicando cuán similares son los valores de cada par de píxeles homólogos; toma valores de similitud entre 0 (mínima) y 1 (máxima). Este resultado es una de las medidas más importantes a considerar para una aplicación interferométrica.

Según Seppi (2016) las técnicas InSAR funcionan solo bajo condiciones coherentes; esto es, cuando las señales recibidas están correlacionadas entre ambas adquisiciones SAR. Este cálculo responde a la ecuación (López-Martínez y Pottier, 2007):

$$|\rho_{MLT}| = \frac{|\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S_1(m, n) S_2^*(m, n)|}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |S_1(m, n)|^2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |S_2(m, n)|^2}}$$

donde,

$S_1$  y  $S_2$ : funciones de densidad de probabilidad gaussianas en formato complejo y  $S_2^*$  refiere al conjugado.

$m$  y  $n$ : dimensiones de la imagen

$M$  y  $N$ : cantidad de píxeles promediados en cada dimensión

$|\rho_{MLT}|$ : estimador de coherencia multilook

En este procedimiento se selecciona una imagen maestra de referencia (master) correspondiente a la de fecha más temprana, y otra como esclava (slave), de fecha más reciente. A tales fines, se utiliza una ventana de dimensión 2x2 (acimut y rango). Como resultado de este procedimiento se obtiene un único archivo y de manera automática

se ejecuta la corregestración, donde en base a coordenadas y puntos comunes se garantiza la coincidencia geográfica entre las imágenes.

A tales fines en ENVI se utiliza el comando *coherence* (Anexo 1: figura 5).

Por último, el producto de coherencia se georreferencia (GEO) (Anexo 1: figura 6) y se obtiene el producto:

CSKS2\_20130619-20130627\_COH\_GEO

#### 3.3.1.4. Agrupamiento espacial de los resultados parciales

El cuarto procedimiento por aplicar consiste en garantizar las dimensiones y coincidencia de píxeles entre las tres imágenes intervinientes; para ello se realiza un recorte (subset) de las imágenes limitándose al área de estudio, optando por la opción *exclusive* que habilita a considerar píxeles con valores válidos en todas las imágenes. A tales fines en ENVI se utiliza el comando *layer stacking* (Anexo 1: figuras 7, 8 y 9).

#### 3.3.1.5. Ajuste en x, y

Dado a que el producto generado en el punto anterior posee una georreferenciación basada en los parámetros orbitales de la plataforma satelital, se realiza una georreferenciación de ajuste (GCP) en función del archivo vectorial ejes de calles. Para llevar a cabo este procedimiento se tomaron puntos de referencia considerando una distribución homogénea de puntos en los límites y dentro del distrito Rosario, sistema de proyección UTM Zona 20 Sur. La cantidad de puntos tomados fueron suficientes para que el error medio cuadrático sea menor que 1, es decir, que el error cometido no exceda la unidad de trabajo (pixel = 3m), utilizando como método de interpolación un polinomio de grado 3 y como método de resamplio el vecino más cercano. En ENVI se utiliza el comando *Warp File* (Anexo 1: figuras 10, 11, 12, 13 y tabla 1; Anexo 2: tablas 1 y 2) y se obtienen los productos:

CSKS2\_20130619\_GEO\_CALdB\_FRT\_GCP

CSKS2\_20130627\_GEO\_CALdB\_FRT\_GCP

CSKS2\_20130619-20130627\_COH\_GEO\_GCP

#### 3.3.1.6. Depuración de datos

En la presente sección se manipulan matemáticamente las imágenes a fin de reemplazar aquellos píxeles que son identificados con la codificación NaN (not a number) por un valor numérico (-9999). A continuación, se procede a estimar el valor en estos píxeles en función de los valores en los píxeles vecinos (FIL). A tales fines en ENVI se utilizan los comandos *Band Math* y *Replace bad values* respectivamente (Anexo 1: figuras 14 y 15). Como resultado se obtienen los productos:

CSKS2\_20130619\_GEO\_CALdB\_FRT\_GCP\_FIL

CSKS2\_20130627\_GEO\_CALdB\_FRT\_GCP\_FIL

#### 3.3.1.7. Análisis textural por matriz de ocurrencia

El procedimiento en cuestión refiere a las métricas de primer orden que operan en los recuentos u ocurrencias de los diferentes valores de números digitales dentro de un kernel. Este filtro permite realizar los cálculos en función del rango de datos, varianza,

entropía, asimetría y media, siendo este último el producto de interés. Esta operación es esencialmente de suavizado y responde a la siguiente ecuación:

$$\text{Media } (M) = \sum_{i=0}^{N_g-1} i P(i),$$

donde,

$N_g$ : número de niveles de gris distintos en la imagen cuantizada

$P(i)$ : probabilidad de cada valor de píxel.

A tales fines en ENVI se utiliza el comando *Occurrence Measure* (Anexo 1: figura 18). Los resultados que se consideran son los productos:

CSKS2\_20130619\_GEO\_CALdB\_FRT\_GCP\_FIL\_MED

CSKS2\_20130627\_GEO\_CALdB\_FRT\_GCP\_FIL\_MED

A los fines de obtener una composición RGB se plantea la obtención de un producto correspondiente al promedio y otro a la diferencia (Anexo 1: figura 16 y 17; Anexo 2: figura 1). Como resultado se obtienen los productos:

CSKS2\_20130619-20130627\_GEO\_CALdB\_FRT\_GCP\_FIL\_MED\_PROM

CSKS2\_20130619-20130627\_GEO\_CALdB\_FRT\_GCP\_FIL\_MED\_DIF

### 3.3.1.8. Cálculo de Huella Urbana

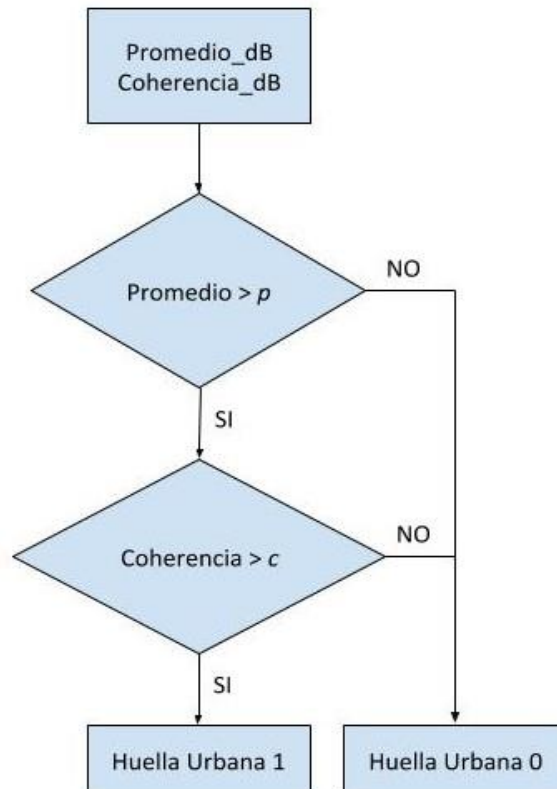
Se procede a la obtención de la huella urbana para lo cual se utiliza el siguiente algoritmo:

Si Promedio\_dB > p y Coherencia\_dB > c entonces 1 si no 0,

donde,

Promedio\_dB = CSKS2\_20130619-20130627\_GEO\_CALdB\_FRT\_GCP\_FIL\_MED\_PROM

Coherencia\_dB = CSKS2\_20130619-20130627\_COH\_GEO\_GCP



Donde,  $p$  y  $c$  son valores umbrales que han sido modificados respecto a los sugeridos por la metodología tomada de referencia a fin de obtener un resultado adaptado a las características de la huella urbana de la ciudad de Rosario. Este concepto se plantea en función de considerar variaciones que puedan incidir en la señal retrodispersada por los asentamientos europeos (donde fue aplicada inicialmente esta metodología) y las edificaciones de nuestra área de estudio.

Teniendo en cuenta que el algoritmo planteado se basa en dos valores umbrales, cuyo valor se puede obtener realizando un estudio exploratorio de los valores de las celdas en lugares reconocibles a fin de identificarlos y definir los umbrales representativo sobre las imágenes de coherencia y promedio respectivamente. A tales fines en ENVI se utiliza el comando *Edit Density Slice*. Como resultado de este análisis, se definió  $p = -15$  y  $c = 0,5$ . Como resultado se obtiene el producto:

HU\_Pp\_Cc

### 3.3.2. Procedimiento de validación

Este procedimiento consta de dos etapas a realizar en QGIS. La primera, referente al análisis de la huella urbana obtenida en relación al producto GUF partiendo de la cuantificación y relación de la superficie detectada por cada producto, estableciendo una unidad de análisis espacial (Manzanas\_completas). Para ello, se aplica un índice que permite cuantificar la semejanza entre el producto obtenido y GUF. Los valores obtenidos a partir de su aplicación oscilan entre  $[-1; 1]$  según el grado de semejanza en la identificación.

La segunda etapa de validación, se realiza un análisis exploratorio que consiste en relacionar las superficies considerando la huella urbana obtenida, GUF y lo edificado en planta (basado en la digitalización a partir del fotomosaico 2013 Infomapa IDERosario), en base a una selección de sitios testigos. En principio se considera la ubicación de estos lugares a fin de hacer un análisis en función de distintas características constructivas en el área de estudio. Luego se plantea considerar tanto lugares donde no existe edificación alguna (la identificación debería ser nula, ejemplo: plazas, parques) como donde sí las hay.

#### 3.3.2.1. Procesamiento en un sistema de información geográfica

Esta etapa de procesamiento comienza con la creación de un nuevo proyecto en un sistema de información geográfica donde se añaden las capas manzanas, parcelas, límites del distrito Rosario, producto GUF y la huella urbana obtenida (HU\_P-15\_C05); sistema de referencia de coordenadas POSGAR<sup>23</sup> 94 faja 5.

Las capas Manzanas y Parcelas de las veintiún secciones catastrales de la ciudad de Rosario se combinan para obtener Manzanas\_completas (manzana); se define como unidad de análisis espacial a cada polígono de dicha capa. En esta etapa, previamente

---

<sup>23</sup> POSGAR: Posiciones Geodésicas Argentinas. POSGAR 94 es una red de puntos que se obtiene como resultado de un proyecto que surge ante la necesidad de disponer de un marco de referencia básico compatible con las precisiones de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS).

se excluyen en las veintidós capas parcelas aquellos polígonos que tienen definido la manzana. En este proceso en QGIS se utilizaron los comandos *unión* y *filtro*.

A fin de trabajar con máscaras cuya ‘resolución espacial’ sea igual, se realiza un cambio de resolución espacial al producto GUF, donde se pasa de 12 a 3 metros. A tales fines en QGIS se utiliza el comando *r.resample* (Anexo 3: figura 1).

El proceso continúa con el recorte de los datos ráster a los límites del área de estudio (distrito Rosario), conservando la resolución de origen. A tales fines en QGIS se utiliza el comando *cortar ráster por capa de máscara* (Anexo 3: figura 2).

A partir de aquí comienza la etapa de obtención de datos cuantitativos de las máscaras intervinientes. Se realiza un conteo de los píxeles que tienen valor 1 (presencia de huella urbana) en cada unidad de análisis espacial y a este resultado se lo multiplica por su respectiva superficie (9m<sup>2</sup>) obteniéndose la superficie urbanizada. A tales fines en QGIS se utilizaron los comandos *estadísticas de zona* y *calculadora de campos* (Anexo 3: figura 3 y 4).

### 3.3.2.2. Relación entre GUF y huella urbana

Para obtener un parámetro de la relación que existe entre la superficie GUF ( $Sup_{GUF}$ ) y la máscara HU\_Pp\_Cc ( $Sup_{HU\_Pp\_Cc}$ ) se plantea el cálculo de un índice que responde a:

$$\begin{array}{l}
 \text{Relación} \\
 \text{Sup}_{GUF} \\
 \text{y} \\
 \text{Sup}_{HU\_Pp\_Cc}
 \end{array}
 \left\{
 \begin{array}{l}
 \frac{Sup_{GUF} - Sup_{HU\_Pp\_Cc}}{Sup_{GUF}}, Sup_{GUF} > Sup_{HU\_Pp\_Cc} \text{ y } Sup_{GUF} \neq 0 \\
 \frac{Sup_{GUF} - Sup_{HU\_Pp\_Cc}}{Sup_{HU\_Pp\_Cc}}, Sup_{GUF} < Sup_{HU\_Pp\_Cc} \text{ y } Sup_{HU\_Pp\_Cc} \neq 0 \\
 0, Sup_{GUF} = 0 \text{ y } Sup_{HU\_Pp\_Cc} = 0 \\
 0, Sup_{GUF} > 0 \text{ y } Sup_{HU\_Pp\_Cc} > 0 \text{ y } Sup_{GUF} = Sup_{HU\_Pp\_Cc}
 \end{array}
 \right.$$

Éste índice toma valores entre [-1;1]. A tales fines en QGIS se utiliza el comando *calculadora de campos* (Anexo 3: figura 5).

### 3.3.2.3. Relación entre la digitalización del área edificada, GUF y huella urbana

Este procedimiento comienza con la digitalización de la superficie edificada en planta a partir del fotomosaico del distrito Rosario producto del vuelo fotogramétrico del IGN del año 2013. A este producto se accede a través del servicio WMS de la IDERosario (Anexo 3: figura 6). Para ello se crea una nueva capa vectorial, tipo polígono, cuyo nombre es *Edificado*; en la tabla de atributos se definen las variables ID, nombre del lugar y área. La digitalización del área edificada en planta se realiza teniendo en cuenta el desplazamiento por perspectiva, las sombras que se manifiesten en la imagen (figura 30) a fin de atenuar el desplazamiento propio de la imagen y aleros que alteren las dimensiones de lo construido en planta. A tales fines en QGIS se utiliza el comando *añadir polígono*.



Figura 30. Visualización del desplazamiento por perspectiva, Influencia de las sombras y su utilidad para definir la superficie edificada en planta.

A los fines de esta etapa se seleccionan catorce sitios testigos (figura 31). Las edificaciones que se digitalizan son construcciones cuyo uso responden a: iglesia, supermercado, fábrica, escuela, institución gubernamental, centro comercial, estación ferroviaria, vivienda, edificio y museo. Por otra parte, también se eligieron espacios recreativos (plazas).

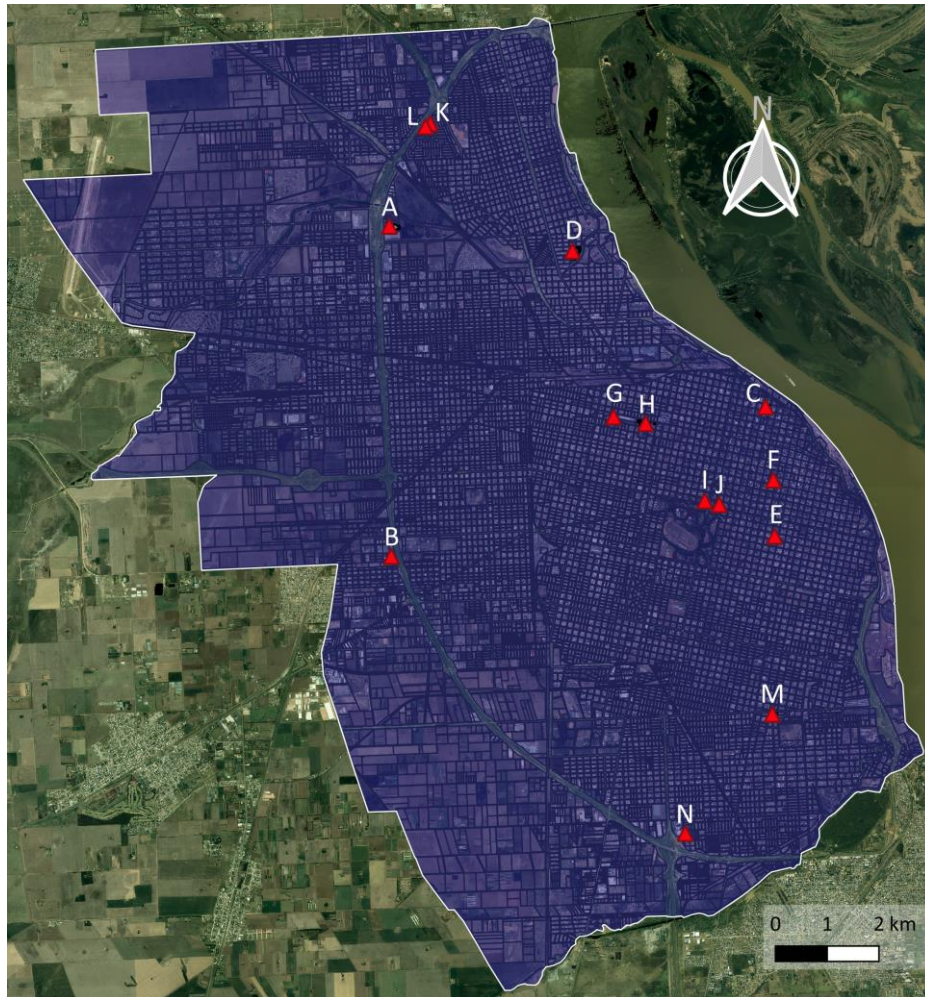


Figura 31. Sitios testigos seleccionados. A) Supermercado Micropack ; B) Fabaher S.A.; C) Escuela Técnica N°7; D) Portal Rosario Shopping; E) Plaza Libertad; F) Escuela Normal Superior N°1 "Dr. Nicolás Avellaneda" ; G) Plaza Mariano Moreno; H) Mercado del Patio - McDonald's ; I) Museo Municipal de Bellas Artes Juan B. Castagnino ; J) Tribunales Provinciales de Rosario; K) Parroquia Natividad del Señor; L) Monoblock Barrio Rucci; M) Centro Municipal de Distrito Sur Rosa Ziperovich; N) Manzana.

A partir de la digitalización se calcula el área edificada en planta y se la relaciona con la superficie identificada por la huella urbana y por GUF en la manzana. Los resultados se presentan en figuras y una tabla resumen.

## 4. Resultados

### 4.1. Huella urbana

El resultado obtenido es una máscara binaria donde los píxeles celestes (originariamente blancos) corresponden al área edificada y los blancos (originariamente negros) representan la ausencia de construcciones (figura 32) (cambio de colores que se realiza a los fines de apreciación visual). Este producto se ha ajustado en x, y con un error medio cuadrático total de 0,59.

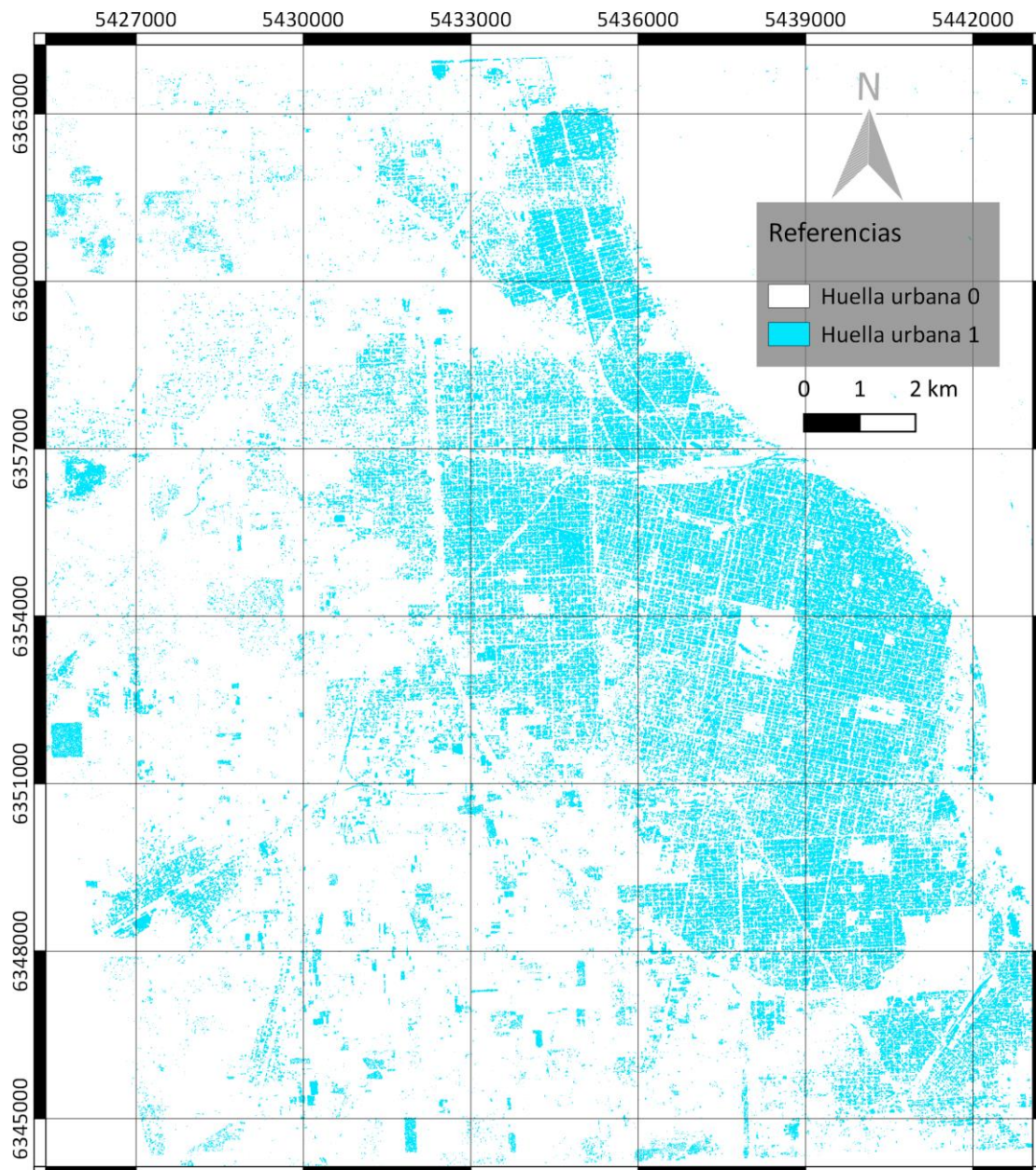


Figura 32. Huella urbana  $p = -15$  y  $c = 0,5$ .

#### 4.2. Relación entre GUF y la huella urbana

A continuación, se exponen las huellas urbanas intervinientes, recortadas y superpuestas al área de estudio (figura 33).

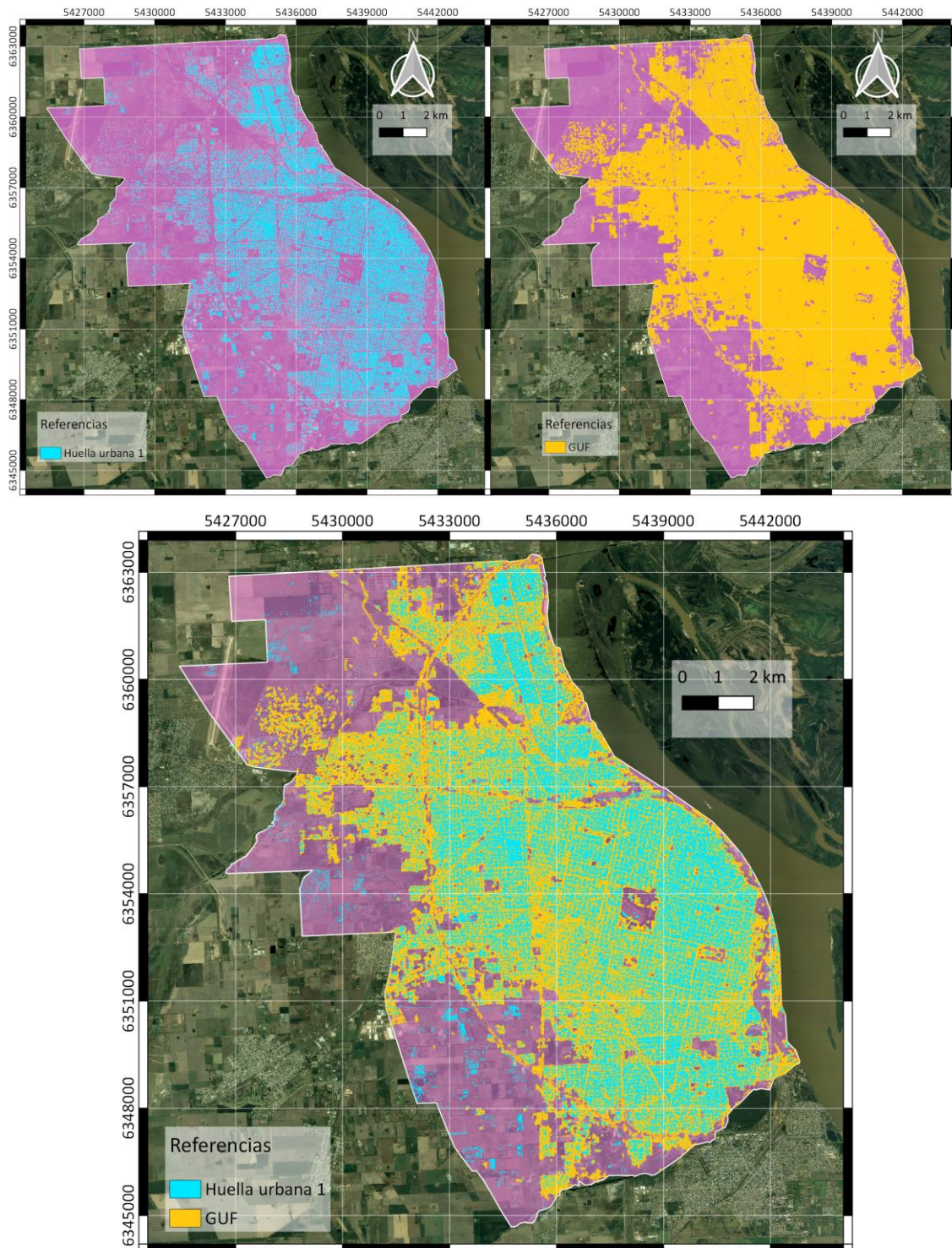


Figura 33. Máscaras recortadas al área de estudio. El primer caso es el Huella urbana obtenida HU; el segundo representa el producto GUF; y, en tercer lugar, se muestra la superposición del producto GUF y HU.

Remitiendo al algoritmo utilizado para la definición del índice, los tonos rojos (valores negativos) refieren a los polígonos donde HU identifica mayor superficie que GUF, mientras que los tonos verdes (valores positivos) refieren al caso contrario. En blanco se identifican los polígonos donde la identificación es similar o igual (figura 34).

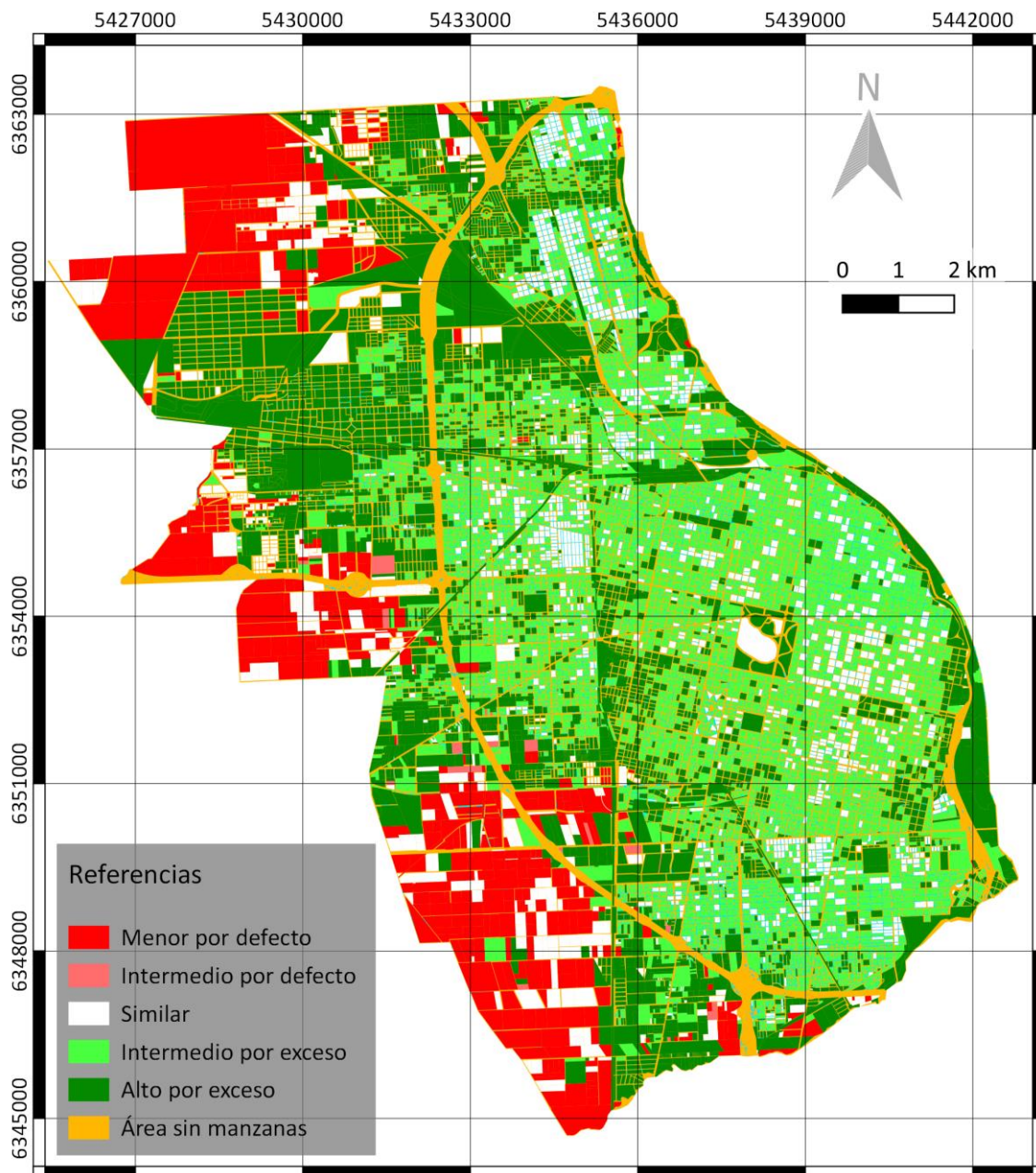


Figura 34. Relación entre lo identificado por GUF y HU.

#### 4.3. Relación entre la digitalización del área edificada, GUF y huella urbana.

A continuación, se presenta cada uno de los sitios testigos seleccionados, con su correspondiente digitalización según corresponda, y una breve descripción de lo que se visualiza en cada figura.

En la figura 35 el área testigo responde al tipo supermercado donde se observó que la digitalización del área edificada se encontraba completamente incluida dentro del polígono de la manzana. En lo que respecta al área identificada por GUF no se ajustó

a lo edificado en sí, sino que manifestó una cierta aleatoriedad en la detección cubriendo parte del área circundante que responde a superficie impermeable. Mientras tanto HU reflejó un cierto desplazamiento hacia el sur-oeste de la edificación más sobresaliente, detección que se ajustó a su silueta.

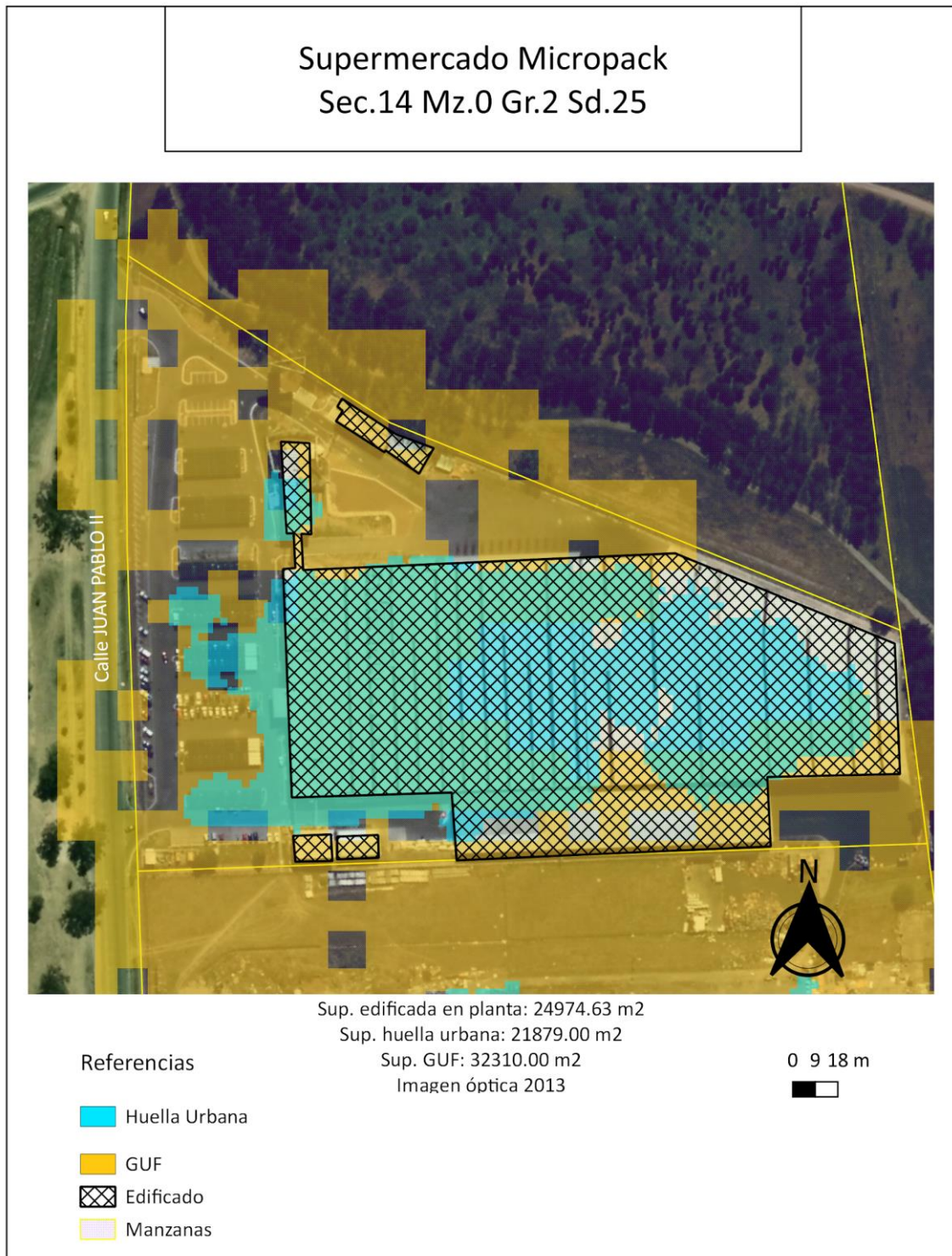


Figura 35. Sitio testigo A, tipo supermercado, ubicado con frente a calle Juan Pablo II.

El segundo sitio testigo digitalizado (figura 36), tipo fábrica, estaba totalmente incluido en el polígono de la manzana. En tanto que lo que respecta al área identificada

por GUF cubrió la totalidad de lo edificado, incluso por exceso hacia el este y nor-oeste de el incluyendo gran parte del espacio verde circundante. En cuanto a HU detectó de forma 'segmentada' en tres bloques con cierto desplazamiento hacia el sur-oeste.

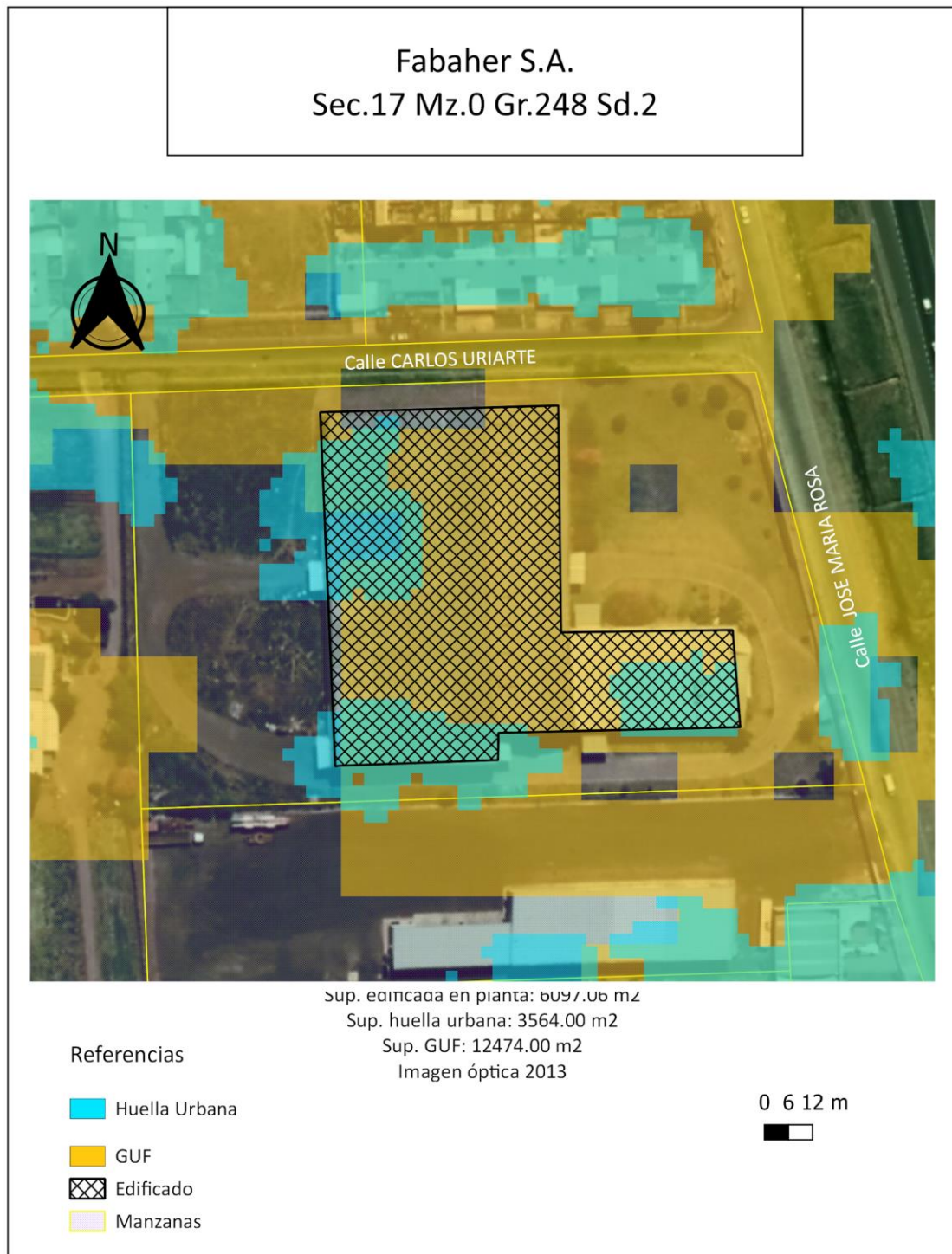


Figura 36. Sitio testigo B, tipo fábrica, ubicado en la esquina sur-oeste de la intersección de las calles Carlos Uriarte y José María Rosa.

En la figura 37 el área testigo responde al tipo escuela donde se observó que la digitalización del área edificada se encontraba en su totalidad incluida dentro del polígono de la manzana, con mínimos excesos parciales en su lados nor-este, sur-este y

sur-oeste. En lo que respecta al área identificada por GUF, cubrió la totalidad de la unidad de estudio, tanto lo edificado como los patios impermeables. En cuanto a la HU, no identificó toda el área digitalizada, pues la construcción sur-este no se detectó y se visualizó un desplazamiento hacia el sur.

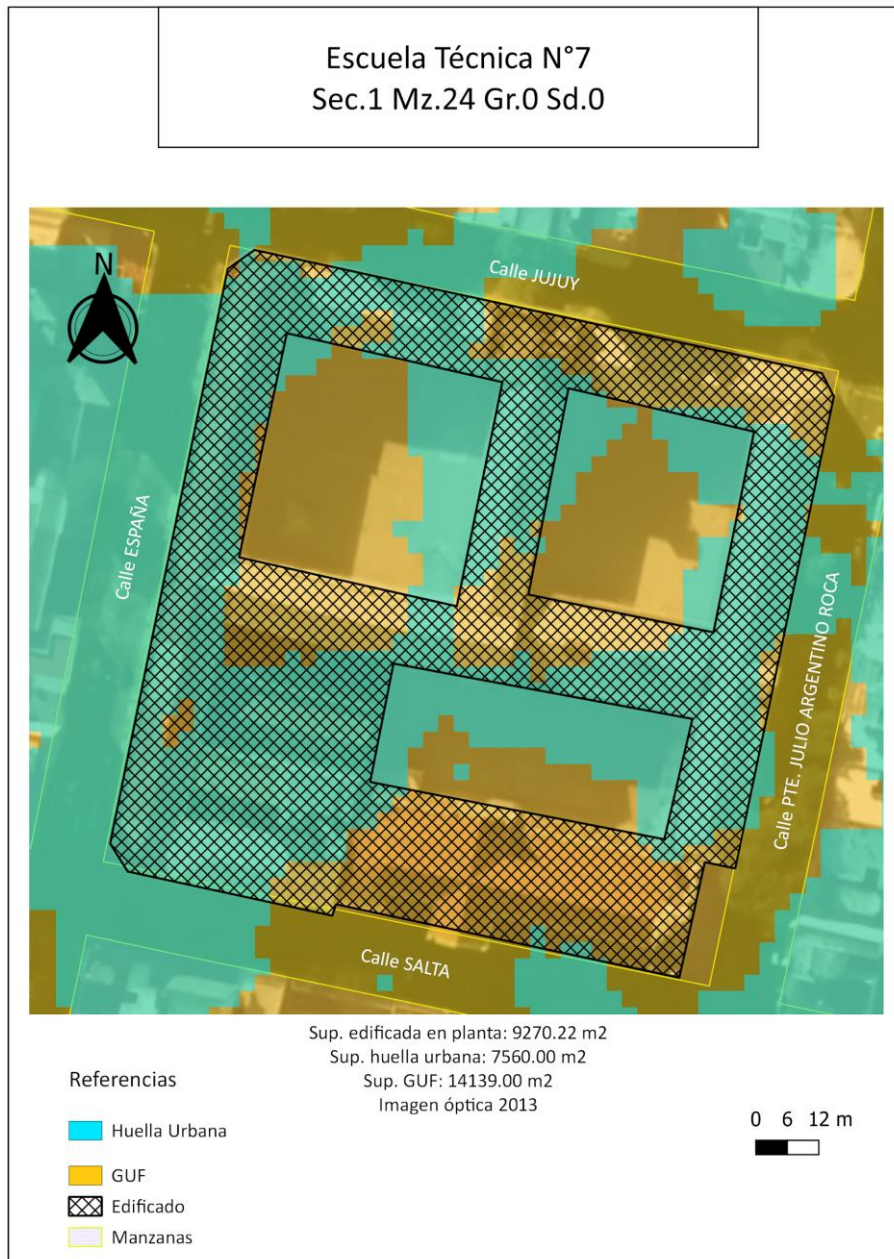


Figura 37. Sitio testigo C, tipo escuela, ubicado entre las calles Jujuy, Pte. Julio Argentino Roca, Salta y España.

En el cuarto sitio testigo (figura 38), tipo centro comercial, se observó que la digitalización del área edificada se encuentra en su totalidad incluida dentro del polígono de la manzana. En tanto que lo que respecta al área identificada por GUF, detectó por exceso el área edificada, sin embargo en ciertos espacios internos a la misma no manifestó una completa detección. En cuanto a HU, no se ajustó a la superficie edificada pues su detección reflejó principalmente la parte central, centro-sur y este.

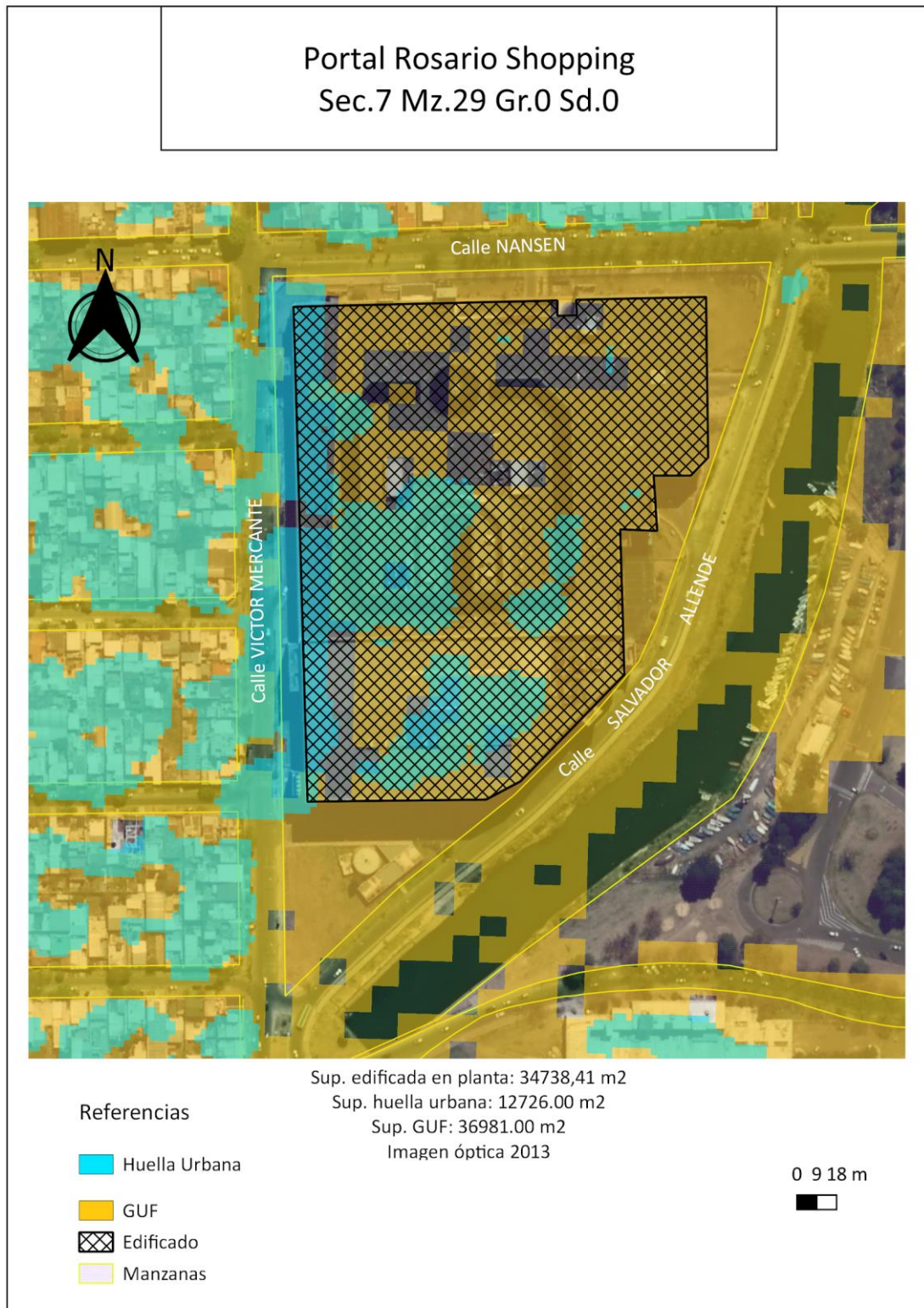


Figura 38. Sitio testigo D, tipo centro comercial, ubicado entre las calles Nansen, Salvador Allende y Victor Mercante.

En la figura 39 el sitio testigo responde al tipo espacio recreativo donde no se observó edificación alguna. En lo que respecta al área identificada por GUF, detectó

como huella urbana espacios verdes mientras que HU no identificó construcciones en concordancia con el resultado teórico esperado.

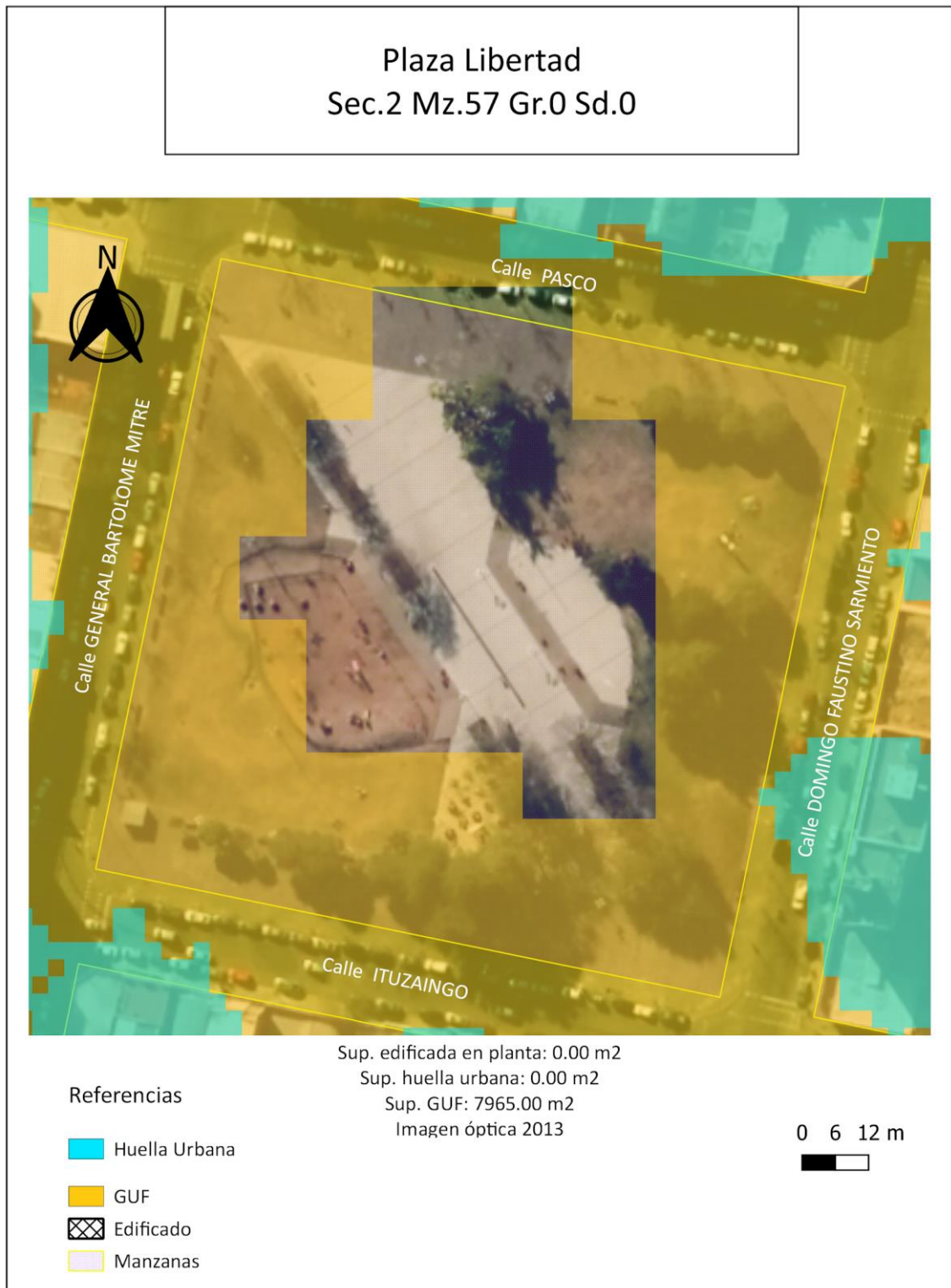


Figura 39. Sitio testigo E, tipo espacio recreativo, ubicado entre las calles Pasco, Domingo Faustino Sarmiento, Ituzaingo y General Bartolomé Mitre.

En sexto lugar se analizó la relación en un sitio testigo (figura 40), tipo escuela y espacio recreativo, donde se observó que la digitalización del área edificada se

encontraba en su totalidad incluida dentro del polígono de la manzana, con excepción del lado sur-este donde se visualiza un exceso parcial que se consideró mínimo. En lo que respecta al área identificada por GUF, detectó por exceso el área edificada, incluyendo gran parte del espacio verde recreativo. Por otra parte, HU mostró un ajuste más representativo de la construcción existente.



Figura 40. Sitio testigo F, tipo escuela y espacio recreativo, ubicado entre las calles San Juan, Entre Ríos, Mendoza y Corrientes.

En la figura 41, el sitio testigo responde al tipo espacio recreativo. No se observó edificación alguna. GUF detectó como huella urbana espacios verdes mientras que parte

de las superficies impermeables no, y HU prácticamente no identificó construcciones en concordancia con el resultado teórico esperado.

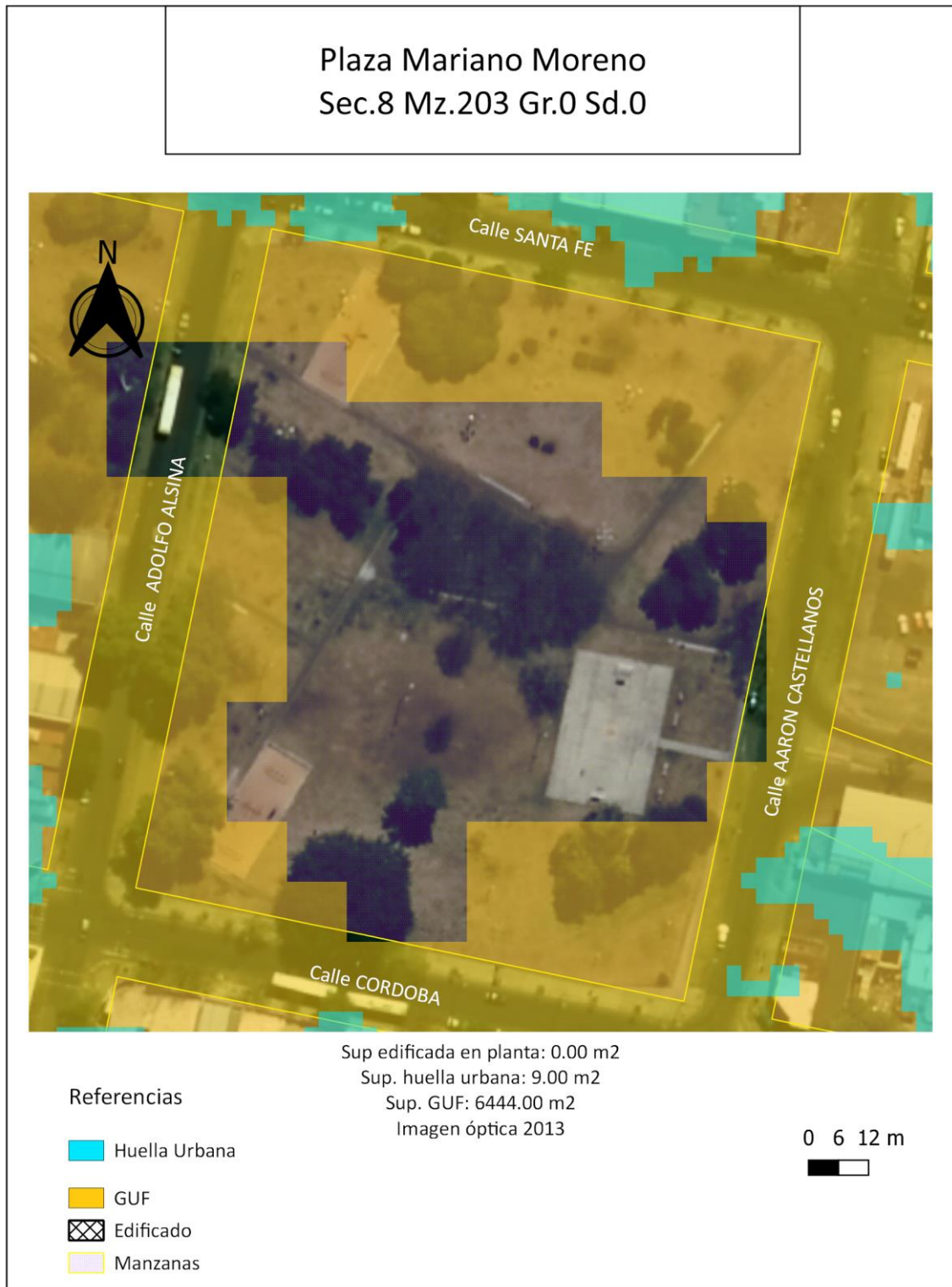


Figura 41. Sitio testigo F, tipo espacio recreativo, ubicado entre las calles Santa Fe, Aaron Castellanos, Córdoba y Adolfo Alsina.

En octavo lugar se analiza la relación en un sitio testigo (figura 42), tipo estación ferroviaria y espacio recreativo, hoy utilizado como centro comercial, donde se observó

que la digitalización del área edificada se encontraba totalmente incluida dentro del polígono de la manzana. En lo que respecta al área identificada por GUF, detectó por exceso la mayoría de las edificaciones existentes, incluyendo gran parte del espacio verde recreativo. Por otro lado, HU detectó con distintos niveles de aproximación todas las construcciones digitalizadas con un desplazamiento en dirección sur-oeste.



Figura 42. Sitio testigo H, tipo estación ferroviaria y espacio recreativo, hoy centro comercial, ubicado entre las calles Santa Fe, Francisco Vera Mujica, Córdoba y Juan Manuel Cafferata.

En la figura 43 el área testigo responde al tipo museo donde se observó que la digitalización del área edificada se encontraba completamente dentro del polígono de la manzana. En tanto que lo que respecta al área identificada por GUF, detectó por

exceso el área edificada, incluyendo parte considerable del espacio recreativo verde (vegetación). Sin embargo, HU detectó concretamente la edificación.

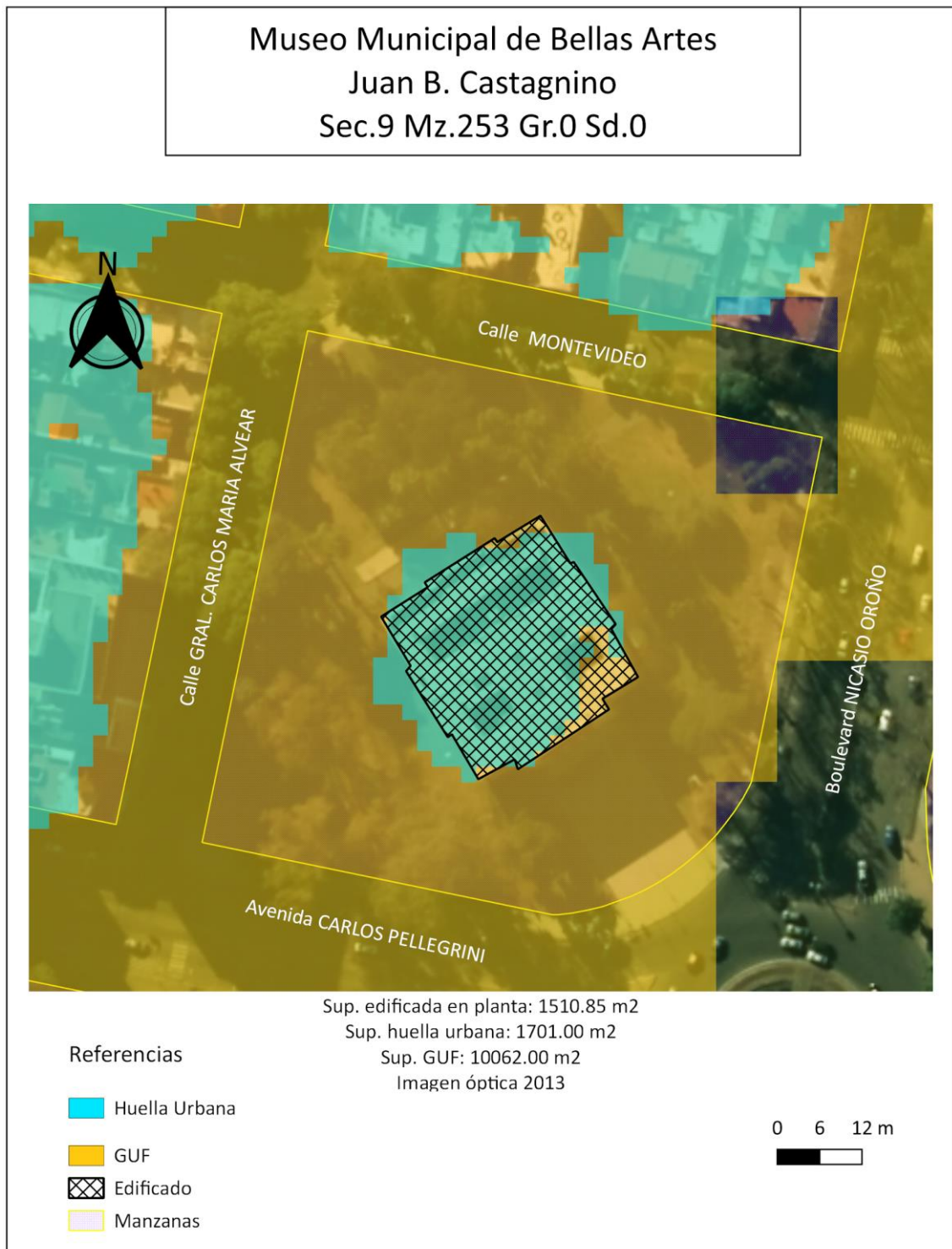


Figura 43. Sitio testigo I, tipo museo, ubicado entre calle Montevidéo, boulevard Nicasio Oroño, avenida Carlos Pellegrini y calle Gral. Carlos María Alvear.

A continuación, en la figura 44 el área testigo responde al tipo institución gubernamental donde se observó que la digitalización del área edificada se encontraba completamente incluida dentro del polígono de la manzana, con excesos parciales

considerados mínimos en los lados nor-este, sur-este y sur-oeste. En cuanto al área identificada por GUF cubre la totalidad del área edificada, vereda y patios internos verdes, mientras que, HU detectó desplazada en dirección sur-oeste las distintas naves del edificio.

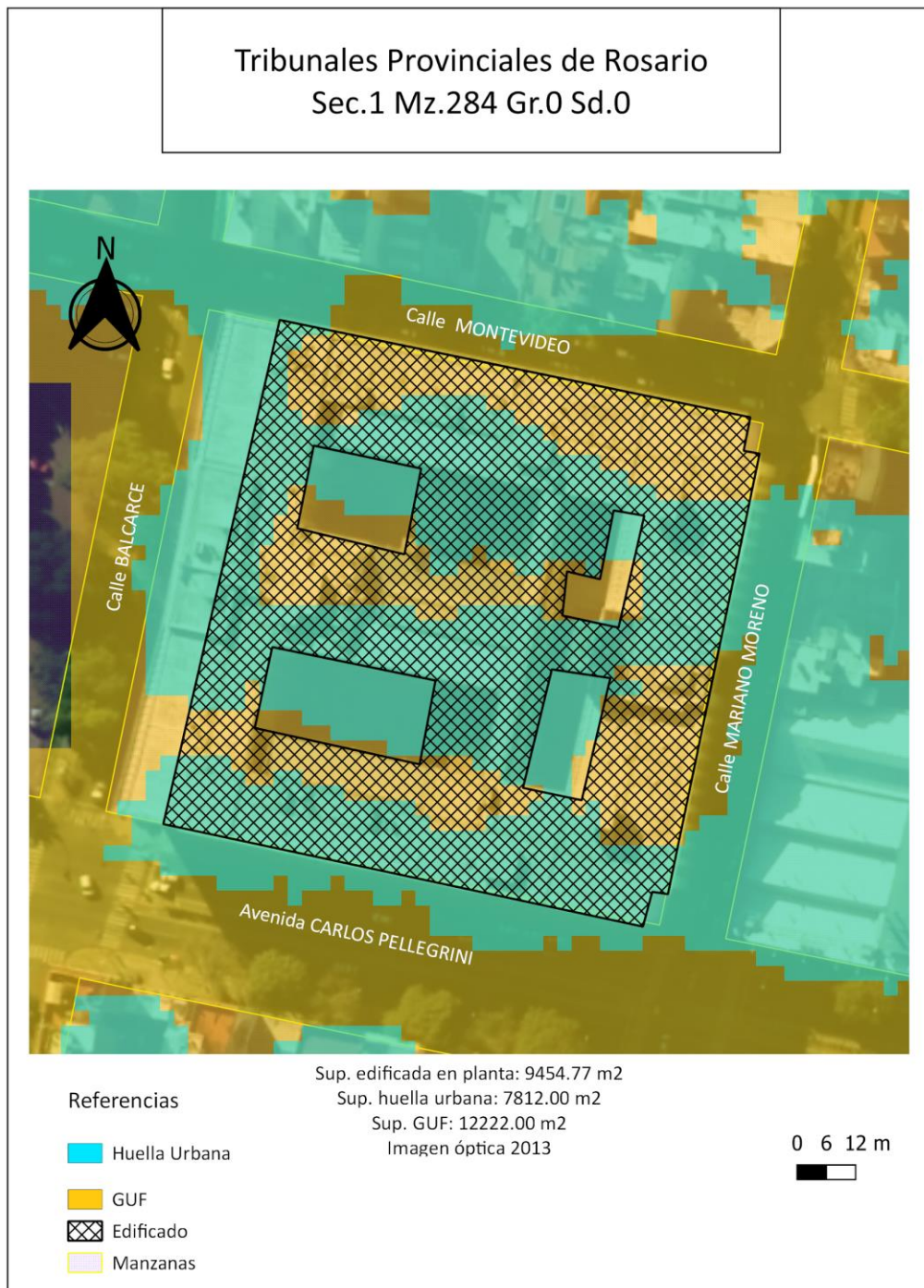


Figura 44. Sitio testigo J, tipo institución gubernamental, ubicado entre las calles Montevideo, Mariano Moreno, avenida Carlos Pellegrini y calle Balcarce.

Luego se analizó la relación en el sitio testigo (figura 45) que responde al tipo iglesia donde se observó que la digitalización del área edificada se encontraba incluida dentro del polígono de la manzana a excepción del lado nor-oeste que se visualizó un

exceso considerado mínimo. GUF detectó área impermeable, la arboleda y lo edificado, sin embargo, la cobertura no se condice completamente con la construcción. Por otra parte, HU no identificó las edificaciones.



Figura 45. Sitio testigo K, tipo iglesia, ubicado entre las calles Concolorcorvo, Francisco Solano Ortega y Juan de Dios Mena.

En décimo segundo lugar, se analizó la relación en un sitio testigo (figura 46) que responde al tipo edificio. En este contexto se observó que la digitalización del área

edificada se encontraba ubicada completamente dentro del polígono de la manzana. En lo que respecta al área identificada por GUF, detectó la edificación existente, incluyendo espacios verdes. Por otra parte, HU reflejó la construcción digitalizada con un desplazamiento importante en dirección sur-oeste.

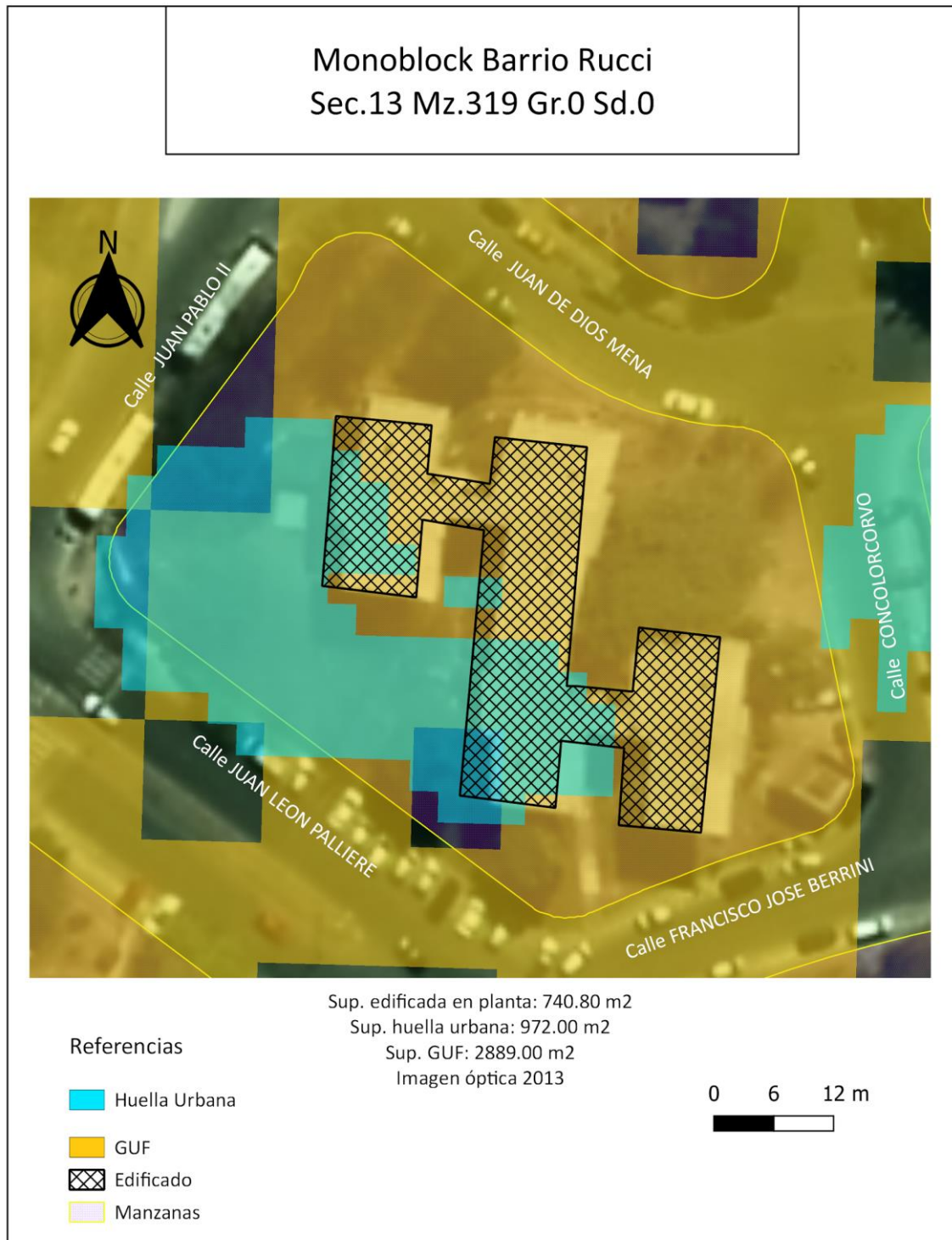


Figura 46. Sitio testigo L, tipo edificio, ubicado entre las calles Juan de Dios Mena, Concolorcorvo, Francisco José Berrini, Juan Leon Palliere y Juan Pablo II.

A continuación, en la figura 47 el área testigo responde al tipo institución gubernamental donde se observó que la digitalización del área edificada excedía groseramente los límites el polígono de la manzana en el lado sur. En cuanto al área identificada por GUF cubrió la mayor parte del área edificada y la vegetación. En tanto, HU lo hizo de manera más acotada.

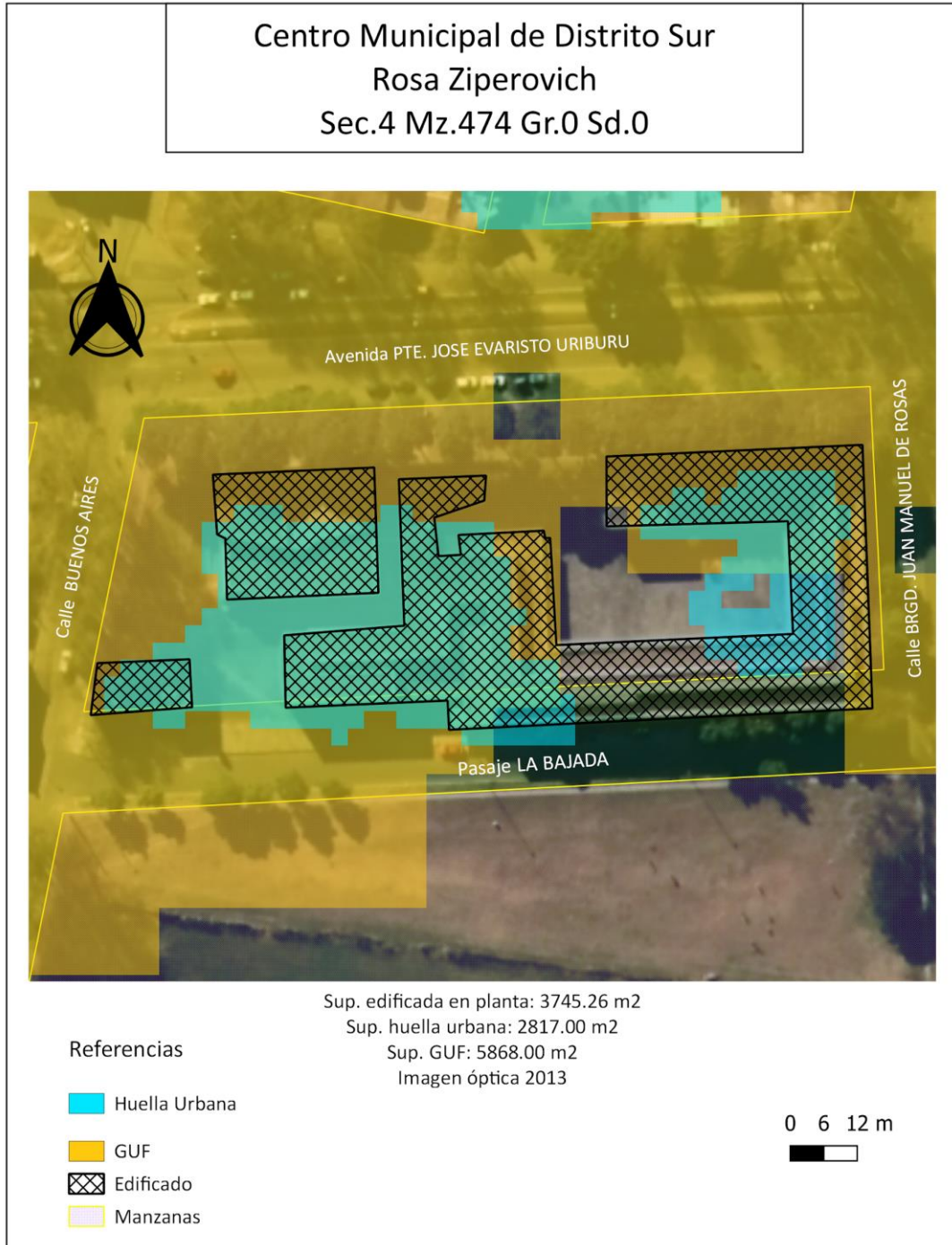


Figura 47. Sitio testigo J, tipo institución gubernamental, ubicado entre avenida Pte. José Evaristo Uriburu, calle Brgd. Juan Manuel de Rosas, pasaje La Bajada y calle Buenos Aires.

Por último, en la figura 48 el área testigo responde al tipo vivienda donde se observó que la digitalización del área edificada se encuentra en su totalidad incluida dentro del polígono de la manzana, con excepción del lado este que se visualizó un exceso parcial que se consideró mínimo. En tanto que lo que respecta al área identificada por GUF cubrió casi la totalidad del área edificada incluyendo espacios verdes. En cuanto a la huella urbana detectada se halla desplazada hacia el sur-oeste.

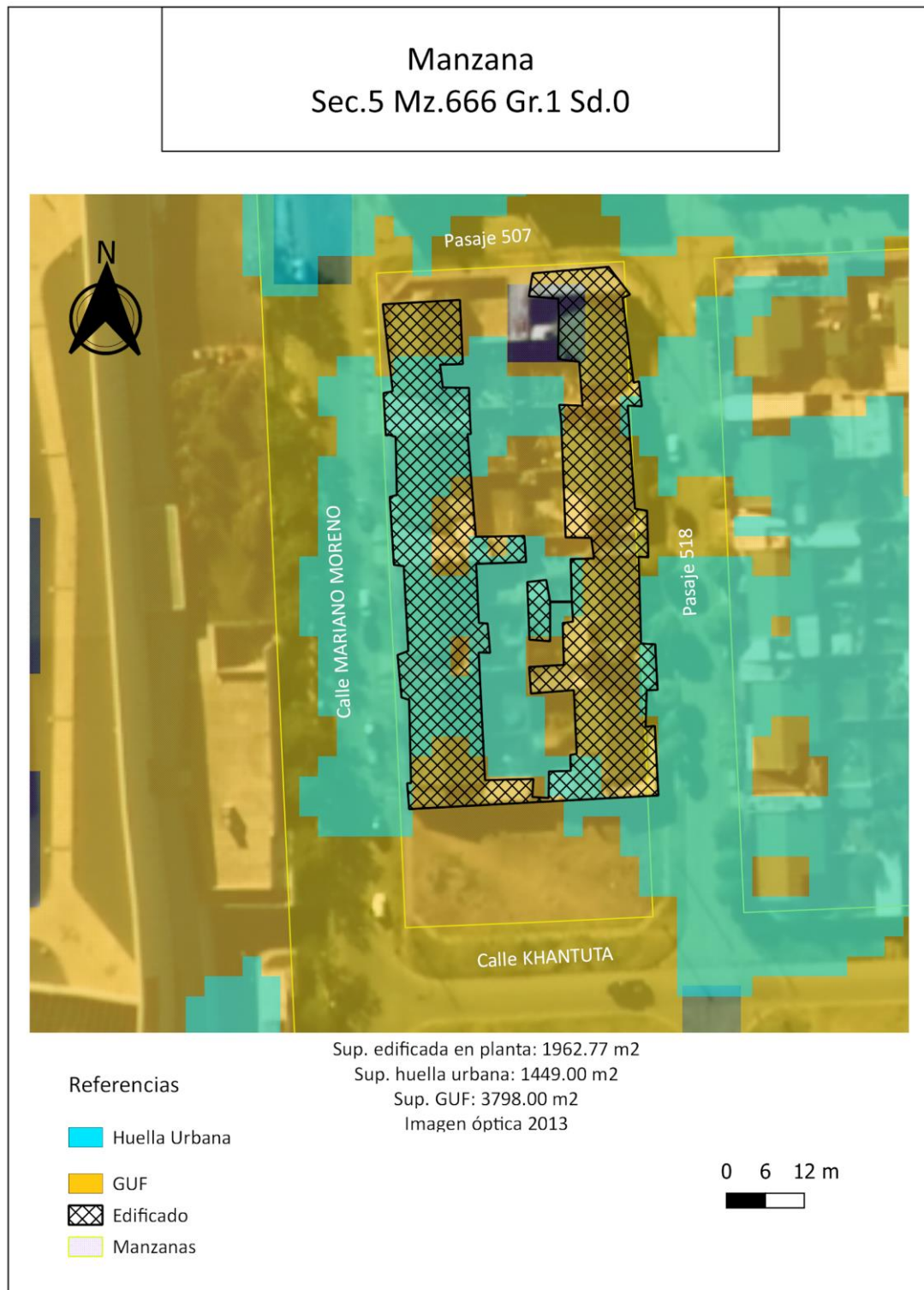


Figura 48. Sitio testigo N, tipo vivienda, ubicado entre pasaje 507, 518, calle Khantuta y Mariano Moreno.

A continuación, se exhibe la tabla 6 que contiene datos de superficie referidos a la digitalización de lo edificado ED, lo identificado por GUF y la huella urbana HU de los sitios testigos que contienen edificaciones. Además, se calcula la razón porcentual entre el resto entre las distintas máscaras y lo edificado, y lo edificado.

Tabla 6. Sitios testigos con edificación con sus respectivas superficies y relaciones porcentuales.

Lugar	ED [m <sup>2</sup> ]	GUF [m <sup>2</sup> ]	HU [m <sup>2</sup> ]	(GUF-ED)	(HU-ED)
				ED [%]	ED [%]
A) Supermercado Micropack	24974,63	32310,00	21879,00	29,37	-12,40
B) Fabaher S.A.	6097,06	12474,00	3564,00	104,59	-41,55
C) Escuela Técnica N°7	9270,22	14139,00	7560,00	52,52	-18,45
D) Portal Rosario Shopping	34738,41	36981,00	12726,00	6,46	-63,37
F) Escuela Normal Superior N°1 "Dr. Nicolás Avellaneda"	3686,27	14274,00	3807,00	287,22	3,28
H) Mercado del Patio - McDonald's	9115,37	40770,00	11097,00	347,27	21,74
I) Museo Municipal de Bellas Artes Juan B. Castagnino	1510,85	10062,00	1701,00	565,98	12,59
J) Tribunales Provinciales de Rosario	9454,77	12222,00	7812,00	29,27	-17,38
K) Parroquia Natividad del Señor	1260,97	2970,00	18,00	135,53	-98,57
L) Monoblock Barrio Rucci	740,80	2889,00	972,00	289,99	31,21
M) Centro Municipal de Distrito Sur Rosa Ziperovich	3745,26	5868,00	2817,00	56,68	-24,79
N) Manzana	1962,77	3798,00	1449,00	93,50	-26,18

Ante tales resultados se calcula el promedio de identificación por exceso y defecto según corresponda. GUF identifica en promedio el 166,53% por exceso respecto a lo digitalizado, mientras que HU por exceso en cuatro casos obteniéndose un promedio de 17,20%, por defecto en ocho casos resultando 37,83% y el promedio de

tomar todos los casos referentes a HU de manera conjunta da como resultado una predominancia de identificación por defecto del 19,49%.

La tabla 7 que contiene datos de superficie referidos a la unidad de análisis (manzana - MZ), lo identificado por GUF y la huella urbana HU de los sitios testigos que son netamente espacios recreativos. Además, se calcula la razón porcentual entre las distintas máscaras y la unidad de análisis.

Tabla 7. Sitios testigos, tipo espacio recreativo donde no se existen edificaciones, con sus respectivas superficies y la relación porcentual.

Lugar	MZ [m <sup>2</sup> ]	GUF [m <sup>2</sup> ]	HU [m <sup>2</sup> ]	GUF/MZ [%]	HU/MZ [%]
E) Plaza Libertad	13010,31	7965,00	0,00	61,22	0,00
G) Plaza Mariano Moreno	15166,53	6444,00	9,00	42,49	0,06

#### 4.4. Discusión

El presente trabajo se planificó bajo el supuesto de que la totalidad de los datos utilizados se rigen por los estándares del Open Geospatial Consortium (OGC)<sup>24</sup>. No obstante, en ninguno de los casos se encontró una medida que indique la calidad o el error en la edición.

Un punto que considerar es que, la metodología utilizada en GUF no es estrictamente la misma que la usada en la obtención en la huella urbana en la ciudad de Rosario con imágenes COSMO-SkyMed. Las diferencias están dadas principalmente en la técnica, el volumen de datos y la temporalidad; por otro lado, la resolución espacial de los productos difiere, siendo la de GUF cuatro veces menor. Si bien, ambas propuestas en principio tienen el mismo objetivo, detectar la huella urbana, GUF utiliza una definición más amplia que la aplicada en el presente trabajo.

En el producto de la huella urbana obtenida, se detectaron en algunos pixeles falsos positivos, los cuales se encuentran circunscritos en la periferia de la ciudad, correspondientes a parcelas caracterizadas como rurales.

En lo que respecta a la digitalización a partir del mosaico aerofotogramétrico año 2013, se observó que en algunos casos el polígono resultante no quedó completamente incluido dentro de la unidad de análisis. Esto podría deberse, quizás, a la génesis que da lugar a este conjunto de datos, cuyo uso es más bien de visualización que de mensura de alta precisión.

El producto GUF manifiesta una detección por exceso en la todos los casos evaluados (respecto de lo edificado) incluyendo casos donde no existían construcciones ni áreas impermeables. Esto podría deberse a las prioridades establecidas por el proyecto GUF en cuanto al área de estudio (nivel mundial) así como también a la metodología utilizada.

<sup>24</sup> OGC: organización internacional sin fines de lucro constituida en 1994, con el objetivo de promover el desarrollo y uso de estándares y tecnologías abiertas en el campo de la información geográfica.

En cuanto a la huella urbana obtenida, en general, se observaron sitios testigos donde detectó por exceso y en otros por defecto; indicando la posibilidad de realizar ajustes en la técnica utilizada, como por ejemplo incluir un par de imágenes cuya orientación orbital sea descendente. Además, se visualizó un desplazamiento en dirección sur-oeste de la huella urbana respecto de la digitalización de lo edificado en planta. No obstante, la metodología utilizada en el presente trabajo permite obtener un resultado más cercano a la realidad de terreno en concordancia a los objetivos planteados.

## 5. Conclusiones

A partir de la metodología educativa de la EO-College seleccionada y de las imágenes satelitales de radar COSMO-SkyMed se logra identificar la huella urbana de la Ciudad de Rosario del año 2013. La interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) brinda la oportunidad de determinar la coherencia/coincidencia de la señal retrodispersada por los distintos blancos entre imágenes temporalmente cercanas.

Desde el análisis visual se puede concluir que la metodología utilizada para identificar la huella urbana con el umbral elegido permite identificar píxeles correspondientes al área urbana, manifestando mayor concordancia en el casco céntrico que en la periferia de la ciudad donde se detectaron en algunos casos píxeles falsos positivos.

Resulta de interés la relación que existe entre el producto obtenido y GUF debido a que ambas propuestas en principio tienen el mismo objetivo, detectar la huella urbana.

El análisis que se realiza en los sitios testigos seleccionados permite concluir que GUF en todos los casos identifica por exceso respecto al área digitalizada, mientras que la huella urbana obtenida tiene un comportamiento más aleatorio, en algunos casos influenciado el desplazamiento que se visualiza cuando se analiza cada caso en particular, y en otros, que podrían deberse a las características propias de cada construcción.

Al momento de analizar los resultados, se refiere a una relación y no estrictamente de una comparación porque como se puede ver en el caso del Centro Municipal de Distrito Sur Rosa Ziperovich, no todas las edificaciones están contempladas completamente dentro de la unidad de análisis espacial establecida.

Como resultado de tal análisis se puede concluir que según el objetivo con el que se plantee utilizar la máscara de la huella urbana puede resultar de mayor conveniencia una u otra. Por ejemplo, si se trata de identificar espacios recreativos, HU es más representativa, mientras que a los fines de planificación u ordenamiento territorial la utilización de GUF resulta satisfactoria.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el presente trabajo, se sugieren las siguientes consideraciones de interés, las cuales podrían ser contempladas en futuras investigaciones en esta línea de trabajo, a saber:

- Utilizar filtros o máscaras de vegetación que permitan eliminar falsos positivos.
- Realizar el mismo procedimiento con otros valores umbrales.
- Realizar trabajo de campo a fin de comparar con la realidad de terreno.
- Georreferenciar la máscara a partir de puntos de control medidos en campo.
- Realizar ajustes en la técnica utilizada, como por ejemplo incluir un par de imágenes cuya orientación orbital sea descendente.
- Utilizar imágenes cuya longitud de onda sea banda L para evitar la influencia de la vegetación, sólo que hoy no existen satélites con alta resolución espacial que trabajen con esta banda.
- Utilizar imágenes con polarización vertical-vertical

Los resultados obtenidos en el presente estudio podrían ser considerados por estamentos gubernamentales para mejorar la información de los sitios poblados a ser

utilizada con fines de planificación u ordenamiento territorial ya que permite entre otras cosas identificar la expansión de una ciudad, detectar cambios de uso del suelo de rural a urbano e incluso visualizar su evolución en relación a las localidades vecinas, en este caso en particular la ciudad de Rosario como parte de la Región Metropolitana.

Hoy existen datos muy valiosos captados de forma satelital como así también nuevas técnicas para su análisis para las cuales se requiere de profesionales entrenados para un uso óptimo de los mismos en beneficio de una comunidad o sociedad.

## 6. Referencias bibliográficas

2018 World Population Data Sheet With Focus on Changing Age Structures – Population Reference Bureau. (2019). Disponible en web:

<https://www.prb.org/2018-world-population-data-sheet-with-focus-on-changing-age-structures/>

Agenzia Spaziale Italiana [Consulta: 31 de mayo de 2018]. Disponible en web: <http://www.cosmo-skymed.it/en/index.htm>

Anguita Virella, F. (1988). Origen e historia de la Tierra. Editorial Rueda.

Esch, T., Felbier, A., Heldens W., Klotz M., Marconcini, M., Roth, A., Taubenbock H., Wurm M., Zeidler, J. (2014): THE GLOBAL URBAN FOOTPRINT - PROCESSING STATUS AND CROSS COMPARISON TO EXISTING HUMAN SETTLEMENT PRODUCTS.

Canadian Centre for Remote Sensing. (2001). "Programa GlobeSAR-2: Material educativo para teledetección mediante radares". Ottawa: Canada Centre for Remote Sensing CCRS, Natural Resources Canada

Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección ambiental* (2nd ed.). Madrid, España. Editorial Rialp, S.A.

Chuvieco, E. (2007). *Teledetección ambiental - La observación de la Tierra desde el espacio* (3rd ed.). Barcelona, España. Editorial Planeta, S. A.

Chuvieco, E. (2010). *Teledetección ambiental - La observación de la Tierra desde el espacio* (1st ed.). Barcelona, España. Editorial Planeta, S. A.

eoPortal [Consulta: 26 de diciembre de 2019]. Disponible en web: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cosmo-skymed>

Esch, T., Heldens, W., Hirner, A., Keil, M., Marconcini, M., Roth, A., Zeidler, J., Dech, S., Strano, E. (2017): Breaking new ground in mapping human settlements from space – The Global Urban Footprint. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 134 (2017) 30-42. Disponible en web: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.012>

Esch, T., Marconcini, M., Metz, A., Zeidler, J. (2014). GLOBAL URBAN GROWTH MONITORING BY MEANS OF SAR DATA

Esch, T., Schenk, A., Ullmann, T., Thiel, M., Roth, A., Dech, S. (2011): Characterization of Land Cover Types in TerraSAR-X Images by Combined Analysis of Speckle Statistics and Intensity Information. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volume 49, Issue 6, pp. 1911-1925. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2091644>.

Fernández Ordoñez, Y., Escalona Maurice, M., Valdez Lazalde, J. (2015). AVANCES Y PERSPECTIVAS DE GEOMÁTICA CON APLICACIONES AMBIENTALES, AGRÍCOLAS Y URBANAS. Editorial del Colegio de Postgraduados, Ciudad de México.

Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Thapa, R. B., & Cherrington, E. (2019). The SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation.

Garzelli, A., Zoppetti C. (2018). URBAN FOOTPRINT FROM VHR SAR IMAGES: TOWARD A FULLY OPERATIONAL PROCEDURE

Italian Space Agency. (2016). COSMO-SkyMed Mission and Products Description.

Jaybhay, J. and Shastri, R. (2015). A Study of Speckle Noise Reduction Filters. *Signal & Image Processing : An International Journal*, 6(3).

López-Martínez, C. and Pottier, E. (2007). Coherence estimation in synthetic aperture radar data based on speckle noise modeling.

Lopez-Sanchez, J. (2014). Introduction to SAR Remote Sensing. 5th Advanced Training Course in Land Remote Sensing, Valencia, España.

Lyalin, K., Biryuk, A., Sheremet, A., Tsvetkov, V., & Prikhodko, D. (2018). UAV synthetic aperture radar system for control of vegetation and soil moisture. Lecture, Moscú, Rusia.

Mari, N. (2012). Diseño de un Sistema de Alerta y Respuesta Temprana a Incendios de Vegetación - SARTiv- (Maestría). Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Mayorga Torres, T. (2013). Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (Radar de Apertura Sintética) (Magister). Universidad Nacional de Córdoba.

Miraglia, M., Flores, A., Rivarola y Benitez, M., D' Liberis, M., Galván, L., Natale, D., Rodríguez, M. 2010. Manual de Cartografía, Teleobservación y Sistemas de Información Geográfica. editorial, Los Polvorines. Universidad Nacional de General Sarmiento.

Moya Lozano, J. (2019). *PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE ESTRUCTURAS EN IMÁGENES DE ULTRASONIDO*. Ciudad Juárez, Chihuahua.

Municipalidad de Rosario [Consulta: 18 de septiembre de 2018]. Disponible en web: <https://www.rosario.gob.ar/web/ciudad/caracteristicas/informacion-territorial>

Olaya, V. (2014). Sistemas de Información Geográfica. Disponible en web: <http://volaya.github.io/libro-sig/index.html>.

Olmsted, C. (1993). Alaska SAR Facility. Scientific SAR User's Guide. ASF-SD-003.

Palacios-Lopez, D., Marconcini, M., Nieves, J., Sorichetta, A., Zeidler, J., Tatem, A., & Esch, T. (2018). Leveraging Enhanced Build-Up Area Characteristics to Improve Spatial Population Distribution Modelling. Lecture, Italia.

Pérez Gutiérrez, C., Muñoz Nieto, Á. 2006. Teledetección: Nociones y Aplicaciones. Universidad de Salamanca, Ávila.

Podest, E. (2018). Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética. Lecture, Frascati (Rome), Italy.

SARMAP, UNESCO BILKO group, European Space Agency (2008). Synthetic Aperture Radar and SARscape.

Seppi, S. (2016). USO DE INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL PARA MONITOREAR DEFORMACIONES DE TERRENO EN LA COMUNA DE CORVARA, PROVINCIA DE BOLZANO, ITALIA (Magister). Universidad Nacional de Córdoba.

Soukup, T., Kolomaznik, J., Borja-Vega, C., Mimmi, L., Patel, A. (2018). Predicting Slum Dwellers' deprivations from Space. Lecture, Italia.

Taubenbock, H., Esch, T., Felbier, A., Roth, A., Dech, S. (2011). Pattern-Based Accuracy Assessment of an Urban Footprint Classification Using TerraSAR-X Data. *IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters*, 8(2), 278-282. Disponible en web: <http://dx.doi.org/10.1109/lgrs.2010.2069083>

Torres Perdigón, A., Blanco Figueroa, C., Codazzi, A. (2007). Mejora de los sistemas de cartografía del territorio colombiano. Bogotá: IGAC.

Voltersen, M., Esch, T., Berger, C., Eckardt, R., (2017). Module 3105: Urban Areas. Urban footprint. SAR-EDU. Disponible en web: [https://eo-college.org/articles/resource/urban\\_footprints/](https://eo-college.org/articles/resource/urban_footprints/)

Wang, P., C. Huang, E. C. Brown de Colstoun, J. C. Tilton, and B. Tan. 2017. Documentation for the Global Human Built-up And Settlement Extent (HBASE) Dataset From Landsat. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). <https://doi.org/10.7927/H48W3BCM>. [Consulta: 26 de diciembre de 2019].

Wang, P., Huang, C., Brown de Colstoun, E., Tilton, J., & Tan, B. (2017). Documentation for the Global Human Built-up And Settlement Extent (HBASE) Dataset From Landsat. Nueva York.

## Anexos

### Anexo 1: Parámetros de procesamiento en ENVI

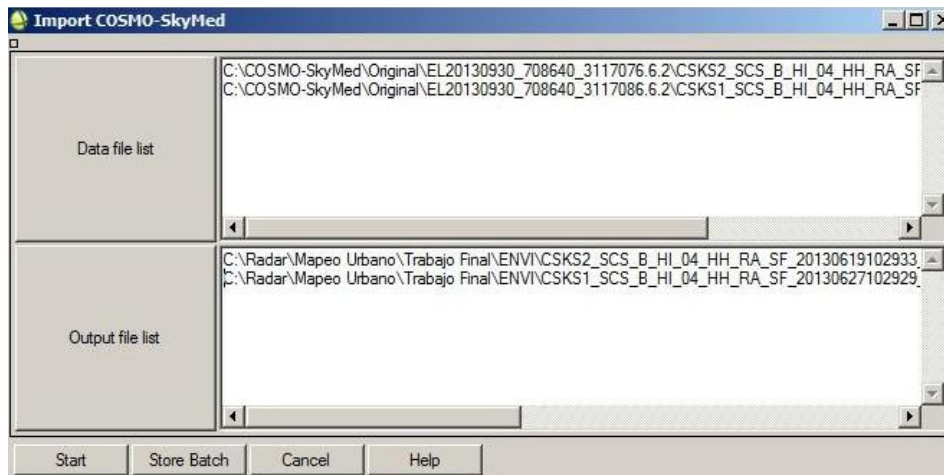


Figura 1. Importación de imágenes.

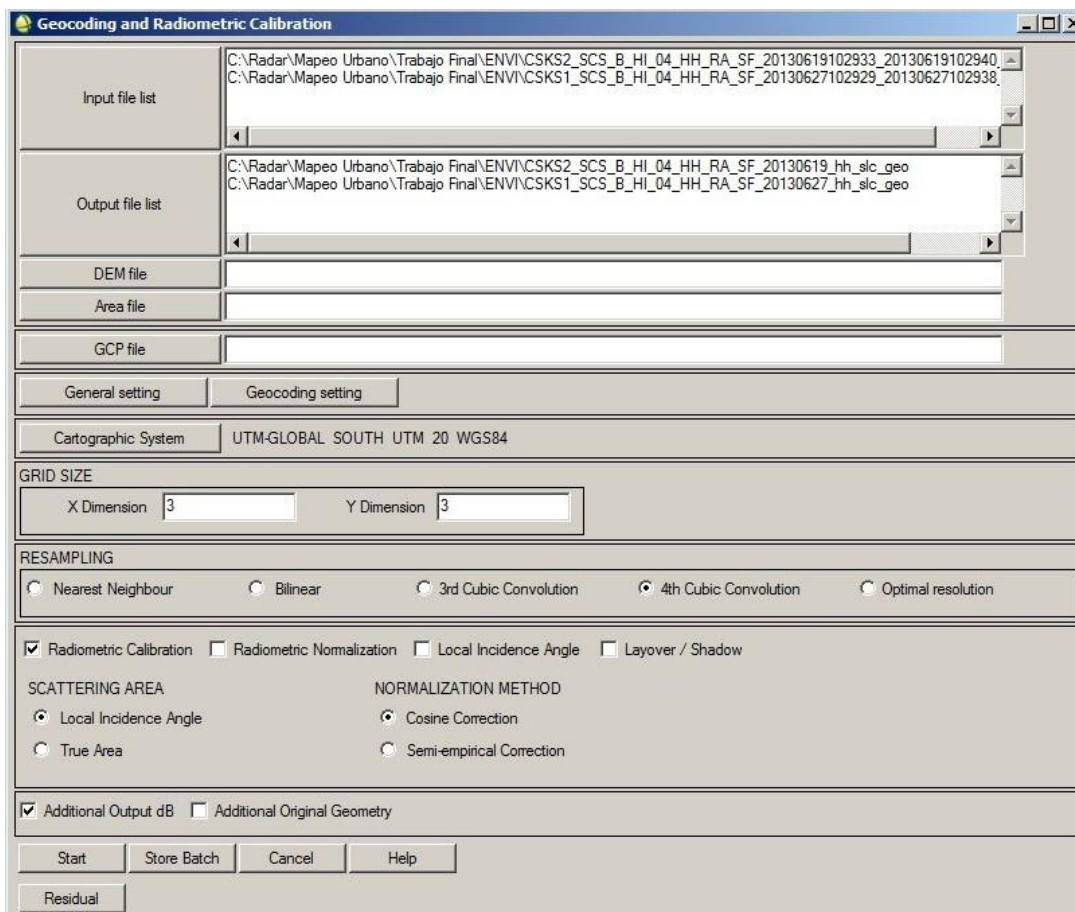


Figura 2. Georreferenciación y calibración de las imágenes

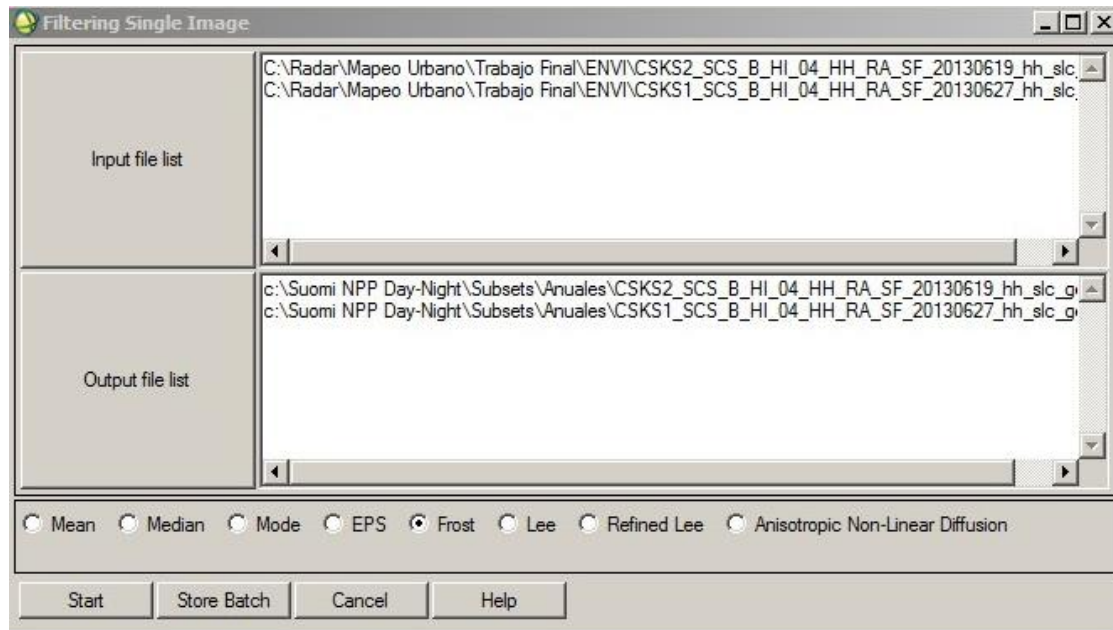


Figura 3. Reducción de speckle.

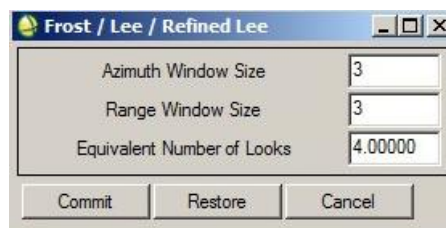


Figura 4. Parámetros establecidos para la reducción de speckle.

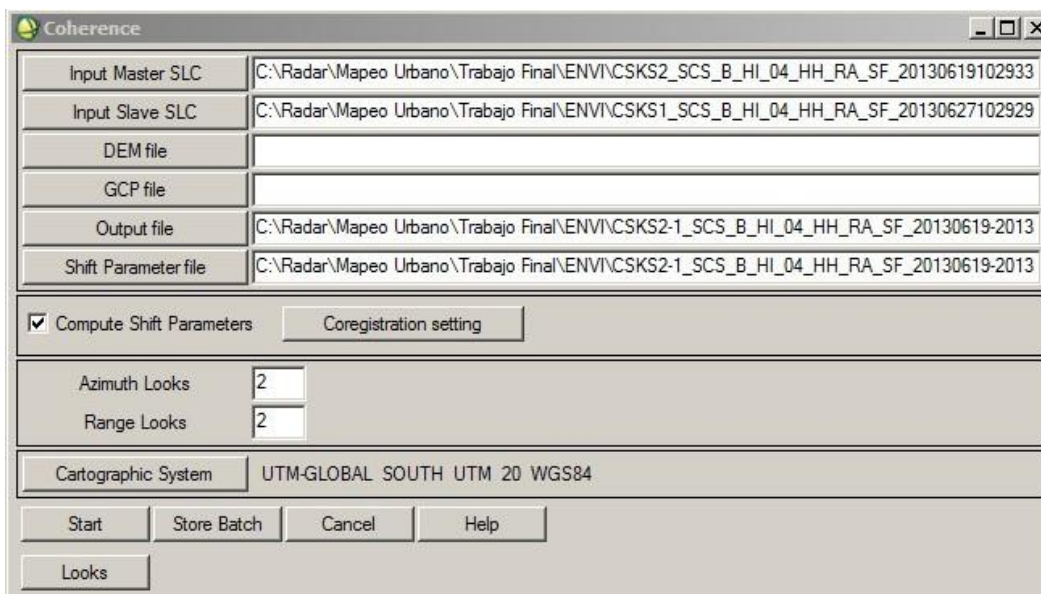


Figura 5. Cálculo de coherencia.

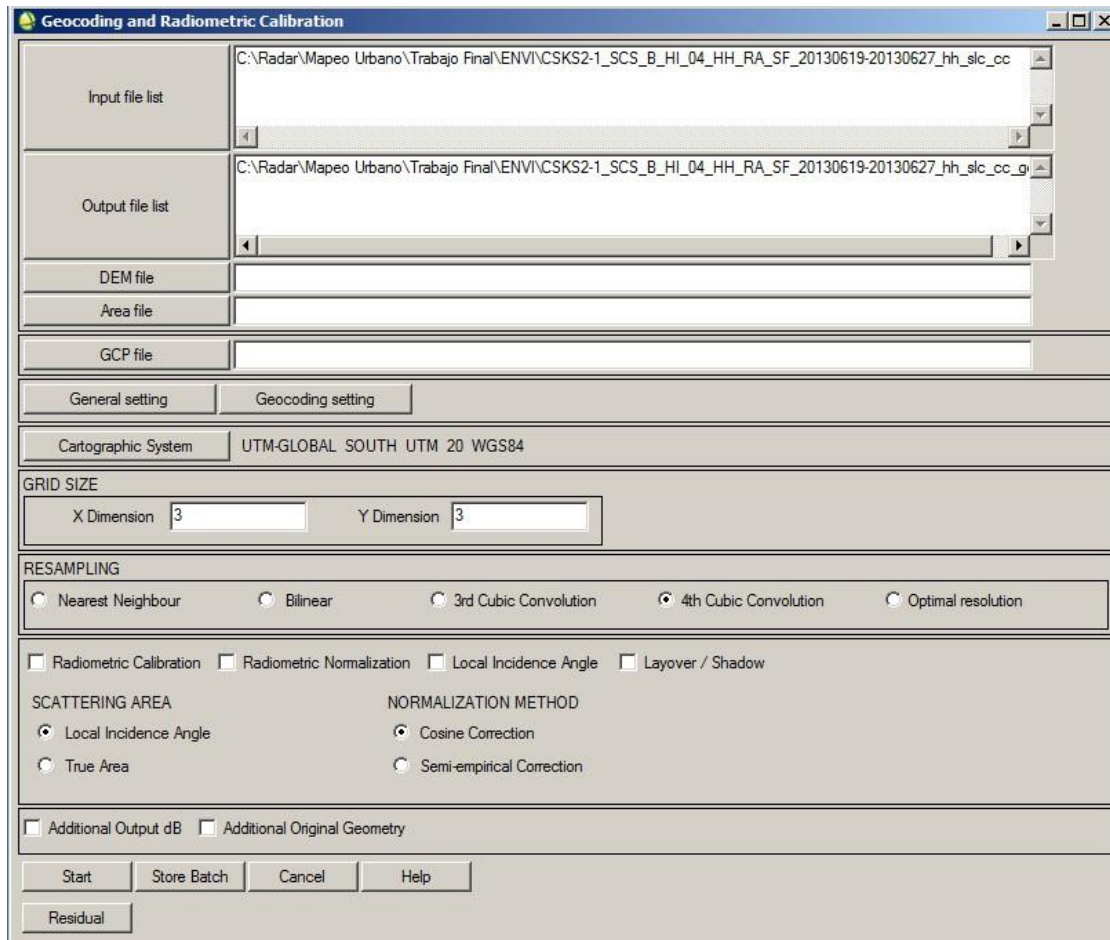


Figura 6. Georreferenciación y calibración de la imagen de coherencia.

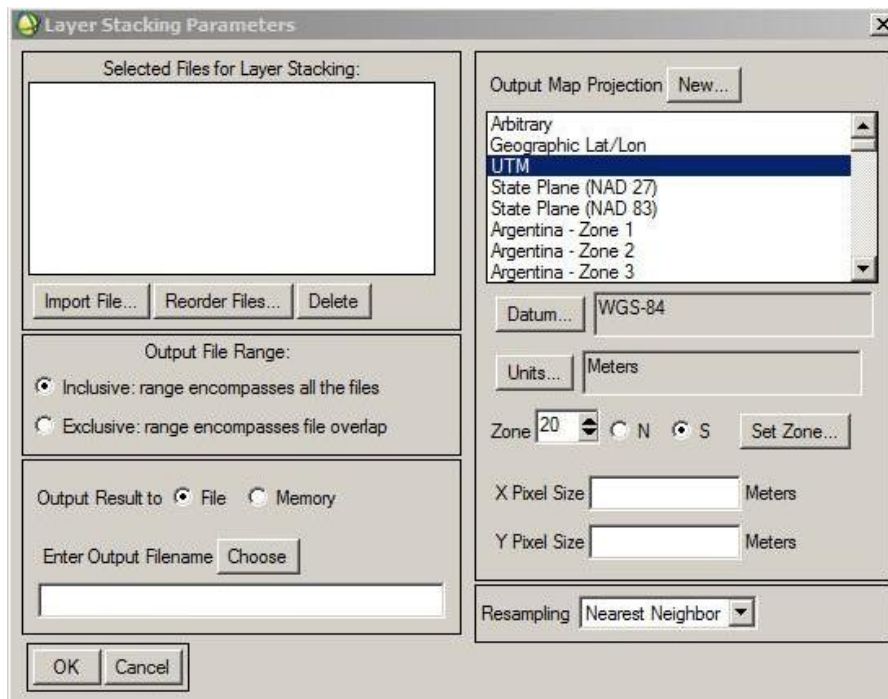


Figura 7. Agrupamiento espacial de los resultados parciales y recorte de datos.

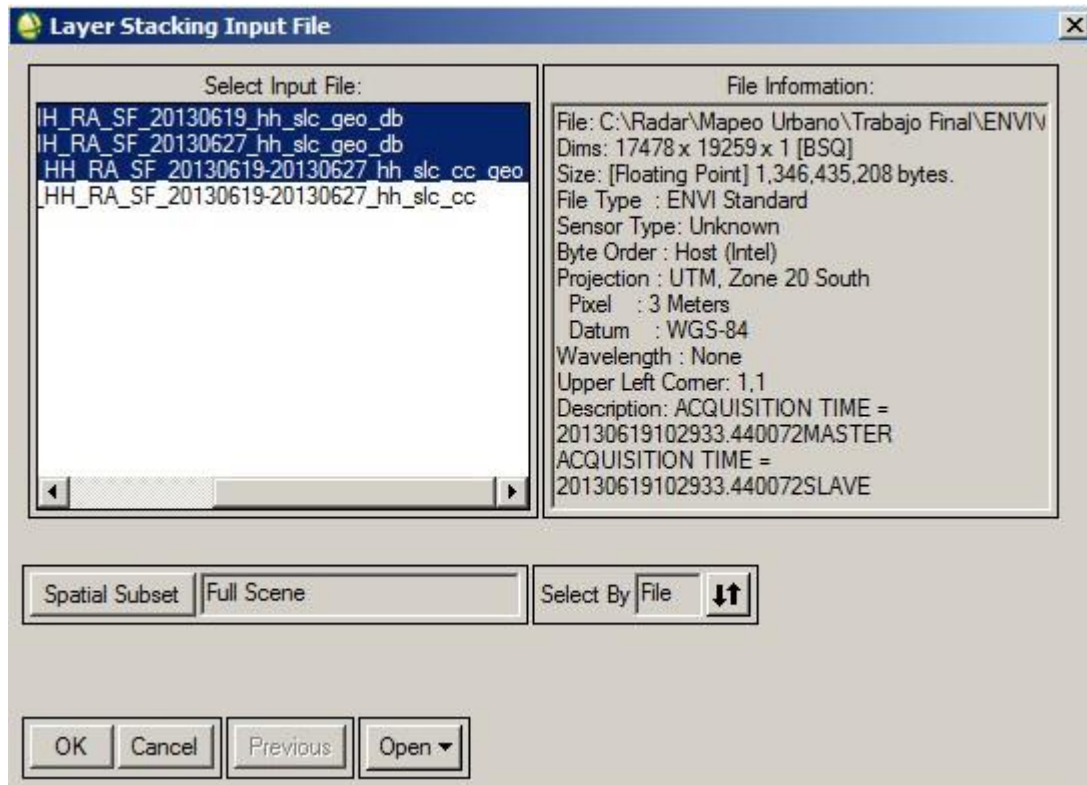


Figura 8. Selección de imágenes para el agrupamiento espacial de los resultados parciales con su correspondiente recorte de datos

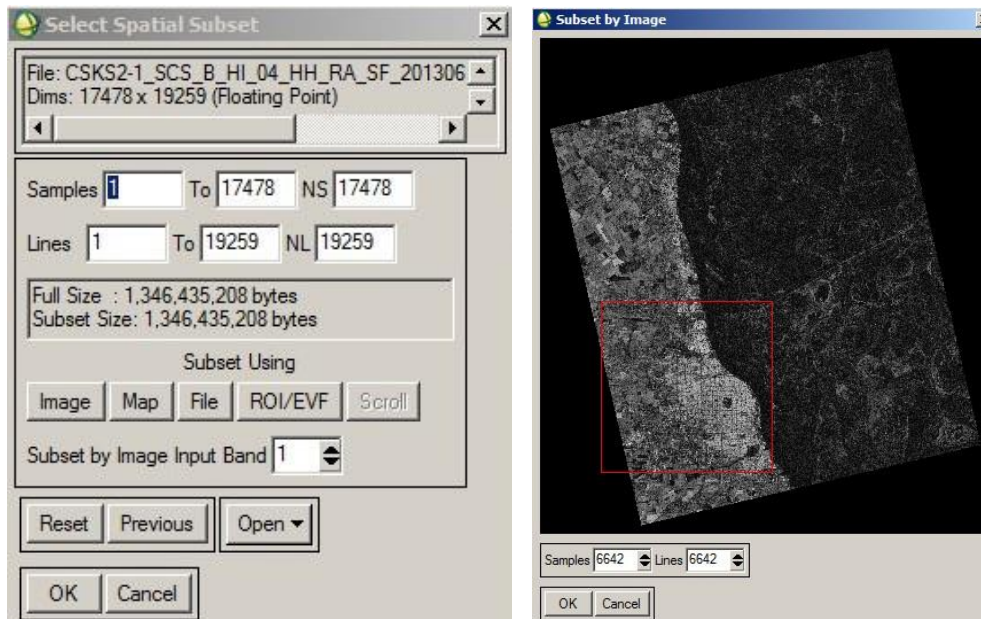


Figura 9. Selección espacial para el recorte de datos

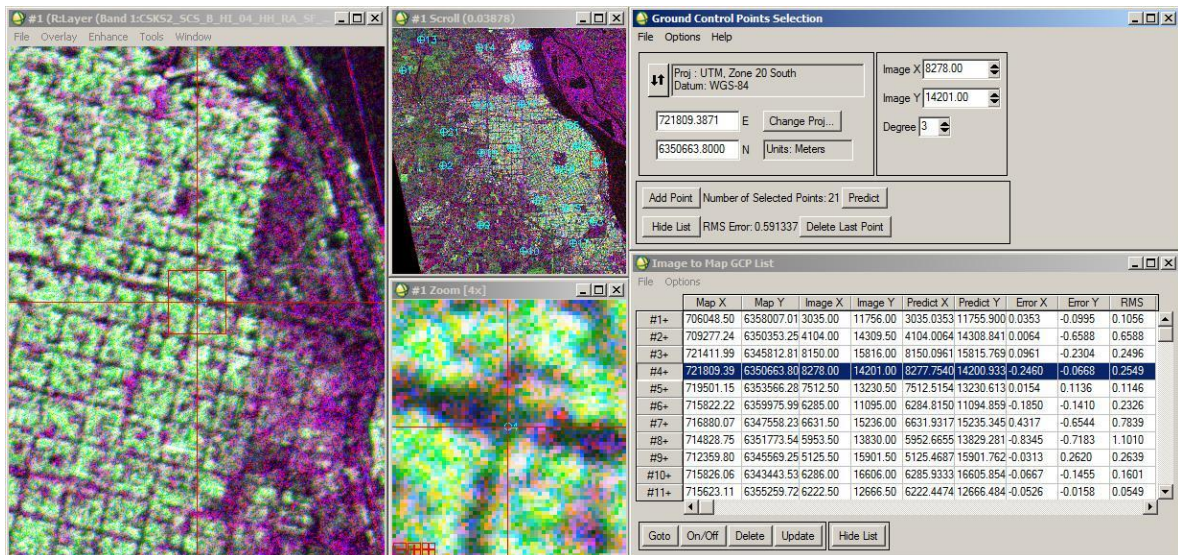


Figura 10. Ajuste x, y al vectorial ejes de calles.

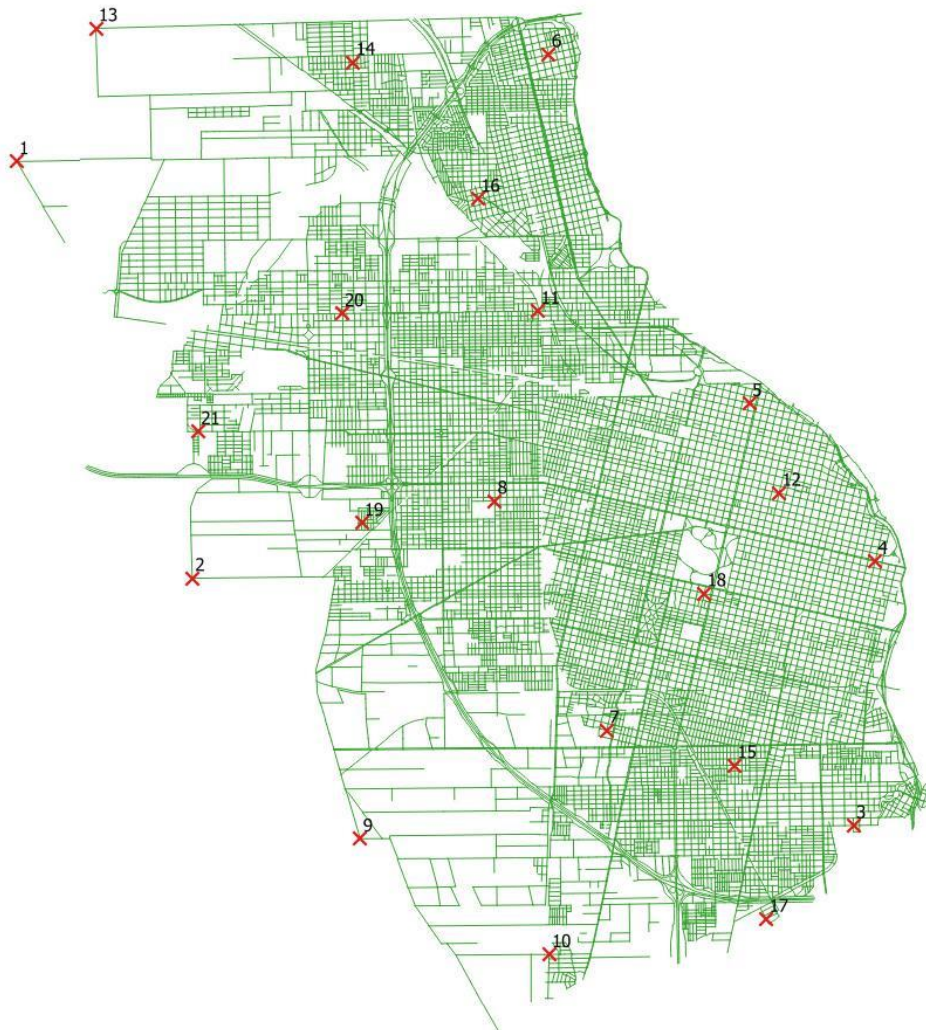


Figura 11. Representación de los 21 puntos tomados para el ajuste.

Tabla 1. Coordenadas de los 21 puntos, sistema de proyección UTM Zona 20 Sur.

Punto N°	Map	
	x [m]	y [m]
1	706048.5	6358007.01
2	709277.24	6350353.25
3	721411.99	6345812.81
4	721809.39	6350663.8
5	719501.15	6353566.28
6	715822.22	6359975.99
7	716880.07	6347558.23
8	714828.75	6351773.54
9	712359.8	6345569.25
10	715826.06	6343443.53
11	715623.11	6355259.72
12	720047.86	6351917.63
13	707506.96	6360453.98
14	712231.78	6359830.75
15	719230.8	6346917.02
16	714524.53	6357319.47
17	719815.17	6344093.17
18	718675.41	6350073.91
19	712384.62	6351366.82
20	712022.69	6355214.7
21	709385.35	6353047.89

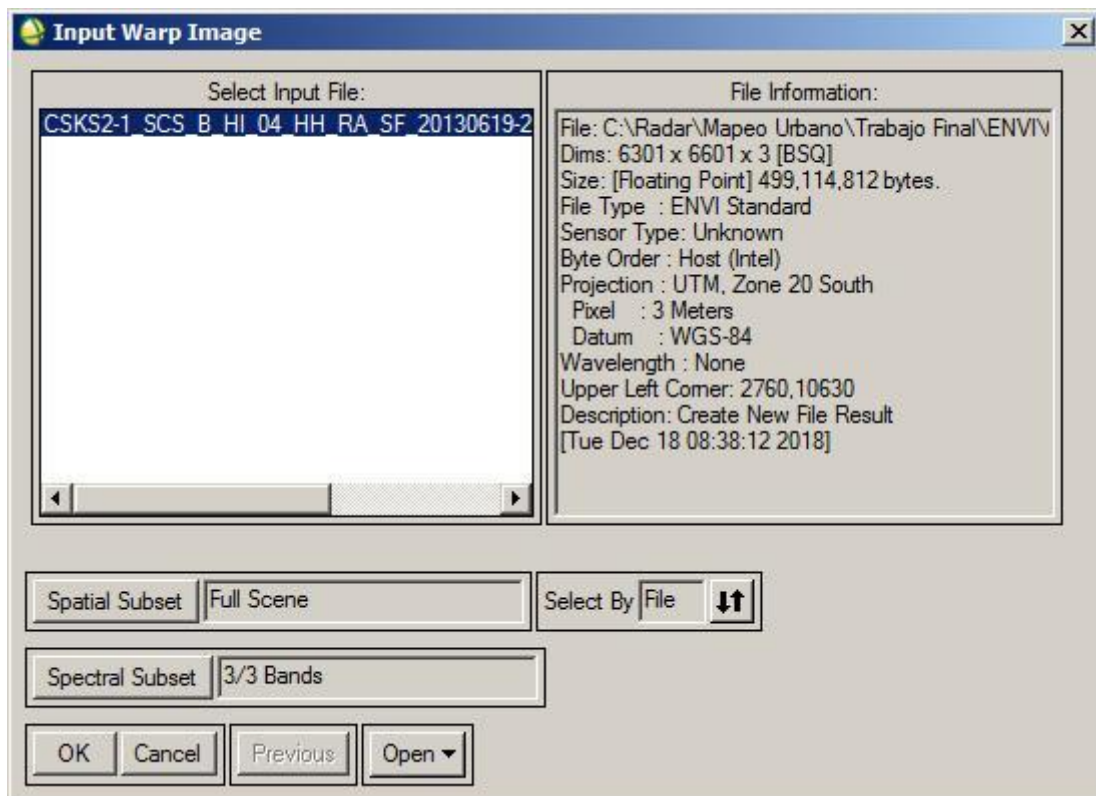


Figura 12. Selección del archivo de entrada para el ajuste x, y.

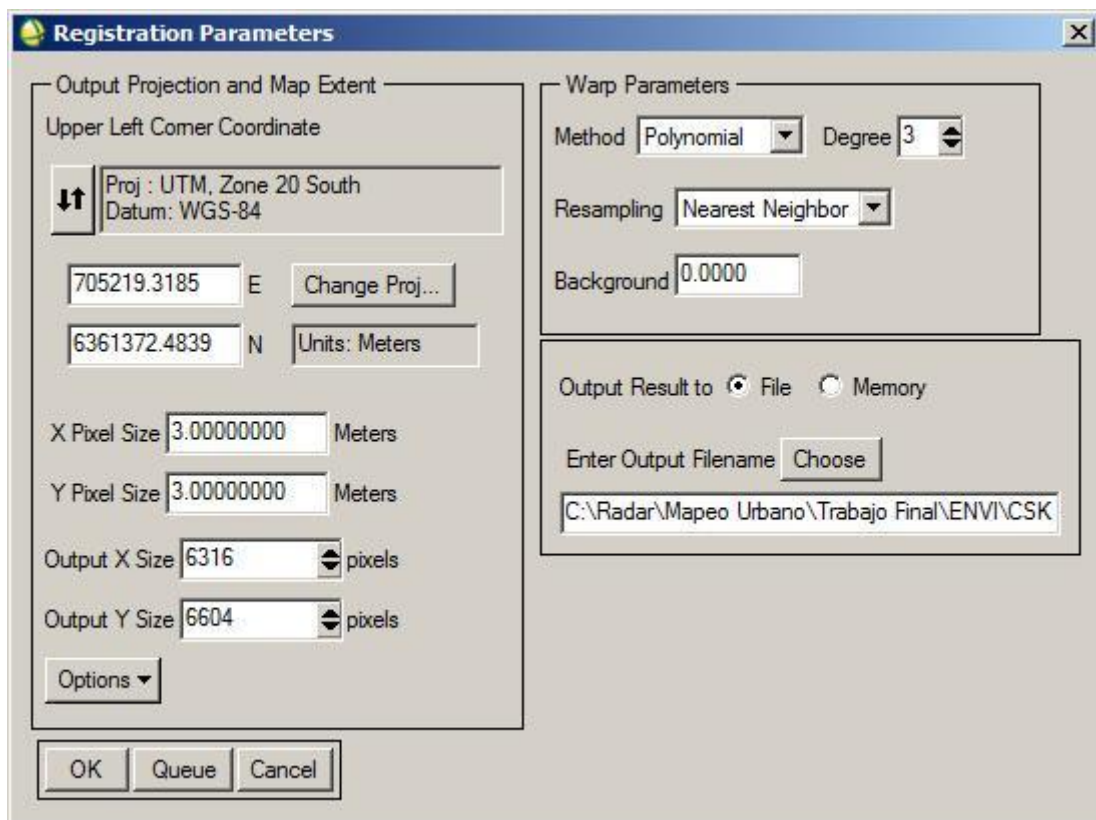


Figura 13. Parámetros de registraci3n para el ajuste en x, y.

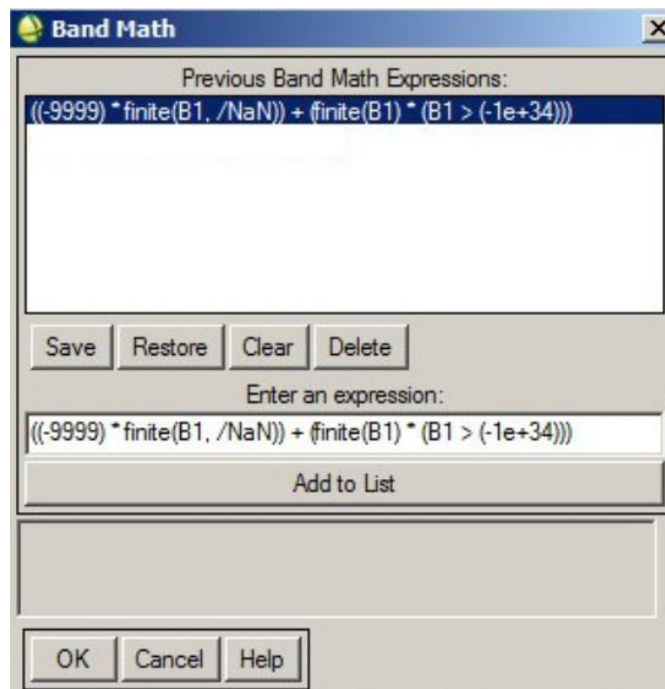


Figura 14. Ecuación utilizada para la depuración de datos.

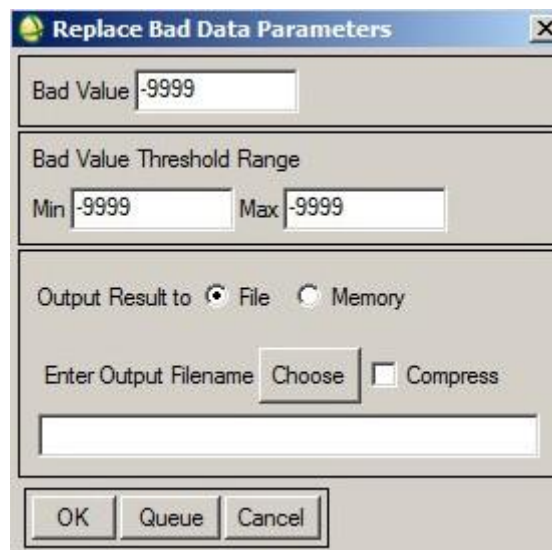


Figura 15. Reemplazo de los valores de los datos depurados.

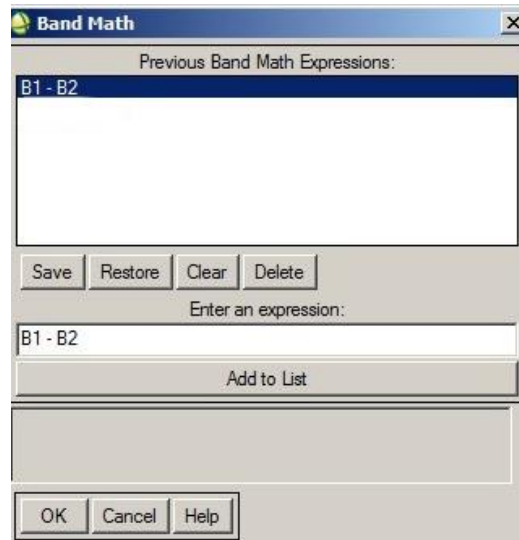


Figura 16. Operación matemática de diferencia.

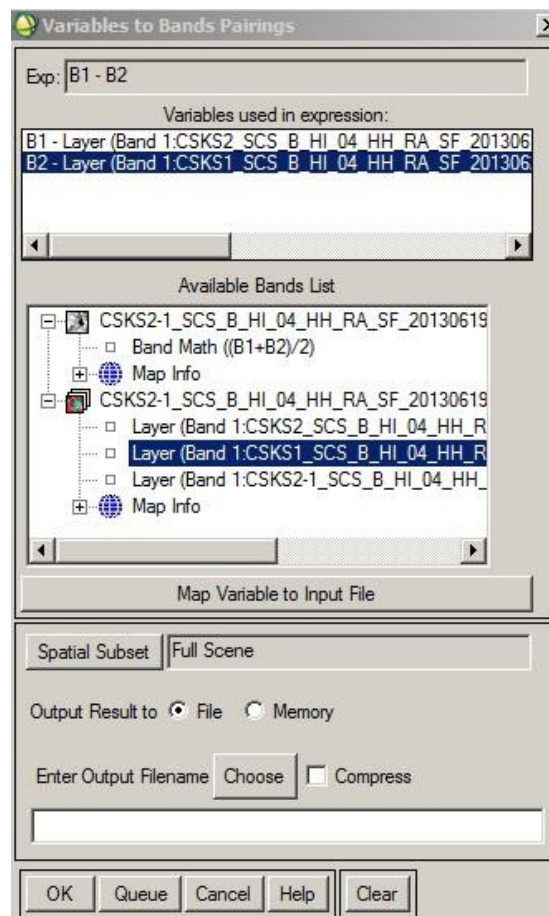


Figura 17. Selección de las bandas intervinientes en el cálculo de diferencia.

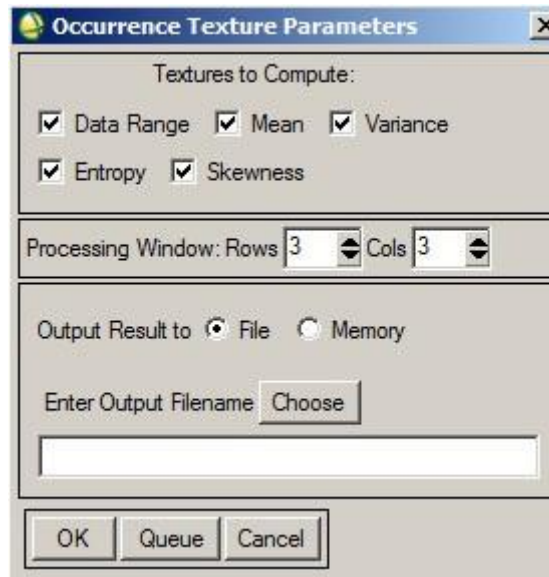


Figura 18. Análisis textural por matriz de ocurrencia.

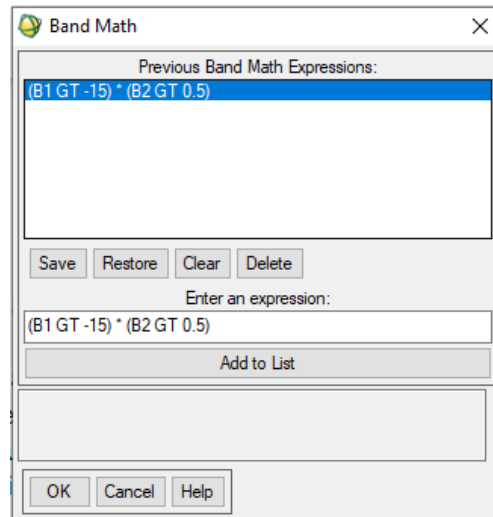


Figura 19. Cálculo de la Huella Urbana.

*Anexo 2: Resultados intermedios del preprocesamiento*

Tabla 1. Coeficientes del polinomio de grado 3.

; kx =			
3059.3222891741	-0.0240199309	0.0000075601	-0.0000000008
0.9616811461	0.0000278432	-0.0000000090	0.0000000000
0.0000124391	-0.0000000119	0.0000000000	-0.0000000000
-0.0000000012	0.0000000000	-0.0000000000	0.0000000000
;			
; ky =			
16611.0941859804	-0.9827490872	-0.0000069018	0.0000000007
0.0019063656	-0.0000145644	0.0000000041	-0.0000000000
-0.0000020586	0.0000000046	-0.0000000000	0.0000000000
0.0000000003	-0.0000000000	0.0000000000	-0.0000000000

Tabla 2. Detalle de los 21 puntos tomados para el correspondiente ajuste en x, y con su respectivo error y el error total.

Map		Image		Predict		Error		RMS Error [m]
x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	
706048.50	6358007.01	3035.00	11756.00	3035.04	11755.90	0.04	-0.10	0.11
709277.24	6350353.25	4104.00	14309.50	4104.01	14308.84	0.01	-0.66	0.66
721411.99	6345812.81	8150.00	15816.00	8150.10	15815.77	0.10	-0.23	0.25
721809.39	6350663.80	8278.00	14201.00	8277.75	14200.93	-0.25	-0.07	0.25
719501.15	6353566.28	7512.50	13230.50	7512.52	13230.61	0.02	0.11	0.11
715822.22	6359975.99	6285.00	11095.00	6284.81	11094.86	-0.19	-0.14	0.23
716880.07	6347558.23	6631.50	15236.00	6631.93	15235.35	0.43	-0.65	0.78
714828.75	6351773.54	5953.50	13830.00	5952.67	13829.28	-0.83	-0.72	1.10
712359.80	6345569.25	5125.50	15901.50	5125.47	15901.76	-0.03	0.26	0.26
715826.06	6343443.53	6286.00	16606.00	6285.93	16605.85	-0.07	-0.15	0.16
Map		Image		Predict		Error		RMS Error

x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	x [m]	y [m]	[m]
715623.11	6355259.72	6222.50	12666.50	6222.45	12666.48	-0.05	-0.02	0.05
720047.86	6351917.63	7691.50	13782.50	7692.05	13782.28	0.55	-0.22	0.60
707506.96	6360453.98	3517.00	10935.00	3516.98	10935.08	-0.02	0.08	0.08
712231.78	6359830.75	5089.00	11144.50	5088.97	11144.44	-0.03	-0.06	0.07
719230.80	6346917.02	7418.00	15448.00	7418.25	15448.58	0.25	0.58	0.63
714524.53	6357319.47	5855.50	11979.50	5856.04	11980.16	0.54	0.66	0.85
719815.17	6344093.17	7619.50	16387.50	7619.35	16387.61	-0.15	0.11	0.19
718675.41	6350073.91	7233.50	14397.00	7232.88	14397.46	-0.62	0.46	0.78
712384.62	6351366.82	5137.00	13964.50	5137.60	13965.37	0.60	0.87	1.06
712022.69	6355214.70	5021.00	12681.00	5020.89	12680.08	-0.11	-0.92	0.93
709385.35	6353047.89	4141.50	13405.50	4141.33	13406.29	-0.17	0.79	0.81
Total RMS Error								0.591337

Las coordenadas de la columna Map, corresponden al sistema de proyección UTM Zona 20 Sur, las de la columna Image representa las coordenadas imagen fila columna, mientras que las de Predict son las que calcula el software en base al algoritmo de transformación creado en base a los GCP ingresados. Luego el Error de la tercera columna refleja tal diferencia y la última cuantifica su módulo. Por último, se referencia el error medio cuadrático total del algoritmo.

Algunas de las interpretaciones a la composición RGB:

- Áreas de alta coherencia: coherencia estable entre dos adquisiciones. Por ejemplo: áreas urbanas, suelo desnudo.
- Áreas de baja coherencia: cambios en la retrodispersión percibida entre dos adquisiciones. Por ejemplo: áreas forestadas irregulares.
- Alta retrodispersión: provocado por el doble rebote generado por los volúmenes. Por ejemplo: áreas urbanas y forestadas.
- Baja retrodispersión: cuando el rebote es único. Por ejemplo: agricultura, suelo desnudo.

De acuerdo con el comportamiento de la señal retrodispersada, se puede inferir que la composición RGB permite interpretar tales manifestaciones:

- Las áreas rojas son las de baja retrodispersión pero alta coherencia tal como es el caso de la agricultura y suelo desnudo.
- Las áreas amarillas son aquellas de donde se percibe una alta retrodispersión con un alto grado de coherencia, característica que responde a las áreas urbanas.

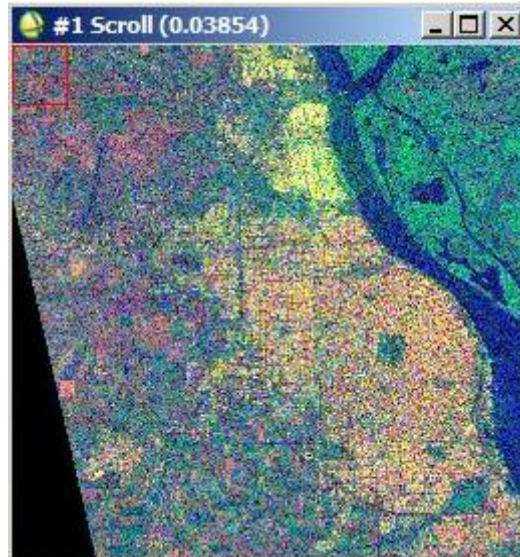


Figura 1. Composición RGB (Rojo: imagen de Coherencia; Verde: imagen de Promedio; Azul: imagen de Diferencia).

### Anexo 3: Parámetros de procesamiento en QGIS

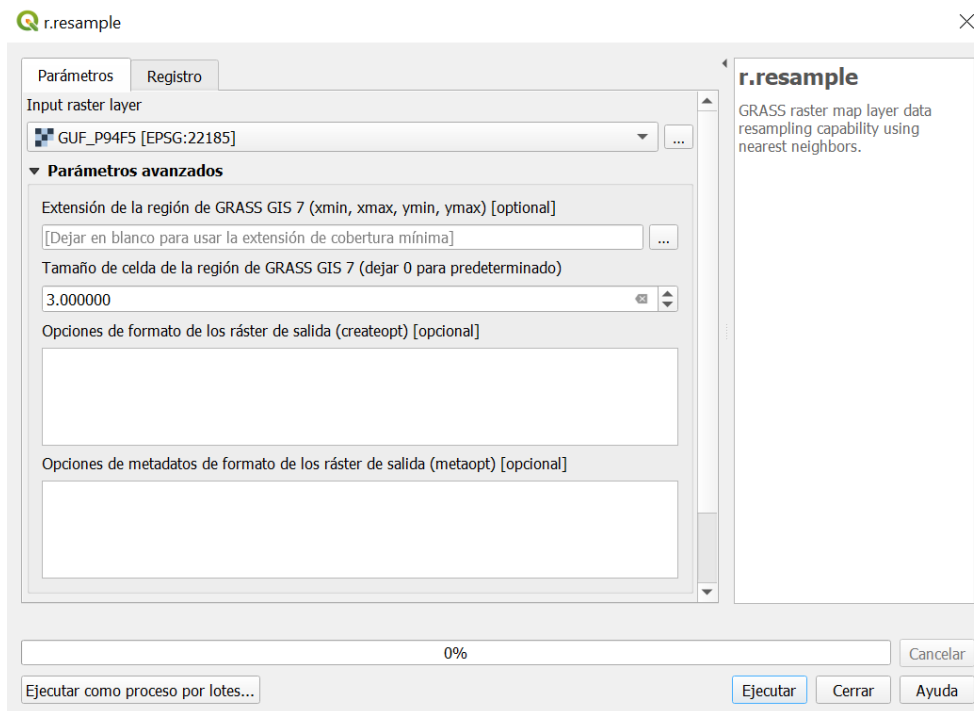


Figura 1. Resamplero del producto GUF.

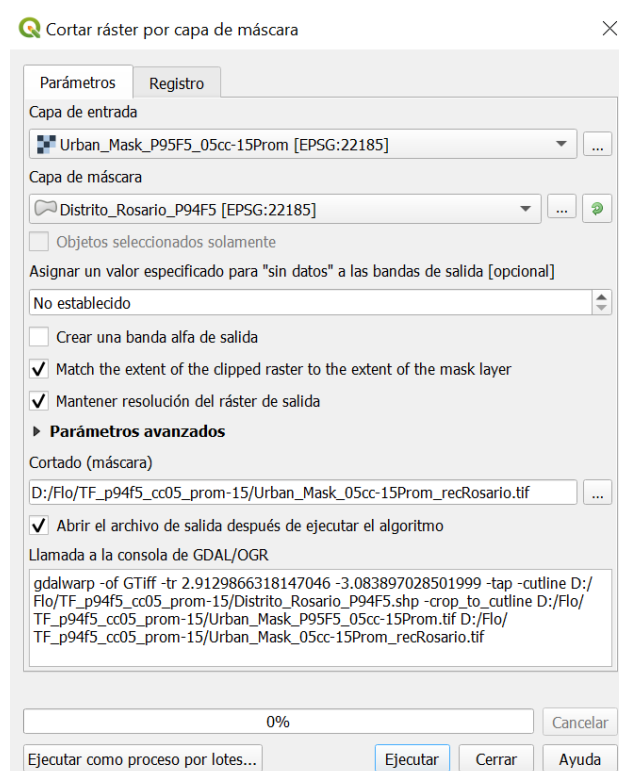


Figura 2. Recorte de datos ráster a los límites del área de estudio.

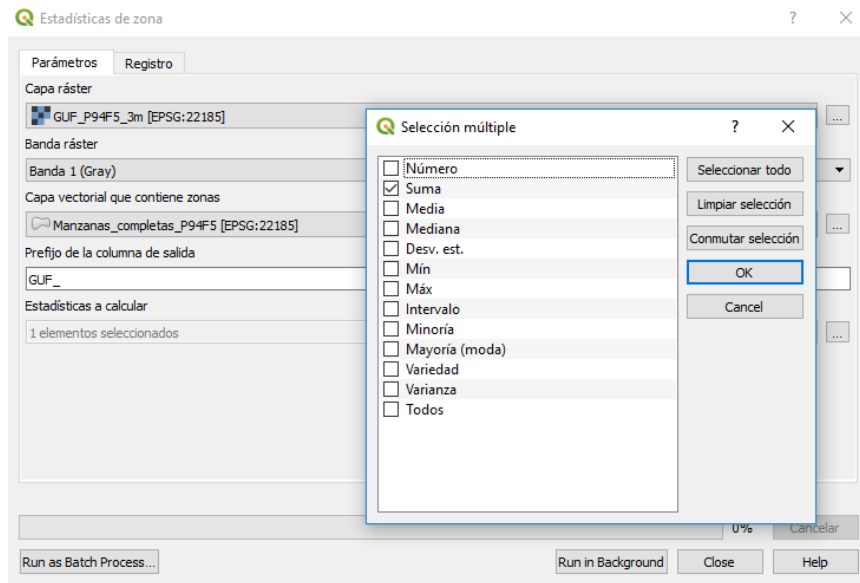


Figura 3. Cuantificación de la cantidad de pixeles que contiene cada unidad de análisis espacial. Opción *suma*: cuenta el valor de cada pixel incluido dentro de cada unidad.

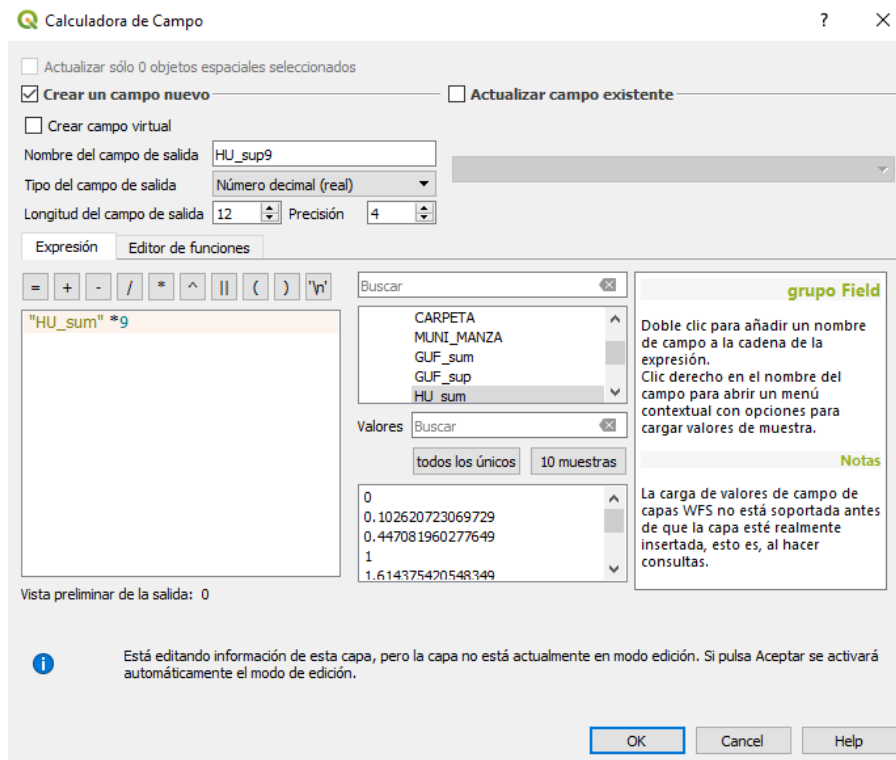


Figura 4. Calculo la superficie urbanizada identificada por la máscara dentro de cada unidad de análisis espacial. Superficie de cada pixel: 9 m<sup>2</sup>.

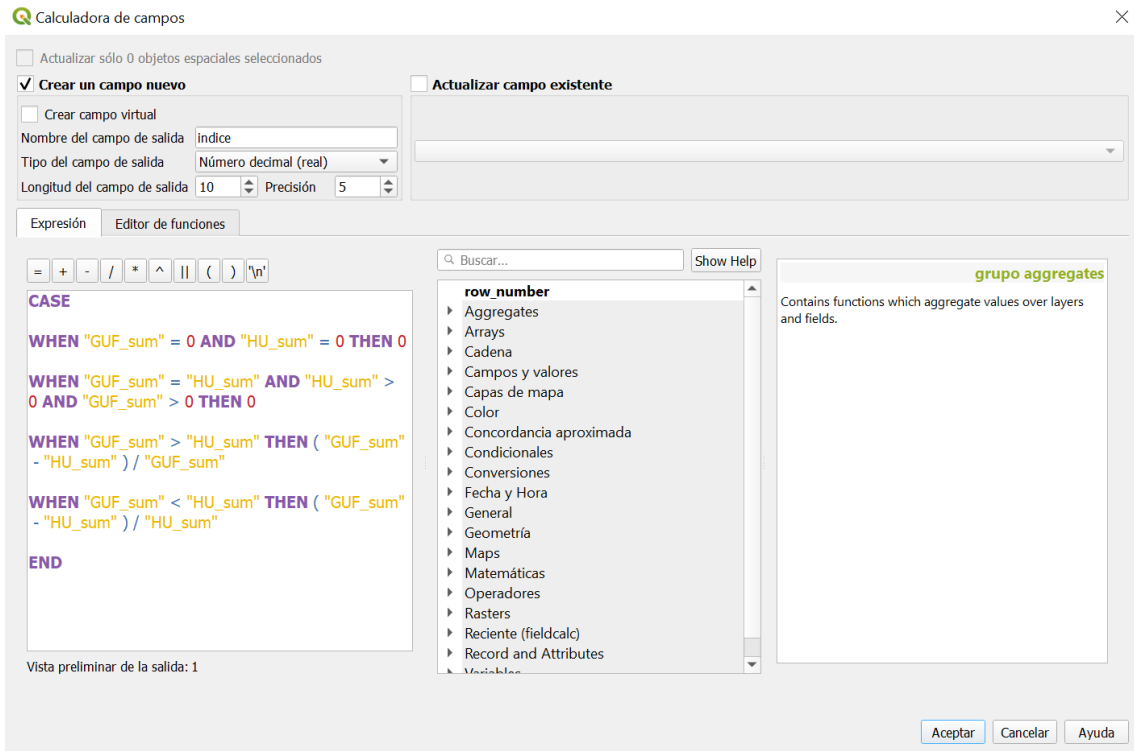


Figura 5. Algoritmo utilizado para la obtención del índice.

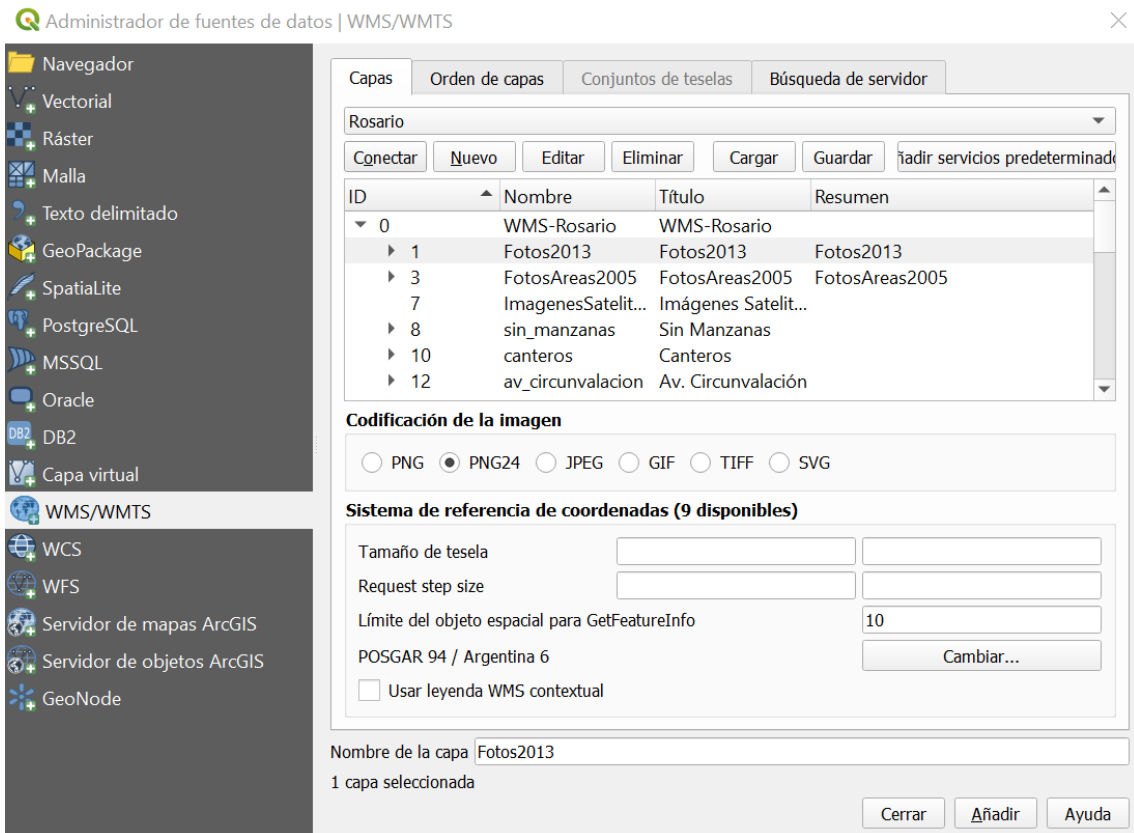


Figura 6. Carga de datos WMS.