

APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN PARA EL ESTUDIO DE LOS PRIMEROS ASENTAMIENTOS ESPAÑOLES EN EL RÍO DE LA PLATA

APPLICATIONS OF REMOTE SENSING FOR THE STUDY OF THE FIRST SPANISH SETTLEMENTS IN THE RÍO DE LA PLATA

Sánchez Granel, A., Cappa, C.¹

1. INTRODUCCIÓN

En los años 70, se desarrollaron una serie de satélites enfocados a estudios medioambientales y de prospección de recursos con una mayor resolución espacial que los satélites meteorológicos empleados hasta entonces. La misión pionera fue LANDSAT, cuyo primer satélite fue conocido como Earth Resources Technology Satellite (ERTS) que superó todas las expectativas en relación con la calidad de la información y sus aplicaciones. Esto permitió los primeros intentos de aplicar la teledetección por satélite en la prospección arqueológica, ya que se venía aplicando con éxito la fotografía aérea,

Las imágenes disponibles de mejor resolución espacial eran las proporcionadas por el sensor MSS (Multi-Spectral Scanner) a bordo de los LANDSAT 1 y 2, cuya resolución espacial era de 79 m. Esta resolución constituía una limitación para el empleo en arqueología. Recién en 1982 con el satélite LANDSAT 3, equipado con el sensor Thematic Mapper con una resolución espacial nominal de 30 m, fue posible utilizar estas imágenes en una arqueo-

¹ Instituto de Medio Ambiente y Ecología (IMAE). Universidad del Salvador, Buenos Aires, Argentina. granel.sanchez@usal.edu.ar

logía regional, convirtiéndose en una herramienta de localización y diagnóstico no destructiva para el estudio y la investigación en arqueología. La espectrometría de imágenes ya sea óptica o radar, es una de las técnicas de especial aplicación en exploración, prospección y registro remoto del terreno con fines arqueológicos dentro de la amplia gama de acciones que abre esta tecnología (Deroin *et al.* 2012; Ruiz Gálvez *et al.* 2011; Rejas *et al.* 2009; 2010).

En particular el empleo de la teledetección en el infrarrojo para la localización de restos arqueológicos se basa en que la presencia de restos arqueológicos en el subsuelo causa una serie de anomalías térmicas que pueden ser detectadas por equipos de barrido infrarrojo (Perisset y Tabbagh, 1981). Tanto en Francia (Tabbagh, 1984 y 1992) como en Italia (Baggio *et al.*, 1988), se usaron equipos de barrido infrarrojo aerotransportado con una resolución espacial inferior a 1 m que permitió la localización de numerosos yacimientos antes desconocidos. La región del espectro electromagnético de alta frecuencia, como los rayos cósmicos, rayos gamma y rayos X, rayos UV (entre los 300 Å y los 0.4 mm), se ha utilizado muy poco en Teledetección en Arqueología fundamentalmente por una incompatibilidad con la resolución espacial de estos sensores. Los intervalos de longitudes de onda más utilizados son los correspondientes a la región óptica formada por la radiación visible e infrarroja y la región de las microondas. El espectro visible va desde los 0.4 mm a los 0.7 mm, la región infrarroja va desde los 0.7 mm a los 100 mm, y puede dividirse en dos, la reflejada desde los 0.7 mm a los 3.5 mm, dividida a su vez en *Near Infrared-NIR*, *Short Wave Infrared-SWIR* y *Medium Wave Infrared-MWIR* y la térmica de los 3.5 mm a los 14 mm, o *Thermal Infrared-TIR*. Respecto a la región de las microondas, de 1 mm (300 GHz de frecuencia) a 1.5 m, cada vez más se está utilizando en prospección espacial o sobre el terreno (Rejas *et al.*, 2006; Weller 2006).

En este trabajo se utilizaron imágenes de Alta Resolución Espacial, que fueron provistas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), la cual a partir de Febrero del 2023 sumó a sus servicios satelitales imágenes de alta resolución espacial, con un detalle que va de 0,30 a 1,5 metros, útiles para el análisis territorial, y en particular para nuestro caso, la prospección arqueológica. Las mismas estuvieron disponibles mediante la firma del Convenio firmado entre la CONAE y la Universidad del Salvador el 5 de Agosto del 2022. Las imágenes fueron provistas por la empresa francesa Airbus y procesadas por la agencia espacial nacional. El servicio se extenderá hasta junio 2024 e incluye imágenes actualizadas de las misiones satelitales Spot, con una resolución espacial de 1,5 metro; Pléiades, de 0,5 m, y Pléiades NEO, de 0,3 m.

El trabajo de investigación está focalizado en los restos arqueológicos de los primeros asentamientos españoles en el Río de la Plata. Estos incluyen los primeros fuertes construidos durante la conquista sobre el Río Paraná en el Siglo XVI y aquellos posteriores construidos luego de la emancipación por el ejército en los Siglos XVII y XVIII en particular en la Provincia de Santa Fe.

1.1 Objetivo

Aportar a la geografía histórica y a la arqueología herramientas de localización y prospección de los sitios arqueológicos de los primeros asentamientos españoles en el Río de la Plata, mediante la teledetección con imágenes de Alta Resolución Espacial.

1.2 Objetivos específicos

- Recopilar las investigaciones realizadas en el área de estudio, sobre la aplicación de la Teledetección para la búsqueda de restos arqueológicos y las metodologías utilizadas.
- Recopilar los antecedentes de las exploraciones arqueológicas sobre los primeros asentamientos realizadas en la zona de estudio y analizar la morfología y materialidad de los restos hallados.
- Detectar por medio de imágenes satelitales de Alta Resolución Espacial, rastros antrópicos del pasado, obtener firmas espectrales de los restos arqueológicos e índices indicativos de la materialidad utilizada.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el caso de aplicación de la teledetección al campo de la Geografía Histórica y la Arqueología, cabe mencionar que el principio de detección remota se utiliza para la identificación, análisis e interpretación de objetos, rasgos y/o contextos culturales o naturales que permitan obtener, de manera directa o indirecta, información resultante de actividades socio-culturales pasadas (Bognanni, 2012). Para la presente investigación, nos basamos en la metodología utilizada por el equipo de investigación formado por Fabián Bognanni de la Universidad Nacional de Luján y Mónica P. Valentini, Mariano Darigo, Matías Warr y María Lara Moschetoni de

la Universidad Nacional de Rosario, en el trabajo titulado: Teledetección espacial aplicada a la búsqueda de restos de la Estancia San Miguel del Carcarañá y publicado por la Revista Teoría y Práctica de la Arqueología Histórica Latinoamericana, ISSN: 2250-866X (impreso) | ISSN: 2591-2801 (en línea) Año VI, Volumen 6, 2017. La idea es recrear mediante las imágenes utilizadas en dicho trabajo de investigación, las mismas condiciones y procesamiento de las imágenes de manera de poder detectar los rasgos antrópicos detectados en el mismo y de esa manera replicar la metodología en los posibles sitios de interés donde históricamente se podrían localizar los primeros asentamientos españoles. La aplicación de este conjunto de técnicas es una herramienta de ayuda que con el avance de la tecnología mejora los procedimientos de localización de sitios desaparecidos, pero de ninguna manera debe tomarse como la panacea el análisis espacial en la geografía histórica y la arqueología, aunque a lo largo de las últimas décadas, ha demostrado ser muy útil y provechoso en las distintas instancias de investigación. Se deben tener en cuenta en cualquier investigación de este tipo donde se utilice la teledetección espacial, lo siguiente:

1. Cada problema de sitios históricos no encontrados es único y debe ser analizado con las imágenes que mejor se ajusten al tema de estudio, ya sea por la época de toma, las bandas que mejor reflejan los rasgos a resaltar y los filtros utilizados. No todas las imágenes son útiles debido a que los diferentes sensores (de los tantos satélites) tienen características técnicas distintas que pueden o no ajustarse a las necesidades de la investigación. En este contexto es importante resaltar las diferencias en las escalas de análisis y las consecuentes posibilidades de resolución de cada sensor (espacial, temporal, radiométrica y espectral).

2. No se puede prescindir del trabajo de campo para poder verificar y contrastar los rasgos obtenidos en las imágenes.

Teniendo en cuenta estos recaudos, se presentan los materiales utilizados y el método y técnicas aplicadas.

2.1 *Materiales*

En la primera etapa de la investigación se utilizó como material aquellas imágenes satelitales de libre disponibilidad cuya más alta Resolu-

ción espacial ronda en los 2,7 m para las imágenes del Satélite Chino-Brasileño CBERS 2B, en particular para el replanteo del trabajo realizado sobre la Estancia San Miguel del Carcarañá en la Provincia de Santa Fe (Bognanni *et al.*, 2017). También se bajaron imágenes LANDSAT, SENTINEL, CBERS 4A para un análisis más regional y las imágenes hiperespectrales de los sensores Hyperion y Ali del satélite EO-1, de las cuales no había disponibilidad de la zona de estudio antes citada, pero si en parte de zonas aledañas y de muy baja resolución espacial. Luego de la firma del Convenio entre la CONAE y la Universidad del Salvador el 5 de Agosto del 2022, se pudieron disponer las imágenes Spot 6 y 7 con resoluciones de 1,5 m en el Pancromático y 6 m en el Multiespectral, donde se pudieron obtener mayores resultados para la identificación de rasgos culturales.

Las imágenes LANDSAT, SENTINEL, CBERS, EO1 (HYPERION y ALI), fueron bajadas de los sitios que tienen acceso público previa registración como la Sociedad Geológica de USA (USGS), el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil (INPE) y de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Las imágenes SPOT fueron bajadas de la CONAE, mediante el Convenio Específico CONAE-USAL. Los softwares utilizados para el procesamiento de las imágenes son el SOPI de la CONAE y el QGIS 3.16.16, ambos de acceso libre.

Como se dijo anteriormente de manera de poder educar el ojo para la detección de rasgos antrópicos del pasado y entrenarnos en la utilización de los distintos filtros y clasificaciones provistas por los softwares, se intentó recrear el trabajo realizado por Bognanni et al (2017), utilizando las mismas imágenes en las mismas fechas y tratando de aplicar la metodología de filtrado del mismo. Los resultados obtenidos (obviamente sin disponer de toda la información que dispusieron sus autores, sino solamente su informe) en la Zona de Interés 1, donde se supone que había una iglesia de los Jesuitas de la Estancia San Miguel del Carcarañá, aplicando un filtro laplaciano a imágenes del satélite CBERS2B, se logró poder delinear el contorno de la misma. También con las mismas imágenes se detectaron algunos rasgos lineales que podrían ser de antiguos cultivos realizados por los jesuitas y que se detallan también en ese trabajo de investigación (Figura 1).

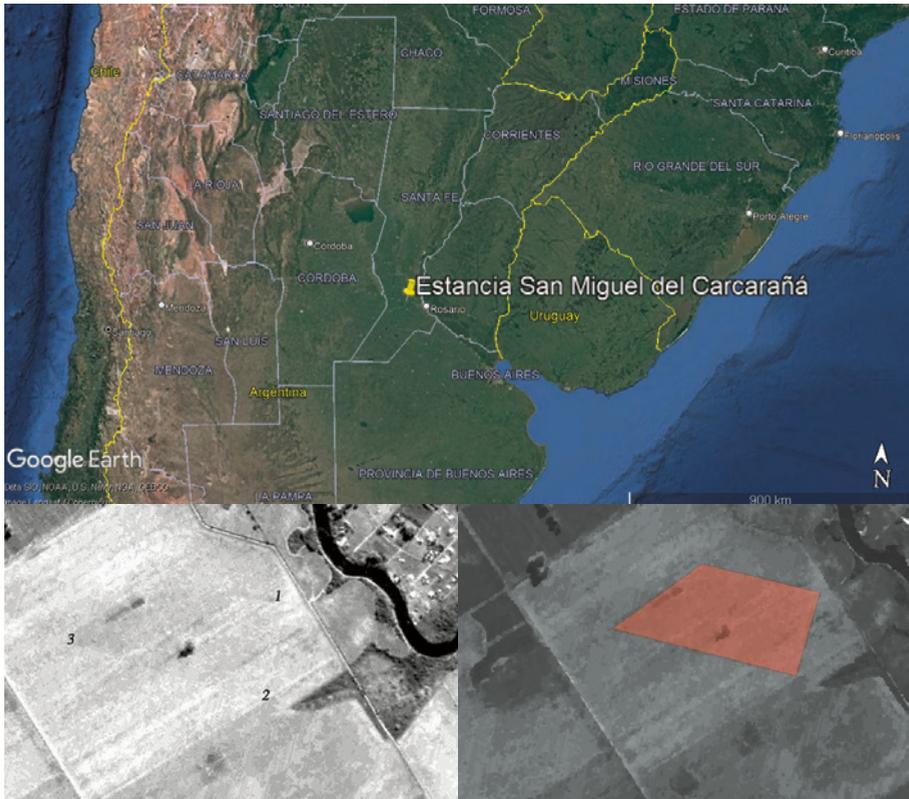


Figura 1. Reconstrucción de los rastros de una antigua iglesia jesuita. Fuente: imagen izquierda Bognanni et al, imagen derecha investigación propia.

En la segunda etapa de la investigación se pudo disponer de las imágenes Pléiades, de 0,5 m, y Pléiades NEO, de 0,3 m de resolución espacial, óptimas para este tipo de investigación donde se pueden discriminar restos de cimientos de construcciones dentro de esa escala. Además nos anunciamos que en el marco del proyecto arqueológico «Entornos a Melincué: Construcción de pasados y territorialidades desde la Laguna Melincué» en Agosto del 2022, desarrollado por el Área de Antropología y Paleontología del Museo Provincial de Ciencias Naturales «Dr. Ángel Gallardo» de Rosario y el Centro de Estudios Interdisciplinarios en Antropología de la Facultad de Humanidades y Artes de la Universidad Nacional de Rosario (UNR), se realizaron distintas prospecciones en diferentes sectores de la laguna de Melincué en el suroeste de la Provincia de Santa Fe. En esa campaña se encontraron los restos del fuerte San Juan Bautista de Melincué, el cual surge a instancias de la creación del Virreynato del Rio de la Plata en el año 1776, con el propósito de

intentar garantizar un control más efectivo de estos espacios. Con este propósito, se erigieron una serie de fuertes y fortines que constituyeron la línea de continuación de la frontera norte de la Provincia de Buenos Aires, tales como: Melincué, India Muerta y Pavón, reconstruyéndose también el de Guardia de la Esquina.

Del intercambio de información con el citado grupo de investigación, se logró disponer de la ubicación de una serie de fortines del Siglo XVIII, con los cuales se pudieron estudiar sus rasgos morfológicos, texturas, firmas espectrales, etc.

En la Tabla 1 se detalla el material utilizado para la investigación y sus características técnicas.

Tabla 1.

Catálogo de Imágenes Satelitales utilizadas en la investigación.

Satélites	LANDSAT 8	SENTINEL 2A	CBERS2B	CBERS4A	SPOT7	EO-1	EO-1	PLEIADES 1 y 2
Sensor	OLI -TIRS	MSI	HRC	WFI	MS	HYPERION	ALI	NEO
Fecha	12/10/2019 y 28/09/2020	12/05/2019 y 01/05/2020	8/5/2009	26/11/2022	12/7/2018	18/7/2002	18/7/2002	09/2022 al 09/2023
Resolución Radiométrica	8 bits	12 bits	8 bits	8 bits	12 bits	8 bits	8 bits	12 bits
Resolución Temporal	16 días	10 días	130 días	3 a 5 días	26 días			26 días
Resolución Espacial	15 m y 30 m	10 m y 60 m	2,7 m	55 m	1,5 m	30 m	30 m	0,30 m y 0,50 m
Resolución Espectral (Pan)	0,50-0,68 µm	no tiene	0,50-0,80 µm		0,45-0,74 µm	0,40 -2,5 µm		0,47 -0,83 µm
Ancho de faja	185 Km	290 Km	27 Km	684 Km	60 Km	7,5 Km		20 Km
Banda 1	0,43-0,45 µm	0,43-0,45 µm				220 bandas	0,43-0,45 µm	0,40-0,45 µm
Banda 2	0,45-0,51 µm	0,45-0,52 µm		0,45-0,52 µm	0,45-0,52 µm		0,45-0,51 µm	0,45-0,52 µm
Banda 3	0,53-0,59 µm	0,54-0,57 µm		0,52-0,59 µm	0,53-0,59 µm		0,53-0,59 µm	0,53-0,59 µm
Banda 4	0,64-0,67 µm	0,65-0,68 µm		0,63-0,69 µm	0,63-0,69 µm		0,64-0,67 µm	0,62-0,69 µm
Banda 5	0,85-0,88 µm	0,69-0,71 µm		0,77-0,89 µm	0,76-0,89 µm		0,85-0,88 µm	0,70-0,75 µm
Banda 6	1,57-1,65 µm	0,73-0,74 µm					1,57-1,65 µm	0,77-0,88 µm
Banda 7	2,11-2,29 µm	0,77-0,79 µm					2,11-2,29 µm	
Banda 8	0,50-0,68 µm	0,78-0,90 µm					0,50-0,68 µm	
Banda 8A		0,85-0,87 µm					1,36-1,38 µm	
Banda 9	1,36-1,38 µm	0,93-0,95 µm					10,60-11,19 µm	
Banda 10	10,60-11,19 µm	1,36-1,39 µm						
Banda 11	11,50-12,51 µm	1,56-1,65 µm						
Banda 12		2,10-2,28 µm						

2.2 Métodos

El siguiente paso de la investigación consistió en la recopilación de las firmas espectrales de los principales materiales utilizados para la construcción de los primeros asentamientos españoles, ya sea para las casas, las fortificaciones y empalizadas. La idea se enfoca en la medida de lo posible en la utilización de

imágenes en particular en las bandas del infrarrojo para poder afinar la reflectancia de dichos materiales y así poder identificar algunos rasgos del pasado.

2.2.1 Análisis de los restos del Fuerte de Melincué

Para poder analizar los rasgos de los cimientos del Fuerte de Melincué se utilizó la información del sitio arqueológico provista por el Grupo de Investigación de la UNR-Museo Gallardo, la ubicación mediante una imagen de Google Earth y fotos de la campaña (Figura 2), respecto a los materiales y la estructura se pueden ver en fotos de la época (Figura 3). Según las investigaciones los cimientos de la iglesia y de la comandancia se realizaron con ladrillos de adobe cocido de 0,40 x 0,20 x 0,05 m, lo mismo que los pilares del puente elevadizo de las puertas de entrada. El perímetro del fuerte tenía una fosa alrededor de 4 m de ancho por 2 m de profundidad y en su interior las empalizadas del fuerte hechas con palo de Ñandubay.



Figura 2. Ubicación de los restos del Fuerte de Melincué. Fuente: Grupo de Investigación de la UNR-Museo Gallardo.



Figura 3. Fotos del Fuerte de Melincué. Fuente: Grupo de Investigación de la UNR-Museo Gallardo.

Los restos del fuerte estuvieron durante más de 200 años debajo del agua de la Laguna de Melincué, la cual debido a obras hidráulicas y la sequía de los años 2020-2021 y 2022, quedaron al descubierto.

Por sus características y estado de conservación, este sitio se utilizó como modelo para poder obtener las firmas espectrales que caracterizan los cimientos de adobe que se utilizaron en la construcción de dichos fuertes y de esta forma replicar esta metodología en otros sitios de similares características. En la imagen que se puede obtener del Google Earth no se logra ver el sitio debido a la resolución espacial de las imágenes disponibles en ese lugar (Figura 4).



Figura 4. Ubicación con zoom en el Google Earth.

El análisis se realizó con las imágenes del satélite Pléiades NEO, de 0,5 m de resolución espacial en el multiespectral:

IMG_PNEO4_202307271412149_MS-FS_ORT_PWOI_000111489_1_2_F_1_NED_R1C1

y

IMG_PNEO4_202307271412149_MS-FS_ORT_PWOI_000111489_1_2_F_1_RGB_R1C1

Y la imagen de 0,3 m en el pancromático:

IMG_PNEO4_202307271412149_PAN_ORT_PWOI_000111489_1_2_F_1_P_R1C1

Dichas imágenes fueron obtenidas mediante el Convenio CONAE-USAL.

Los productos Pléiades fueron corregidos radiométricamente frente a distorsiones o irregularidades mediante calibración interna de los sensores y mediciones de altitud y se realizó una corrección de ruido para la imagen pancromática. Se corrigió su geometría y luego se georreferenció el ráster con el sistema de referencia de coordenadas WGS 84. A continuación se hizo una ortorectificación en la que se corrigieron los ángulos de perspectiva de la adquisición de la imagen sobre el suelo, restaurando una vista completamente vertical y perpendicular a la zona capturada. A las imágenes utilizadas no se les aplicó otra corrección radiométrica, sino que se mantuvieron los valores de reflectancia a tope de atmósfera. Para su distribución, se efectuó un apilado de bandas a elección del usuario. En el caso de los productos utilizados en este trabajo, se solicitó su descarga completa, es decir, la imagen pancromática y por otro lado, una imagen en color real y otra con las bandas restantes.

A dichas imágenes se le realizaron algunos realces y se le aplicaron algunos estilos de contraste, brillo saturación y gama de manera de poder mejorar y resaltar los rasgos buscados. Luego se aplicaron algunos filtros pasa bajos, pasa altos, laplaciano y una serie de sumas, restas y divisiones de las bandas donde se resaltaron más dichos rasgos a través de la herramienta del álgebra de bandas.

2.2.2 Análisis de los restos del Fuerte de India Muerta

Para poder analizar los rasgos de los cimientos del Fuerte de India Muerta se utilizó la ubicación del sitio arqueológico provista por el Grupo de Investigación de la UNR-Museo Gallardo, la ubicación mediante una imagen de Google Earth (Figura 5) y las imágenes Pleiade provistas por la CONAE. Similar al Fuerte de Melincué, el perímetro del fuerte tenía una fosa alrededor de 4 m de ancho por 2 m de profundidad y en su interior las empalizadas del fuerte hechas con palo de Ñandubay.

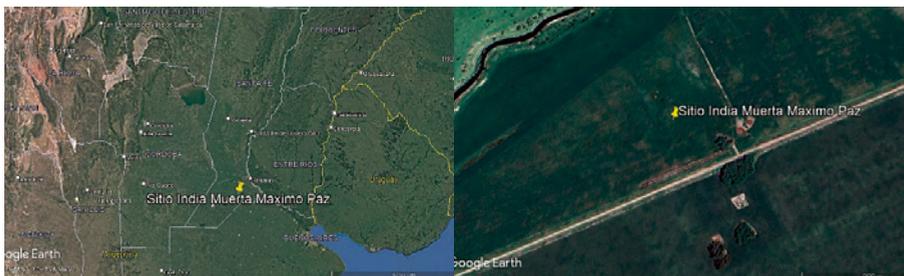


Figura 5. Ubicación de los restos del Fuerte de India Muerta. Fuente: Grupo de Investigación de la UNR-Museo Gallardo.

El análisis se realizó con las imágenes del satélite Pléiades, de 1,69 m de resolución espacial en el multispectral:

IMG_PHR1B_MS_202309141421254_ORT_6796775101-2_R1C1

y

IMG_PHR1A_MS_201909201413028_ORT_6861691101-2_R1C1

3. RESULTADOS

Dentro de los resultados presentamos las transectas realizadas sobre el contorno del sitio del Fuerte de Melincué y un gráfico de las reflectancias para cada banda y las firmas espectrales del interior, el contorno y el exterior del sitio. Por otro lado, del sitio del Fuerte India Muerta, se obtuvieron resultados mediante un análisis de las fechas de las imágenes teniendo en cuenta el período de sequía.

3.1 Resultados del Fuerte de Melincué

Primeramente, se trazó una serie de transectas sobre el contorno del Fuerte, de manera de poder establecer un perfil que reflejara las respuestas espectrales de las diferentes porciones del terreno. En todos los casos se abarcó terreno que cruzara de manera transversal el fuerte y se pudiera caracterizar la reflectancia en cada sector: tanto en el perímetro, como en las porciones de tierra que se encuentran por dentro y por fuera. A continuación, se muestra la transecta trazada (Figura 6) para la generación de los perfiles.

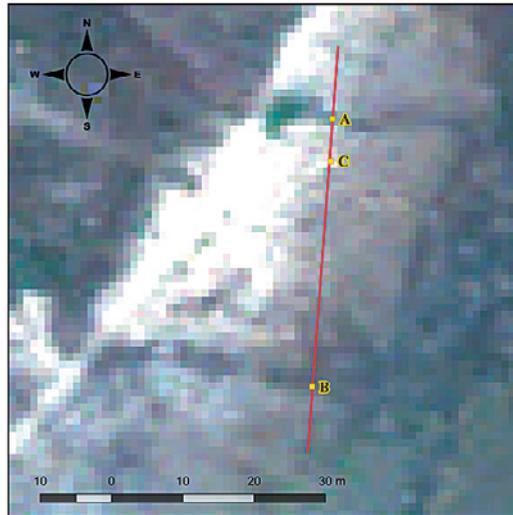


Figura 6. Transecta sobre contorno del Fuerte de Melincué (Imagen Pléiade Neo MS en combinación de color real). Fuente: Imagen satelital provista por la CONAE.

En este mapa se observan tres puntos que fueron el objetivo principal del análisis visual a partir de la respuesta espectral de cada píxel en el espacio.

Se construyeron los gráficos mediante el uso del complemento de QGIS Profile Tool utilizando la librería de gráficos Matplotlib. Se tomaron como insumo los valores de reflectancia calibrados, procesados y rectificadas tal como son distribuidos por la empresa Airbus en función de la longitud de la transecta trazada, medida en kilómetros. Se incorporaron las seis bandas con las que cuenta el producto en el mismo gráfico, identificadas mediante diferentes colores de acuerdo con la figura 7.

	Layer	Band/Field
	IMG_PNEO4_202307271412149_MS-FS_OR_T_PWOI_000111489_1_2_F_1_RGB_R1C1	1
	IMG_PNEO4_202307271412149_MS-FS_OR_T_PWOI_000111489_1_2_F_1_RGB_R1C1	2
	IMG_PNEO4_202307271412149_MS-FS_OR_T_PWOI_000111489_1_2_F_1_RGB_R1C1	3
	IMG_PNEO4_202307271412149_MS-FS_OR_T_PWOI_000111489_1_2_F_1_NED_R1C1	1
	IMG_PNEO4_202307271412149_MS-FS_OR_T_PWOI_000111489_1_2_F_1_NED_R1C1	2
	IMG_PNEO4_202307271412149_MS-FS_OR_T_PWOI_000111489_1_2_F_1_NED_R1C1	3

Figura 7. Referencia de colores utilizados en la realización de los gráficos de reflectancia por unidad de distancia.

A continuación (Figura 8) se observan tres gráficos indistintos en los que se observa la respuesta espectral de cada banda a lo largo de la transecta y se enfatiza cada uno de los puntos ubicados en la Figura 6.

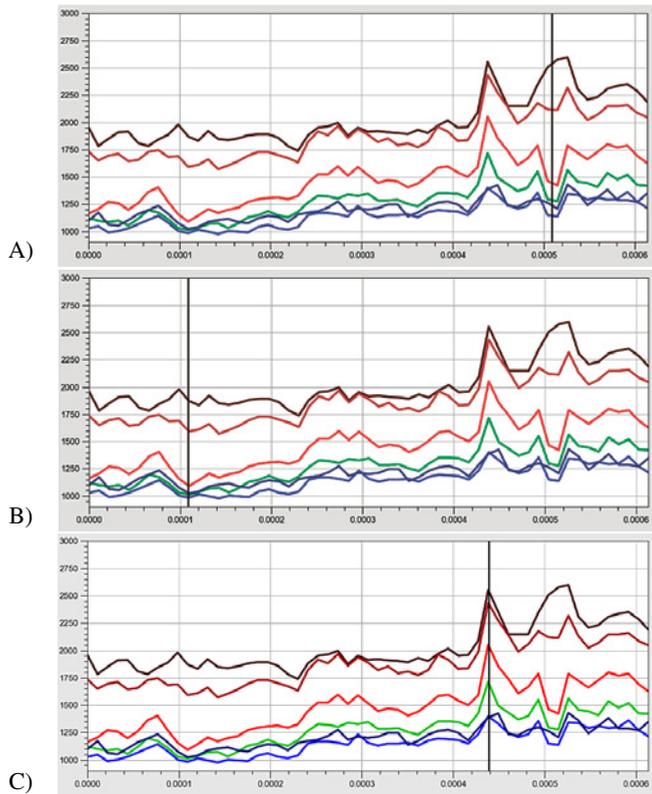


Figura 8. Gráfico de reflectancia en función de la longitud de la transecta (km). Arriba, la línea vertical muestra el punto A; en el medio, el punto B y debajo el punto C de la figura 6.

Tanto el punto A como el punto B se corresponden con el perímetro del Fuerte de Melincué. El punto A se encuentra en el límite norte, mientras el B se ubica en el sur. En ambos casos se observa una respuesta espectral particular que no se refleja en otras porciones de este gráfico. Tanto en los puntos A como B se puede detectar una notable diferencia en los comportamientos del infrarrojo y el resto de las zonas del espectro. Mientras el infrarrojo mantiene su variación constante en relación con los píxeles aledaños, los colores en el espectro visible tienen un claro decaimiento que contrasta con lo que sucede unos pocos metros alrededor. La capa del Red Edge evidencia este valle en menor magnitud.

En el contraste con el punto C u otras porciones del gráfico se observa que las respuestas del infrarrojo suelen ser coherentes con el resto de las bandas y no se evidencian tendencias opuestas como se observaron en los puntos A y B en particular.

A modo de profundizar en la caracterización de las firmas espectrales de cada una de estas áreas en particular, se prosiguió con la extracción de valores de píxel mediante el software Sentinel Application Platform (SNAP).

Se seleccionaron aleatoriamente diez puntos dentro del perímetro, diez puntos sobre el perímetro y diez puntos por fuera del perímetro. Para cada uno de ellos se extrajo el valor del píxel en cada una de las bandas en una ventana de 3x3, obteniendo los valores del píxel central y de los 8 aledaños. Se obtuvo la media para cada uno de los treinta puntos seleccionados y finalmente se promedió para obtener un valor medio del área interna, del área sobre el perímetro y de la externa. En la Figura 9 se observan los resultados.

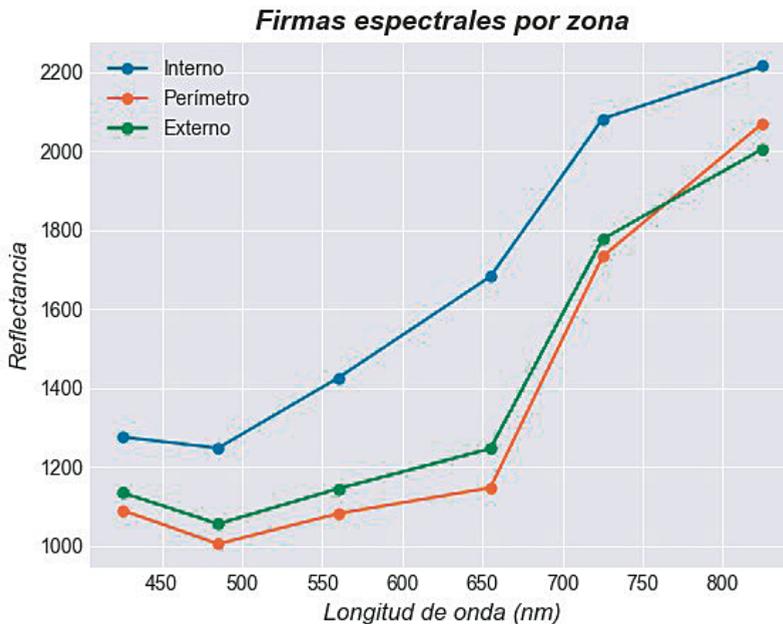


Figura 9. Firmas espectrales para la zona interior, exterior y sobre el perímetro del Fuerte de Melincué obtenidas a partir del promedio de los diez píxeles por zona que, a su vez, fueron obtenidos promediando los nueve píxeles alrededor de cada uno de los puntos.

En base al álgebra de bandas realizado sobre las imágenes del caso tomado como testigo, los restos del Fuerte de Melincué, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. La primera álgebra de bandas que se le aplicó a la imagen multispectral fue:

$$(NIR + NIR) / (BLUE - GREEN)$$

Obteniéndose el siguiente resultado del contorno del Fuerte (Figura 10) donde se encontraba la fosa y los cimientos de la empalizada a la derecha y los restos de la Capilla a la izquierda:

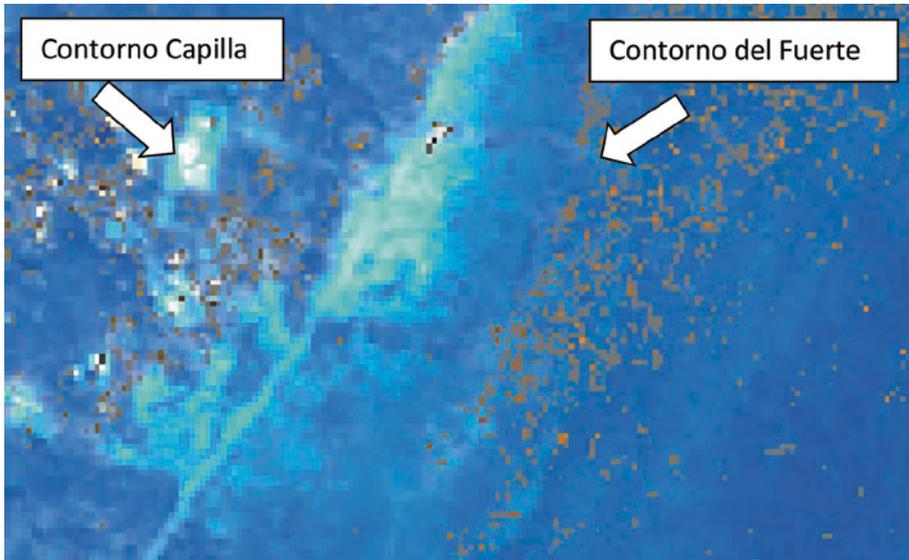


Figura 10. Contornos de la Capilla y del Fuerte de Melincué (Imagen Pléiade Neo MS). Fuente: Imagen satelital provista por la CONAE.

Los parámetros que se utilizaron para mejorar el aspecto (Figura 11) fueron.

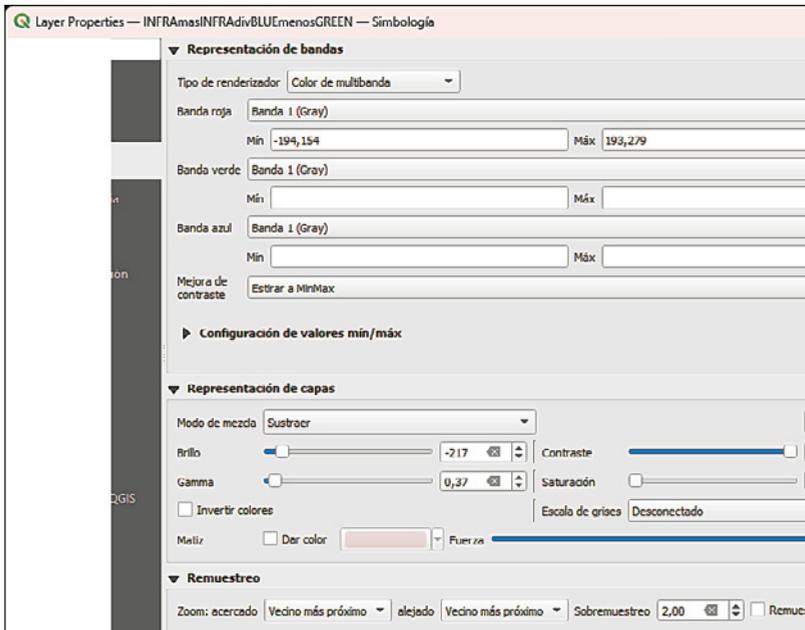


Figura 11. Parámetros de aspecto de la imagen Pléiade con QGIS.

2. La segunda álgebra de bandas que se le aplicó a la imagen multiespectral fue:
 $(\text{BLUE} * \text{GREEN}) / \text{NIR}$

Obteniéndose el siguiente resultado del contorno del Fuerte (Figura 12) donde se encontraba la fosa y los cimientos de la empalizada a la derecha y los restos de la Capilla a la izquierda:

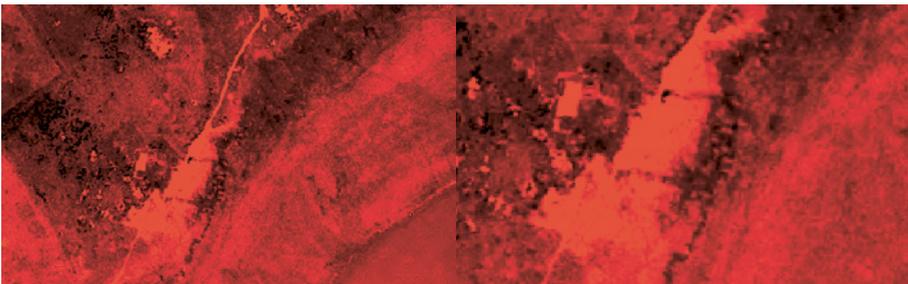


Figura 12. Contornos de la Capilla y del Fuerte de Melincué (Imagen Pléiade Neo MS). Fuente: Imagen satelital provista por la CONAE.

Los parámetros que se utilizaron para mejorar el aspecto (Figura 13) fueron.

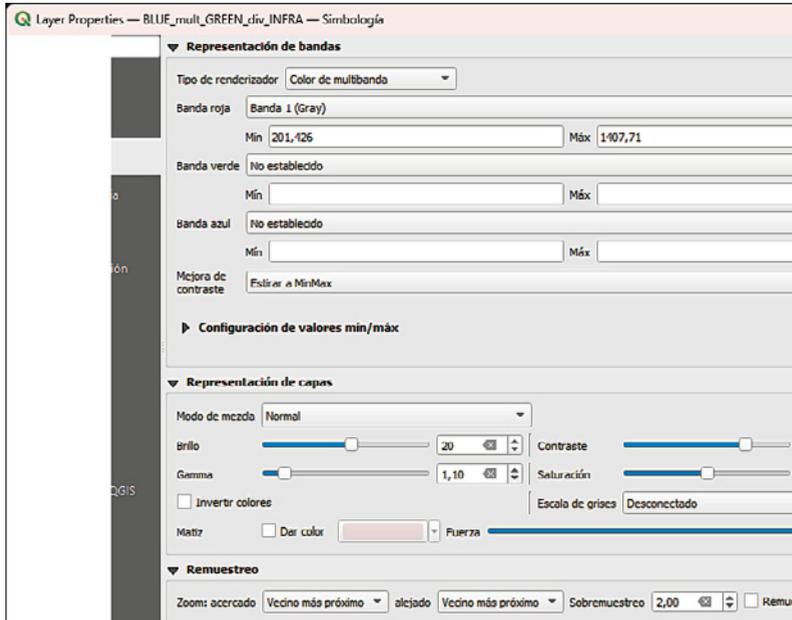


Figura 13. Parámetros de aspecto de la imagen Pléiade con QGIS.

3. La tercera álgebra de bandas que se le aplicó a la imagen multispectral fue:
 $(BLUE + GREEN) / NIR$

Obteniéndose el siguiente resultado del contorno del Fuerte (Figura 14) donde se encontraba la fosa y los cimientos de la empalizada a la derecha y los restos de la Capilla a la izquierda:

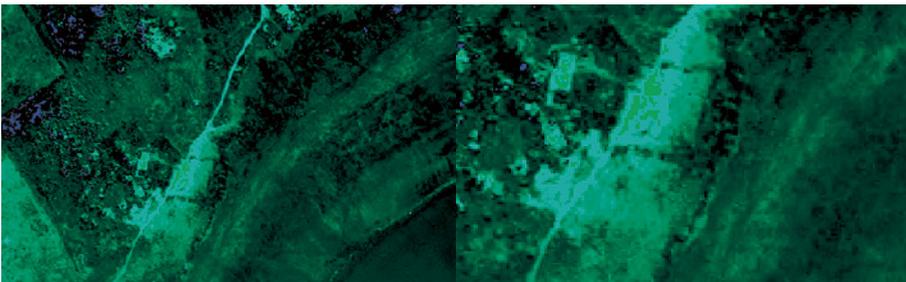


Figura 14. Contornos de la Capilla y del Fuerte de Melincué (Imagen Pléiade Neo MS). Fuente: Imagen satelital provista por la CONAE.

Los parámetros que se utilizaron para mejorar el aspecto (Figura 15) fueron.

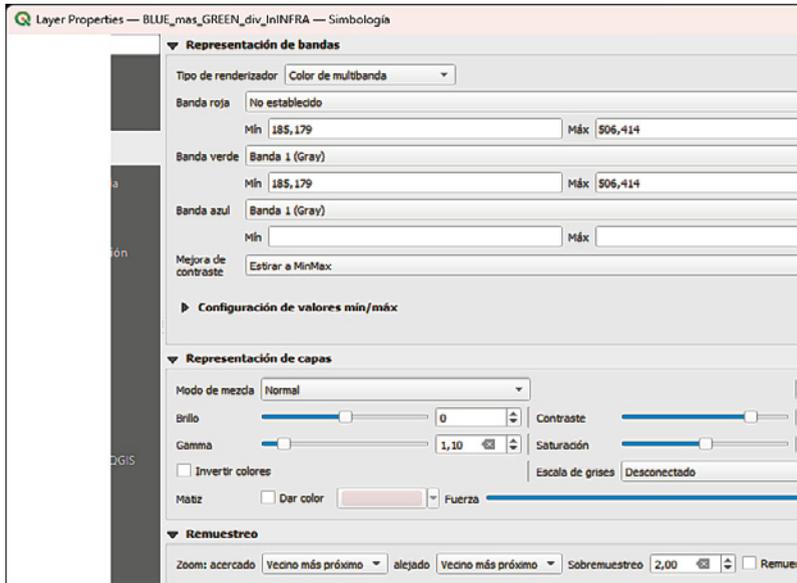


Figura 15. Parámetros de aspecto de la imagen Pléiade con QGIS.

Donde se puede visualizar con mayor nitidez el contorno de la capilla y del Fuerte fue en el álgebra de bandas aplicado en el caso 2 y 3.

2.1.4 Resultados del Fuerte de India Muerta

En este caso se puede apreciar las diferencias en las fechas de toma. En la imagen de fecha 14 de septiembre de 2023, debido a la vegetación, no se puede observar ningún rastro del contorno del Fuerte India Muerta. En cambio, en la imagen del 20 de septiembre del 2019 en pleno año de sequía, se puede observar claramente el contorno del fuerte (Figura 16).



Figura 16. Ubicación de los restos del Fuerte de India Muerta. Fuente: Grupo de Investigación de la UNR-Museo Gallardo.

En base al álgebra de bandas realizado sobre las imágenes los restos del Fuerte de India Muerta, se obtuvieron los siguientes resultados:

El álgebra de bandas que se le aplicó a la imagen multispectral fue el índice NDVI y se le hicieron algunas correcciones de aspecto respecto al contraste (Figura 17):

$$(NIR + RED) / (NIR - RED)$$

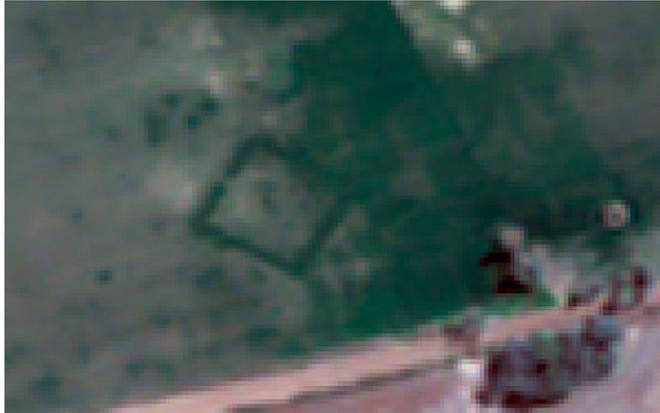


Figura 17. Contornos del Fuerte de India Muerta (Imagen Pléiade MS). Fuente: Imagen satelital provista por la CONAE.

Los parámetros que se utilizaron para mejorar el aspecto (Figura 18) fueron.

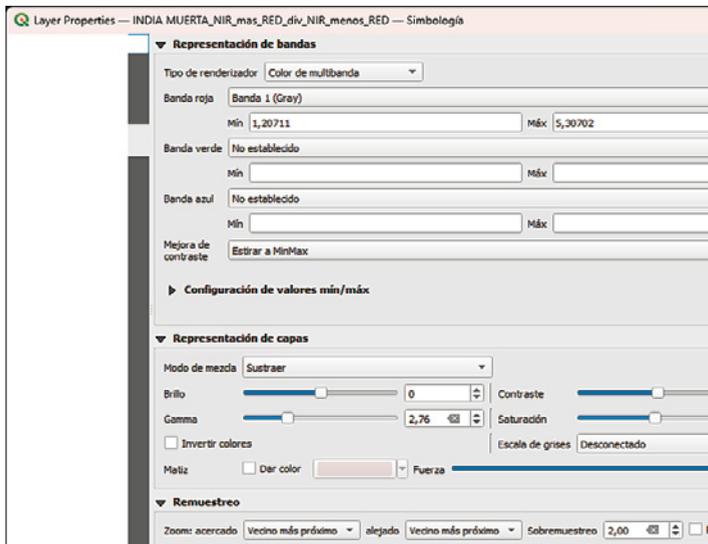


Figura 18. Parámetros de aspecto de la imagen Pléiade con QGIS.

4. DISCUSIÓN

En la introducción a este trabajo de investigación se resaltaron dos aspectos importantes a tener en cuenta para este tipo de aplicación de las imágenes satelitales. Por un lado, que cada problema de sitios históricos no encontrados es único y debe ser analizado con las imágenes que mejor se ajusten al tema de estudio, ya sea por la época de toma, las bandas que mejor reflejan los rasgos a resaltar y los filtros utilizados. Por otro lado, no se puede prescindir del trabajo de campo para poder verificar y contrastar los rasgos obtenidos en las imágenes. Las distintas pruebas realizadas con la aplicación del álgebra de bandas y los distintos filtros aplicados, nos han devuelto resultados parciales dependiendo del tipo de imagen, su resolución espacial, su resolución espectral y su resolución temporal. En los casos de estudio se partió de rasgos antropogénicos conocidos y verificados desde el punto de vista arqueológico. No se realizó en esta etapa, por falta de medios, una campaña de radiometría de campo con espectrorradiómetro para una caracterización espectral de superficies dentro del yacimiento arqueológico, cosa que hubiera redundado en un aporte importante para la determinación de aquellas bandas de mayor reflectancia. De ser así, se hubieran necesitado imágenes de alta resolución espacial e hiperespectrales de la zona de estudio. Las imágenes hiperespectrales disponibles (Hyperion), pasaron tangencialmente por el área y eran de muy baja resolución espacial para este tipo de estudio. Otro aspecto importante en esta discusión, es la fecha de toma de las imágenes, de las cuales no se pudo disponer en su totalidad, y que en el caso de estudio, de asentamientos realizados en la llamada «pampa húmeda» y en áreas inundadas, con un gran espesor sedimentario compuesto de una Faja Loéssica donde predominan las arcillas, limos y arenas finas y en ausencia total de material rocoso, se vio favorecido por la sequía ocurrida durante los años 2019 al 2022, que dejó al descubierto en muchos lugares los cimientos de construcciones realizadas en los siglos XVII y XVIII de ladrillos de adobe cocido, difíciles de perdurar en el tiempo.

5. CONCLUSIONES

La aparición en los últimos años de satélites con sensores multiespectrales de alta resolución espacial ha posibilitado la aplicación de las técnicas de teledetección en la arqueología a escalas más grandes, donde los yacimientos son de pequeñas dimensiones. El gran potencial de los datos hiperespectrales y multiespectrales térmicos para la detección de alineamientos y estructuras en-

terradas, así como las capacidades de las imágenes de radar para el cálculo de evidencias y restos de estructura antrópicas en regiones caracterizadas por cobertura forestal, todavía no ha llegado a los satélites juntamente con imágenes de alta resolución espacial, lo que hace que por ahora se utilicen a escala regional. Esta investigación estuvo centrada para el caso particular de aplicación de Teledetección en el estudio arqueológico de los primeros asentamientos luego de la conquista española constituido en una serie de fortines para defenderse de la avanzada de las poblaciones indígenas sobre el territorio ocupado. Mediante las herramientas del software de procesamiento de imágenes se pudieron mejorar los rasgos antrópicos de los restos de los cimientos de estas fortificaciones asentadas en adobe y con empalizadas de palo de Ñandubay, deterioradas por el paso del tiempo en un terreno húmedo, fangoso y muchas veces inundado.

Se considera necesario, no obstante, la integración de estas herramientas con otras disciplinas geospaciales, incluyendo capas de información como modelos digitales del terreno, elementos lineales, etc. que mediante una integración adecuada y rigurosa permitan separar superficies conformadas por los mismos o similares materiales, pero que presenten una distribución espacial diferente.

Finalmente, consideramos que las propiedades y capacidades del espectro térmico tienen un gran potencial de utilización para el cálculo de anomalías térmicas, que puedan ser indicativas de la presencia de estructuras enterradas, con el evidente interés que ello tiene en Arqueología (Rejas Ayuga *et al.*, 2016).

BIBLIOGRAFÍA

- BAGGIO, P., *et al.* Applicazioni del termico da vicino per la conoscenza di strutture antropiche nel sottosuolo: l' 'esperimento de Eretum (Lazio-Italia). Télédétection et Cartographie Thematique en Archéologie (E. Barisano, Ed.), Notes et Monographies Techniques n.0 18, CNRS, Paris, 1988, pp. 139-151.
- BOGNANNI, F., Un estudio acerca del uso del espacio en arqueología de sitios históricos. 2012. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata.
- *et al.* Teledetección espacial aplicada a la búsqueda de restos de la Estancia San Miguel del Carcarañá. Teoría y Práctica de la Arqueología Histórica Latinoamericana. ISSN: 2250-866X (impreso) | ISSN: 2591-2801 (en línea) Año VI, Volumen 6, 2017.
- DEROIN J. P., *et al.* Integrated non-invasive remote-sensing techniques and field survey for the geoarchaeological study of the Sud Lipez mining district, Bolivia,

- Journal of Geophysics and Engineering*, Volume 9, Issue 4, August 2012, Pages S40–S52, <https://doi.org/10.1088/1742-2132/9/4/S40>.
- FARJAS, M., *et al.* Geodesic Approach to an Artefact-3D Scanner Virtual Modeling versus Archaeological Tracings (First Part). *15th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*. IEEE, 2009. p. 52-57.
- GIORDANO PORATI, G., y GARCIA, F., *et al.* Proyecto Arqueológico «Entornos a Melincué. Área de Antropología y Paleontología del Museo Provincial de Ciencias Naturales «Dr. Ángel Gallardo» de Rosario y el Centro de Estudios Interdisciplinarios en Antropología de la Facultad de Humanidades y Artes de la Universidad Nacional de Rosario (UNR). *XXI Congreso Nacional de Arqueología Argentina, Corrientes (Argentina) Julio 2023*.
- PÉRISSET, M. C., y TABBAGH, A., Interpretation of thermal prospection on bare soils. *Archaeometry*, 1981, vol. 23, no 2, p. 169-187.
- REJAS AYUGA, J. G.; BURILLO MOZOTA, F.; LÓPEZ, R., y FARJAS ABADÍA, M., 2006. «Hyperspectral remote sensing application in the celtiberian city of Segeda». *From Space to Place, 2nd International Conference on Remote Sensing Archaeology*, Rome (Italy) 4-7 December 2006, BAR International Series 1568, BAR S1568 2006.
- REJAS AYUGA, J. G., *et al.* Integrating SAR data and hyperspectral analysis for the archaeological survey of the Segeda city, Spain 2010. *British Archaeological Reports International Series*.
- *et al.* Aplicación de teledetección hiperespectral en la ciudad celtíbera de Segeda. Tecnologías de información geográfica y análisis arqueológico del territorio: *Actas del V Simposio Internacional de Arqueología de Mérida* / coord. Por Victorino Mayoral Herrera, Sebastián Celestino Pérez, 2011, ISBN 978-84-00-09407-2, pp. 793-799.
- REJAS AYUGA, J. G., y MOZOTA, F., Teledetección aplicada a la arqueología. Manual de tecnologías de la información geográfica aplicadas a la arqueología, 2016, vol. 8, p. 241-270.
- RUIZ-GÁLVEZ, M. C., *et al.* Informe de la campaña de campo 2009 en el Agdal de Oukaïmeden, (Alto Atlas, Marruecos). *Informes y Trabajos*, 2011, vol. 5.
- SANCHEZ GRANEL, A.; JIMENEZ, C., y CAPPA, C., Antecedentes cartográficos de los primeros asentamientos españoles en el Río de la Plata. Pag. 89-112. *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*. Tomo CLX. Madrid. 2023.
- TABBAGH, A., Interest in the slingram EM method for archaeological prospecting. En *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1984*. Society of Exploration Geophysicists, 1984. p. 206-208.
- (1992). Geophysical methods in archaeological prospecting. 161. 9-15.
- WELLER, E. T., Satellites, survey and settlement: the Late Classic Maya Utilization of Bajos (Seasonal Swamps) at Tikal and Yaxha, Guatemala. *From Space to Place, 2nd International Conference on Remote Sensing Archaeology*, Rome (Italy) 4-7 December 2006, BAR International Series 1568, BAR S1568 2006.

RESUMEN

APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN PARA EL ESTUDIO DE LOS PRIMEROS ASENTAMIENTOS ESPAÑOLES EN EL RÍO DE LA PLATA

En los años 70, se desarrollaron una serie de satélites enfocados a estudios medioambientales y de prospección de recursos con una mayor resolución espacial que los satélites meteorológicos empleados hasta entonces. La misión pionera fue LANDSAT, cuyo primer satélite fue conocido como Earth Resources Technology Satellite (ERTS) que superó todas las expectativas en relación con la calidad de la información y sus aplicaciones. Esto permitió los primeros intentos de aplicar la teledetección por satélite en la prospección arqueológica, ya que se venía aplicando con éxito la fotografía aérea. Para esta investigación se utilizaron imágenes de Alta Resolución Espacial, que fueron provistas por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), la cual a partir de febrero del 2023 sumó a sus servicios satelitales imágenes con un detalle que va de 0,30 a 1,5 metros. El trabajo se focalizó en analizar a través de estas imágenes, los restos arqueológicos de los primeros asentamientos españoles en el Río de la Plata ya localizados, detectar rastros antrópicos del pasado, obtener firmas espectrales e índices indicativos de la materialidad utilizada. Estos incluyen los primeros fuertes construidos durante la conquista española sobre el Río Paraná en el Siglo XVI y aquellos posteriores construidos luego de la emancipación por el ejército en los Siglos XVII y XVIII en particular en la Provincia de Santa Fe (Argentina).

Palabras clave: teledetección; arqueología; fortines Santa Fe; Melincue.

ABSTRACT

APPLICATIONS OF REMOTE SENSING FOR THE STUDY OF THE FIRST SPANISH SETTLEMENTS IN THE RÍO DE LA PLATA

In the 1970s, a series of satellites were developed focused on environmental studies and resource prospecting with a higher spatial resolution than the meteorological satellites used until then. The pioneer mission was LANDSAT, whose first satellite was known as Earth Resources Technology Satellite (ERTS) that exceeded all expectations regarding the quality of the information and its applications. This allowed the first attempts to apply satellite remote sensing, since aerial photography had been successfully applied in archaeological prospecting. For this research, High Spatial Resolution images were used, which were provided by the National Commission for Space Activities (CONAE), which as of February 2023 added images with a detail ranging from 0.30 to 1,5 meters to its satellite services. The work focused on analyzing the archaeological remains of the first Spanish settlements in the Río de la Plata already located, detecting anthropic traces of the past, obtaining spectral signatures and

indexes indicative of the materiality used. These include the first forts built during the Spanish conquest on the Paraná River in the 16th century and those later built after emancipation by the army in the 17th and 18th centuries, particularly in the Province of Santa Fe (Argentina).

Keywords: remote sensing; archeology; Santa Fe Forts; Melincué.