



Análisis de firmas espectrales basado en imágenes Sentinel-2 y su vinculación con un sistema de transferencia de sedimentos activo en el Valle Inferior del Río Chubut, Patagonia, Argentina

Nicolas SCIVETTI¹, Andrés BILMES¹, Federico ARES¹, Pablo J. BOUZA¹, Sebastián LUCAS¹ y Gabriel KALESS²

¹Instituto Patagónico de Geología y Paleontología (IPGP), CONICET, CCT CENPAT, Boulevard Brown 2915, CP 9120 Puerto Madryn, Chubut, Argentina.

²Departamento de Ingeniería Civil Hidráulica - Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Mitre 655, Trelew, Argentina.

Email: nscivetti@cenpat-conicet.gob.ar

Editor: María Romina Onorato

Recibido: 12 de mayo de 2023

Aceptado: 29 de octubre de 2023

RESUMEN

El presente artículo analiza las características de la cobertura superficial y de las unidades litoestratigráficas presentes en un sector particular del Valle Inferior del Río Chubut en la Patagonia argentina; basado en los valores de reflectancia obtenidos a partir de imágenes multiespectrales de la plataforma Sentinel-2. El objetivo del estudio es identificar las principales unidades litoestratigráficas aportantes de sedimentos en un sistema de transferencia activo del área de estudio a través del análisis de las firmas espectrales de una geoforma de acumulación, tributaria del río Chubut, interpretada como un abanico fluvial – aluvial. La identificación de las unidades aportantes de sedimentos reviste suma importancia dado que, durante eventos extremos de precipitación, grandes volúmenes de sedimentos son volcados al cauce del río Chubut lo que impacta directamente sobre las actividades socioeconómicas de la región. Los resultados sugieren que dicha geoforma se encontraría compuesta prácticamente en su totalidad por sedimentos provenientes de las unidades litoestratigráficas Grupo Sarmiento y Grupo Río Chico, por lo que dichas unidades estarían actuando, al menos en el área de estudio, como las principales unidades productoras de sedimentos. A su vez, se discute sobre el desempeño de los diferentes algoritmos de clasificación supervisada utilizados a partir de los resultados obtenidos para el área de estudio.

Palabras clave: Teledetección; aporte de sedimentos; identificación de coberturas.

ABSTRACT

Analysis of spectral signatures obtained from Sentinel-2 images and their relationship with sediment transfer in the Lower Valley of the Chubut River, Patagonia, Argentina.

This article analyzes the characteristics of the lithostratigraphic units and the sedimentary cover of a particular sector of the Chubut River (Valle Inferior del Río Chubut) in Argentine Patagonia based on reflectance values obtained from multispectral images of the Sentinel-2 platform. The objective of the study is to identify the main lithostratigraphic units contributing sediments in an active transfer system of the study area through the analysis of the spectral signatures of an accumulation geoform, tributary to the Chubut River, interpreted as a fluvial-alluvial fan. The identification of sediment-contributing units is of utmost importance given that, during extreme precipitation events, large volumes of sediment are dumped into the Chubut River channel, which directly impacts the socioeconomic activities of the region. The results suggest that the fluvial – alluvial fan is composed mainly by sediments of the Grupo Sarmiento and Grupo Río Chico lithostratigraphic units, so these units would be acting, at least in the study area, as the main sediment-producing units. In turn, the performance of the different supervised classification algorithms used is discussed based on the results obtained for the study area.

Keywords: Remote sensing; sediment supply; land-cover recognition

INTRODUCCIÓN

Las precipitaciones y los vientos son considerados como los mayores agentes erosivos que contribuyen a la pérdida de suelo y la transferencia de sedimentos en diversos ambientes (Marzen et al. 2019). Las regiones más susceptibles a ser erosionadas por las lluvias son aquellas ubicadas en zonas áridas y semi-áridas del mundo (Reynolds et al. 2007, Duniway et al. 2019). En estas regiones los eventos extremos de precipitación suelen ser estacionales, tienden a ocurrir con baja frecuencia, y su potencial erosivo sigue siendo difícil de predecir (Cabré et al. 2020). Debido a estos eventos, una cantidad variable de sedimentos pueden ser transportados desde las cabeceras de las cuencas de drenaje y sus tributarios (Denner et al. 1999, Battista et al. 2020) teniendo un impacto directo sobre la turbiedad del río, y por lo tanto en la calidad de su agua (Mouri et al. 2011, de Bastos et al. 2021).

El río Chubut es el río más importante de la provincia de Chubut, el cual atraviesa la Patagonia de oeste a este sin recibir aportes de tributarios permanentes para luego desembocar en el Mar Argentino (Kaless et al. 2008). Su zona de cabecera se ubica en las regiones cordilleranas de Chubut y Río Negro, abarcando una cuenca hidrográfica de alrededor de 54000 km²; la cual se divide en cuatro subcuencas: Valle Alto del Río Chubut, Valle Medio del Río Chubut, Valle Inferior del

Río Chubut y la cuenca Río Chico (Kaless et al. 2019) (Fig. 1).

Las características geomorfológicas, geológicas, climáticas y biológicas del Valle Inferior del Río Chubut juegan un rol preponderante en la carga de sedimentos transportada por el Río Chubut (Kaless et al. 2008, 2019; Pascual 2019, Scivetti et al. 2022a). La mencionada transferencia de sedimentos desde los márgenes del Valle Inferior del Río Chubut hacia el cauce principal del río, constituye una problemática relevante en el suministro de agua potable para las ciudades de Rawson, Trelew, Gaiman, Dolavon, 28 de Julio y Puerto Madryn, como así también para el desarrollo de las actividades socio-económicas de la región (Kaless et al. 2008, 2019, Pascual 2019, Liberoff et al. 2020). Trabajos previos demuestran que los eventos extremos de precipitación en el Valle Inferior del Río Chubut transportan sedimentos desde las cabeceras de las cuencas de drenaje hasta el Río Chubut (Scivetti et al. 2022 a,b). Sin embargo, se desconoce cuál o cuáles son las unidades estratigráficas que actúan como fuente principal de estos sedimentos. El objetivo de este trabajo es el de analizar la firma espectral de las diferentes coberturas y unidades litoestratigráficas presentes en un sector específico del Valle Inferior del Río Chubut —y en particular las correspondientes a un sistema de transferencia de sedimentos activo—, a fin de identificar las principales unidades litoestratigráficas removilizadas con potencialidad de aporte de sedimentos al río.

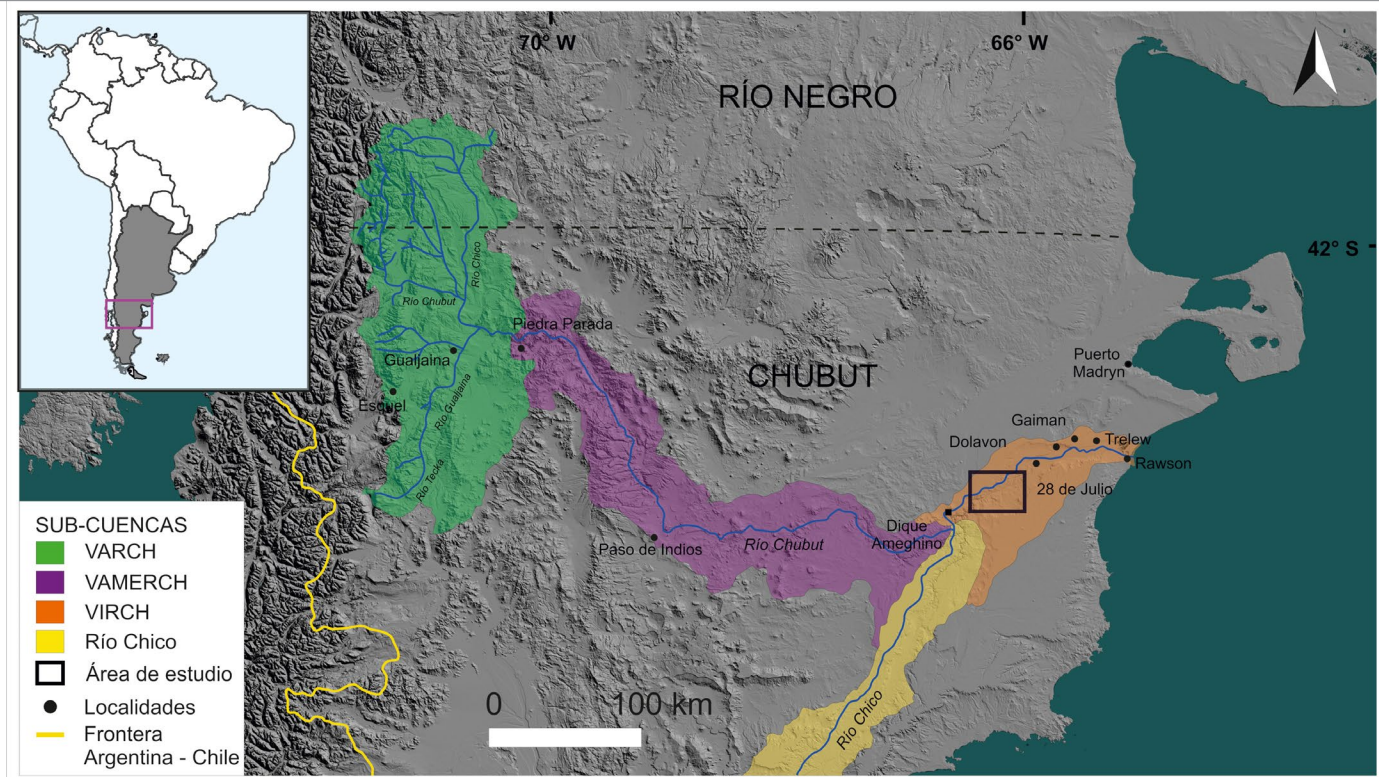


Figura 1. Cuenca del río Chubut, subcuencas, localidades y zona de estudio (modificado de Scivetti et al. 2022a). VARCH (Valle Alto del Río Chubut), VAMERCH (Valle Medio del Río Chubut) y VIRCH (Valle Inferior del Río Chubut).

MARCO GEOLÓGICO

La estratigrafía del área de estudio y zonas aledañas (Fig. 2a), sintetizada en la hoja geológica 4366-III, Las Plumas (Sacomani et al. 2007) y adaptada a este trabajo, se compone de un basamento volcánico (ignimbritas riolíticas; lavas y tobas) de edad jurásica asignado a la Formación Marifil (Malvicini y Llambías 1972a, 1972b), el cual se encuentra cubierto por los depósitos marinos maastrichtianos-danianos de la Formación Salamanca (areniscas coquinoides, coquinas, areniscas finas a gruesas, arcilitas; Lesta y Ferello 1972). La sucesión continúa con los depósitos continentales volcanoclásticos Paleógeno-Neógenos del Grupo Río Chico (areniscas, arcilitas, tobas y tufitas; Legarreta y Uliana 1994; Raigemborn et al. 2010), el Grupo Sarmiento (tobas finas, areniscas tobáceas, tobas arenosas, arcilitas bentoníticas; Spalletti y Mazzoni 1979) y la Formación Puerto Madryn (areniscas y limolitas; Haller 1981). Posteriormente, en relación de contacto mediante discordancia erosiva, se reconocen los depósitos Plio-pleistocenos correspondientes a los Rodados Patagónicos (conglomerados, con clastos principalmente de riolitas procedentes de la Formación Marifil; junto con basaltos, andesitas y cuarzo muy subordinados). Por último, se reconocen depósitos fluviales y aluviales recientes con diverso grado de actividad. El área de estudio se ubica en las cabeceras de la Cuenca Piloto Sagmata (Kaless et al. 2021) que forma parte de la subcuenca del Valle Inferior del Río Chubut (Fig. 2b). Posee una geometría cuadrangular y una superficie de aproximadamente 14 km². Dentro del área se reconoce una geoforma de acumulación

interpretada como un abanico fluvial – aluvial activo (Fig. 2b), el cual presenta una superficie aproximada de 1.8 km² y cotas entre 100 y 140 m s.n.m. Dicha geoforma se ubica en el piedemonte de un frente compuesto por escarpas de erosión y *badlands* con el que se encuentra genéticamente asociado y que presenta cotas entre 150 y 300 m s.n.m. (Fig. 2c). La red de drenaje desarrollada en el frente del piedemonte es efímera, de tipo dendrítica, sin control estructural (Sacomani et al. 2007) y tributaria con el abanico fluvial – aluvial (Fig. 2b). El clima en el área es árido, con precipitaciones que no suelen exceder los 185 mm/año en promedio y se concentran durante el período invernal (Coronato 1994, Paruelo et al. 1998). La baja densidad de cobertura vegetal que se mantiene constante a lo largo del año en el área de estudio (Scivetti et al. 2022a, Fig. 3a,b), permite analizar la firma espectral de las unidades litoestratigráficas y de los depósitos presentes.

METODOLOGÍA

Con el fin de obtener los valores de reflectancia y las firmas espectrales de las diferentes coberturas y unidades litoestratigráficas presentes en el área de estudio se descargaron imágenes adquiridas por la plataforma Sentinel-2 sensor MSI (Multispectral Instrument). Las imágenes Sentinel-2 cubren 13 bandas espectrales en el rango visible, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR), con cuatro bandas con resolución espacial de 10 m, seis de 20 m y tres bandas de 60 m (ESA 2012). La resolución

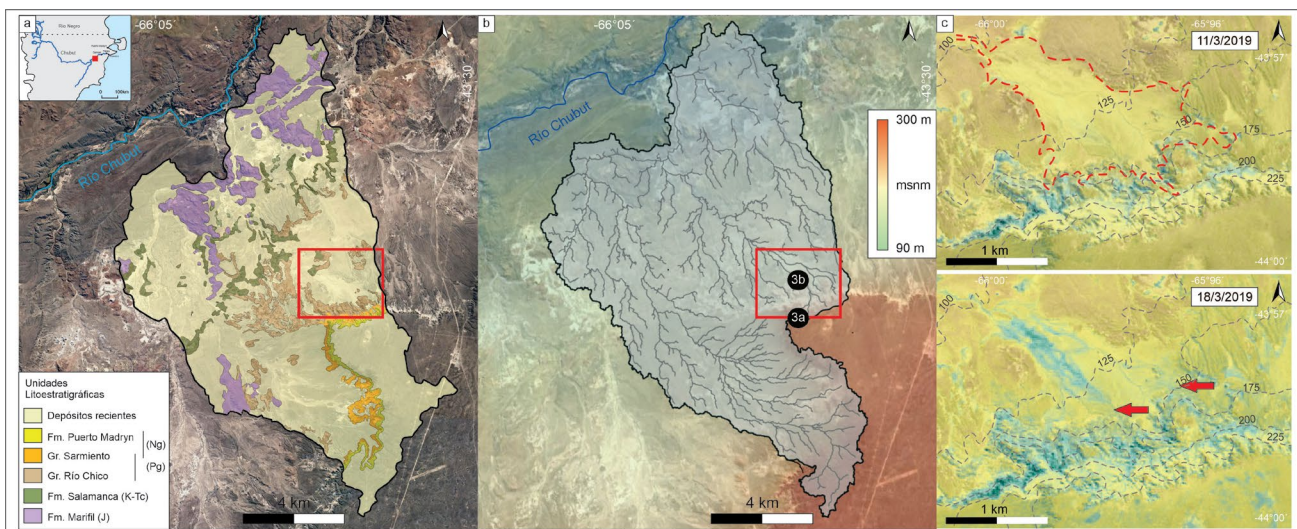


Figura 2. Cuenca Piloto Sagmata (línea continua negra) y ubicación de zona de estudio (línea continua roja): a) Mapa geológico modificado de Biles et al. (2023); b) Modelo digital de elevación Tandem-X y configuración de la red de drenaje; c) Índice NSDSI1 (Yue et al. 2019) y curvas de nivel del área de estudio. Las flechas rojas indican la activación de los sistemas de transferencia en el abanico fluvial – aluvial para el evento de tormenta ocurrido el 14/3/2019. En línea roja punteada se representa el contorno del abanico aluvial.

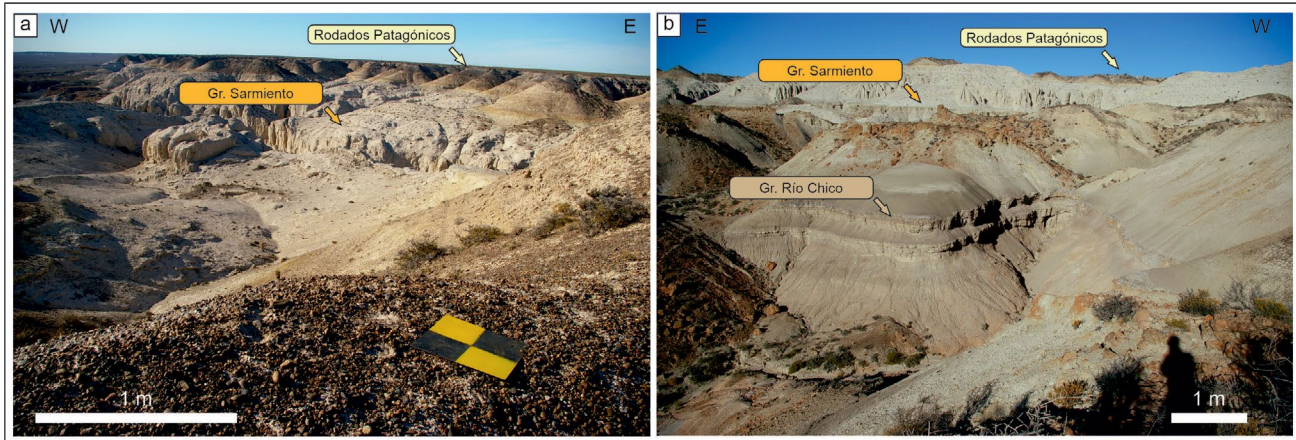


Figura 3. Fotografía del área de estudio mostrando los afloramientos de las unidades litoestratigráficas, las características de la cobertura y la baja densidad de vegetación: a) Vista desde la cabecera de la red de drenaje; b) Vista Desde el piedemonte. Ubicación en figura 2.

temporal para la revisita de una determinada área puede ser de cinco días combinando la información proveniente de las plataformas Sentinel-2A y Sentinel-2B (Wang et al. 2016). Las imágenes seleccionadas y procesadas fueron la S2A_MSIL1C_20190311T141041_N0207_R110_T19GG-M_20190311T172905 y la S2A_MSIL1C_20190318T140051_N0207_R067_T19GGM_20190318T190346, correspondientes a las fechas 11 y 18 de marzo de 2019, respectivamente. El criterio para la elección de las imágenes radicó en que el día 14 de marzo de 2019 ocurrió un evento de precipitaciones en el cual llovieron sobre la cuenca 43 mm en 27 horas, lo cual resulta útil para evaluar cambios superficiales asociados a dicho evento. Además, previamente al 11 de marzo no se registraron precipitaciones (SIPAS INTA 2023) evitando los efectos de posibles cambios en el contenido de humedad del suelo en la extracción de las firmas espectrales (Bogrecki y Lee 2004). A partir del procesamiento de las imágenes seleccionadas, se obtuvo la reflectancia real a nivel de la superficie (BOA, bottom of atmosphere) por medio de la herramienta Sen2Cor (Main-Knorn et al. 2017). Luego se calcularon los siguientes cocientes entre bandas: B12/B11, B12/B8 y B4/B3; los cuales fueron utilizados posteriormente para crear una composición R, G, B; respectivamente (Fig. 4a). La mencionada composición resulta especialmente útil para resaltar las diferentes litologías (Van der Meer et al. 2014). A su vez, se calculó el índice NSDSI1 [(BSWIR1 - BSWIR2) / BSWIR1] (Yue et al. 2019) el cual estima la humedad del suelo permitiendo inferir la red y las áreas de acumulación del escurrimiento superficial. Con el objetivo de determinar y discriminar firmas espectrales de las diferentes coberturas, se realizó el apilamiento de las bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8A, 11 y 12 (layer stacking) y se definieron regiones de interés o áreas de entrenamiento (ROI por sus siglas en inglés) sobre afloramientos de las unidades litoestratigráficas basadas en

el mapa geológico de detalle de Bilmes et al. (2023) (Fig.4b). Sobre dichas áreas de entrenamiento se evaluó la separabilidad de las firmas espectrales de cada clase mediante el estadístico de similitud de Bray-Curtis (Holmes et al. 2015, Leroux et al. 2018) el cual indica con valores de 0 (0 %) que las firmas son completamente diferentes y con valores de 1 (100 %) que las firmas son idénticas (Congedo 2016). Cabe destacar que debido a la escasa representación y espesores inferiores a los dos metros de los depósitos de la formación Puerto Madryn, los mismos fueron incluidos dentro del Grupo Sarmiento. Posteriormente, se llevó a cabo una clasificación supervisada por medio de los algoritmos de clasificación de máxima probabilidad, mapeo del ángulo espectral y distancia mínima. En base a las áreas de entrenamiento y las áreas de control seleccionadas sobre las unidades litoestratigráficas definidas por Bilmes et al. (2023), el desempeño de los diferentes algoritmos fue analizado mediante la exactitud, el índice estadístico kappa, la precisión, la sensibilidad y valor F1 (He y Ma 2013, Fernández et al. 2018). Las mencionadas tareas fueron realizadas utilizando el programa del Sistema de Información Geográfica (SIG) QGIS, versión 3.26.3-Buenos Aires y el complemento SCP (Semi-Automatic Classification Plugin, Congedo 2016).

RESULTADOS

A partir de la generación de la composición RGB mencionada en la metodología, fue posible discriminar visualmente diferentes coberturas en el área de estudio (Fig. 4a).

Los valores medios, mínimos y máximos de reflectancia real a nivel de la superficie de cada banda extraídos a partir de las áreas de entrenamiento permiten discriminar cada una de las coberturas de interés (Fig. 5). La principal diferencia

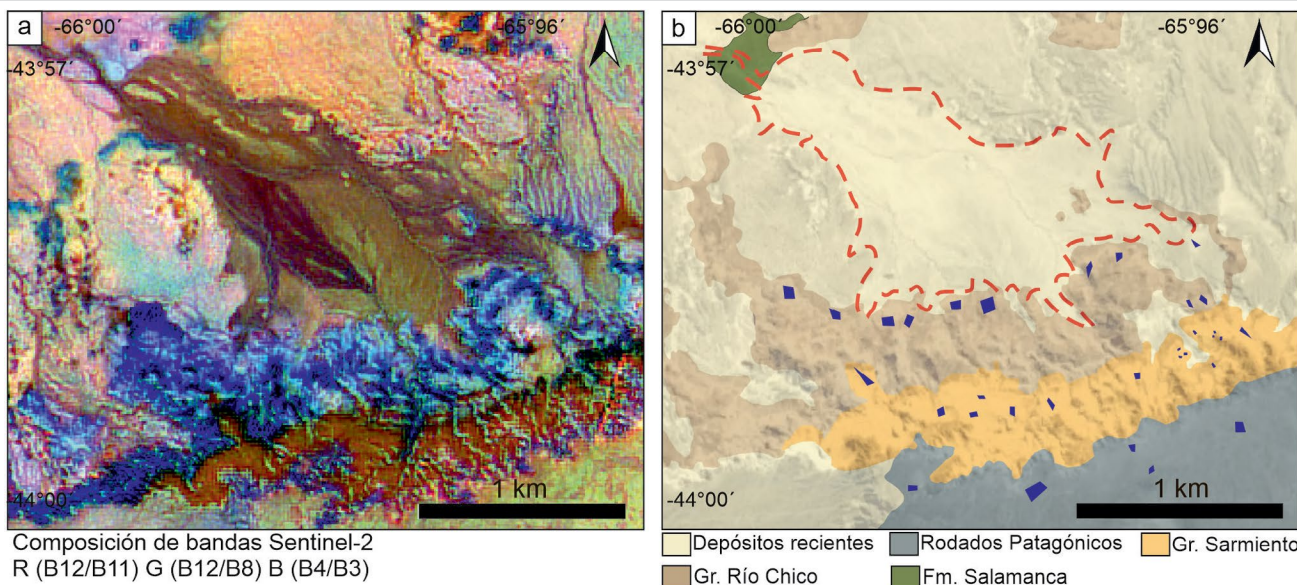


Figura 4. a) Composición de bandas R(B12/B11) G(B12/B8) B(B4/B3) resaltando las diferentes coberturas en el área de estudio; b) Unidades litoestratigráficas aflorantes (Bilmes et al. 2022, 2023); y áreas de entrenamiento para la obtención de las firmas espectrales (polígonos azules). En línea roja punteada se representa el contorno del abanico fluvial – aluvial.

puede ser observada en la geometría de las firmas espectrales para cada unidad litoestratigráfica discriminada. Mientras que la firma correspondiente al Grupo Sarmiento presenta una firma aproximadamente simétrica y convexa hacia arriba, las firmas que representan al Grupo Río Chico y a los Rodados Patagónicos exhiben una pendiente general positiva hacia las mayores longitudes de onda. Por otro lado, los valores de reflectancia promedio para cada banda del Grupo Sarmiento son los más elevados en el área de estudio alcanzando un valor máximo de 0.5301 para la banda 5; seguidos por los del Grupo Río Chico y luego por aquellos correspondientes a los

Rodados Patagónicos. Estos últimos con valores máximos de reflectancia de 0.3637 y 0.3003, respectivamente, para la banda 11.

El Cuadro 1 muestra el estadístico de similitud de Bray-Curtis entre las firmas espectrales de las unidades litoestratigráficas discriminadas. En ella se observa que las unidades Rodados Patagónicos y Grupo Río Chico presentan el valor de similitud más elevado (93.86 %), indicando un alto grado de solapamiento para dichas firmas.

Los resultados de la clasificación supervisada en el área de estudio basada en la reflectancia real a nivel de la super-

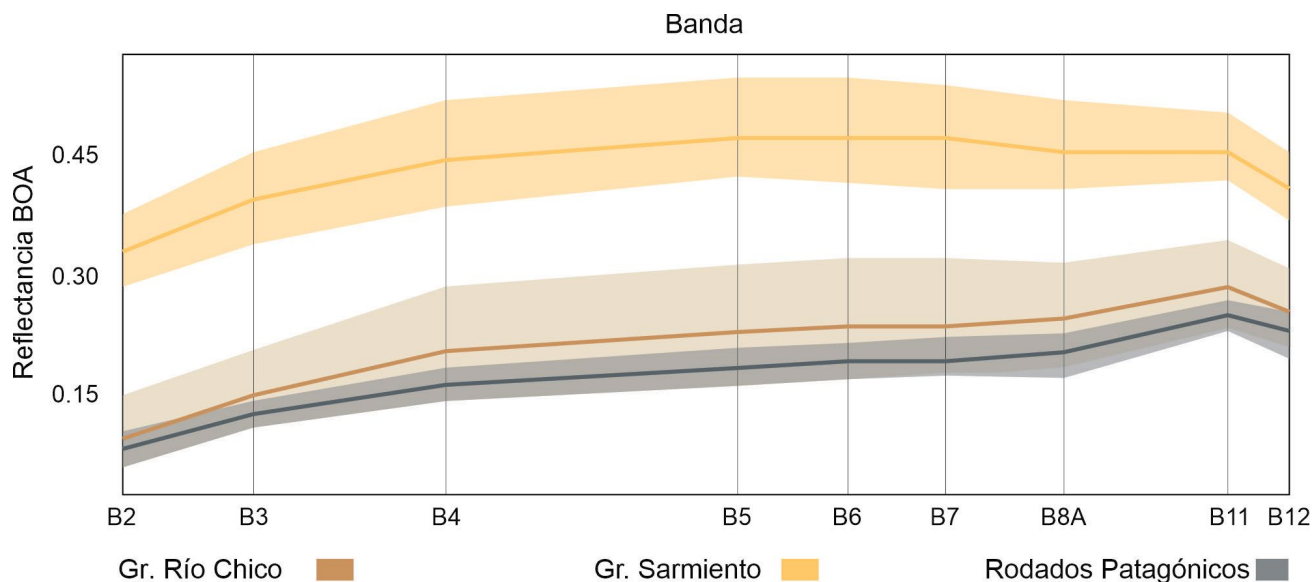


Figura 5. Valores de reflectancia BOA en función de la longitud de onda para las diferentes unidades litoestratigráficas discriminadas en el área de estudio.

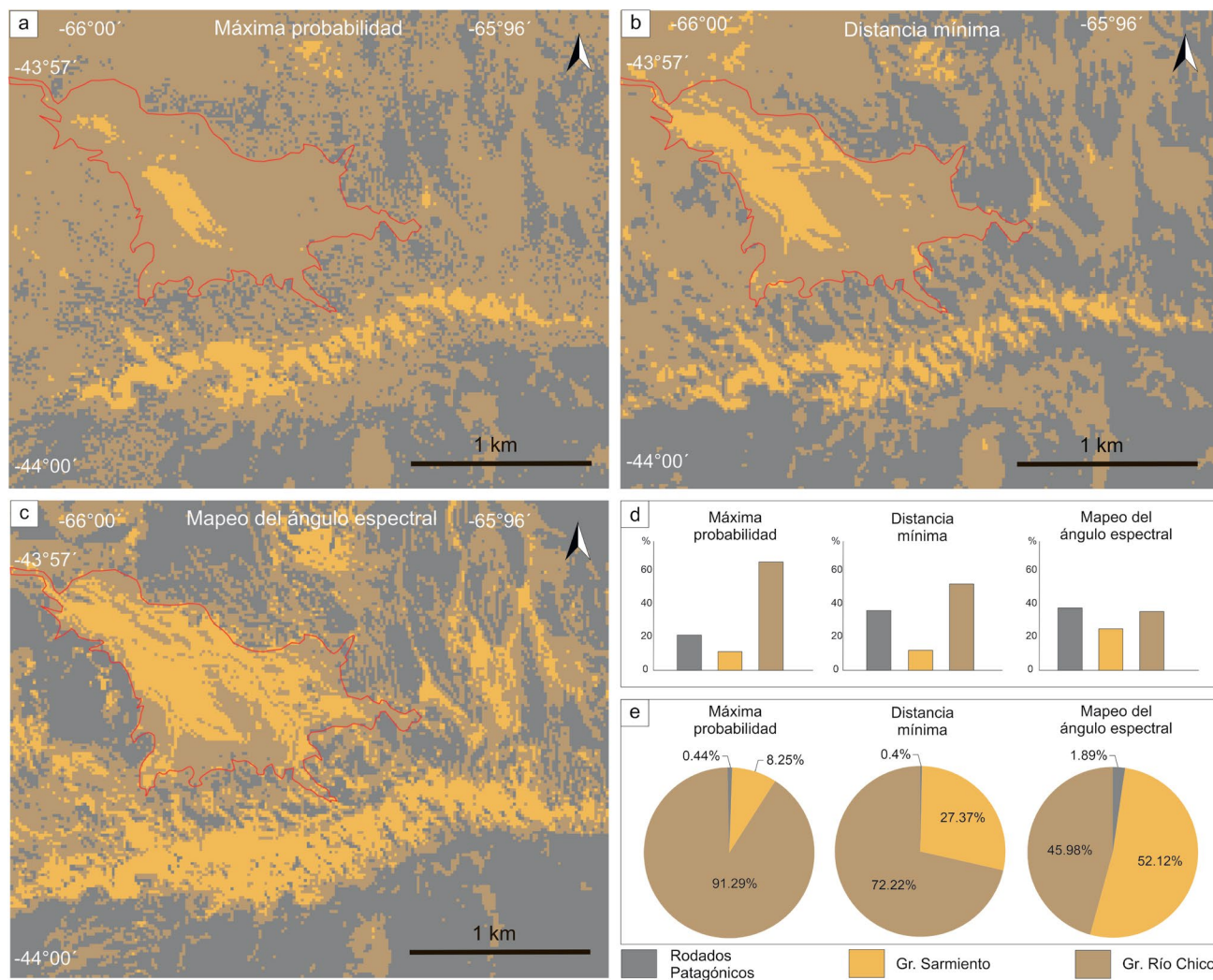


Figura 6. Resultados de las clasificaciones supervisadas para el área de estudio utilizando los métodos de: a) máxima probabilidad; b) distancia mínima; c) mapeo del ángulo espectral. Con línea roja se representa el contorno del abanico fluvial – aluvial; d) Histogramas porcentuales de participación para cada clase en el área de estudio; e) Porcentaje de participación para cada clase en el abanico fluvial – aluvial.

Cuadro 1. Estadístico de similitud porcentual de Bray-Curtis entre las unidades litoestratigráficas discriminadas.

	Rodados Patagónicos	Grupo Sarmiento	Rodados Patagónicos
	vs	vs	vs
	Grupo Río Chico	Grupo Río Chico	Grupo Sarmiento
Similitud Bray-Curtis [%]	93.86	72.38	66.80

ficie de las diferentes coberturas, utilizando los algoritmos de máxima probabilidad, mapeo del ángulo espectral y distancia mínima pueden observarse en las figuras 6a, b y c. En los histogramas de frecuencia resultantes de los tres métodos aplicados (Fig. 6d) se observa que, en todos los casos, las frecuencias para las coberturas de los Rodados Patagónicos y el Grupo Río Chico resultan mayores; mientras que el Grupo Sarmiento presenta las menores frecuencias.

Respecto a la validación de los resultados del análisis espectral con el mapa de unidades litoestratigráficas definidas

por Bilmes et al. (2023), el desempeño de cada método se encuentra representado en el Cuadro 2. En ella se observa que la mayor exactitud global en la clasificación fue obtenida mediante el algoritmo de mapeo del ángulo espectral, seguido por el algoritmo de máxima probabilidad y por último el de distancia mínima. Este mismo ordenamiento se observa para el índice kappa.

Por su parte, la matriz de confusión para cada método (Cuadro 3), refleja que el Grupo Sarmiento fue identificado con la mayor sensibilidad (0.95 – 1) y precisión (0.952 – 1) independientemente del algoritmo utilizado. Los Rodados Patagónicos muestran también una relativamente elevada sensibilidad (0.704 – 0.994) y precisión (0.871 – 0.915), pudiendo ser confundidos con el Grupo Río Chico particularmente cuando se aplicaron los algoritmos de máxima probabilidad y de distancia mínima. El Grupo Río Chico muestra la menor sensibilidad (0.395 – 0.604) y un amplio rango de precisión

Cuadro 2. Exactitud global e índice kappa obtenidos para cada uno de los algoritmos de clasificación supervisada.

	Exactitud global (%)	Índice kappa
Mapeo del ángulo espectral	93.62	0.89
Máxima probabilidad	61.73	0.35
Distancia mínima	58.93	0.33

(0.292 – 0.952) en función del algoritmo utilizado.

El Cuadro 4 y la figura 6e muestran el porcentaje de participación de cada firma espectral en el área del abanico fluvial – aluvial para cada algoritmo de clasificación. Si bien los valores obtenidos por cada método son diferentes, en todos los casos las unidades litoestratigráficas con mayor representación son el Grupo Río Chico y el Grupo Sarmiento.

DISCUSIÓN

El análisis de los resultados provenientes de la composición RGB para la imagen correspondiente a la plataforma Sentinel-2 analizada, sugiere que es posible discriminar visualmente diferentes coberturas en el área de estudio en función de los valores de reflectancia. El análisis de las firmas espectrales (Fig. 5) refleja que el Grupo Sarmiento presenta los valores más elevados de reflectancia y una geometría distintiva en el área de estudio producto de su litología predominantemente tobácea, lo cual facilitaría su reconocimiento. Por su parte, las unidades litoestratigráficas Grupo Río Chico y Rodados Patagónicos presentan firmas espectrales que podrían ser confundidas durante la clasificación. Dicha similitud

espectral calculada mediante el estadístico Bray-Curtis alcanza un 93.86 %.

Los resultados de la validación para la clasificación supervisada (Cuadro 2), sugieren que el método de mapeo del ángulo espectral presenta la mayor exactitud global en el área (93.62 %) como así también el mayor valor del índice kappa (0.89). Dado que el set de datos utilizado constituye un conjunto de datos desbalanceado, resulta interesante analizar el comportamiento del parámetro F1 como medida de la exactitud de los algoritmos. En líneas generales, el algoritmo de mapeo del ángulo espectral obtiene los mayores valores de F1 (Cuadro 3), lo cual es consistente con las exactitudes globales obtenidas. Esto sugiere que la exactitud global de la clasificación podría ser un parámetro adecuado para evaluar el desempeño de los algoritmos de clasificación para el contexto en el que se enmarca este trabajo. Para el caso particular del abanico fluvial – aluvial, se obtuvieron diferentes proporciones de participación de clases en función de los algoritmos aplicados (Cuadro 4, Fig. 6e). Sin embargo, independientemente del método utilizado, en todos los casos los resultados indican que esta geoforma estaría compuesta casi exclusivamente por materiales provenientes del Grupo Río Chico y del Grupo Sarmiento. Considerando que la mayor exactitud global fue obtenida por medio del algoritmo de mapeo del ángulo espectral, es posible asumir que el abanico fluvial – aluvial estaría compuesto de alrededor de un 52 % de sedimentos provenientes del Grupo Sarmiento, un 46% de sedimentos provenientes del Grupo Río Chico y de un 2% de sedimentos provenientes de los Rodados Patagónicos (Cuadro 4). Dado que dicha geoforma constituye parte de un sistema de transferencia activo, es plausible inferir que las unidades Grupo Sarmiento y Grupo

Cuadro 3. Matrices de confusión obtenidas para cada uno de los algoritmos de clasificación supervisada utilizados.

Clasificada como	Mapeo del ángulo espectral			Máxima probabilidad			Distancia mínima		
	Clase	Clase	Clase	Clase	Clase	Clase	Clase	Clase	Clase
	Rodados Patagónicos	Grupo Sarmiento	Grupo Río Chico	Rodados Patagónicos	Grupo Sarmiento	Grupo Río Chico	Rodados Patagónicos	Grupo Sarmiento	Grupo Río Chico
Rodados Patagónicos	195	0	18	177	0	26	138	0	15
Grupo Sarmiento	0	100	5	0	100	0	0	95	2
Grupo Río Chico	1	0	20	19	0	17	58	5	26
Total	196	100	43	196	100	43	196	100	43
Exhaustividad	0.995	1	0.465	0.903	1	0.395	0.704	0.950	0.605
Precisión	0.915	0.952	0.952	0.871	1	0.472	0.901	0.979	0.292
F1	0.953	0.975	0.625	0.887	1	0.430	0.790	0.964	0.393

Cuadro 4. Porcentaje de participación de cada firma espectral para el abanico fluvial – aluvial obtenido con cada algoritmo de clasificación.

Método	Composición (%)		
	Rodados Patagónicos	Grupo Sarmiento	Grupo Río Chico
Máxima probabilidad	0.44	8.25	91.29
Distancia mínima	0.4	27.37	72.22
Mapeo del ángulo espectral	1.89	52.12	45.98

Río Chico serían las principales aportantes de sedimentos en el área de estudio y, potencialmente, al cauce del Río Chubut en la Cuenca Piloto Sagmata.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, es posible inferir que las diferentes coberturas presentes en el área de estudio pueden ser discriminadas mediante el análisis de los valores de reflectancia provenientes de imágenes Sentinel-2 y validadas con control de campo. Si bien la firma espectral de cada unidad litoestratigráfica presenta características propias, las firmas correspondientes al Grupo Río Chico y a los Rodados Patagónicos presentan un elevado valor de similitud Bray-Curtis. En el contexto de este trabajo, la mayor exactitud global para la clasificación supervisada se logró por medio del algoritmo de mapeo del ángulo espectral. Esto mismo fue obtenido a través del análisis del parámetro F1. A su vez, más allá del algoritmo de clasificación supervisada utilizado, la geoforma interpretada como abanico fluvial – aluvial se encontraría constituida casi exclusivamente por sedimentos provenientes de las unidades litoestratigráficas del Grupo Sarmiento y del Grupo Río Chico. Por lo tanto, considerando que el abanico fluvial – aluvial forma parte de un sistema de transferencia activo, podría asumirse que dichas unidades serían las principales aportantes de sedimentos en el área de estudio y potencialmente al cauce del Río Chubut. Actualmente se encuentran en desarrollo trabajos y proyectos vinculados al monitoreo de la transferencia de sedimentos en la región que apuntan a encontrar metodologías basadas en teledetección satelital que, junto con las actividades de campo, permitirán discriminar de forma consistente las diferentes coberturas y comprender la dinámica de los sedimentos dentro del Valle Inferior del Río Chubut.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las revisoras Dra. Santi Malnis y un/una revisor/a anónimo/a por las correcciones y sugerencias realizadas, las cuales contribuyeron a mejorar significativamente este trabajo. A la Agencia Espacial Europea y al Centro Aeroespacial Alemán por el acceso gratuito a las imágenes Sentinel-2 y Modelo Digital de Elevación TanDEM-X, respectivamente; y al equipo de desarrollo del software de acceso libre de sistema de información geográfica QGIS 2023. <http://qgis.osgeo.org>. Este proyecto fue financiado con el proyecto CONICET PUE N° 22920200100014.

REFERENCIAS

- Battista, G., Molnar, P. y Burlando, P. 2020. Modelling impacts of spatially variable erosion drivers on suspended sediment dynamics. *Earth Surface Dynamics* 8(3): 619-635.
- Bilmes, A., Cuitiño, J., Bouza, P., Scivetti, N., Rostagno, M., Pascual, M. 2023. Critical areas for sediment delivery to the Chubut River, Patagonia Argentina: geomorphological evidence from the Sagmata pilot basin. *Journal of Maps* 19(1): 2244517.
- Bogrekci, I. y Lee, W. S. 2004. The effects of soil moisture content on reflectance spectra of soils using UV-VIS-NIR spectroscopy. 7th Int. Conf. Precision Agricultural and Other Precision Resources Management, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Cabré, A., Remy, D., Aguilar, G., Carretier, S. y Riquelme, R. 2020. Mapping rainstorm erosion associated with an individual storm from InSAR coherence loss validated by field evidence for the Atacama Desert. *Earth Surface Processes and Landforms* 45(9): 2091-2106.
- Congedo, L. 2016. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>
- Coronato, F. 1994. Clima del nordeste del Chubut. En: Súnico, A., Bouza P., Cano, C., del Valle, H., Videla, L. y Monti, A. (eds), *Guía de campo Península Valdés y Centro Noreste del Chubut*. CADINQUA. 13–20, Puerto Madryn.
- De Bastos F., Reichert J. M., Minella J. P. G. y Rodrigues M. F. 2021. Strategies for identifying pollution sources in a headwater catchment based on multi-scale water quality monitoring. *Environmental Monitoring and Assessment* 193(4): 1-24.
- Denner, J. C., Lawson, D. E., Larson, G. J., Evenson, E. B., Alley, R. B., Strasser, J. C., y Kopczynski, S. 1999. Seasonal variability in hydrologic-system response to intense rain events, Matanuska Glacier, Alaska, USA. *Annals of Glaciology* 28: 267-271.
- Duniway M. C., Pfennigwerth A. A., Fick S. E., Nauman T. W., Belnap J. y Barger N. N. 2019. Wind erosion and dust from US drylands: a review of causes, consequences, and solutions in a changing world. *Ecosphere* 10(3): e02650.
- ESA. 2012. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload/resolution-and-swath>.

- Fernández, A., García, S., Galar, M., Prati, R. C., Krawczyk, B., y Herrera, F. 2018. Learning from imbalanced data sets. Springer, Berlin.
- Haller, M.J. 1981. Descripción geológica de la Hoja43h, Puerto Madryn, provincia del Chubut. Servicio Geológico Nacional, Boletín 184, 41 p. Buenos Aires.
- He, H. y Ma, Y. 2013. Imbalanced learning: foundations, algorithms, and applications, 1st edn. Hoboken. Wiley, New Jersey.
- Holmes, K. W., Griffin, E. A. y Odgers, N. P. 2015. Large-area spatial disaggregation of a mosaic of conventional soil maps: evaluation over Western Australia. *Soil Research* 53(8): 865-880.
- Kaless G, Matamala F, Monteros B. y Greco W. 2008. Cambios hidrológicos y morfológicos en el Río Chubut aguas abajo de la presa Florentino Ameghino. <https://www.repositorio.cenpat-conicet.gov.ar/server/api/core/bitstreams/b2527dc6-62ad-481d-b682-1c03f926b80d/content>
- Kaless, G., Pascual, M., Flaherty, S., Liberoff, A., García Asorey, M., Brandizi L., y Pessacq, N. 2019. Ecos de la tormenta de Comodoro Rivadavia en el Valle Inferior del Río Chubut. Aporte de sedimentos al Río Chubut desde la cuenca del Río Chico. En: Paredes J. M. (Ed.) Comodoro Rivadavia y la catástrofe de 2017. Visiones Múltiples para una ciudad en riesgo. UNPSJB, 290-303, Comodoro Rivadavia.
- Kaless G., Malnero H., Frumeto, O. y Pascual M. 2021. When it rains in the desert of Patagonia: heavy rains, sediment laden flash floods and hazard management challenges. Authorea.
- Legarreta, L. y Uliana, M. A. 1994. Asociación de fósiles y hiatos en el supracretácico – Neógeno de Patagonia: una perspectiva estratigráfica – secuencial. *Ameghiniana* 31(3): 257-281
- Leroux, L., Congedo, L., Bellón, B., Gaetano, R. y Bégue, A. 2018. Land cover mapping using Sentinel-2 images and the semi-automatic classification plugin: A Northern Burkina Faso case study. *QGIS and Applications in Agriculture and Forest* 2: 119-151.
- Lesta, P. y Ferello R. 1972. Región extraandina de Chubut y norte de Santa Cruz. En: Leanza, A. (Ed.), *Geológica Regional Argentina*. Academia Nacional Ciencias Córdoba: 601-653. Córdoba.
- Liberoff A, Pessacq N, Cannizzaro A, Diaz L, Hernandez M, Mac Donnell L, Salvadores F. 2020. Un río, todas las aguas: El Río Chubut, nexos entre ambiente y sociedad. <http://www.repositorio.cenpatconicet.gov.ar/123456789/1288>.
- Main-Knorn, M., Pflug, B., Louis, J.M., Debaecker, V., Müller-Wilm, U., y Gascon, F. 2017. Sen2Cor for Sentinel-2. In *Image and Signal Processing for Remote Sensing* 23 (10427) 37-48.
- Malvicini L. y Llambías E. 1972a. Geología y génesis del depósito de manganeso Arroyo Verde, Chubut. 5° Congreso Geológico Argentino, Actas 2:185–202. Buenos Aires.
- Malvicini L. y Llambías E. 1972b. Metalogénesis del manganeso en el Macizo Nordpatagónico. 5° Congreso Geológico Argentino, Actas 2:203–221. Buenos Aires.
- Marzen, M., Iserloh, T., Fister, W., Seeger, M., Rodrigo-Comino, J., y Ries, J. B. 2019. On-site water and wind erosion experiments reveal relative impact on total soil erosion. *Geosciences*, 9(11), 478.
- Mouri, G., Shiiba, M., Hori, T. y Oki, T. 2011. Modeling reservoir sedimentation associated with an extreme flood and sediment flux in a mountainous granitoid catchment, Japan. *Geomorphology* 125(2): 263-270.
- Paruelo, J., Beltrán, A., Jobbágy, E., Sala, O.E., Golluscio, R.A. 1998 The climate of Patagonia: general patterns and controls on biotic processes. *Ecología Austral* 8:85-101.
- Pascual, M. 2019. Aplicación de ingeniería verde para fomentar la retención de sedimentos en suelos del Valle Inferior del Río Chubut. <http://www.repositorio.cenpat-conicet.gov.ar/123456789/1302>.
- QGIS Development Team. 2023. <http://qgis.osgeo.org>.
- Raigemborn, M. S., Krause, J. M., Bellosi, E., y Matheos, S. D. 2010. Redefinición estratigráfica del grupo Río Chico (Paleógeno Inferior), en el norte de la cuenca del golfo San Jorge, Chubut. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 67(2), 239-256.
- Reynolds, J.F., Smith, D.M.S., Lambin, E.F., Turner, B.L., Mortimore, M., Batterbury, S.P. y Walker, B. 2007. Global Desertification: Building a Science for Dryland Development. *Science* 316: 847-851.
- Sacomani, L. E., Panza J. L., Parisi C. y Pezzuchi H. 2007. Hoja Geológica4366-III, Las Plumas, provincia del Chubut. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 291: 1-74, Buenos Aires.
- Scivetti, N., Bilmes, A., Rostagno, C. M., Kaless, G., Marcos, P., Prieto, M. E., Cuitiño, J.I., Falco, J.I, Pascua, M.A., Lucas, S. y Bouza, P. J. 2022a. Controlling factors in the interferometric coherence derived from Sentinel-1 images: an example from the Río Chubut Lower Valley, Argentina. *Geocarto International* 37(27): 17917-17932.
- Scivetti, N., Bilmes, A., Kaless, G., Lucas, S., Bouza, P.J. 2022b. Análisis de firmas espectrales en imágenes Sentinel-2 y su vinculación con la transferencia de sedimentos en el Valle Inferior del Río Chubut. 8° Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. Actas 1:1059-1060, San Juan.
- SIPAS INTA 2023. <https://sipas.inta.gov.ar/?q=agrometeorologia-lista-do-estaciones>
- Spalletti, L. y Mazzoni, M. 1979. Estratigrafía de la Formación Sarmiento en la barranca sur del lago Colhue Huapi, provincia del Chubut. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 34(4): 271-281, Buenos Aires.
- Van der Meer, F. D., Van der Werff, H. M. A. y Van Ruitenbeek, F. J. A. 2014. Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote sensing of environment*,148: 124-133.
- Wang, Q., Shi, W., Li, Z., & Atkinson, P. M. 2016. Fusion of Sentinel-2 images. *Remote sensing of environment*, 187: 241-252.
- Yue, J., Tian, J., Tian, Q., Xu, K., y Xu, N. 2019. Development of soil moisture indices from differences in water absorption between shortwave-infrared bands. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 154, 216-230.