

Sensoramiento remoto aplicado al reconocimiento de depósitos evaporíticos del oeste de Buenos Aires, Argentina

Rosario Acosta^{1,2}, Paula Leal^{1,2}, Eleonora Carol^{1,2}, M del Pilar Alvarez³, Luis Vigiani¹, Germán Kûrten¹

Resumen El sensoramiento remoto en imágenes ópticas multiespectrales es una herramienta útil en ambientes salinos, en donde las sales evaporíticas presentan firmas espectrales características. En el oeste de la provincia de Buenos Aires existen numerosas cubetas de deflación, en muchas de las cuales precipitan minerales evaporíticos, llegando en algunos casos a conformar salinas. La formación de estos depósitos se ve favorecida por el clima subhúmedo seco. El objetivo del trabajo es realizar un reconocimiento de evaporitas precipitadas en cubetas de deflación a partir de una clasificación supervisada de imágenes satelitales apoyada en datos obtenidos en muestreos efectuados en tres lagunas de deflación que alojan lagunas hipersalinas y extrapolar la información a otras lagunas de la región. Para ello se realizó un muestreo de sales evaporíticas en 3 lagunas, en donde se tomaron muestras y se marcaron con GPS las coordenadas de los puntos muestreados. En laboratorio se determinó la composición mineralógica por difracción de rayos X. Por otro lado, se seleccionó una imagen Sentinel 2A para un año en donde el índice NDWI evidenciara que las cubetas se encontraban con poca o nula presencia de agua en superficie, para que los valores de reflectancia del agua no interfirieran con el análisis. Luego, se procesó la imagen seleccionada y se agregaron a la misma los puntos de muestreo. Se observó la curva espectral de los puntos muestreados y a partir de ellos se crearon zonas de entrenamiento sumado a otras áreas de las lagunas con las mismas curvas espectrales para darle más información al software. Además, se seleccionaron como zonas sectores de las cubetas con sedimento sin cobertura, y sectores de campos. Por último, se realizó la clasificación supervisada con el método de mínima distancia de todos los píxeles del área de estudio. Los resultados evidencian la presencia de sales evaporíticas no solo en las cubetas relevadas en campo, sino también en muchas otras del área de estudio. Este método permite poder realizar una extrapolación de datos a toda el área de estudio y así poder seleccionar posibles objetivos de muestreo en gabinete, ahorrando tiempo de trabajo en campo. Por otro lado, presenta una serie de desventajas. Aún así, los resultados son alentadores, y complementados con otro tipo de análisis pueden hacer que este tipo de metodologías sean muy útiles.

INTRODUCCIÓN

El sensoramiento remoto facilita el análisis de grandes áreas en relativamente poco tiempo (Carrillo de la Cruz et al., 2016). A su vez, es una herramienta de importancia en el mapeo de superficie, ya que las distintas coberturas terrestres interactúan con la radiación de una manera diferente, absorbiendo en algunas longitudes de onda y reflejando en otras, presentando así firmas espectrales diferentes (Alonso et al., 1999). Es por ello que, el sensoramiento remoto en imágenes ópticas multiespectrales es una herramienta muy útil en ambientes salinos, en donde las sales evaporíticas presentan firmas espectrales características (Soltaninejad et al., 2017).

En el sector oeste de la provincia de Buenos Aires se encuentran numerosas cubetas de deflación ubicadas a lo largo de depresiones regionales (Acosta et al., 2023). En muchas de estas cubetas tiene lugar la concentración de minerales evaporíticos, conformando salinas (Angelelli et al., 1976; Schalamuk et al., 1999). Varias de estas salinas son explotadas para extraer por un lado cloruro de

¹Facultad de Ciencias Naturales y Museo (FCNyM), Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Argentina. Email: racosta@cig.museo.unlp.edu.ar

²Centro de Investigaciones Geológicas (CIG), CONICET – UNLP, La Plata, Argentina.

³Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales (IPEEC), CCT – CONICET CENPAT, Puerto Madryn, Argentina.

sodio (halita) y por otro, sulfatos de sodio (thenardita, mirabilita). La formación de estos depósitos se ve favorecida por el clima subhúmedo seco, donde la precipitación media anual es de 704 mm y la evapotranspiración media anual alcanza valores de 750.3 mm (Acosta et al., 2023). El objetivo del trabajo es realizar un reconocimiento de evaporitas precipitadas en cubetas de deflación del oeste bonaerense a partir de una clasificación supervisada de imágenes satelitales apoyada en datos obtenidos en muestreos efectuados en tres cubetas de deflación que alojan lagunas hipersalinas. A partir de la clasificación se pretende también extrapolar la información a otras lagunas de la región para así poder adquirir datos de posibles áreas con presencia de sales evaporíticas a escala más regional.

MATERIALES Y MÉTODOS

En primer lugar, se generó en campo una red de muestreo de sales evaporíticas en tres lagunas del área de estudio (Leubucó, Chasilauquen y de la Sal), en donde se tomaron muestras y se marcaron con GPS las coordenadas de los puntos muestreados (Fig. 1). Luego en laboratorio se determinó la composición mineralógica de las muestras por difracción de rayos X (DRX).

Por otro lado, se procedió a seleccionar una imagen satelital Sentinel 2A. Como el objetivo del trabajo es poder realizar una clasificación supervisada de sales evaporíticas, se seleccionó una imagen cuyos valores de índice NDWI (Normalized Difference Water Index) (calculado utilizando el visualizador de Copernicus <https://dataspace.copernicus.eu/>) evidenciaran que las cubetas se encontraban con poca o nula presencia de agua en superficie, para que los valores de reflectancia del agua no interfirieran.

Una vez seleccionada la imagen, se cargó la misma en el software SNAP 9.0.0 ofrecido por la ESA (Agencia Espacial Europea) (<https://step.esa.int/main/download/snap-download/>), en donde se recortó la imagen según el área de estudio, se realizó un remuestreo de las bandas a 10 metros para que todas tengan la misma resolución espacial, y por último se reproyectó al sistema de referencia WGS84. Luego, se agregó al software un archivo .shp con los puntos de muestreo.

Una vez que se completaron las tareas anteriormente mencionadas, se crearon las zonas de entrenamiento, es decir, se realizó la digitalización de vectores que van a servir para entrenar el método de clasificación. A partir de la ubicación de los puntos muestreados se procedió a observar la curva espectral de los mismos, y se seleccionaron dichas áreas sumado a otras áreas dentro de las lagunas con las mismas firmas espectrales para darle más información al software para luego poder realizar una clasificación más fidedigna. A su vez se seleccionaron como áreas de entrenamiento por un lado los sectores de las lagunas con sedimento sin cobertura salina o vegetación, y por otro, los sectores de campos y caminos. Luego de creadas todas las zonas de entrenamiento, se realizó la clasificación supervisada con el método de mínima distancia de todos los píxeles del área de estudio utilizando a dichas zonas como insumo.

RESULTADOS

En las tres lagunas estudiadas se tomaron muestras de sales evaporíticas distribuidas en distintos sectores de las cubetas (Fig. 1a y b). En la laguna Leubucó las sales evaporíticas forman delgadas costras en los bordes de la cubeta que aumentan en espesor hacia el centro de la misma, formando capas resistentes de más de 7 cm de espesor. Los análisis de rayos X (Fig. 1c y d) evidenciaron que las costras correspondían principalmente a halita y en menor medida, a mezcla de halita y sulfatos de magnesio, tales como hexahidrita y epsomita, estando estas últimas ubicadas hacia los bordes de la cubeta. La laguna Chasilauquen se encuentra casi en su totalidad cubierta por costras salinas las cuales se presentan en los bordes de la cubeta como delgadas eflorescencias y llegando hacia el sector central de la laguna a formar capas de evaporitas de más de 10cm. Por último, en la laguna de

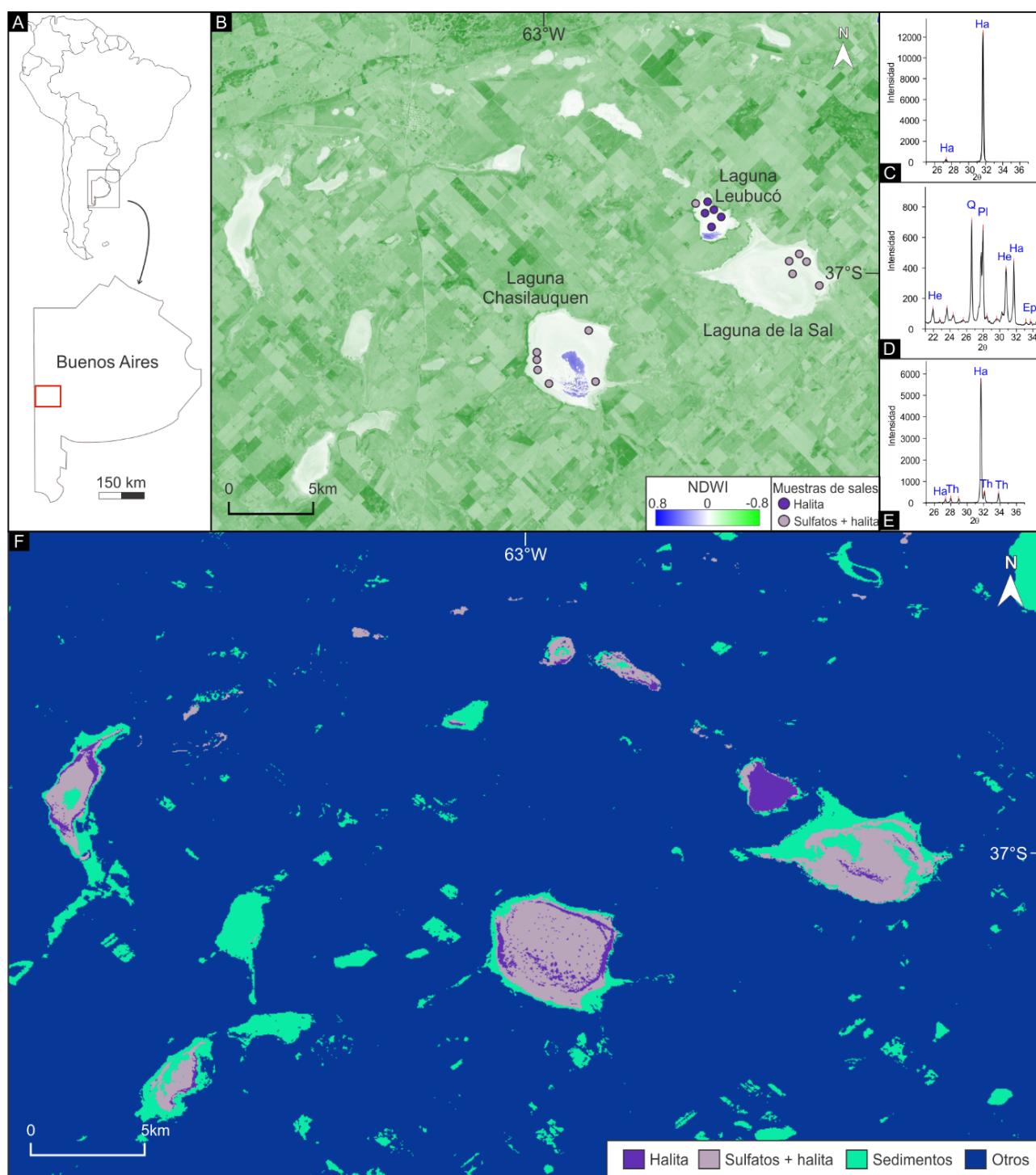


Figura 1. a) Ubicación del área de estudio. b) índice NDWI y ubicación de puntos de muestreo de sales. c) DRX de halita. d) DRX de sulfatos de magnesio. e) DRX de sulfatos de sodio. f) clasificación supervisada. Las abreviaturas en los difractogramas corresponden a Ha: halita, He: hexahidrita, Ep: epsomita, Th: thenardita, Q: cuarzo, Pl: plagioclase.

la Sal se encontraron áreas cubiertas con sales pero en menor medida que en las cubetas anteriores. Los análisis de rayos X evidenciaron que, tanto en la laguna Chasilauquen como en la de la Sal, los depósitos de evaporitas se componen de halita y thenardita en los bordes que pasan hacia el centro de las cubetas a depósitos en donde la thenardita es el mineral dominante (Fig. 1e).

El índice NDWI (Fig. 1b) calculado para la imagen correspondiente al 31/01/2024 constató que dicha imagen es adecuada para realizar una clasificación, ya que el mismo muestra que la mayoría de los

pixeles tienen un valor menor a 0.3, lo que indica que no hay presencia de agua en superficie en las cubetas. A escala más regional, en la imagen de NDWI se observa que la mayoría de las cubetas presentan tonos blanquecinos, que corresponden a valores de 0 y evidencian la ausencia de agua en superficie. Sólo algunos parches de pixeles azules (valores de índice cercanos a 0.8) pueden observarse en algunas cubetas los que indican la presencia de agua en superficie en pequeños sectores de las mismas.

La clasificación supervisada realizada a partir de los puntos de muestreo y otras áreas con igual curva espectral a los distintos grupos de sales dieron como resultado la identificación de 4 clases: halita, sulfato + halita, sedimentos y otros (Fig. 1f). Dentro de las sales evaporíticas, la halita se distingue por su curva espectral característica, sin embargo, la diferenciación en clases dentro de los tipos de sulfatos no resultó tan clara. Si bien en los relevamientos de campo se encontró que la presencia de sulfatos de sodio es mucho mayor que la de sulfatos de magnesio, las curvas espectrales otorgadas por el software para los puntos de muestreo de sulfatos no mostró diferencias significativas que permitan separarlos en dos clases distintas. Esto se debe a que en las muestras tomadas hay presencia tanto de sulfatos como de halita y, por lo tanto, no es posible obtener una curva espectral característica para cada tipo de sulfato.

CONCLUSIONES

Se observó para las lagunas relevadas en campo una gran coincidencia entre la clasificación supervisada y las sales evaporíticas identificadas en campo y por DRX, tanto en composición como en distribución espacial. Además, los resultados obtenidos a partir de la clasificación evidencian la presencia de sales evaporíticas no solo en las lagunas analizadas, sino en muchas otras cubetas del área de estudio. Este método permite poder realizar una extrapolación de datos a toda el área de estudio y así poder seleccionar posibles objetivos de muestreo en gabinete, ahorrando tiempo de trabajo en campo.

Asimismo, si bien la metodología utilizada tiene múltiples ventajas presenta a su vez ciertas desventajas, como la imposibilidad de separar los sulfatos entre sí en distintas categorías y de determinar si se trata de costras de varios cm de espesor o de eflorescencias salinas, sumado al tamaño de píxel que no tiene una gran resolución espacial para delimitar con precisión los depósitos. A pesar de esto, los resultados son alentadores, y complementados con otro tipo de análisis como la utilización de imágenes de radar y ópticas con mayor resolución espacial y espectral pueden hacer que este tipo de metodologías sean muy útiles para localizar potenciales cuerpos salinos.

REFERENCIAS

- Acosta, R., Carol, E., Borzi, G., Cellone, F., & Alvarez, M. P.** (2023). Factors and processes controlling hydrochemistry and evaporitic deposits in hypersaline wetland-shallow lake systems. *Hydrological Processes*, 37(11), e15031. <https://doi.org/10.1002/hyp.15031>
- Alonso, C., Moreno, V., & Rodríguez, E.** (1999). Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación. una sencilla práctica de introducción a la teledetección. *TELEDETECCIÓN. Avances y Aplicaciones. VIII Congreso Nacional de Teledetección*, 429.
- Angelelli, V., Schalamuk, I., & Arrospide, A.** (1976). *Los yacimientos no metalíferos y rocas de aplicación de la región Patagonia Comahue*. Anales XVII. Secretaría de Estado de Minería, Buenos Aires.
- Carrillo de la Cruz, J. L., Escalona, F., Zamora Camacho, A., & Núñez-Cornú, F. J.** (2016). Interpretación de lineamientos estructurales en Nayarit, México, aplicando sensores remotos y software libre. *GEOS*, 35, 351–358.
- Schalamuk, I., Del Blanco, M., Marchionni, D., Romero, S., & Cábana, M. C.** (1999). Salinas y sulfateras de la región Pampeana. Buenos Aires y La Pampa. *Recursos minerales de la República Argentina*, volumen 35, 1947–1962. Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR.
- Soltaninejad, A., Ranjbar, H., & Honarmand, M.** (2017). Evaporite mineral mapping and determining their source rocks using remote sensing data in Sirjan playa, Kerman, Iran. *Carbonates Evaporites*, 33, 255–274.