

Identificación, clasificación y cartografía de los cuerpos de agua y manantiales en el sitio Ramsar (1981), Baño de San Ignacio, municipio de Linares, Estado de Nuevo León, México[☆]

Identification, classification and mapping of water bodies and springs at the Ramsar (1981) site, Baño de San Ignacio, Linares municipality, Nuevo León State, México

Jerjes Rigoberto Pantoja-Irys^a, Christian Santillanes-Gutiérrez^b, Hugo Mujica-Sánchez^a, Antonio Cardona-Benavides^c, Elizabeth Mandujano-Grimaldo^c, Carlos Trejo-De León^a, Octavio Ortiz-Enriquez^c, Heriberto Gonzalez-Sánchez^c

^aCorporación Ambiental de México S.A. de C.V, 64960, Monterrey, Nuevo León, México

^bCorporación Ambiental de México, 03100, Benito Juárez, Ciudad de México, México.

^cUniversidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, 78290, San Luis Potosí, México.

Resumen

Los humedales generalmente se relacionan directamente con el agua subterránea, que constituye la principal fuente para los ecosistemas terrestres dependientes de sus descargas naturales en la superficie. Esta investigación analizó las condiciones topográficas y se enfocó en la diferenciación de las descargas naturales de agua subterránea en el humedal denominado Baño de San Ignacio, clasificado como sitio RAMSAR (No. 1981) y como Área Natural Protegida en el 2000, durante la temporada de estiaje del 2024. Se realizaron mediciones de parámetros hidrogeoquímicos de campo en los diversos cuerpos de agua, así como vuelos con un Vehículo Aéreo No Tripulado; lo que permitió identificar cuerpos de agua con características (temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y potencial redox) muy contrastantes, así como una serie de depresiones topográficas y cauces de arroyos previamente no registrados. Las condiciones geológicas particulares condicionan la presencia de 1,644 depresiones topográficas, predominando las que tienen menor índice de circularidad (1.02-1.52) y de alargamiento (1.0-2.1), además de mayor índice de forma (0.3-0.9) y de elongación (0.7-1.1). De acuerdo con el número de Horton-Strahler se identificaron dos arroyos principales (con orden 7) que drenan el humedal, que se integran junto con un total de 21 cuerpos lagunares, 6 manantiales termales y 2 manantiales fríos. Los valores promedio de las características hidrogeoquímicas de campo de los manantiales termales (temperatura 34.4 °C, 6.8 de pH, -226 mV ORP, OD menor que 0.5 mg/l y CE de 7,800 μ S/cm), y cuerpos lagunares (temperatura 23.5°C, 7.0 de pH, 32 mV ORP, OD 1.8 mg/l y CE de 1,800 μ S/cm), sugieren que en el humedal descargan sistemas de flujo de agua subterránea de diferente trayectoria clasificados como regionales e intermedios. El estudio ratifica la dependencia del humedal en las descargas naturales de agua subterránea y la gran cantidad de depresiones topográficas sugiere que para la temporada de lluvias la cantidad de cuerpos lagunares se incrementará notablemente comparado con los identificados en la temporada de estiaje.

Palabras clave: manantial termal, humedal, depresión topográfica, lagunas, arroyos

Abstract

Wetlands are closely connected to groundwater, which is the primary source for land ecosystems that rely on natural discharges on the surface. This study was conducted to analyze the topographic conditions and differentiate natural groundwater discharges in the Baño de San Ignacio wetland, a RAMSAR site (No. 1981) designated as a Protected Natural Area in 2000. The research took place during the dry season of 2024. Field measurements of hydrogeochemical parameters were taken in various water bodies, and flights with an Unmanned Aerial Vehicle were conducted to identify water bodies with varying characteristics such as temperature, pH, electrical conductivity, dissolved oxygen, and redox potential. Additionally, previously unrecorded topographic depressions and stream beds were identified. Particular geological conditions led to the presence of 1,644 topographic depressions, with those having lower circularity (1.02-1.52) and elongation (1.0-2.1) indices predominating (0.3-0.9), as well as higher shape and elongation indices (0.7-1.1). With the use of the Horton-Strahler number, two main streams (with order 7) were identified as draining the wetland, along with a total of 21 lagoon bodies, 6 thermal springs, and 2 cold springs. The average values of the hydrogeochemical characteristics of the hot springs (temperature 34.4 °C, pH 6.8, -226 mV ORP, DO less than 0.5 mg/l and EC of 7,800 μ S/cm) and lagoon bodies (temperature 23.5 °C, pH 7.0, 32 mV ORP, DO 1.8 mg/l and EC of 1,800 μ S/cm), indicate that the wetland is discharged by groundwater flow systems with different trajectories, which are classified as regional and intermediate. The study confirms the wetland's dependence on natural groundwater discharges. The large number of topographic depressions indicates that the number of lagoon bodies will significantly increase during the rainy season compared to those identified during the dry season.

Keywords: hot springs, wetlands, topographic depressions, lagoon, creek

1. Introducción

Los avances digitales y tecnológicos de las últimas décadas han estimulado el uso de la percepción remota satelital y de vuelos aéreos no tripulados (VANT) con fines cartográficos multitemáticos; lo que ha permitido la ejecución de análisis más detallados de la superficie terrestre, los ecosistemas y su interacción con el ser humano (Ihl, et al., 2017; Lopez-Caloca et al., 2021; Pérez-Espinosa et al., 2019). En México, se han creado 232 “áreas naturales protegidas”, se apoya a 602 “áreas destinadas voluntariamente a la conservación” (www.conanp.gob.mx) y se han inscrito 144 sitios RAMSAR (www.ramsar.org). Cada uno de estos sitios requiere contar con un plan de manejo sustentable que permita dirigir las estrategias para la conservación y la continuidad de los procesos ecológicos y geológicos de los ecosistemas de cada uno de ellos. En esta investigación proponemos una metodología semiautomatizada para la generación de un mapa que identifica y clasifica los rasgos topográficos y cuerpos de agua de este importante humedal del noreste de México, con el uso de bases de datos públicas y tecnología de vanguardia.

Baño de San Ignacio (BSI) fue designado el sitio Ramsar número 1981, el 2 de febrero del año 2009 (Ramsar, 2009). Los humedales desempeñan múltiples funciones, como la preservación de diversidad biológica, el amortiguamiento de inundaciones y la mitigación del cambio climático; además son importantes sumideros de carbono, recarga de acuíferos, filtración y purificación de agua subterránea, entre otros. Dada su importancia internacional y su singularidad geotérmica, el humedal BSI ha sido investigado en múltiples disciplinas (Barbarín et al., 1998; Benítez, 1997; Chacón-Baca et al., 2016, Garza-Castillo, 2006; Hofmann et al., 1993; Rodríguez-García, 1992); sin embargo, hasta la fecha, no se ha publicado cartografía que diferencie los cuerpos de agua en el humedal. Para coadyuvar a la mejor comprensión y manejo del humedal BSI se creó un sistema de información geográfica que integra por métodos semiautomatizados: la identificación, clasificación y cartografía de los manantiales termales, las depresiones topográficas; los cauces de arroyos y las lagunas; además de ubicar y presentar información hídrica de algunas estaciones de monitoreo establecidas para conocer las características geoquímicas e hidrodinámicas de este singular ecosistema.

2. Descripción del área de estudio

El sitio Ramsar (1981), BSI se ubica en el noreste de la República Mexicana entre la Sierra Madre Oriental y la sierra de

San Carlos en el municipio de Linares, Estado de Nuevo León. Conforman una depresión topográfica (resultante de una tectónica compleja y miles de años de procesos endógenos y exógenos que han esculpido la geomorfología en el humedal), localizada en la parte baja de una pequeña cuenca de arroyos intermitentes que fluyen en dirección oeste-este y son tributarios del río Conchos. El límite norte del polígono (Figura 1) está delimitado en gran parte por un talud con una altura de hasta 2 m; siendo la zona más alta la del extremo occidental a 262 m s.n.m.m., y la más baja al oriente a 233 m s.n.m.m., a 500 m aproximadamente del punto de aforo de la cuenca y confluencia con el río Conchos. El polígono de forma elongada del sitio Ramsar humedal BSI tiene un área de 6.6 km², un eje longitudinal mayor de 7.93 km y su eje longitudinal menor de 1.34 km. El clima que predomina es del tipo semiseco cálido, la precipitación promedio anual es de 657 mm; el mes más lluvioso septiembre y enero el más seco; mientras que la temperatura media anual es de 19.3°C (SMN, 2024).

3. Metodología

Presentamos a continuación los métodos, basados en adquisición de imágenes de VANT, fotogrametría, interpretación visual de imágenes, y análisis espacial en un Sistema de Información Geográfica (SIG), que permitieron la identificación, clasificación y cartografía de depresiones topográficas (sección 3.1), cauces y arroyos (sección 3.2), cuerpos de agua-lagunares (sección 3.3) y manantiales (sección 3.4). Además, se midieron parámetros hidrogeoquímicos en estaciones de monitoreo del humedal (sección 3.5).

El área mínima cartografiable que corresponde a esta escala es de 484 m² de acuerdo con la propuesta de Salitchev (1979), sin embargo, la mayoría de los cuerpos de agua y manantiales identificados en el BSI no cumplen con el área mínima cartografiable y podrían considerarse para su eliminación del mapa; sin embargo, se tomó la decisión de no eliminarlos para mostrar la totalidad de los sitios identificados.

3.1. Identificación, clasificación y cartografía de depresiones topográficas

Se utilizó la metodología automatizada de Wu et al. (2015) y el método complementario empleado por Pantoja et al. (2022). La base cartográfica sobre la que se hicieron los cálculos, fue un mosaico de imágenes construidas a partir de los cuatro MDE LiDAR de INEGI (claves G14C59D1, G14C58C4, G14C58F2, G14C59D1).

3.2. Identificación, clasificación y cartografía de cauces y arroyos

Se estableció como base topográfica el MDE representado por el mosaico de imágenes construidas a partir de los cuatro MDE LiDAR de INEGI, y se realizaron los procesos descritos a continuación.

☆© J. R. Pantoja-Irys, C. Santillanes-Gutiérrez, H. Mujica-Sánchez, A. Cardona-Benavides, E. Mandujano-Grimaldo, C. Trejo-De León, O. Ortiz-Enriquez, H. Gonzalez-Sánchez. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), which permits non-commercial sharing of the work and adaptations, provided the original work is properly cited and the new creations are licensed under identical terms.

*E-mail address: jerjes.pantojai@anahuac.mx

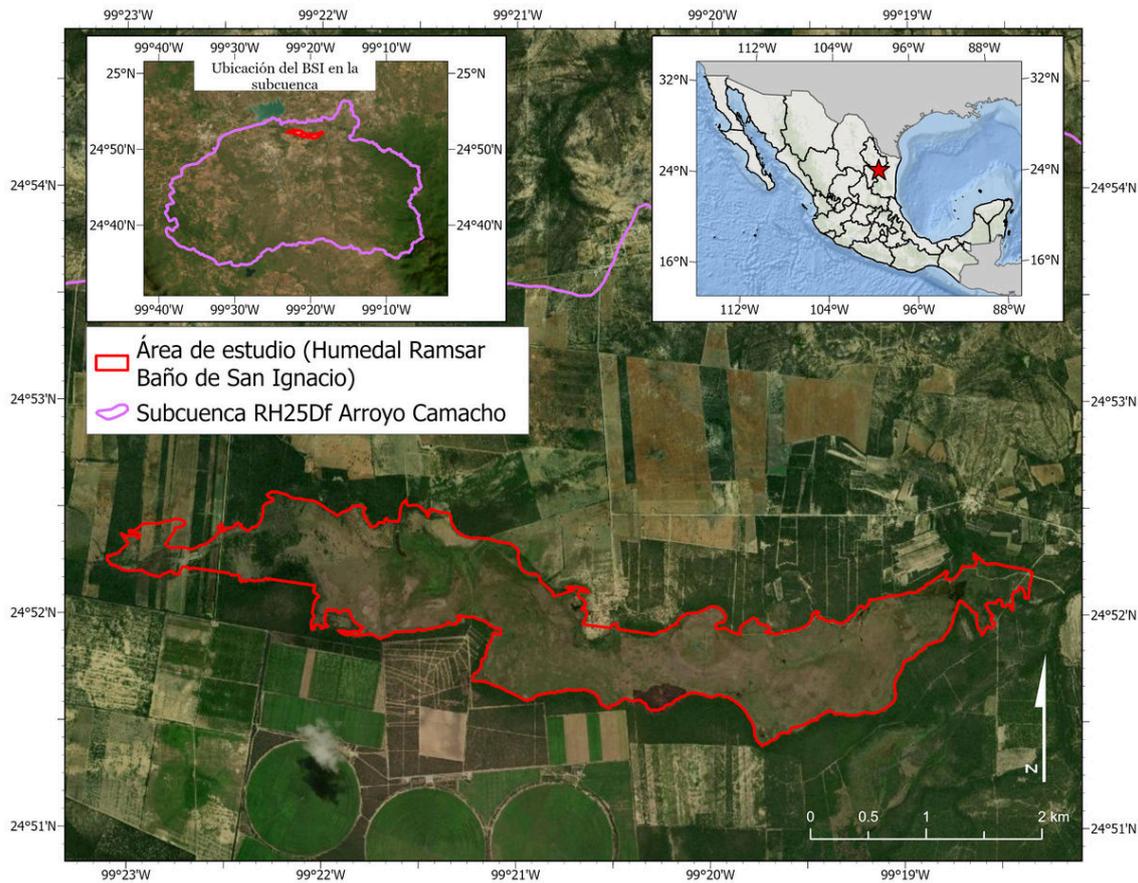


Figura 1. Localización del sitio Ramsar (1981), Baño de San Ignacio / Figure 1. Location of the Ramsar site (1981), Baño de San Ignacio

Primero se corrigieron los datos nulos existentes en el MDE (mosaico) para después obtener la dirección del flujo, que consiste en calcular la dirección en que sale el flujo de cada celda o pixel del raster de entrada. Posteriormente se obtuvo la acumulación del flujo, calculando la cantidad de agua que fluye dentro de cada celda desde todas las celdas con pendiente descendente. Por último, se identificaron los cursos de agua y se segmentaron, separándose en cursos-líneas segmentadas por cada vínculo-uniión con otro curso de agua. Una vez que se obtuvieron los cauces de los escurrimientos de agua, se clasificaron por el método Horton-Strahler (García-Puga; 2001), el cual asigna un orden numérico a los vínculos en una red de drenaje en función de su número de afluentes.

Al analizar los resultados del proceso anterior, se detectó que la topografía con poca pendiente de la zona propició errores en algunas conexiones y trazos en las corrientes de agua, principalmente en los arroyos de menor jerarquía. Por lo anterior se realizó una revisión de toda la red de arroyos y se corrigieron de forma manual una a una las conexiones y trazos erróneos de los cauces que lo ameritaron (~200), así como su clasificación. Algunas vías de comunicación y drenes en la periferia del humedal, por fuera de la delimitación de la cuenca calculada, son poco relevantes en la configuración de la red hidrológica. Esta aseveración pudo confirmarse durante el trabajo

en campo, al identificar que los arroyos principales calculados en gabinete siguen la misma configuración que sus contrapartes en la realidad.

3.3. Identificación, clasificación y cartografía de cuerpos de agua-lagunares y/o zonas de inundación

Este apartado de la investigación se elaboró en dos etapas, una en gabinete y la otra en campo. La identificación en gabinete consistió en hacer una revisión de las imágenes históricas existentes con cobertura para el polígono del BSI en el software Google Earth Pro. De esta búsqueda, resultaron 5 imágenes para diferentes temporalidades (2003, 2011, 2016, 2019 y 2023). Sobre cada una de estas imágenes, comenzando con la más reciente, se hizo una búsqueda y pre-identificación de aquellas formas que tuvieran características de textura, color y forma coincidente con un cuerpo de agua. Cada uno de los cuerpos identificados, fue confirmado como cuerpo de agua o descartado en función de la comparación con el resto de las imágenes revisadas, ya que algunas estructuras identificadas preliminarmente como cuerpos de agua, resultaron ser sombras o vegetación arbustiva y arbórea de acuerdo con imágenes más antiguas o más recientes según el caso. En este primer proceso se obtuvieron 24 cuerpos lagunares.

Para la identificación en campo se utilizó un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) modelo DJI Mavic 3 Enterprise, con cámara térmica y una estación móvil GNSS DJI D-RTK-2. Se realizaron sobrevuelos, con rutas automatizadas de los cuerpos lagunares y surgencias termales y frías. Las rutas de vuelo se automatizaron con el software DJI Pilot 2 y se procesaron con el software Pix4D Mapper para obtener mosaicos georreferenciados de imágenes RGB y térmicas de cada uno de los vuelos. Se capturaron videos térmicos y convencionales de los cuerpos identificados en gabinete, y de esta manera confirmarlos o descartarlos, así como clasificarlos como termales o fríos. Además de las rutas de vuelo automatizadas, se realizaron cuatro vuelos manuales capturando video con las cámaras RGB y térmica, con el fin de detectar cuerpos lagunares que no fueron identificados en gabinete. La versatilidad de esta herramienta permitió optimizar los tiempos de trabajo en campo y aumentar la precisión en la identificación, ya que lograron identificarse cuatro nuevos cuerpos de agua, al tiempo que se descartaron siete que correspondían a sombras de vegetación, arbustos frondosos y cuerpos de agua que en campo se identificaron como manantiales, además de confirmarse la existencia del resto. Dos de los vuelos se realizaron de manera transversal al polígono del BSI y dos longitudinales, con distancias de 910 m y 610 m, y 1,700 m y 2,500 m, respectivamente.

3.4. Identificación, clasificación y cartografía de manantiales

Después de identificar en gabinete los cuerpos de agua, se llevaron a cabo entrevistas a los responsables de la reserva para ubicar los manantiales termales identificados localmente. En esta fase del estudio también se recurrió a los vuelos automáticos y manuales del VANT con su cámara térmica para analizar la zona en busca de evidencias de actividad termal.

3.5. Parámetros hidrogeoquímicos de campo

Una vez que los manantiales y cuerpos lagunares fueron identificados tanto por el personal de la reserva como por el VANT con cámara térmica, se seleccionaron los que se consideraron como principales para la medición de parámetros hidrogeoquímicos de campo, que incluyeron temperatura, pH, conductividad eléctrica (CE), potencial redox (ORP; electrodo de platino), oxígeno disuelto (OD). Las mediciones de campo se realizaron con una sonda multiparámetro marca YSI modelo ProQuatro, que se sumergió al menos 0.5 m en el cuerpo de agua, manteniéndola estática durante las mediciones; se registraron datos cada 2 minutos hasta que las mediciones se estabilizaron (en general entre 10-15 min). El aseguramiento de la calidad de las mediciones de campo se logró mediante la calibración diaria de los diferentes electrodos al inicio de las actividades. Para la CE se utilizó una solución estándar de 1,413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C, para el pH se realizó calibración en tres puntos utilizando soluciones buffer de pH=4, pH=7 y pH=10. Para el ORP se utilizó una solución con redox 470 mV. La calibración del OD se realizó utilizando una solución con cero concentración de OD (generada mediante la disolución de sulfito de sodio

en agua destilada) y la concentración de oxígeno a la atmósfera (corregida de acuerdo con la altitud del sitio). De acuerdo con las características geoquímicas especiales de las descargas de los manantiales, se realizó la toma de una alícuota, preservada con 0.3 ml NaOH 6N y 0.3ml $\text{Zn}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ para análisis de sulfuros que se mantuvo en refrigeración (4°C) hasta su análisis de laboratorio. La determinación de sulfuros se realizó mediante espectrofotometría (Cline, 1969). El control de calidad para las determinaciones de laboratorio incluyó análisis de duplicados, y la utilización de materiales de referencia.

4. Resultados

4.1. Depresiones topográficas

Se lograron identificar 1,644 depresiones topográficas en el humedal BSI. En la Tabla 1 se pueden apreciar los datos máximos y mínimos de área, perímetro, eje mayor y eje menor, mientras que en la Tabla 2 se presentan los parámetros de circularidad, alargamiento, forma y elongación que, mediante el uso del método estadístico de K medias, permitieron clasificar y cartografiar las depresiones topográficas en 3 tipos: 1, 2 y 3 (Figura 2).

Tabla 1: Resultados morfométricos extremos totales / Table 1. Total extreme morphometric results.

Depresiones topográficas	Mínimo	Máximo
	1644	
Área (m^2)	7,218.18	40,443.78
Perímetro (m)	741.12	3,368.70
Eje mayor (m)	157.30	619.54
Eje menor (m)	95.95	413.31

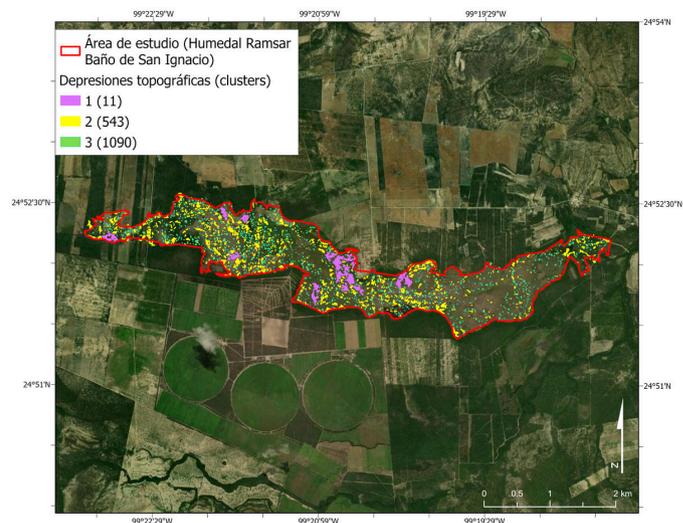


Figura 2. Localización de las depresiones y clasificación en grupos 1, 2 y 3 / Figure 2. Location of depressions and classification into groups 1, 2 and 3

Tabla 2: Índices morfométricos extremos totales / Table 2. Total extreme morphometric indexes.

Depresiones totales	Tipo/cantidad de depresiones	Circularidad		Alargamiento		Forma		Elongación	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1,644	1 / 11	2.07	3.94	1.15	2.65	0.14	0.42	0.43	0.73
	2 / 543	1.14	2.61	1.04	4.81	0.10	0.56	0.36	0.85
	3 / 1,090	1.02	1.52	1.00	2.06	0.35	0.91	0.67	1.08

4.2. *Cauces y arroyos*

Al terminar los procesos automatizados y manuales de identificación de arroyos sobre el mosaico LiDAR, se obtuvieron 2,261 corrientes de agua de los cuales dos se consideraron como los más importantes, a estos se les asignó el nombre de Guidi y Kawas (Figura 3). El primero de ellos tiene una dirección oeste-este, siguiendo el desnivel topográfico del terreno tendiendo a acumularse hacia el límite norte del polígono del humedal BSI. El segundo escurrimiento recorre el humedal con la misma dirección que el anterior, pero sobre el límite sur del polígono del humedal, hasta unirse con el arroyo Guidi en la porción este del polígono. La Tabla 3 indica el número de arroyos identificados y clasificados, y en la Figura 3 se cartografían.

Tabla 3: Características de los cauces y arroyos / Table 3. Stream characteristics.

Número de Horton-Strahler	Número de arroyos	Tipo de arroyo
1	1,400	Tributario/secundario
2	624	Tributario/secundario
3	180	Tributario/secundario
4	40	Tributario/secundario
5	12	Tributario/secundario
6	3	Tributario/secundario
7	2	Principal

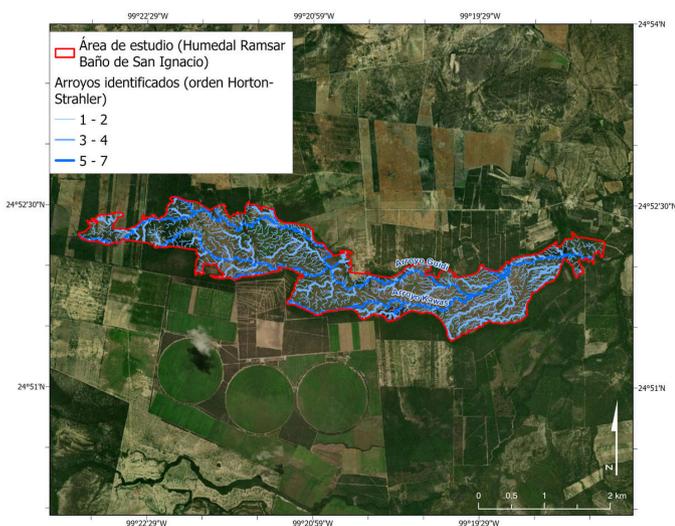


Figura 3. Localización de arroyos / Figure 3. Location of streams

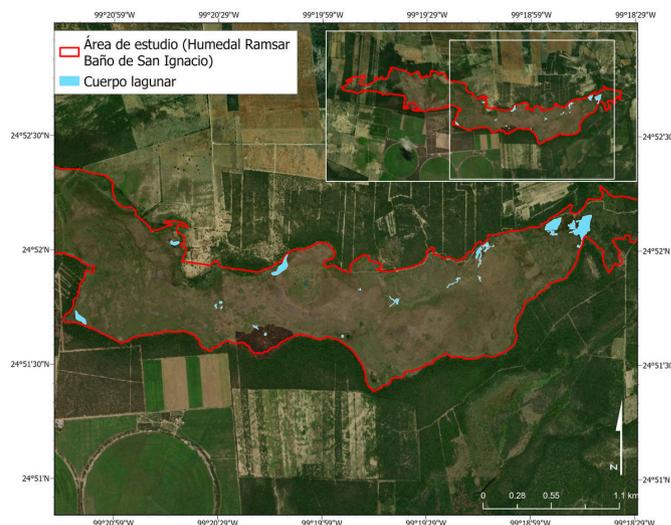


Figura 4. Localización de cuerpos lagunares / Figure 4. Location of lagoon bodies

4.3. *Cuerpos de agua-lagunares y/o zonas de inundación*

La identificación de cuerpos lagunares por medio de imágenes históricas y vuelos con el VANT arrojó un total de 21 polígonos, todos localizados en las zonas central y oeste del humedal BSI (Figura 4). Sus superficies se muestran en la tabla 4.

4.4. *Manantiales termales*

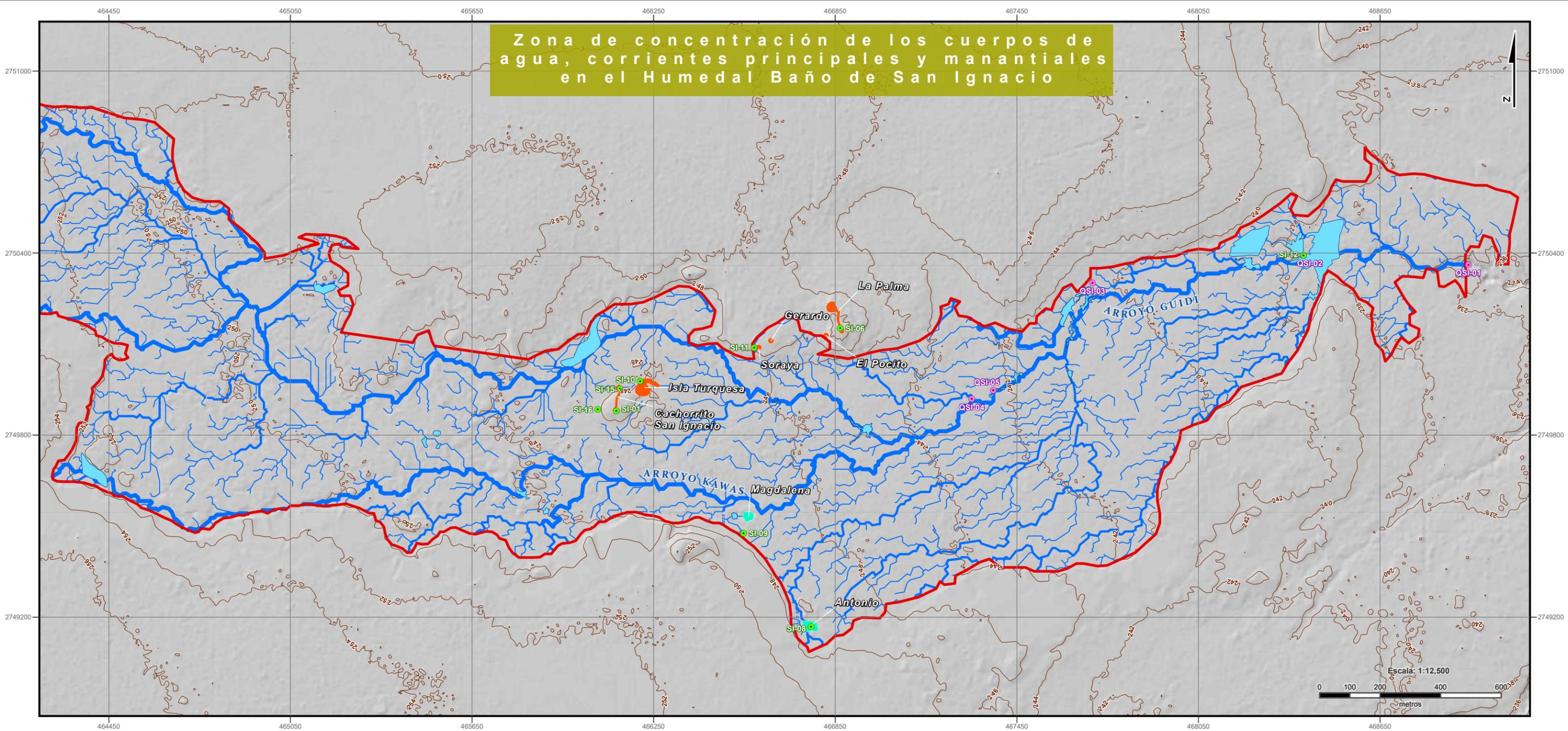
Por medio de la identificación de surgencias termales con ayuda del personal de la reserva del humedal BSI y los vuelos con el VANT, se identificaron un total de ocho manantiales, de

los cuales seis son termales y dos fríos (Figura 5). Sus coordenadas se muestran en la tabla 5.

4.5. *Hidrogeoquímica*

Los parámetros de campo (Tabla 6, Figura 6) del agua subterránea de los manantiales termales indica que los valores de pH están entre 6.60 y 7.42, por lo que el sistema analizado tiene valores cercanos a pH neutro; los menores valores de pH (promedio 6.8) se asocian con las aguas de mayor temperatura (promedio 34.4°C) valores muy negativos de ORP (promedio -226 mV), prácticamente nula presencia de OD y valor prome-

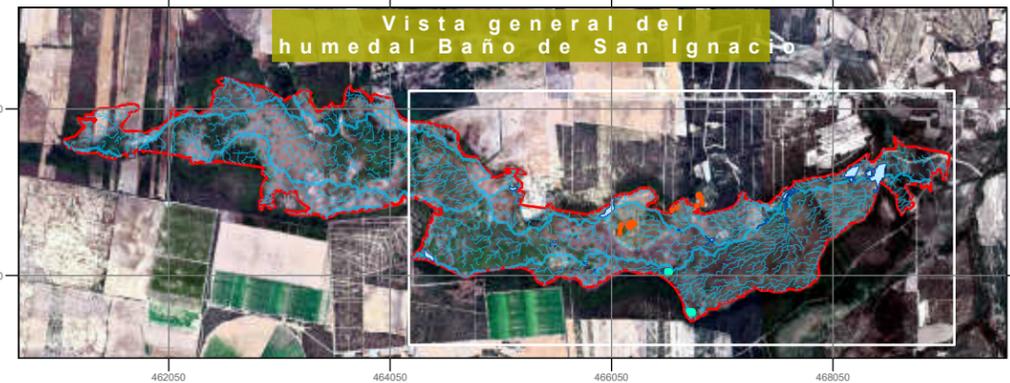
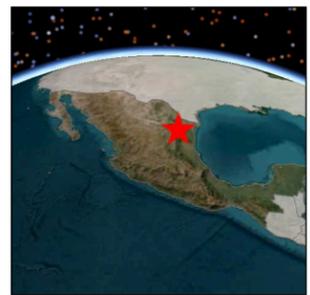
Zona de concentración de los cuerpos de agua, corrientes principales y manantiales en el Humedal Baño de San Ignacio



Explicación

- Red de drenaje (orden Horton-Strahler)**
 - 1 - 2
 - 3 - 4
 - 5 - 7
- Manantial**
 - Frío
 - Termal
- Referencias geográficas**
 - Humedal Baño de San Ignacio
 - Curva de nivel (2m)
 - Estación hidrométrica
 - Estación de monitoreo

Macro ubicación del área de estudio



Proyección.....UTM
 Datum.....WGS 84
 EPSG.....23614
 Cuadrícula.....cada 600m

Jerjes Rigoberto Pantoja Irys¹, Christian Santillanes-Gutiérrez², Hugo Mujica-Sánchez³, Antonio Cardona-Benavides³, Elizabeth Mandujano-Grimaldo³, Carlos Trejo-De León¹, Octavio Ortiz-Enriquez³, Heriberto Gonzalez-Sánchez³

¹Corporación Ambiental de México. Texcoco 100, Colonia Satélite Acueducto, 64960 Monterrey, Nuevo León, México.
²Corporación Ambiental de México. Patricio Sanz 1609, Torre 2, Piso 6, Colonia Del Valle, 03100 Benito Juárez, Ciudad de México, México.
³Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 78290 San Luis Potosí, México.

Bases cartográficas:
 Imagen satelital: ESRI-Maxar, World Imagery, 2023;
 Polígono del humedal Baños San Ignacio: CONAGUA, 2024.

Tabla 5: Coordenadas de los manantiales / Table 5. Coordinates of springs.

ID	Nombre	Tipo	UTM X (m)	UTM Y (m)
1	Cachorrito San Ignacio	Termal	466123.73	2749882.20
2	Gerardo	Termal	466638.00	2750112.00
3	Isla Turquesa	Termal	466208.52	2749952.00
4	El Pocito	Termal	466819.39	2750128.04
5	La Palma	Termal	466870.10	2750146.63
6	Soraya	Termal	466597.49	2750088.75
7	Antonio	Frío	486729.00	2749170.00
8	Magdalena	Frío	466551.90	2749534.17

(1988), Benitez-Gonzalez (1997), Chacón-Baca, et al. (2015), y Garza-Castillo (2006).

Se puede indicar que de acuerdo con la evolución geoquímica del agua subterránea en este humedal, se presentan modificaciones en su composición a partir de la trayectoria de flujo en el subsuelo y la interacción con los materiales geológicos con los que está en contacto; lo que resulta en que se incrementan los sólidos totales disueltos a lo largo de la dirección de flujo y la composición química evoluciona de bicarbonatada-cálcica a clorurada-sódica, la concentración de OD y el ORP disminuyen, a tal grado que en ocasiones facilitan el desarrollo de reacciones de reducción de sulfatos. Por el efecto del gradiente geotérmico, en la medida de que el agua subterránea circula a profundidad se incrementa su temperatura y transporta energía hacia las zonas de descarga natural de agua subterránea, por lo que en estos sitios se presentan anomalías de salinidad y temperatura. De este modo, los parámetros hidrogeoquímicos de campo registrados sugieren que de las descargas naturales de mayor temperatura y CE, nula presencia de OD y ORP negativo, son el resultado de una trayectoria de flujo (horizontal y vertical) diferente que los correspondientes a los cuerpos lagunares que tienen menor temperatura, CE, presencia de OD y ORP positivo. Las mayores concentraciones de sulfuro en las descargas termales (hasta 2,500 ppb $\Sigma\text{H}_2\text{S}$) derivadas de reacciones de reducción de sulfatos, contrastan con las registradas para los cuerpos lagunares superficiales (promedio 135 ppb $\Sigma\text{H}_2\text{S}$) corroborando este hecho. Los mayores valores de temperatura y CE sugieren una mayor profundidad de circulación y en general un mayor recorrido para el agua subterránea que descarga en los manantiales termales que para el agua subterránea que alimenta los cuerpos lagunares.

6. Conclusiones

El quehacer científico basado en las mediciones de campo se ha visto beneficiado con el uso de tecnología de reciente generación como los VANT. La combinación de imágenes VANT, de imágenes satelitales (para cubrir grandes porciones de terreno en poco tiempo), y del reconocimiento de zonas de difícil acceso, incrementó la eficiencia del trabajo en campo en el humedal BSI, permitiendo dedicar una mayor cantidad de tiempo a los análisis en gabinete.

Por las condiciones que presenta en cuanto a la cantidad identificada de depresiones topográficas, el humedal BSI puede funcionar en forma efectiva como un regulador local del ciclo hidrológico, especialmente durante eventos extremos (sequías y lluvias intensas) y como receptor de sedimentos, además de que es un sitio adecuado para la conservación de especies. Las aguas termales tienen una temperatura moderada, pH ligeramente menor al neutral, ORP negativo; como característica notable una elevada concentración de $\Sigma\text{H}_2\text{S}$ y una CE relativamente elevada, por lo que su principal utilidad es la de mantener el ecosistema local, ya que el agua no puede ser utilizada directamente para consumo humano o riego agrícola. Como los humedales son una zona de transición entre los ecosistemas terrestres y acuáticos, su preservación es importante por la cantidad de servicios ecosistémicos que puede proporcionar. De acuerdo con la teoría de sistemas de flujo thotianos de agua subterránea (Tóth, 1999, 2015) el sistema de flujo que alimenta los manantiales termales, por las características de temperatura, CE, pH y ORP, debe de corresponder con un sistema de flujo regional, mientras que el sistema de flujo que mantiene los cuerpos lagunares identificados en esta investigación corresponde con uno de tipo intermedio.

El mapa aquí publicado aporta información topográfica, hidrológica y geoquímica que podrá ser utilizada en el plan de restauración y manejo sustentable del humedal. Su integración con otros temas sociales, medioambientales (vegetación, fauna, microbiota) y su actualización a través del tiempo, permitirá comprender los efectos del cambio climático en el ecosistema. La metodología y la tecnología aquí descritas pueden aplicarse en investigaciones en otras áreas naturales protegidas, áreas destinadas voluntariamente a la conservación y sitios RAMSAR, coadyuvando en la preparación de los planes de restauración y manejo sustentable.

Software y diseño del mapa

Se realizó una recopilación de datos vectoriales y ráster para ser usada como capa base durante la construcción del mapa. Cada una de las capas base y del medio físico fueron reproyectadas al sistema de coordenadas utilizado en el mapa (UTM 14N, datum WGS 1984) con ayuda del software ArcGIS Pro y su módulo de Proyecciones y transformaciones.

Clave	Tipo	Elevación (m)	OD (%)	OD (mg/L)	ORP (mV)	pH	Sulfuros (μM)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)
SI-01	Descarga Manantial	259	1.6	0.11	-279.8	6.6	157.058	35.1
SI-06	Descarga Manantial	251	0.5	0.03	-314.3	6.63	112.745	35.3
SI-08	Descarga Manantial	246	25.4	2.1	104	7.1	8.606	23.2
SI-09	Descarga Manantial	248	18.4	1.5	-39.6	6.83	9.759	23.8
SI-10	Descarga Manantial	241	0.2	0.01	-141	6.95	3.814	34.7
SI-11	Descarga Manantial	251	12.2	0.84	-171.5	7.01	22.277	32.4
SI-12	Estanque	237	59.1	4.81	90	7.42	4.383	24.7
SI-15	Escurrecimiento Manantial	245	22.9	1.77	-84.9	7.29	4.255	26.5
SI-16	Manantial	216	41.1	3.38	51.1	7.57	10.087	21.2

Tabla 6: Parámetros hidrogeoquímicos de los manantiales / Table 6. Hydrogeochemical parameters of springs.

Se utilizó el software ArcGis Pro, versión 3.0 y su conjunto de herramientas Spatial Analyst y Arc Hydro para la identificación y clasificación de cuerpos lagunares, arroyos y depresiones topográficas. La proyección cartográfica utilizada en el mapa fue Universal Transversal de Mercator zona 14 norte (UTM 14N) datum WGS 1984, escala 1:12,000.

El mapa estático fue diseñado en un formato horizontal tamaño doble carta (tabloide), esta disposición fue la más adecuada para la forma y dimensiones del área de estudio. Se elaboró también un mapa interactivo que puede ser consultado a través del enlace DOI correspondiente, al final de este documento. Las capas públicas utilizadas en el mapa base se enlistan a continuación:

- Sitios Ramsar en México, escala 1:250,000, geovisor del Inventario Nacional de Humedales (CONAGUA, 2024).
- Marco Geoestadístico 2023, capas de polígonos municipales y localidades ameznadas, escala 1:4,000,000. Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI, 20-23).
- Red hidrográfica de la RH25 San Fernando-Soto La Marina (corrientes y cuerpos de agua), escala 1:50,000. INEGI (2010).
- Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) versión 3.0, con definición de 15 m, recortado en función del polígono de la RBEC, INEGI (2012a) en formato raster (imagen con información en cada uno de sus píxeles o celdas).
- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, escala 1: 50,000, con resolución de 5 m, tipo Terreno. G14C59D1, G14C58C4, G14C58F2, G14C59D1 de INEGI (2012b).
- Uso de suelo y vegetación serie VII, escala 1:250,000. INEGI (2018).

Agradecimientos

Al licenciado Gerardo de Jesús Guidi Kawas, director general, de la Reserva Natural Baño de San Ignacio AC por su

amable apoyo durante la ejecución de las actividades de campo de esta investigación. Al personal de la empresa Corporación Ambiental de México, por su entusiasta apoyo técnico.

Referencias

- Barbarín, J. M., Hubberten, H. W., Meiburg, P., Rodríguez de Barbarín, C. O., 1988. Hidrogeoquímica de las aguas termales del Baño San Ignacio, Linares, Nuevo León, México, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Actas de la FCT, UANL 3, 99 p.
- Benítez González, M. C., 1997. Contribución a la caracterización ecológica y socio-económica de la región Baño San Ignacio, Linares, Nuevo León, México: Linares, N.L., Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Tesis de Maestría, 137 p.
- Chacon-Baca, E., Alba-Aldave, L., Angeles, S., Cantú-Ayala, C., 2015. Tapetes microbianos recientes en el Manantial hidrotermal de Baño San Ignacio, Linares, Nuevo León. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 67 (3), 387–400, <https://doi.org/10.18268/BSGM2015v67n3a3>.
- Cline, J. D., 1969. Spectrophotometric determination of hydrogen sulfide in natural waters. Limnology and Oceanography 14, 454–458.
- Davidovich, B., Nassi, B., Elovici, Y., 2022. Towards the detection of GPS spoofing attacks against drones by analyzing camera's video stream. Sensors 22 (7), 2608, <https://doi.org/10.3390/s22072608>.
- del Agua (CONAGUA), C. N., 2024. Capa vectorial de los Sitios Ramsar en México, escala 1:250,000 (en línea). CONAGUA.
- García-Puga, J., Hinojosa-Corona, A., 2001. Aplicación de tres métodos de sistemas de información geográfica para la caracterización de la hidrología superficial en la región de Puertecitos-San Luis Gonzaga, B.C. Geos 21 (2), 114–124.
- Garza-Castillo, A. M., 2006. Caracterización hidrogeoquímica de las aguas termales del Baño San Ignacio, Linares, Nuevo León, México, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Tesis de Licenciatura, 96 p.
- Hoffmann, M., Rodríguez de Barbarín, C. O., Werner, J., 1992. Investigaciones geológicas e hidrogeológicas en el área del Baño San Ignacio, Linares, N.L., México: Linares, N.L., Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL Linares 7, 171–176.
- Ihl, T., Bautista, F., Mendoza, M., 2017. Preservation and intensity of land-use in the biosphere reserve of Zicuírán-Infiernillo, Michoacan. Terra Digitalis 1 (1), 1–5, <https://doi.org/10.22201/igg.terradigitalis.2017.1.2>.
- INEGI, 2010. Conjunto vectorial de red hidrográfica (corrientes y cuerpos de agua), escala 1:50,000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI, 2012a. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) versión 3.0, con definición de 15m. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI, 2012b. Imágenes de Alta Resolución LiDAR escala 1:50,000, claves: G14C59D1, G14C58C4, G14C58F2, G14C59D1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI, 2018. Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1:250,000, serie VII. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

- INEGI, 2023. Marco Geoestadístico, capas de polígonos municipales y localidades ameznadas, escala 1:4,000,000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- López-Caloca, A. A., Morales Gamas, A., López Aguilar, M. G., 2021. Wetland landscape based on Sentinel-2 images and geotagged photographs in Centla, Tabasco. *Terra Digitalis* 5 (2), 1–14, <https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2021.2.88>.
- Pantoja-Irys, J., Santillanes-Gutiérrez, C., Arista-Cázares, L., Ramírez-Colín, L., Hernández-García, D., Mujica-Sánchez, H., Wagner, M., 2022. Identification, classification and mapping of the karst depressions in El Cielo Biosphere Reserve, Tamaulipas, Mexico. *Terra Digitalis* 6 (2), 1–10, <https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2022.2.97>.
- Pérez Espinosa, I., Gallegos Martínez, M. E., Ressler, R. A., Valderrama Landeros, L. H., Hernández Cárdenas, G., 2019. Spatial distribution of submerged aquatic vegetation of los Petenes, Campeche. *Terra Digitalis* 3 (2), 1–11, <https://doi.org/10.22201/igg.25940694.2019.2.56>.
- Ramsar, 2009. Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR) Sitio 1981. Ramsar.
- Rodríguez-García, M. G., 1992. Investigaciones eléctricas sobre estructuras y régimen hidráulico de la anomalía térmica Baño San Ignacio. Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, Nuevo León.

This article accompanies the following material:

Static map: [10.22201/igg.25940694e.2024.2.121.10](https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2024.2.121.10)

Interactive map: [10.22201/igg.25940694e.2024.2.121.11](https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2024.2.121.11)