

USO DE PERCEPCIÓN REMOTA EN EL ANÁLISIS DE LIXIVIADOS EN VERTEDEROS

Use of remote sensing in the analysis of leachate in landfills

Mayra SERNA HERNÁNDEZ^{1*}, José David MENDOZA SANTANA¹,
Javier GÓMEZ MATURANO^{2**} y Ana Lilia AGUILAR GARCÍA¹

¹ Proyecto Nacional de Investigación e Incidencia “Estrategia transdisciplinaria de investigación y resolución en la problemática nacional de los residuos sólidos urbanos”, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, Unidad Regional Golfo, 91170 Xalapa, Veracruz, México.

² Departamento de Medio Ambiente y Energía, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, 31136 Chihuahua, Chihuahua, México.

Autores para correspondencia: * mayrasernahdez@gmail.com; ** javier.gomez@cimav.edu.mx

(Recibido: marzo 2024; aceptado: agosto 2024)

Palabras clave: zonas de acumulación, fotogrametría, índices espectrales, modelo digital del terreno, ortofoto.

RESUMEN

El manejo inadecuado de los sitios de disposición final (SDF) en México ha derivado en impactos negativos al medio ambiente y la salud humana. Uno de los principales problemas de los SDF es el casi inexistente manejo de lixiviados. Una de las causas de esta deficiencia es la falta de información precisa, detallada y actual de la dinámica de los lixiviados. En este estudio se evaluó el relieve del terreno del SDF Tonsil, localizado en el estado de Tlaxcala, México, aplicando técnicas de percepción remota para identificar las zonas de acumulación de lixiviados. Las técnicas utilizadas fueron la fotogrametría y el análisis de índices espectrales: índice de diferencia normalizada del agua (NDWI, por su sigla en inglés) e índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI, por su sigla en inglés). La fotogrametría se realizó a través de un sistema de aeronave pilotada a distancia y los índices se determinaron a partir del procesamiento de imágenes satelitales multiespectrales del sensor satelital Sentinel-2. Los resultados del análisis demuestran que la implementación conjunta de la fotogrametría y los índices espectrales, así como el análisis de sus subproductos, el modelo digital del terreno y la ortofotografía, permiten la identificación y comprobación de zonas de acumulación de lixiviados en vertederos. En el SDF Tonsil se detectaron tres zonas de acumulación, de las cuales dos pueden ser aptas para el emplazamiento de obras de manejo de lixiviados.

Keywords: accumulation zones, photogrammetry, spectral indices, digital terrain model, orthophoto.

ABSTRACT

The improper management of final disposal sites (FDS) in Mexico has resulted in negative impacts on the environment and human health. One of the main issues with FDS is the almost nonexistent management of leachates. A cause of these deficiencies is the lack of precise, detailed, and current information on the dynamics of leachates. In this study, the terrain relief of FDS Tonsil, located in the state of Tlaxcala, Mexico, was evaluated by applying remote sensing techniques to identify areas of leachate accumulation. The remote sensing techniques used were photogrammetry and the analysis of spectral indices, specifically the normalized difference water index (NDWI) and the normalized difference vegetation index

(NDVI). Photogrammetry was conducted through a remote pilot aircraft system, and the indices were determined from the processing of multispectral satellite images from the satellite sensor Sentinel-2. The results of the analysis demonstrate that the joint implementation of photogrammetry and spectral indices, as well as the analysis of their by-products, the digital terrain model and orthophotography, allow for the identification and verification of leachate accumulation areas in landfills. In the Tonsil FDS, three accumulation areas were detected, of which two may be suitable for the placement of leachate management works.

INTRODUCCIÓN

La creciente urbanización y el desarrollo industrial han llevado a un aumento significativo en la generación de residuos sólidos urbanos (RSU), que implican desafíos críticos en cuanto a su manejo y disposición final. Los sitios de disposición final (SDF) de RSU juegan un papel vital en la gestión de residuos; sin embargo, la administración eficiente de estos sitios es compleja, dada la necesidad de minimizar su impacto ambiental y garantizar que las comunidades cercanas no sean afectadas. El problema más importante asociado con los SDF es la generación de lixiviados, un tipo de agua residual peligrosa que puede causar contaminación de las aguas subterráneas (El-Saadony et al. 2023). Los lixiviados se forman a partir de una serie de reacciones físicas y químicas de los residuos y suelen presentar contenidos altos de demanda bioquímica de oxígeno, amoníaco, cloruro, metales pesados y contaminantes orgánicos (EPA 2010, Hussein et al. 2019). La infiltración de aguas de precipitaciones a través de un SDF influye significativamente en la generación de lixiviados (Azimov et al. 2020).

Rueda et al. (2021) indican que, considerando únicamente los SDF activos, en México existen 163 rellenos sanitarios (7.4 %) y 2034 tiraderos a cielo abierto (92.6 %). De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), sólo en 316 SDF existe la infraestructura para canalizar y tratar los lixiviados (INECC 2022). La carente gestión de lixiviados en México ocasiona impactos significativos al medio ambiente y la salud humana. Algunos de estos impactos son la contaminación del suelo y los acuíferos, emisión de gases de efecto invernadero y malos olores y exposición a sustancias peligrosas (EPA 2010, INECC 2022). En este contexto, es necesario contar con información precisa, confiable y actualizada sobre la situación de los SDF que permita a las autoridades ambientales y de obras públicas, a los profesionistas, académicos y público interesado en el tema, conocer y estudiar los problemas antes mencionados y tomar las decisiones pertinentes para mitigarlos (INECC 2022).

En su esfuerzo por proveer una solución para la adquisición de datos, el Proyecto Nacional de Investigación e Incidencia (Pronaii) “Estrategia transdisciplinaria de investigación y resolución en la problemática nacional de RSU” del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (actualmente Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Secihti), aplicado en seis ciudades mexicanas, implementó conjuntamente la fotogrametría con un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS, por su sigla en inglés) y el análisis de los índices espectrales como herramientas para analizar las zonas de acumulación de lixiviados en el SDF Tonsil, Tlaxcala, México.

El monitoreo de la dinámica de generación y movimiento de lixiviados en los SDF, así como las afectaciones al entorno natural y social, son algunas de las principales líneas de investigación en los estudios ambientales de los SDF. Los métodos tradicionales basados en estudios in situ y levantamientos topográficos convencionales son costosos y demandan una inversión considerable; sin embargo, el desarrollo de nuevas tecnologías, el estudio de los lixiviados en SDF se está revolucionando.

Desde hace varias décadas las imágenes aéreas se han utilizado para el manejo de SDF, de manera que a través de fotoanálisis y análisis topográficos se ha podido identificar la red de drenajes y acumulaciones de aguas superficiales. Con estos datos, se ha reconocido la trayectoria de posibles agentes contaminantes que impactan cuerpos de aguas superficiales, se identificaron zonas potenciales de inundación y se calcularon diques y embalses (Erb et al. 1981). Muleya (2020) demostró que a través del modelo 3D obtenido por fotogrametría se puede evaluar el riesgo de deslizamientos y áreas debilitadas por grietas y cárcavas en taludes de residuos. En el trabajo de Filkin et al. (2021), el análisis de imágenes aéreas permitió detectar la dispersión de basura en el territorio adyacente, la contaminación por lixiviados, las características del recubrimiento de los residuos y la infraestructura técnica en el sitio, así como inferir la estabilidad de taludes de residuos. La contaminación por lixiviados se ha detectado mediante la identificación

de canales y sus acumulaciones. Por tanto, se ha demostrado que los RPAS tienen la capacidad de realizar toda la gama de tareas asociadas con el monitoreo de SDF; sin embargo, estas aplicaciones sólo han sido explotadas y reportadas desde hace apenas tres o cuatro años (Sliusar et al. 2020).

La implementación de percepción remota satelital y los sistemas de información geográfica (SIG) también se han sumado al monitoreo detallado y efectivo de los SDF. Aslam et al. (2022) abordan la selección de áreas para SDF en Faisalabad, Pakistán, centrándose en el análisis espectral. Destacan cómo el uso de estos índices permite evaluar la presencia de agua y humedad en el terreno, asegurando que la selección de sitios para emplazar vertederos minimiza el impacto ambiental en los recursos hídricos.

El estudio de Papale et al. (2023) aporta una revisión sobre las potencialidades de los datos satelitales para el monitoreo de SDF de RSU, examinando métodos basados en la percepción remota para la identificación y monitoreo de estos sitios. Examina mediciones tanto de sensores espectrales como de radar, utilizando índices de vegetación y temperatura tanto de forma independiente como en combinación. Este estudio subraya la importancia de utilizar los datos adquiridos por sensores heterogéneos, incluidos los que operan en el infrarrojo visible/cercano e infrarrojo térmico, para un monitoreo de los vertederos y su impacto en las áreas circundantes.

Debido a que la percepción remota (PR) analiza la energía reflejada y emitida por la superficie en distintas bandas del espectro electromagnético, los índices espectrales son una herramienta que permite el estudio y monitoreo de procesos terrestres (Smith et al. 2005, Collado-Torres et al. 2015). Los índices se basan en las firmas espectrales únicas de los materiales y su utilidad radica en su capacidad de reflejar y monitorear cambios y condiciones específicas en el medio ambiente (Montero et al. 2023). Con los índices espectrales es posible monitorear la dinámica de la vegetación y de los cuerpos de agua, así como los regímenes de incendios, entre otros fenómenos naturales (Smith et al. 2005, Zeng et al. 2022). El análisis de Papale et al. (2023) expone la potencialidad de los datos satelitales en el monitoreo de SDF, enfatizando el uso combinado de índices espectrales con otras herramientas para detectar y evaluar el impacto ambiental de los vertederos, incluyendo lixiviados y emisiones de gases como el metano.

En este estudio se utilizan el índice de diferencia normalizada del agua (NDWI, por su sigla en inglés) y el índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI) para identificar zonas de acumulación

de lixiviados y sus efectos en la vegetación, respectivamente. Se ha demostrado que el NDWI es efectivo para identificar cuerpos de agua en una variedad de situaciones ambientales y de lixiviados (Montero et al. 2023); no obstante, su eficacia disminuye en entornos urbanizados, tendiendo a sobreestimar las extensiones de agua. Frente a esta limitación, Xu (2006) propuso el índice de diferencia normalizada modificada del agua (MNDWI, por su sigla en inglés), una mejora del NDWI que sugiere utilizar la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR) en lugar de la banda cercana al infrarrojo (NIR).

El NDVI es una herramienta esencial en el análisis y monitoreo de la vegetación, especialmente en áreas adyacentes a SDF (Papale et al. 2023). La aplicación de mapas de NDVI permite la identificación de zonas con cobertura vegetal reducida, que pueden ser indicativas de emisiones de metano (CH₄) o acumulación de lixiviados (Daugèla et al. 2020). Además, el NDVI se utiliza para diferenciar entre vegetación viva, estrés vegetativo y áreas no vegetativas, aprovechando la capacidad de la vegetación para reflejar y absorber diferentes cantidades de radiación en las bandas del rojo (B4) y NIR (Sonali et al. 2021).

La utilidad del NDVI se complementa con el NDWI y el MNDWI cuando se enfocan a la detección y análisis de cuerpos de agua. La capacidad de ambos índices para diferenciar entre áreas acuáticas y terrestres mejora el estudio integral de la interacción entre la vegetación y los recursos hídricos en los SDF (Gómez-Maturano et al. 2024). Este método optimiza el monitoreo ambiental y el manejo de lixiviados, facilitando la evaluación de los impactos y la toma de decisiones para la conservación de ecosistemas (Laonamsai et al. 2023).

Los SIG son una tecnología que integra métodos y herramientas para analizar y gestionar datos, asociándolos a una referencia geográfica (Flenniken et al. 2020). El carácter espacial de la información obtenida y procesada en esta investigación precisó la utilización de la tecnología mencionada. Dado que cualquier elemento que ocupa un espacio geográfico (como los lixiviados en un SDF) puede analizarse en un SIG (Burrough y McDonell 1998), la información obtenida se integró en capas de información georreferenciada en formatos vectorial y ráster.

El objetivo de este estudio fue evaluar el relieve del terreno del SDF aplicando una metodología basada en técnicas de PR para identificar zonas de acumulación de lixiviados. La metodología utilizada generó datos de alto detalle que representan la complejidad del relieve propiciada por la disposición final de residuos. Los resultados demostraron que las técnicas de PR no sólo permiten identificar las zonas de acumulación de

lixiviados, sino también sus trayectorias superficiales y la afectación de la vegetación que puede estar asociada a la presencia de lixiviados. La metodología aquí presentada permite generar información que sirve como punto de partida para identificar áreas donde conviene emplazar obras de manejo de lixiviados. Con ello se espera aportar elementos para el mejoramiento del manejo de lixiviados en el SDF Tonsil y reducir los impactos negativos ocasionados por la disposición final de residuos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La estrategia de investigación de este estudio consistió en tres etapas: la primera aborda el reconocimiento del caso de estudio, la segunda la planeación y ejecución de los trabajos relativos al levantamiento fotogramétrico, y la tercera el procesamiento y análisis de los índices espectrales (**Fig. 1**). El reconocimiento del caso de estudio se centró en describir la configuración del SDF, en específico las celdas y obras de manejo de lixiviados. Las técnicas de PR, fotogrametría y análisis de índices espectrales proveyeron de la información espacial y temporal necesaria para localizar las áreas con acumulaciones de lixiviados y la respuesta de la vegetación ante éstos.

Etapas I. Reconocimiento del caso de estudio

Una de las seis entidades mexicanas en las que el Pronaii colaboró para investigar y resolver la problemática

de la gestión y manejo de RSU es el estado de Tlaxcala. Dentro de esta colaboración, el Pronaii gestionó los permisos para realizar los estudios técnicos de caracterización del SDF Tonsil, localizado en el municipio de Panotla. Para determinar la configuración del sitio y entender la evolución histórica del SDF, se analizaron imágenes satelitales de Google Earth Time Lapse de baja resolución entre 1984 y 2023, así como imágenes de Google Earth Pro con alta resolución de 2011 a 2024. El SDF Tonsil fue clasificado como un sitio no controlado que recibe cerca de 700 t/día de RSU provenientes de 28 municipios de Tlaxcala. El predio tiene un área de 87 ha, cinco celdas de disposición final de RSU, cinco obras de manejo de lixiviados y un área de residuos esparcidos (**Fig. 2**).

Etapas II. Levantamiento fotogramétrico

Etapas IIa. Preparación y ejecución del vuelo con RPAS

Una vez conocida la configuración del SDF y sus límites, se procedió a planificar el vuelo del RPAS para obtener las imágenes aéreas. Se realizó una visita preliminar al SDF para observar las condiciones ambientales y físicas del lugar e identificar obstáculos. Este paso es necesario, ya que dichas condiciones provocan ajustes al plan de vuelo. El **cuadro I** muestra las consideraciones técnicas de la planeación del vuelo. Las fotografías aéreas fueron obtenidas a través de un dron Phantom 4 RTK de la marca DJI equipado con un sensor CMOS de 1" con 20 megapíxeles efectivos. Para la planeación del

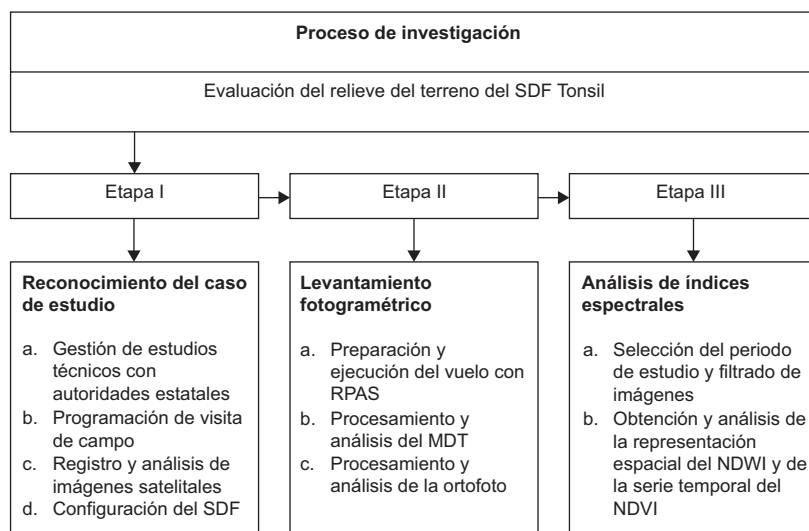


Fig. 1. Estrategia de investigación para la identificación de acumulaciones de lixiviados. (SDF: sitios de disposición final; RPAS: sistema de aeronave pilotada a distancia [por su sigla en inglés]; MDT: modelo digital de terreno; NDWI: índice de diferencia normalizada del agua; NDVI: índice de diferencia normalizada de vegetación.)

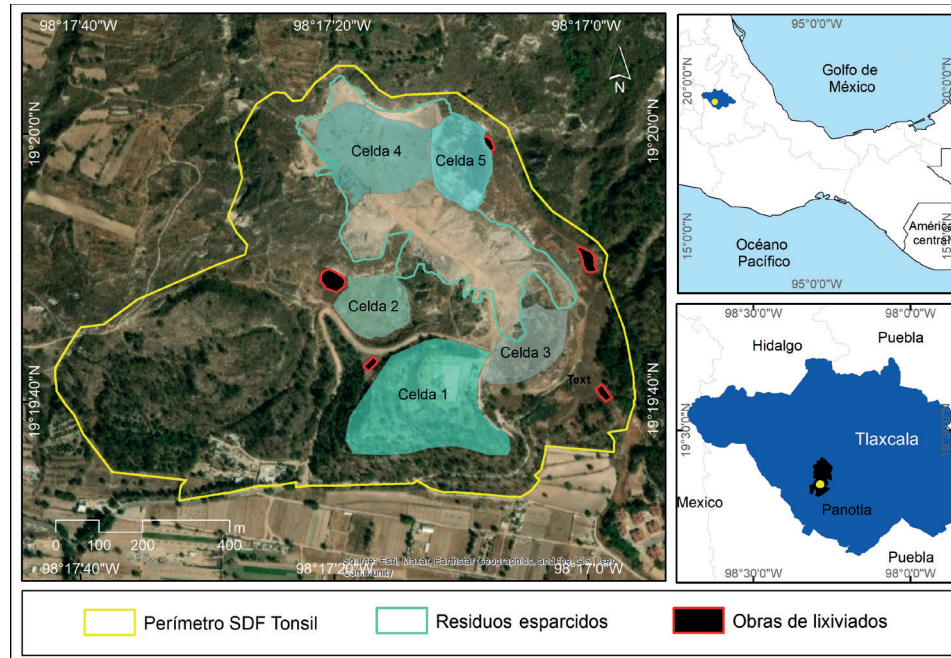


Fig. 2. Localización y configuración del sitio de disposición final Tonsil, Tlaxcala, México.

CUADRO I. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO Y PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL VUELO DEL RPAS.

| Parámetro | Magnitud/descripción |
|-----------------------------------|---|
| Fecha de vuelo RPAS | 8 de noviembre de 2023 Phantom 4 RTK DJI |
| Aplicación de planeación de vuelo | DJI Fly |
| Distancia de muestro del suelo | 4.6 cm |
| Área | 88.6 Ha |
| Altura de vuelo | 168 m |
| Traslape vertical | 60 % |
| Traslape horizontal | 60 % |
| Número de fotografías | 768 |

RPAS: sistema de aeronave pilotada a distancia (por su sigla en inglés).

vuelo se utilizó la aplicación DJI Fly y las funciones de mapeo se especificaron para que el píxel de la ortofoto y el modelo digital del terreno (MDT) fuera menor de 5 cm/píxel. El vuelo se realizó el 8 de noviembre de 2023, tuvo una altura de 168 m respecto al punto de despegue, las fotografías tuvieron un traslape horizontal y vertical del 60 % y se tomaron un total de 768 fotografías.

Una vez que se obtuvieron las imágenes aéreas se procedió a realizar los análisis de percepción remota para identificar las zonas de acumulación de lixiviados.

La **figura 3** detalla las etapas relacionadas con la fotogrametría y al análisis de los índices espectrales. Con el análisis visual, topográfico e hidrológico de la ortofoto y el MDT se identificaron zonas de acumulación y elementos topográficos con potencial para albergar lixiviados. La presentación visual de las áreas destacadas por el NDWI sobrepuestas en la ortofoto corroboró y agregó áreas de humedad que fueron interpretadas como zonas de acumulación de lixiviados. Para delimitar las zonas de acumulación y las principales trayectorias de lixiviados fue necesario integrar y analizar la información obtenida por las técnicas de PR. Estos procesos se llevaron a cabo en el SIG ArcGis Pro.

Etapas IIb. Procesamiento y análisis del MDT

Las imágenes aéreas para generar el MDT fueron procesadas en el software Agisoft Metashape. Una vez generada la nube de puntos fueron eliminados los datos (puntos) para representar únicamente la superficie del terreno. A partir de la nube de confianza se eliminaron los puntos de menor confiabilidad y con una reclasificación manual se eliminaron aquellos puntos que evidentemente no correspondían a la superficie del terreno: personas, vegetación, maquinaria, etc. Por el tamaño del predio, la clasificación manual se centró en las áreas que presentaban residuos y vegetación. El MDT tuvo una resolución de píxel de 4.63 cm.

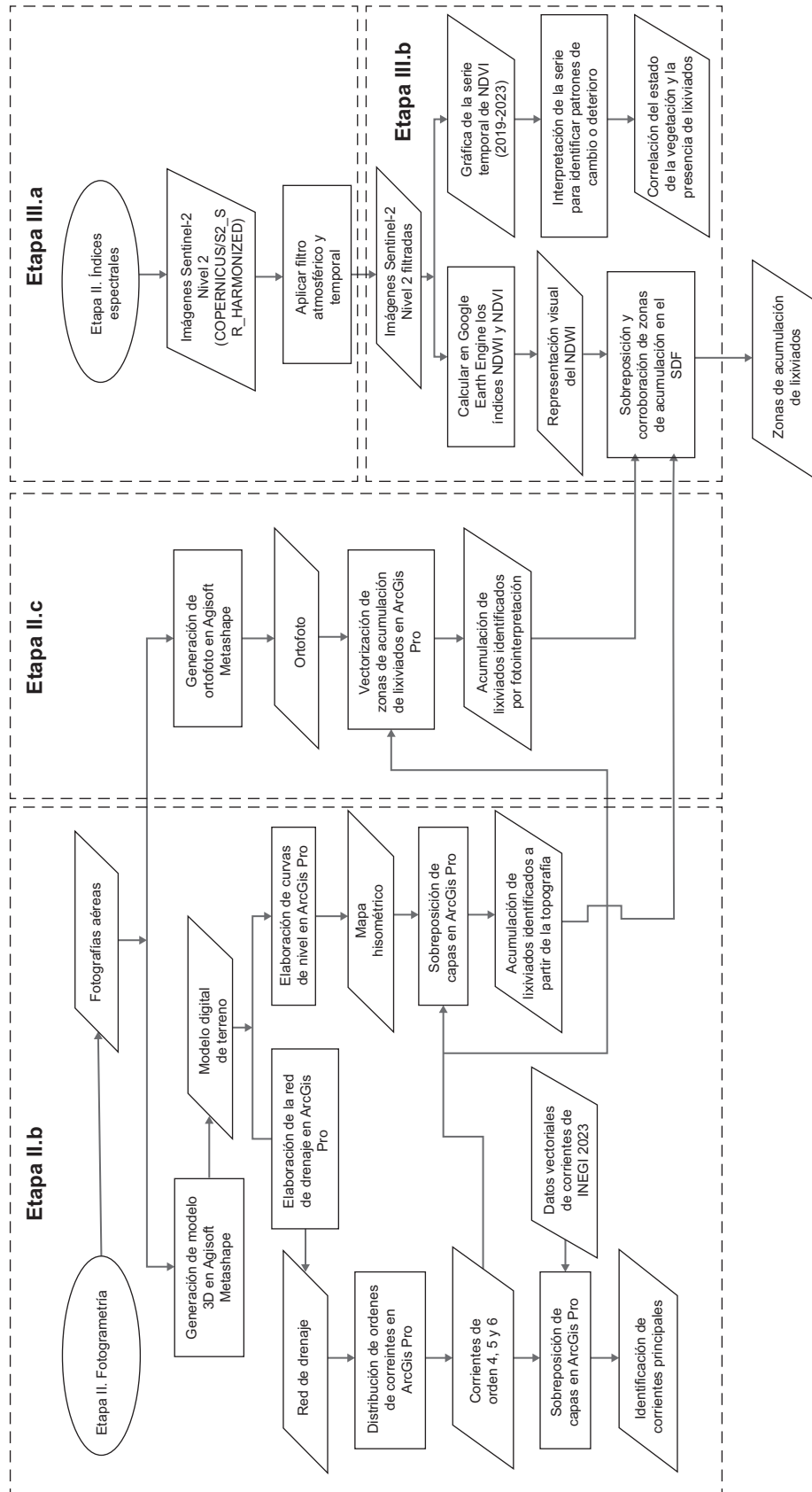


Fig. 3. Diagrama de flujo para la identificación de acumulaciones de lixivios en el sitio de disposición final Tonsil mediante percepción remota.

El MDT sirvió para identificar los rasgos topográficos que determinan las trayectorias y zonas de acumulación de lixiviados. Las trayectorias se definieron por la red de drenaje y las zonas de acumulación por los cauces de las corrientes principales y superficies topográficas bajas.

La red de drenaje se definió con la herramienta Hydrology de ArcGis Pro y, con base en el orden de corriente, los drenajes fueron representados con diferentes colores. La representación de los drenajes según su orden permitió distinguir la dirección de flujo preferencial del SDF e identificar espacialmente las corrientes de mayor orden (5 y 6) que fueron consideradas como corrientes principales.

Con la intención de comprobar si las corrientes principales eran alimentadas por corrientes aguas arriba y su trayectoria fuera del sitio, se superpuso el conjunto de datos vectoriales topográficos E14B33, escala 1:50000 (INEGI 2023). Se determinó que dos corrientes del SDF presentaron geometría y ubicación semejante con corrientes definidas por el INEGI; a partir de esta semejanza se nombraron las corrientes principales del sitio. Además, la superposición de los datos del INEGI definió si el agua y lixiviados captados y generados en el SDF se acumulan en éste o si provienen de un sitio exterior y migran fuera de él, lo que incrementaría los impactos ambientales.

Para identificar los bajos topográficos se generaron las curvas de nivel de 1 y 5 m con la herramienta contour de ArcGis Pro y se superpusieron las corrientes de órdenes 4, 5 y 6. La coincidencia espacial de superficies topográficas bajas y de corrientes de orden alto fue el indicador que permitió delimitar las zonas potenciales de acumulación por análisis topográfico.

Etapas IIc. Procesamiento y análisis de la ortofoto

Las 768 fotografías aéreas fueron procesadas con el programa Agisof Metashape para generar la ortofoto del sitio con una resolución de píxel de 4.63 cm. A partir del análisis visual de la ortofoto y de la red de drenaje, se generó una capa de datos vectoriales de áreas de acumulación de lixiviados. En esta capa se mapearon aquellas zonas en que se visualizaron cuerpos de líquido negro y superficies de coloración negra, donde también se localizaban uno o varios drenajes (**Fig. 4**).

Las acumulaciones que se muestran en la **figura 4a** se delimitaron con base en el área que presentaba coloración negra y corrientes. En la **figura 4b** la identificación se apoyó en la presencia de corrientes, superficies de color negro y corrientes activas de lixiviados. La acumulación de la **figura 4c** corresponde a una obra de manejo de lixiviados en que se

observaron corrientes convergiendo hacia dicha estructura. Vectorizar la distribución de las acumulaciones de lixiviados permitió inferir el flujo preferencial de éstos y establecer si las obras de manejo de lixiviados y procedimientos técnicos aplicados en los residuos logran un manejo adecuado de los mismos.

Etapas III. Índices espectrales

Etapas IIIa. Selección del periodo de estudio y filtrado de imágenes

Para el análisis espectral centrado en el NDWI, MNDWI y NDVI, con los que se evaluaron las variaciones temporales de la acumulación de agua y el verdor de la vegetación, se emplearon imágenes satelitales de Sentinel-2 con resolución de 10 m correspondientes al periodo 2019-2023. Este proceso se ejecutó en Google Earth Engine, una plataforma en la nube que facilita el análisis de grandes conjuntos de datos geoespaciales (Amani et al. 2020).

Para mejorar la calidad del análisis de imágenes se aplicó un filtro que elimina píxeles afectados por nubes. Esta técnica garantiza un análisis más fiable de los índices espectrales. Además, se utilizó una clasificación de cambios con umbrales preestablecidos para identificar áreas de cambio significativo. Esto mejoró la interpretación de las dinámicas ambientales, permitiendo visualizar los cambios en mapas temáticos y series temporales para una clara comprensión de las tendencias.

Etapas IIIb. Obtención y análisis de la representación espacial del NDWI y el MNDWI, así como de la serie temporal del NDVI

El cálculo del NDWI se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$NDWI = (B3 - NIR)/(B3 + NIR) \quad (1)$$

donde *B3* representa el valor de reflectancia de la banda verde y *NIR* el valor de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (Gerardo y de Lima 2023).

El MNDWI se calculó utilizando la siguiente expresión:

$$MNDWI = (B3 - SWIR)/(B3 + SWIR) \quad (2)$$

donde *SWIR* es la reflectancia en la banda de infrarrojo de onda corta. Este índice es particularmente efectivo para identificar cuerpos de agua, aprovechando la mayor absorción en SWIR comparada con NIR. Du et al. (2016) validaron su utilidad, señalando que el MNDWI mejora la detección de agua frente al NDWI original.

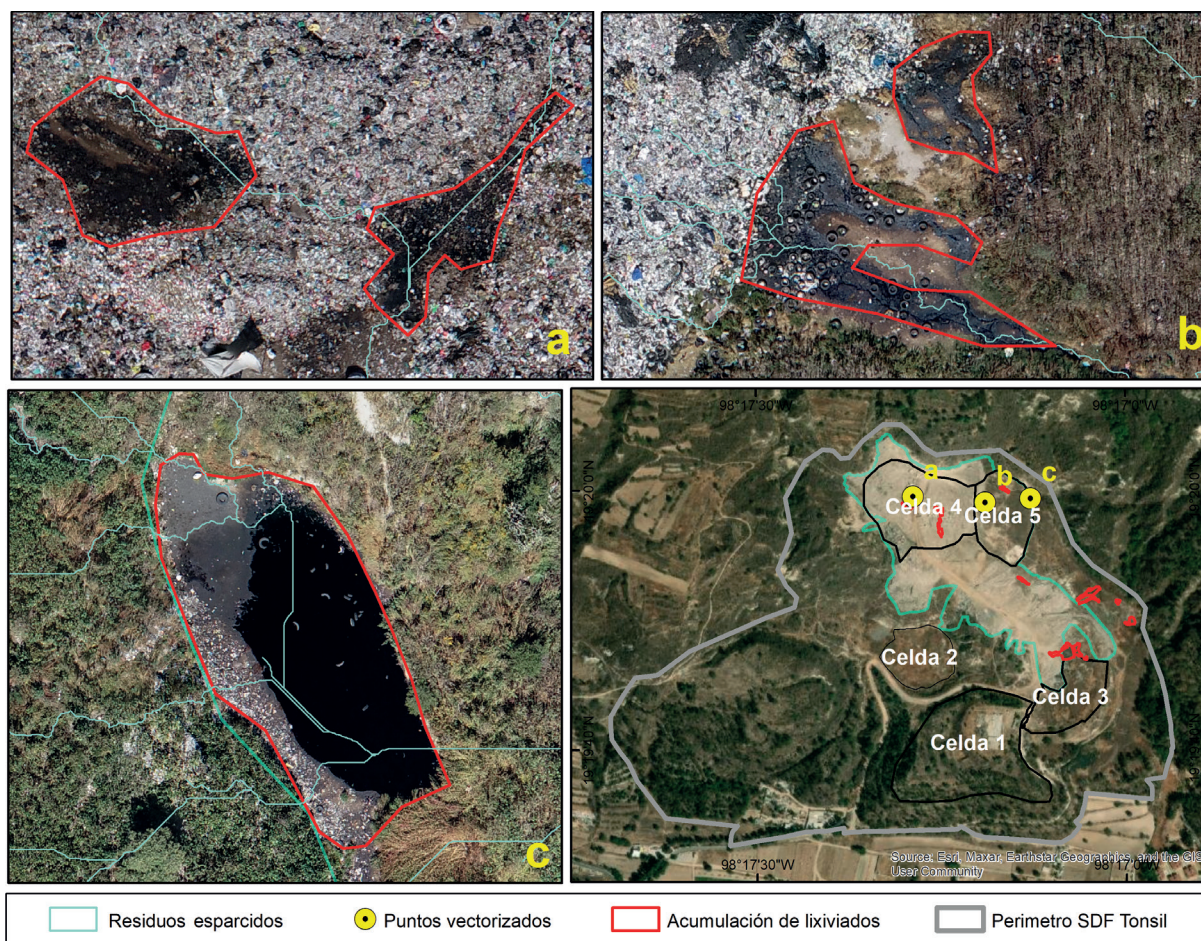


Fig. 4. Acercamiento a algunas zonas de acumulación de lixiviados vectorizadas a partir de la ortofoto y del sistema de drenaje.

Una vez que se calculó el NDVI, su representación espacial se sobrepuso a la capa de acumulaciones de lixiviados identificados por fotointerpretación (Etapa IIc). La sobreposición se realizó con la intención de corroborar las zonas de acumulación previamente reconocidas y localizar otras que no se hubiesen identificado.

El NDVI se fundamenta en la relación entre la diferencia y la suma de la reflectancia del NIR y la banda roja B4, expresada mediante la siguiente expresión:

$$NDVI = (NIR - B4)/(NIR + B4) \quad (3)$$

Esta relación capta las firmas espectrales específicas de la vegetación, proveyendo un indicador de su salud, densidad y bienestar (Lozano-Tello et al. 2023).

La serie temporal del NDVI se elaboró mediante un algoritmo programado en Google Engine que consideró el registro de los valores del índice del SDF para calcular un promedio de los píxeles y construir

la serie temporal. Para descartar que las variaciones del NDVI fueran controladas por la precipitación y establecer una relación del índice con la presencia de lixiviados, se analizaron simultáneamente las magnitudes de las precipitaciones mensuales y anuales registradas en la estación climatológica del Observatorio de Tlaxcala y los valores del NDVI.

RESULTADOS

Los resultados se presentan con base en las etapas descritas en la **figura 3**. Cada uno de los resultados sumó información para identificar las principales zonas de acumulación de lixiviados.

Etapas IIb. Procesamiento y análisis del MDT ***Corrientes principales***

La **figura 5** muestra la red de drenajes generados a partir del MDT, diferenciados según su orden (el

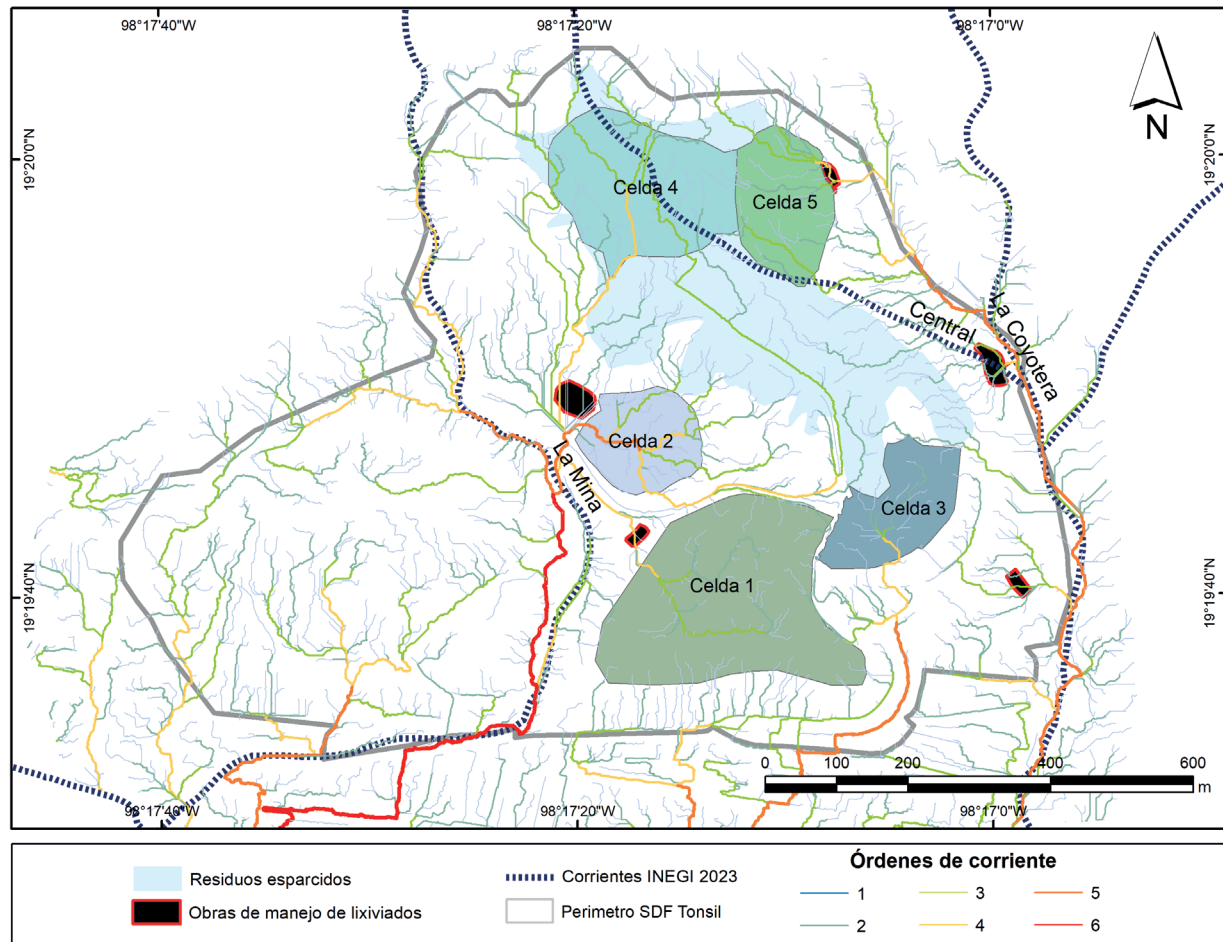


Fig. 5. Red de drenaje del sitio de disposición final Tonsil. Fuente: datos vectoriales topográficos E14B33, escala 1:50000 (INEGI 2023).

orden máximo es 6). Se identificaron dos corrientes principales, una de orden 5 que corre a lo largo del límite este del sitio y, otra de orden 6 que lo cruza en la parte central con dirección norte-sur. Con base en los órdenes de las corrientes se identificó que el agua fluye preferencialmente de norte a sur. La dirección se debe a la forma del terreno, que es una ladera que conecta una meseta al norte con un valle al sur.

A partir del análisis de los datos del INEGI (2023) se determinó que la corriente de orden 5 es la corriente La Coyotera y la de orden 6 es la corriente La Mina. En la parte norte-central del SDF, sobre la celda 4 y límite sur de la celda 5, según el INEGI (2023) existe una tercera corriente, definida como Corriente Central. Ésta inicia en el norte del sitio y fluye hacia el sur para unirse con la corriente La Coyotera. La intensa modificación del relieve debida a la disposición de residuos pudo haber ocasionado que el cauce de la Corriente Central no fuera preservado

y, por tanto, no hubiera sido identificado en la red de drenaje generado a partir del MDT. La red de drenaje mostró que la zona que drenaba la Corriente Central ahora es drenada por corrientes de órdenes 1, 2 y 3.

Con base en los datos del INEGI (2023) y la red de drenaje elaborada a partir del MDT, se confirmó que existen al menos tres cauces que aportan agua al SDF, las cuales continúan su trayectoria fuera del mismo, atravesando su superficie. La entrada de agua por escorrentía y su libre curso a través y fuera del SDF puede provocar efectos negativos como incremento en la generación de lixiviados, dispersión de lixiviados, contaminación del agua al contacto con residuos, contaminación de cuerpos de agua localizados aguas abajo, contaminación del suelo y transporte de residuos sólidos. Los gastos de las corrientes que aportan agua al sitio, así como sus trayectorias, deben ser consideradas para el diseño de las obras de manejo de lixiviados y de drenaje.

Zonas de acumulación identificadas por análisis topográfico

El mapa hipsométrico, las curvas de nivel de 1 y 5 m, y las corrientes de órdenes 4, 5 y 6 fueron los insumos para el análisis morfológico del relieve que permitió identificar zonas potenciales de acumulación de lixiviados (**Fig. 6**).

Las pendientes que bordean las corrientes principales (La Mina y La Coyotera) son algunos de los elementos topográficos más evidentes del SDF (**Fig. 6a**). En la franja este del sitio, se localiza la pendiente que delimita el margen derecho de la corriente La Coyotera, la cual tiene inclinación hacia el este y un desnivel de aproximadamente 50 m. La corriente La Mina está albergada en la parte central del sitio; tiene una traza preferencial de norte a sur y está delimitada por dos pendientes con inclinaciones opuestas entre sí y desniveles de aproximadamente 50 m.

La parte norte del sitio se caracteriza por una plataforma, correspondiente a la zona denominada como “Residuos esparcidos”. En esta zona se observan corrientes de orden 3 que fluyen hacia el sureste para unirse con la corriente La Coyotera y hacia el sur con

la corriente La Mina. En el sur del sitio, cerca de la celda 3, se observó una corriente de orden 3 que fluye hacia el sur y alcanza orden 4 en los límites del SDF.

Identificar las corrientes de órdenes altos permitió ubicar los cauces por donde se espera que fluya la mayor cantidad de agua y lixiviados. Los cauces de las corrientes La Coyotera y La Mina deben analizarse en primer lugar para definir si estas zonas son aptas o no para el emplazamiento de obras de manejo y/o contención de lixiviados. Considerando los datos del INEGI (2023), las corrientes principales drenan áreas ubicadas aguas arriba del SDF. Estas aportaciones deben tomarse en cuenta para la proyección de las obras de manejo de lixiviados y de drenaje.

Con el análisis morfológico se determinó que la plataforma adyacente y superpuesta a la celda 2 es una zona de acumulación de lixiviados y agua. Esta superficie es una plataforma rodeada por laderas conformadas por material natural y residuos. Su salida se localiza en el suroeste a través de una corriente de orden 5, en la cual convergen cuatro corrientes de orden 4. A partir de las curvas de nivel de 1 m se observó que la plataforma presenta curvas de nivel cerradas de menor altitud que el terreno

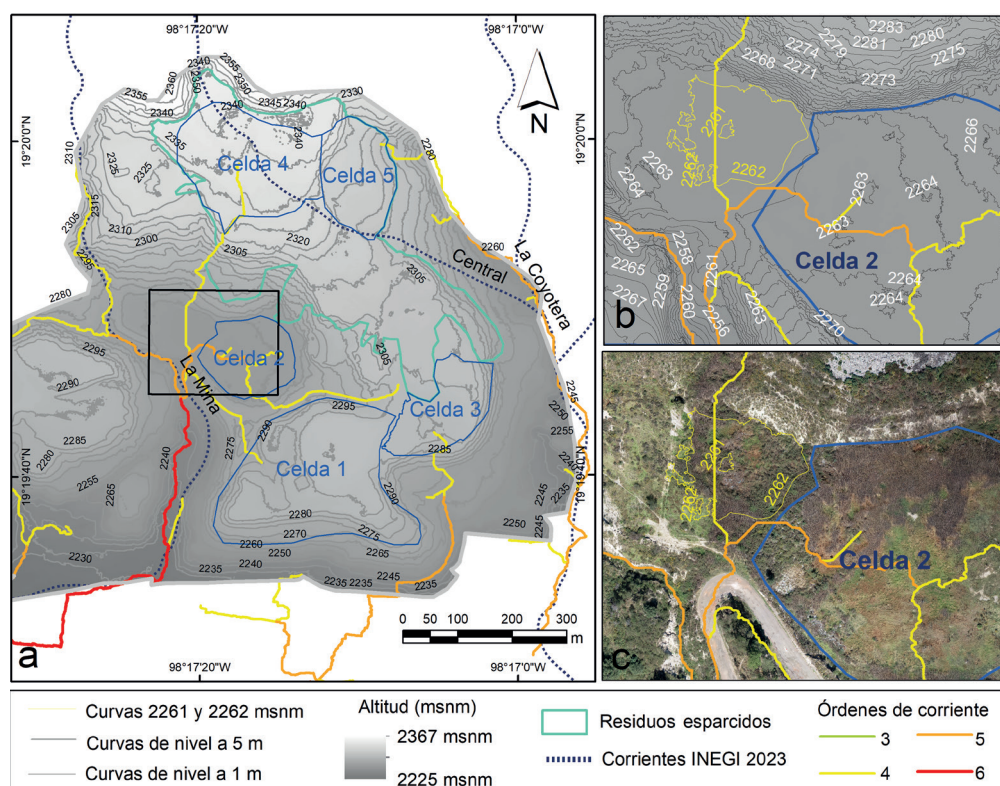


Fig. 6. Mapa hipsométrico y de corrientes del sitio de disposición final Tonsil.

circundante (**Fig. 6b**). Otro rasgo que se suma a esta interpretación y que fue observado en la ortofoto, es la abundante vegetación de la plataforma (**Fig. 6c**), que debe su presencia a la existencia de agua. Por el orden de las corrientes que convergen y su altimetría, esta plataforma es una zona de acumulación importante.

Etapa IIc. Procesamiento y análisis de la ortofoto
Zonas de acumulación identificadas por fotointerpretación

Las acumulaciones de lixiviados identificadas a partir de la ortofoto y del sistema de drenaje consisten en cuerpos de lixiviados y superficies de color negro con presencia de drenajes superficiales (**Fig. 7**). Algunas acumulaciones se localizan en depresiones o zonas planas que parecen generarse cuando los lixiviados fluyen hacia estas superficies; otras son estructuras construidas para tal fin. Las acumulaciones coinciden con drenajes superficiales que fluyen hacia la corriente La Coyotera y hacia la celda 2. La mayoría se localizaron en la franja este del SDF.

La distribución de las acumulaciones de lixiviados está controlada por la geometría del terreno y los frentes de disposición final de residuos activos, haciendo que éstas se concentren en la franja este y el área central del sitio, en el cual se distingue una plataforma definida como “Residuos esparcidos” donde la disposición final de residuos está activa. Los frentes activos se distribuyen según el criterio del personal del sitio y cambian de ubicación constantemente.

La plataforma de residuos esparcidos está rodeada por laderas convexas hacia el este y cóncavas hacia el suroeste. En el este, sobre las laderas convexas, las concentraciones de lixiviados se localizan en la corona y en el pie de talud. La presencia de las acumulaciones en la corona se debe a la poca inclinación del terreno y al depósito descontrolado de residuos que genera pequeños bordos, propiciando la retención de lixiviados y agua. Los pies de talud corresponden al cauce de La Coyotera y por tanto son bajos topográficos que por gravedad acumulan lixiviados. En la zona central del sitio, las laderas potencian el transporte de lixiviados y agua hacia el área de la celda 2 ya que presentan perfiles rectos y cóncavos.

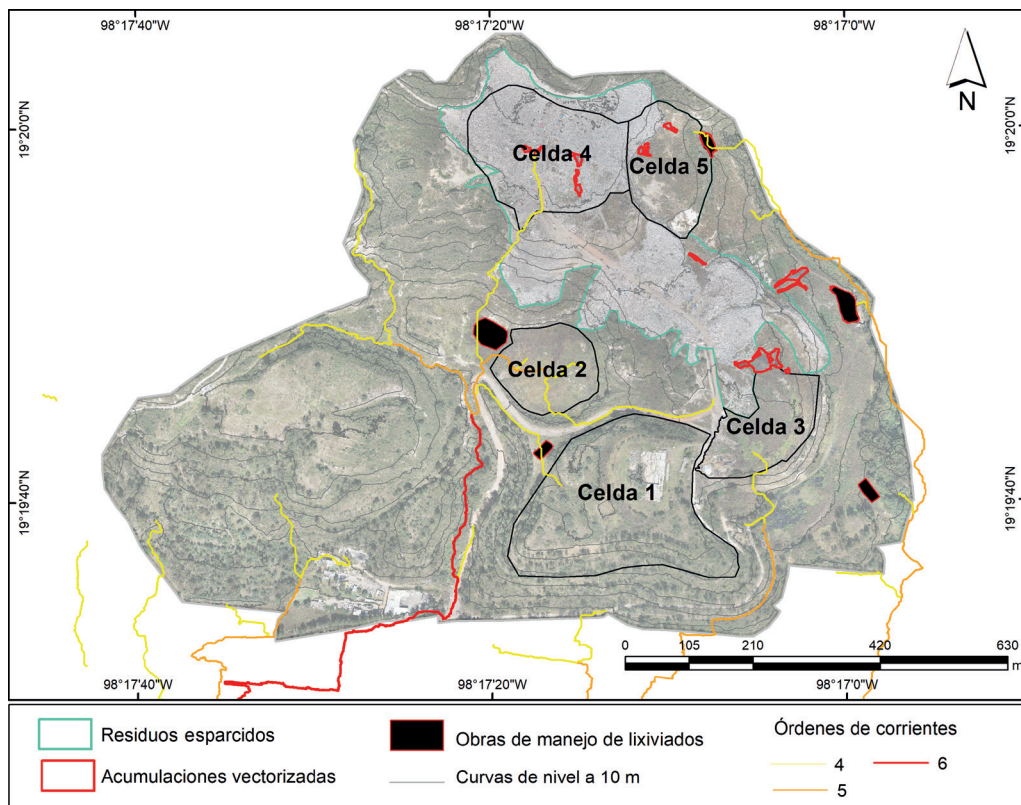


Fig. 7. Zonas de acumulación de lixiviados en el sitio de disposición final Tonsil identificadas a partir de la ortofoto y la red de drenajes.

Etapa IIIb. Obtención y análisis de la representación espacial del NDWI y de la serie temporal del NDVI

Zonas de humedad identificadas por NDWI

La **figura 8** concentra las zonas de acumulación de lixiviados y de humedad identificadas a través del análisis visual de la ortofoto y el análisis temporal del NDWI, respectivamente. La superficie de la celda 2, previamente identificada como una zona de acumulación con base en la topografía, presenta un NDWI correspondiente a la presencia de agua. Sobre la celda 5, el NDWI indica concentración de humedad. En la franja este del SDF tanto en el análisis del NDWI como en la ortofoto se identificaron pequeñas acumulaciones de lixiviados.

A partir del NDWI se identificó una zona de humedad localizada en la parte sur del área de residuos esparcidos, la cual no había sido reconocida en el análisis topográfico del MDT y visual de la ortofoto. El NDWI confirmó las zonas de acumulación previamente identificadas y además reportó una superficie con potencial para ser una zona de acumulación.

Análisis temporal del NDVI

El estudio multitemporal del NDVI tuvo una resolución de 10 m por píxel y se extendió de 2019 a 2023. La **figura 9a** muestra la serie temporal del NDVI evidenciando la variación del verdor de la vegetación en el predio del SDF Tonsil. En la **figura 9b** se describe la precipitación mensual y anual registrada en la estación climatológica del Observatorio de Tlaxcala localizada a 4.4 km del SDF.

En términos generales, los valores del NDVI en la zona de estudio muestran una tendencia descendente en los años analizados, lo que es indicativo de la degradación de la salud de la vegetación. La variabilidad de los valores del NDVI va desde un pico de 0.608 en 2019 hasta un descenso crítico a 0.009 hacia finales de 2023. La disminución del NDVI se acentuó en 2022 y 2023.

Diversos factores pueden contribuir a la disminución del verdor de la vegetación, uno de ellos es la falta de agua. Por ello, en la **figura 9b** se muestra la serie temporal de precipitación en la zona durante el mismo periodo. Al contrastar ambas series

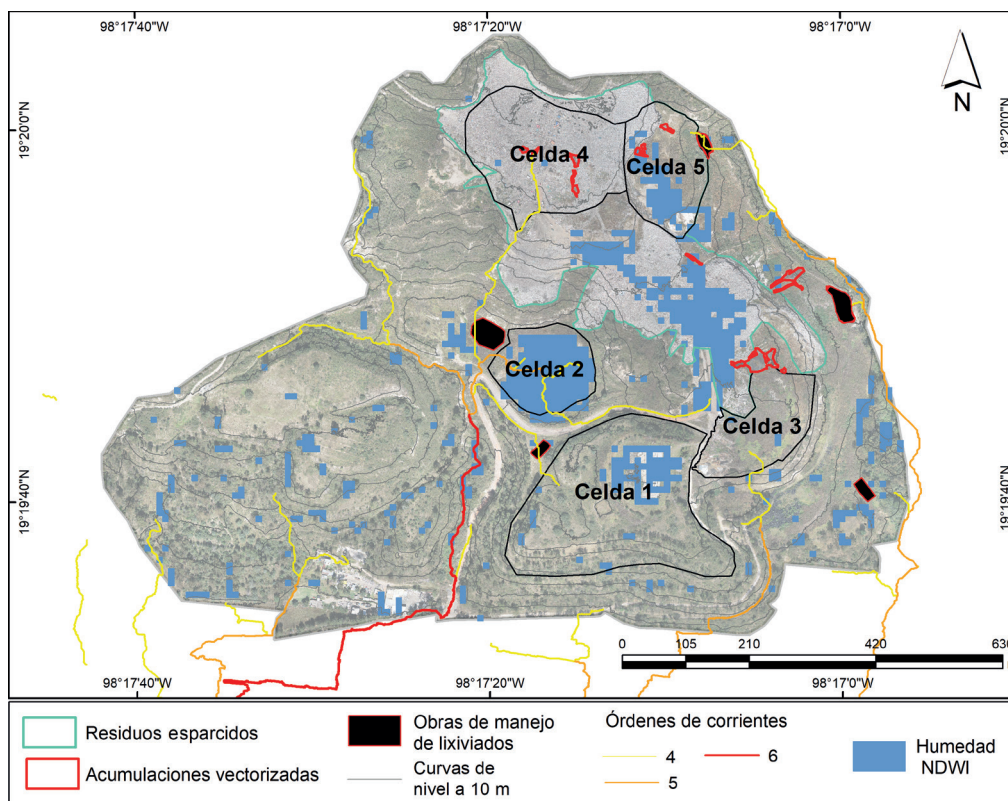


Fig. 8. Zonas de acumulación de lixiviados identificadas mediante fotoanálisis y zonas de humedad identificadas mediante el índice de diferencia normalizada del agua (NDWI).

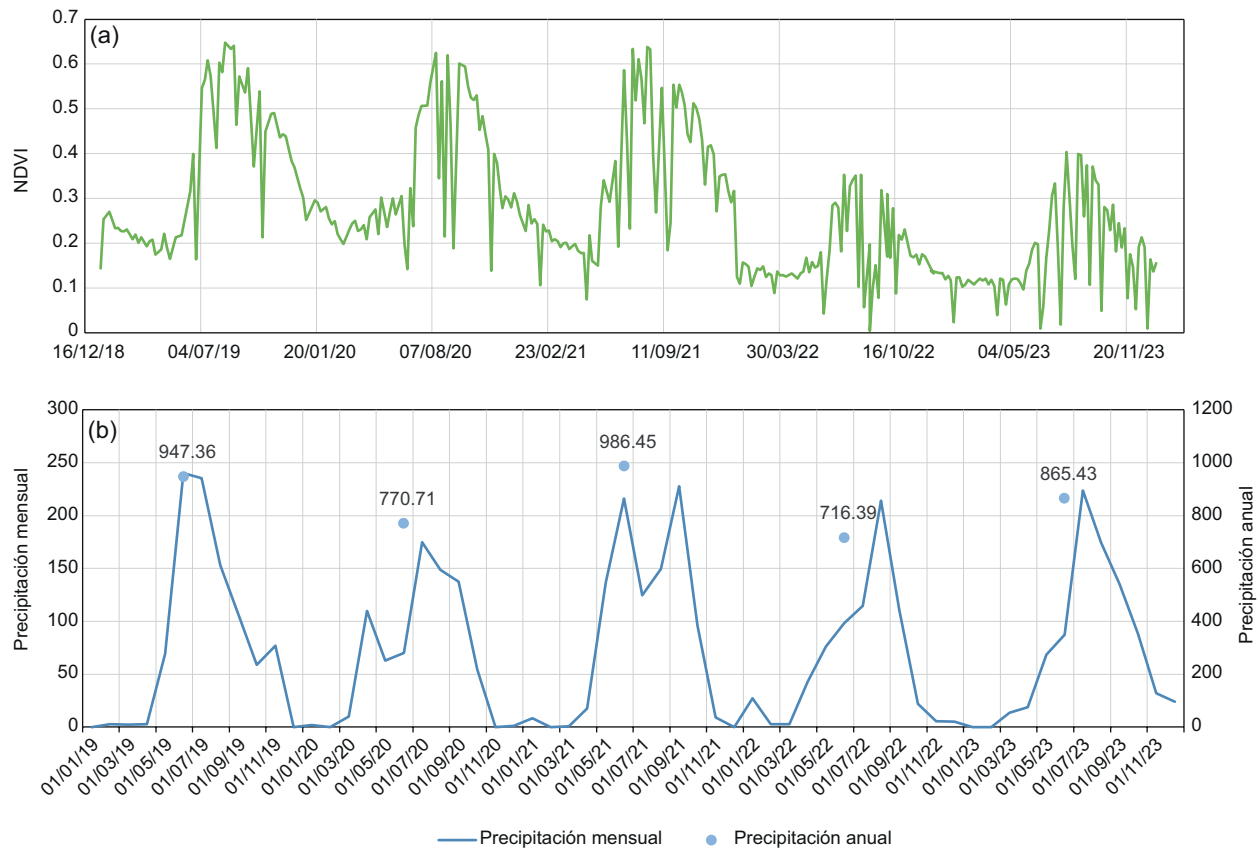


Fig. 9. (a) Gráfica de la serie temporal del índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI) de 2019 a 2023. (b) Precipitación mensual y anual registrada en la estación climatológica Observatorio de Tlaxcala, Tlaxcala. Fuente: datos de precipitación recuperados de CONAGUA (2024).

temporales debe notarse que la disminución del verdor en la zona no está asociado con la falta de agua. Por ejemplo, uno de los años con menor precipitación fue 2020, cuando el NDVI presenta valores altos (en el periodo analizado) superiores a 0.6, a pesar de que en ese año se registró una disminución considerable de las precipitaciones. En 2023 la precipitación anual fue 865.43 mm, un valor medio en relación con las precipitaciones anuales graficadas, pero el NDVI tuvo valores bajos, menores a 0.4.

Lo anterior abre la posibilidad de considerar que la dinámica de crecimiento y declive de la salud de la vegetación, medida con el NDVI, puede estar asociada con la presencia de lixiviados y otros contaminantes del SDF, resultado de la gestión ineficiente de residuos.

Zonas de acumulación de lixiviados

La identificación de las zonas de acumulación y de las trayectorias de lixiviados es el punto de partida

para el diseño de la infraestructura necesaria para su manejo. En el SDF Tonsil se detectaron tres zonas principales de acumulación: la plataforma ubicada en la celda 2, la zona central correspondiente a residuos esparcidos y la franja este adyacente al cauce de la corriente La Coyotera. Se propone que en la celda 2 se prohíba la disposición de residuos y se alberguen obras de contención y tratamiento de lixiviados provenientes de la parte central del sitio, destacando que, por su geometría topográfica, esta superficie no debió utilizarse para disposición final de residuos.

En la zona central correspondiente a residuos esparcidos se deben mejorar las medidas de manejo de residuos, ya que se comprobó que toda el área es una zona con humedad, cuyos drenajes fluyen hacia La Coyotera y la celda 2. Mejoras como compactación y recubrimiento de residuos y conformación de pendientes con dirección preferencial hacia las obras de manejo de lixiviados pueden ser adoptadas para el control de la humedad y la generación de lixiviados.

Para la franja este se sugieren una serie de embalses en los cuales se acumulen y/o traten lixiviados a lo largo del cauce de la corriente La Coyotera, respetando los límites del SDF.

En la parte norte, en la periferia del sitio, se deberán implementar obras de drenaje para evitar que las aguas provenientes de la zona aguas arriba, transportadas por las corrientes La Mina, Central y La Coyotera, entren en contacto con los residuos. Este análisis y sus resultados proveen a los gestores y supervisores información que permite la mejora en el manejo del SDF Tonsil. Se destaca que este estudio sólo permite identificar áreas que por topografía generan acumulaciones de lixiviados y que, para el diseño y construcción de obras de manejo de lixiviados, es necesaria una serie de estudios técnicos complementarios.

DISCUSIÓN

El SDF Tonsil es un sitio no controlado en que el manejo de residuos es nulo, ya que éstos no son compactados ni recubiertos. Esta condición propicia que la superficie del sitio sea muy irregular e inestable, y que la toma de datos topográficos de manera terrestre sea de alto riesgo. Incekara et al. (2019) menciona que un número reducido de datos topográficos no puede reflejar con precisión los cambios en la superficie de un SDF y, por lo tanto, los estudios tradicionales in situ no son preferibles para estas instalaciones.

Para lograr los objetivos del estudio, y en razón de la complejidad del relieve del SDF, se optó por una técnica que permitiera evaluar a detalle y con precisión la geometría del terreno para localizar las zonas de acumulación de lixiviados. Los productos obtenidos por fotogrametría con RPAS, MDT y ortofoto, cubren los requerimientos para realizar la evaluación del relieve. Además, se elimina la necesidad de estar en contacto con la superficie del SDF minimizando riesgos para el personal técnico (Alves et al. 2016; Son et al. 2020).

Considerando los hallazgos de Papale et al. (2023), el estudio aprovecha los datos satelitales no solo para el monitoreo convencional de SDF, sino también para la evaluación de su impacto ambiental. Esta dualidad de propósitos resalta la versatilidad y el valor agregado que los datos satelitales aportan a la investigación ambiental que; en conjunto con la fotogrametría, provee una metodología capaz de identificar zonas de acumulación de lixiviados y su impacto ambiental.

La metodología para identificar acumulaciones a partir de RPAS integró los alcances de Muleya (2020) y Filkin et al. (2021). Muleya (2020) identifica las

zonas de mayor acumulación de agua a partir del modelo digital de elevación (MDE), en tanto que Filkin et al. (2021) utilizan las imágenes aéreas para identificar visualmente zonas de acumulación de lixiviados, así como sus trayectorias. La metodología presentada en este estudio se robusteció con la integración del análisis de los índices espectrales NDWI, MNDWI y NDVI, siguiendo las evidencias presentadas por Papale et al. (2023). El NDWI corroboró zonas de acumulación identificadas por análisis topográfico y visual; además, señaló otras zonas de humedad que se interpretaron como áreas con acumulaciones de lixiviados. Por último, se analizó la variación temporal del NDVI para evaluar si existía una relación entre la salud de la vegetación y la presencia de lixiviados.

La metodología de este estudio se basa en métodos remotos, es decir, a partir de mediciones indirectas que no requieren la manipulación del objeto de estudio. La coloración negra de los fluidos y superficies, el conocimiento previo de las nulas medidas de manejo de residuos y observaciones en campo realizadas durante la ejecución del vuelo de un dron, dan la pauta para precisar que las zonas identificadas efectivamente son acumulaciones de lixiviados. Se reconoce que una mejora en la metodología sería la comprobación en campo de las acumulaciones y el análisis de las características físicas y químicas de los fluidos para precisar si se trata de lixiviados.

Los productos analizados (MDT y ortofoto) presentaban una diferencia notoria en resolución espacial respecto a la del NDWI: de 4.6 cm por píxel para el MDT y ortofoto, y de 10 m para el NDWI. La resolución de la información espacial dependió directamente de la resolución de las imágenes desde las cuales fue generada. En las imágenes aéreas tomadas mediante RPAS se pudo controlar el tamaño del píxel, ya que para este estudio convenía que fueran de alto detalle. Papale et al. (2023) señalan que los instrumentos de la misión Sentinel representan la vanguardia en la investigación ambiental, ya que el nivel de detalle de sus sensores de alta resolución espacial no tiene comparación con otras imágenes satelitales gratuitas, aunque aún no alcanza la precisión de las imágenes aéreas. No obstante, considerando que las imágenes Sentinel ofrecen la mejor resolución disponible de forma gratuita y que su procesamiento puede realizarse mediante plataformas como Google Earth Engine, este estudio optó por su utilización. La diferencia de resolución no generó confusión en la interpretación de resultados, ya que la ubicación de las zonas de acumulación y humedad coincidieron espacialmente, a excepción de la zona sur de residuos esparcidos, que sólo fue detectable mediante el NDWI.

El RPAS y las imágenes satelitales espectrales para el análisis de SDF son herramientas que están al alcance de los gestores, las organizaciones comunitarias y los ciudadanos. Estar capacitado en su utilización puede prevenir desastres y posibilitar que se actúe con pertinencia ante ellos, monitorear impactos ambientales, supervisar y evaluar infraestructura y planificar de manera más precisa y económica estrategias de manejo tanto de residuos como de lixiviados. En el SDF Tonsil la implementación conjunta de estas herramientas podría permitir mejorar el manejo de los lixiviados. Existen algunos desafíos y oportunidades como la inversión inicial, que implica adquirir equipo de cómputo, drones y software, así como la capacitación técnica del personal.

CONCLUSIONES

La metodología presentada en este estudio permitió identificar las corrientes y zonas de acumulación de lixiviados en el SDF Tonsil. Los resultados comprueban que el uso de tecnologías de PR permite identificar, mapear y analizar corrientes de lixiviados en SDF con topografía compleja. Estas herramientas incrementan la capacidad de la ingeniería ambiental para monitorear la dinámica de los contaminantes líquidos en los SDF y su entorno, permitiendo también el adecuado diseño de obras de control y tratamiento de lixiviados. Son sumamente útiles en estudios exploratorios y de reconocimiento de la dinámica y complejidad de los lixiviados en amplias zonas; sin embargo, sus resultados deben apoyarse en estudios específicos, por ejemplo, de la composición físico y química de los lixiviados.

Las corrientes de lixiviados no controladas en los SDF son algunas de las principales fuentes de contaminación del suelo y cuerpos de agua superficial y subterránea en los SDF y sus alrededores. Dada la falta de estudios específicos sobre la dinámica de estas corrientes en los miles de SDF que hay en México, los estudios basados en PR y análisis multiespectral pueden ayudar a la comprensión de la problemática referida. Los investigadores y estudiosos del tema podrán encontrar en este estudio una herramienta útil. Asimismo, los gestores y autoridades encargadas de los SDF podrán apoyarse en estas tecnologías para mejorar las condiciones de monitoreo y control de lixiviados. Al integrar estas tecnologías en la gestión de SDF, se adopta una perspectiva de vanguardia y efectiva para la protección del medio ambiente y el bienestar colectivo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el financiamiento otorgado al Pronaii RSU, a través del Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), para el pago de becas en proyecto y la adquisición de equipos informáticos e instrumentos especializados, sin los cuales los estudios reportados no hubieran podido realizarse.

REFERENCIAS

- Alves C., Romariz C., Silva M.V., Silva A.L., Eustaquio V., Prando C. y Beltrão J.A. (2016). Evaluating the accuracy in volume calculation in a pile of waste using UAV, GNSS and LiDAR. *Boletim de Ciências Geodésicas* 22 (1), 73-94. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000100005>
- Amani M., Ghorbanian A., Ahmadi S.A., Kakooei M., Moghimi A., Mirmazloumi S.M., Moghaddam S.H.A., Mahdavi S., Ghahremanloo M., Parsian S., Wu Q. y Brisco B. (2020). Google Earth Engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 13 (1), 5326-5350. <https://doi.org/10.1109/jstars.2020.3021052>
- Aslam B., Maqsoom A., Tahir M.D., Ullah F., Rehman M.S.U. y Albattah M. (2022). Identifying and ranking landfill sites for municipal solid waste management: An integrated remote sensing and gis approach. *Buildings* 12 (5), 605-624. <https://doi.org/10.3390/buildings12050605>
- Azimov O.T., Shevchuk O.V., Azimova K.O., Dorofey Y.M. y Tomchenko O.V. (2020). Integration of GIS and RSE aiming to the effective monitoring of the surroundings of landfills. *Ukrainian Journal of Remote Sensing* 27, 4-12. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2020.27.183>
- Burrough P.A. y McDonnell R.A. (1998). *Principle of geographic information systems*. Oxford University [en línea]. https://www.researchgate.net/publication/37419765_Principle_of_Geographic_Information_Systems 15/03/2024
- Collado-Torres R.A., Gama-Campillo L.M. y Díaz-López H.M. (2015). Percepción remota: elementos básicos. *Kuxulkab'* 21 (40), 23-29. <https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a21n40.1001>
- CONAGUA (2024). Estaciones climatológicas. Comisión Nacional del Agua, México [en línea]. <https://sih.conagua.gob.mx/climas.html> 14/07/2024

- Daugėla I., Suziedelyte Visockiene J. y Kumpiene J. (2020). Detection and analysis of methane emissions from a landfill using unmanned aerial drone systems and semiconductor sensors. *Detritus* 10, 127-138. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13942>
- Du Y., Zhang Y., Ling F., Wang Q., Li W. y Li X. (2016). Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing* 8 (4), 354-372. <https://doi.org/10.3390/rs8040354>
- El-Saadony M.T., Saad A.M., El-Wafai N.A., Abou-Aly H.E., Salem H.M., Soliman S.M., El-Mageed T.A.A., Elrys A.S., Selim S., El-Hacki M.E.A., Kappachery S., El-Tarabily K.A. y AbuQamar S.F. (2023). Hazardous wastes and management strategies of landfill leachates: A comprehensive review. *Environmental Technology and Innovation* 31, 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103150>
- EPA (2010). Focus on landfilling in Ireland. Environmental Protection Agency, Wexford, Ireland, 80 pp.
- Erb T.L., Philipson W.R., Teng W.L. y Liang T. (1981). Analysis of landfills with historic airphotos. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 47 (9), 1363-1369.
- Flenniken J.M., Stuglik S. y Iannone B.V. (2020). Quantum gis (QGIS): An introduction to a free alternative to more costly GIS platforms: FOR359/fr428. *Edis* 2020 (2), 1-7. <https://doi.org/10.32473/edis-fr428-2020>
- Filkin T., Sliusar N., Ritzkowski M. y Huber-Humer M. (2021). Unmanned aerial vehicles for operational monitoring of landfills. *Drones* 5 (4), 1-17. <https://doi.org/10.3390/Drones5040125>
- Gerardo R. y de Lima I.P. (2023). Comparing the capability of Sentinel-2 and Landsat 9 imagery for mapping water and sandbars in the river bed of the lower Tagus River (Portugal). *Remote Sensing* 15 (7), 1927-1927. <https://doi.org/10.3390/rs15071927>
- Gómez-Maturano J., Mendoza-Santana J.D., Aguilar-García A.L. y Serna-Hernández M. (2024). Remote sensing of illegal dumps through supervised classification of satellite images: Application in Oaxaca, Mexico. *Geographical Research Letters* 50 (2), 157-177. <https://doi.org/10.18172/cig.6273>
- Hussein M., Yoneda K., Zaki Z.M., Othman N.A. y Amir A. (2019). Leachate characterizations and pollution indices of active and closed unlined landfills in Malaysia. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management* 12, 100232-100240. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100232>
- Incekara A.H., Delen A., Seker D.Z. y Goksel C. (2019). Investigating the utility potential of low-cost unmanned aerial vehicles in the temporal monitoring of a landfill. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8 (1), 1-16. <https://doi.org/10.3390/ijgi8010022>
- INECC (2022). Atlas nacional de residuos sólidos urbanos. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México, 313 pp.
- INEGI (2023). Información topográfica E14B33 Tlaxcala de Xicohténcatl escala. 1:50 000. INEGI [en línea] https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463866541_28/11/2023
- Laonamsai J., Julphunthong P., Sapratthet T., Kimmany B., Ganchanasuragit T., Chomcheawchan P. y Tomun N. (2023). Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for estimating erosion and deposition in Ping River in Thailand. *Hydrology* 10 (3), 70-94. <https://doi.org/10.3390/hydrology10030070>
- Lozano-Tello A., Siesto G., Fernández-Sellers M. y Caballero-Mancera A. (2023). Evaluation of the use of the 12 bands vs. NDVI from Sentinel-2 images for crop identification. *Sensors* 23 (16), 7132-7132. <https://doi.org/10.3390/s23167132>
- Montero D., Aybar C., Mahecha M.D., Martinuzzi F., Söchting M. y Wieneke S. (2023). A standardized catalogue of spectral indices to advance the use of remote sensing in Earth system research. *Scientific Data* 10 (1), 197-216. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02096-0>
- Muleya M. (2020). Photogrammetry based analysis for the risks associated with landfilling in developing countries: Case study, Chunga landfill, Lusaka, Zambia. Tesis de Maestría. Auckland University of Technology, Auckland, Nueva Zelanda, 124 pp.
- Papale L.G., Guerrisi G., de Santis D., Schiavon G. y del Frate F. (2023). Satellite data potentialities in solid waste landfill monitoring: Review and case studies. *Sensors* 23 (8), 3917-3941. <https://doi.org/10.3390/s23083917>
- Rueda J.F., Rivas P., Gómez R., Benítez R., Botello J.E. y Tututi S. (2021). Current and prospective situation of municipal solid waste final disposal in Mexico: A spatio-temporal evaluation. *Renewable and Sustainable Energy Transition* 1, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2021.100007>
- Sliusar N., Filkin T., Huber-Humer M. y Ritzkowski M. (2020). Drone technology in municipal solid waste management and landfilling: A comprehensive review. *Waste Management* 139, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.006>
- Smith A.M.S., Wooster M.J., Drake N.A., Dipotso F.M., Falkowski M.J. y Hudak A.T. (2005). Testing the potential of multi-spectral remote sensing for retrospectively estimating fire severity in African savannahs. *Remote Sensing of Environment* 97 (1), 92-115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.04.014>

- Son S.W., Kim D.W., Sung W.G. y Yu J.J. (2020). Integrating UAV and TLS approaches for environmental management: A case study of a waste stockpile area. *Remote Sensing* 12 (10), 1-17. <https://doi.org/10.3390/rs12101615>
- Sonali P.U., Prasanna J., Atre A.A., Pande C. y Gorantiwar S.D. (2021). Application of NDVI in vegetation monitoring using Sentinel-2 data for Shirampur region of Maharashtra. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 10 (01), 799-806. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2021.1001.098>
- Xu H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27 (14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Zeng Y., Hao D., Huete A., Dechant B., Berry J.A., Chen J.C., Joiner J., Frankenberg C., Bond-Lamberty B., Ryu Y., Xiao J., Asrar G.R. y Chen M. (2022). Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally. *Nature* 3 (7), 477-493. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00298-5>