

Capítulo 1.3

Sostenibilidad y riesgos de contaminación en cuerpos de agua: el caso de las extracciones clandestinas de hidrocarburos en Tala, Jalisco

Juan Manuel Sandoval-Hernández¹

Christian René Escudero Ayala²

Edith Xio Mara García-García³

<https://doi.org/10.61728/AE24004268>



¹ Estudiante del Doctorado en Geología, adscrito al Departamento de Estudios del Agua y la Energía, del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* juan.sandoval5593@alumnos.udg.mx

² Profesor Investigador del Centro Universitario de la Costa de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* christian.escudero@academicos.udg.mx

³ Profesora Investigadora del Departamento de Estudios del Agua y la Energía del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. *e-mail:* xio.garcia@academicos.udg.mx

Introducción

El desarrollo económico mundial, la producción industrial, los servicios y suministros para la sociedad e incluso la vida misma en este planeta que habitamos depende de los recursos naturales (Solórzano Chamorro et al., 2022, p. 211) y son considerados como un factor de riqueza de los países. El agua a nivel mundial es un recurso natural indispensable para la vida del ser humano, está almacenada en cuerpos de agua, que son extensiones de agua que pueden estar en estado líquido o sólido sobre la superficie terrestre o el subsuelo. Estos pueden ser naturales o artificiales (CONAGUA, 2017). Del total de agua disponible a nivel mundial el 97 % es agua salada, por lo tanto, el 3 % restante es dulce. De esta última el 79 % está en estado sólido en forma de hielo, el 20 % se agua subterráneas, y tan solo el 1 % es agua superficial (Felice Uricchio et al., 2023, p. 19; Peña García et al., 2012, p. 4). Específicamente, el porcentaje de agua subterránea es una reserva, que abastece gran parte de las poblaciones como agua potable y permite el desarrollo económico del país. Centrarse en el agua como un bien común global es fundamental para repensar sus valores y la economía del agua.

De acuerdo con el reporte global del agua por la revista Acciones de Divulgación del Conocimiento (*Disclosure Insight Action*) CDP en el Reporte Global del Agua 2023, debemos ayudar a lograr un futuro con mayor seguridad hídrica, uno con mayores oportunidades económicas para todos, mayor equidad de acceso, sostenibilidad de uso, desaceleración de la pérdida de biodiversidad y mitigación de los impactos del cambio climático (Le Sève y De Souza, 2024) por lo que debe considerarse como reserva estratégica para disminuir el riesgo de contaminación y sobre explotación.

En varios países de América Latina y el Caribe los Recursos Naturales No Renovables (RNNR) constituyen una fuente de ingresos fiscales tributarios (regalías, impuesto sobre la renta, otros impuestos a los ingresos y otros gravámenes). Uno de los principales RNNR es el hidrocarburo, que según datos de la CEPALSTAT tan solo el aprovechamiento del mismo como una fuente de ingresos fiscales en México representó en 2017 el

5 % del PIB, lo que equivale a una participación relativa del 28 % de los RNNR en los ingresos totales. Sin embargo, los RNNR son limitados y el flujo de ingresos que generan son altamente volátiles, ya que sus precios se fijan en los mercados internacionales. Por lo que es importante considerar en la gestión de RNNR la equidad intergeneracional, garantizando que su agotamiento no comprometa ni restrinja las oportunidades de las generaciones futuras, así como la sostenibilidad medioambiental (OECD, 2020, p. 74).

El desarrollo sostenible o sustentable, según la Organización Naciones Unidas (ONU) es “Aquel que cubre las carencias de las generaciones presentes sin poner en riesgo los requerimientos y bienestar de las generaciones”, definido en el informe *Our common future* (nuestro futuro común) (ONU, 1987). Otra connotación de la definición es que la sostenibilidad proviene de la ecología, lo que implica que su definición esté soportada en los problemas ambientales ocasionados por la alteración de los ciclos de la naturaleza generados por las acciones antrópicas que amenazan la sustentabilidad (González Pérez et al., 2023, p. 78).

Mientras que generalmente, los países con poco desarrollo económico derrochan sus recursos naturales, los desarrollados preservan de manera positiva sus recursos, distinguiéndose principalmente por la industrialización e innovación derivada de inversión en investigación, que fomenta el desarrollo de avances tecnológicos aplicados en la transformación y transporte de recursos naturales renovables y no renovables generando menor contaminación al medioambiente (Gómez-López et al., 2011).

La globalización mundial provocada por el comercio transfronterizo de bienes, servicios, tecnología, flujos de inversión e información, creó la necesidad de coordinación entre países en el proceso de producción y venta de piezas fabricadas en diversas partes del mundo. Lo anterior propició una nueva forma de expansión industrial por las diversas entidades federativas de los países y con ello necesidades de suministro de servicios con infraestructura industrial competitiva. Por lo que, las cadenas de suministro global son la forma de producción característica de la globalización, actualmente representa el 80 % del comercio mundial dirigido por empresas multinacionales especialmente en la manufactura (Kolb, 2021). Es por ello que, en esta forma de producción globalizada, cada país o industria se especializa en lo que tiene ventaja competitiva (mejor produce) esto es,

produce con menor cantidad de recursos, costos, mayor eficiencia, e igual calidad. Por lo que, las industrias en cada país promueven el crecimiento económico y finalmente reducen los precios de los bienes y servicios para los hogares haciéndolos más asequibles.

Por lo tanto, el desarrollo económico derivado de la industrialización generalmente en las urbes, demanda disponibilidad y eficiente del suministro de servicios de energía. Uno de los principales recursos naturales en los procesos de manufactura para el abastecimiento de insumos son los derivados de hidrocarburos. El costo de la energía juega uno de los factores determinantes en la competitividad. Lo que ha provocado el desarrollo mundial de infraestructura para transportar petróleo, sus derivados y otros químicos.

La demanda de hidrocarburos creció principalmente debido al desarrollo industrial. El uso del petróleo se divide en dos áreas básicas: energético y como materia prima. Para el primero, destaca su uso para generar energía en la industria, gasolineras, producción de electricidad, transporte, y uso doméstico. En tanto para el segundo, materia prima para las industrias: farmacéutica y fertilizantes, plásticos, pinturas y solventes, producción de aromáticos, fibras sintéticas, además de, combustibles y lubricantes (Orozco Carbajal, 2011, p. 4). Debido a lo anterior el petróleo es un RNNR indispensable en la vida actual. La industria de extracción petrolera puede estar ubicada en plataformas marítimas o tierra, debido a esto, los principales medios de transporte masivo son por barco, ferrocarril y/o autotankers respectivamente. Sin embargo, para eficientar el transporte de hidrocarburos tanto desde plataformas marítimas como por tierra se desarrolló infraestructura por ductos.

El primer ducto considerado moderno se construyó hace 400 años 1617 en Bavaria, Alemania, con longitud de 31 km, la principal característica fue el uso de bombas para impulsar el producto por bombas con ruedas hidráulicas, utilizado para el transporte de sal (Celovic, 2019). Actualmente los ductos más importantes a nivel mundial por la capacidad de transporte de hidrocarburos y su longitud a nivel mundial son: Oleoducto Druzhba, con 8900 kilómetros de tuberías desde Rusia, pasando por Polonia, Lituania, Letonia, Alemania, Hungría, Eslovaquia, Ucrania y República Checa, operando desde 1964, actualmente este oleoducto transporta el 40 % del petróleo de las importaciones netas europeas (Katyukha y Mottaeva, 2021,

p. 6). En Estados Unidos, hay más de 370 000 kilómetros de oleoductos interestatales e intraestatales (Emanuel et al., 2021, p. 3).

En México, entró en operación la infraestructura del primer oleoducto entre Veracruz y la capital mexicana en 1930 para la empresa El Águila de capital angloholandés de la refinería Azcapotzalco en la Ciudad de México (de los Reyes, 2022). Actualmente, Petróleos Mexicanos (PEMEX) tiene una infraestructura extensa de oleoductos y poliductos para transportar sus productos, entre áreas de extracción petrolera, refinerías, petroquímicas, y estaciones para su compresión, bombeo, procesamiento, almacenamiento y distribución. Los poliductos por su parte transportan combustibles ya procesados, como gasolinas y diésel (Llano y Flores, 2017, p. 2) por el territorio mexicano (Figura 1). La última cifra detallada en rueda de prensa por el gobierno de México informó de una longitud total de ductos de la infraestructura PEMEX Logística en territorio mexicano es de 17 765.2 km (acueductos 7.9; combustoleoductos 144.6; gas LP 1,583; oleoductos 5216; poliductos 8385.8; petroquímicos 1982.2; quimioductos 364.3; turbosinoductos 81.2) y 9167.6 km para gas natural (CENEGAS) (López Obrador, 2020, p. 9).

Figura 1

Imagen de distribución de infraestructura para el transporte de Hidrocarburos en México, oleoductos 10 006.53 km, poliductos 9098.53 km



Fuente: Llano y Flores, 2017.

Para satisfacer la demanda debida al incremento de plantas industriales hubo la necesidad construir ductos para transportar grandes volúmenes de crudo y sus derivados. Los oleoductos para el transporte de crudo, gasoductos, para el transporte de gas; combusteoloductos, para combustóleo pesado derivados del petróleo crudo; poliductos, para destilados de gasolina y diesel; y petroquímicos, como el etano, butano, propano, etc. De acuerdo con el informe en rueda de prensa de PEMEX Logística, el volumen transportado de hidrocarburos en poliductos fue de 817 000.00 barriles promedio por día en 2019, lo que equivale a 128 677 500.00 litros por día. Mientras que, el plan para el 2020 fue incrementar a 950 000 barriles por día. Además, se puso como meta la expansión de la red de poliductos para trasportar hidrocarburos: Tula-Toluca, San Martín-Puebla, Minatitlán-Salina Cruz, Matamoros-Cadereyta, Minatitlán-México, que representa un incremento de 1045 km de infraestructura de trasporte de hidrocarburos por ducto en México (López Obrador, 2020, p. 31).

El precio por kilómetro recorrido para transportar una tonelada de gasolina, vía pipa es de 1.08 pesos, tren 0.48 centavos, barco 0.15 centavos, mientras que por ducto 0.08 centavos, según informe de GasGas Analytics (Bernal Avendaño, 2020; Herrera, 2020), de lo que se puede deducir que la alternativa más económica es el transporte por ducto. Sin embargo, la estimación del precio final de la gasolina al consumidor depende además del medio de transporte, del Costo Trasladable por Pérdidas no Operativas (CTPNO) según resolución para trasladar las pérdidas derivadas por el robo de hidrocarburos en el transporte por ducto a los usuarios del sistema, resolución RES/064/2022 de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y calculado en la resolución RES/164/2022 por PEMEX logística, que va desde 0.004 hasta 0.211 pesos/litro dependiendo de la zona del sistema de transporte por ducto de petrolíferos (CRE, 2022, p. 39).

A pesar del CTPNO aplicado al transporte de hidrocarburos por ductos, este medio de transporte representa el menor costo y riesgo de seguridad a la ciudadanía durante el transporte de material altamente inflamable, comparado con el transporte por carreteras mediante pipas y por tren en vías férreas. Lo que hace a este medio de transporte el más eficiente y económico en la distribución y abastecimiento de refinerías y centros de almacenamiento. Para ello, si la infraestructura de transporte de hidrocarburos por ductos de PEMEX, se opera y mantiene con los valores de

sustentabilidad, rentabilidad, excelencia operativa, disponibilidad de activos, mantenibilidad y confiabilidad que alude la petrolera (López Obrador, 2020, p. 14), será un medio de transporte eficiente, sin contaminar la atmósfera, modifican la ecología, evitando contaminación de suelo, accidentes y daños ecológicos marinos debido al transporte carretero, ferrocarril y buques. Por lo que la infraestructura de transporte de hidrocarburos por ductos favorece la sostenibilidad ambiental, minimiza riesgos de accidentes y desastres ecológicos. Ya que, los sistemas de transporte de hidrocarburo por ductos modernos cuentan con sistemas de software de administración de información, indicadores seguridad y tecnologías modernas que muestran información de transmisores de presión y controlan válvulas de cierre automático con el objetivo de aislar fugas (López Obrador, 2020, p. 14), disminuyen costos de remediación e impacto ambiental. Se considera contaminación de suelo por fuga al proceso ocurrido en el transporte de hidrocarburos a través de la red de ductos (Álvarez-Manilla Aceves et al., 2002, p. 10).

El Diario Oficial de la Federación (DOF) establece las disposiciones de carácter general, los lineamientos en materia de Seguridad Industrial, Seguridad Operativa y Protección al Medio Ambiente, para el transporte terrestre por medio de Ductos de Petróleo, Petrolíferos y Petroquímicos. Así, en el Capítulo I, establece las disposiciones generales. En el Capítulo II establece las condiciones de diseño de los ductos, sobre saliendo para este caso de estudio el Artículo 24 que establece que se debe implementar sistemas de protección y/o control de corrosión, para evitar fugas, el Capítulo III establece los procedimientos de construcción, destacando para este caso los procedimientos en materia de impacto y riesgo ambiental, tipo de tubos, accesorios, conexiones, manejo, soldadura, inspecciones, pruebas y criterios. Además, establece las franjas de seguridad conforme a diámetro de los ductos, distancia a las diversas vías de comunicación carreteras y zonas urbanas.

En el Artículo 36 se establece la profundidad mínima de ductos enterrados, para el caso de ductos de petróleo, petrolíferos (excepto Gas L.P.) y petroquímicos que, dependiendo del uso de suelo, condiciones hidrológicas, tipo de rocas, entre otras debe ser de 0.60 a 1.20 metros. También obliga al señalamiento, que advierta del peligro de cavar, así como señale teléfonos para reportar daños. De la misma manera el Capítulo IV esta-

blece la forma de evaluar el prearranque de la infraestructura, en su caso el Capítulo V establece los lineamientos de operación y mantenimiento, donde destaca en el Artículo 80 el establecimiento de un programa de patrullaje que entre otras obligaciones debe observar condiciones inseguras como tomas clandestinas del producto. En el Capítulo VI establece como se debe administrar la integridad de los ductos destacando que deben identificar las amenazas potenciales, entre ellas menciona corrosión, daños mecánicos, defectos de fabricación, fallas operativas, entre otras. Así como, consecuencias a las instalaciones, personal operativo, población y al medioambiente. El Capítulo VII establece procedimientos para desactivar o suspender temporalmente la operación de los ductos, para en el Capítulo VIII establecer los lineamientos de reactivación. Sin olvidar, en el Capítulo IX los procedimientos ante la necesidad de cierre, desmantelamiento y abandono de la infraestructura (DOF, 2017). En tanto, en el Anexo III, establece métodos y procedimientos de detección de fugas y/o derrames de Petróleo, Petrolíferos y Petroquímicos, en el suelo y debajo de la superficie del suelo. Señala que, los métodos que podrían identificar fugas en el subsuelo son Inspección visual de la vegetación, ultrasonido, fibra óptica, diferenciales de presión y flujo, burbujeo, termografía infrarroja terrestre o aérea y perros adiestrados.

Si además de lo anterior, la calidad de las políticas públicas e instituciones a la vez que estimulan el crecimiento económico pueden proteger el medioambiente y neutralizar los efectos del crecimiento económico de modo sostenible, se reflejarán en las decisiones sociales de los bienes ambientales públicos relativos a la disponibilidad y protección de los recursos naturales. Panayotou en el 2000 citado por Gómez-López (2011) considera cinco indicadores de calidad institucional en general: a) respeto y enduramiento de los contratos, b) eficacia de la burocracia, c) eficiencia de las leyes, d) corrupción en el gobierno y e) riesgo de apropiación, por lo que si las instituciones cuentan con derechos de propiedad sólidos aportan una base legal en la toma de acciones entre quienes generan contaminación y degradan el valor de la propiedad (Gómez-López et al., 2011), la calidad de las políticas contribuirá a la sostenibilidad del medioambiente.

Sobre la red de poliductos de PEMEX se ha provocado sitios contaminados por hidrocarburos, definido por SEMARNAT como un “Lugar, espacio, suelo, cuerpo de agua, instalación o cualquier combinación de

estos que ha sido contaminado con materiales o residuos que, por sus cantidades y características, pueden representar un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y el aprovechamiento de los bienes o propiedades de las personas” (SEMARNAT, 2020). Para este caso de estudio, el agente contaminador son los derivados de hidrocarburo, en específico los hidrocarburos aromáticos BTEX, que son productos químicos orgánicos procesados (gasolinas), compuestos por el grupo del Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno (BTEX). De los químicos antes mencionados la gasolina estándar contiene aproximadamente el 18 % del peso de la mezcla (Frago, 1993, p. 7; Reyes, 2021, pp. 128–129).

A pesar de que los poliductos son el medio de transporte de hidrocarburos más sostenible en condiciones de operación controladas, se ha puesto en riesgo la salud pública por contaminación de hidrocarburos, principalmente por el benceno que puede infiltrarse en el cuerpo a través de los pulmones por evaporación, la piel al contacto con el agua o al pasar al tracto gastrointestinal por medio de alimentos y bebidas producidas con agua contaminada (ATSDR, 1995; García y Fernández, 2014). El principal factor de contaminación de cuerpos de agua y peligro de explosión a la sociedad sobre la infraestructura de poliductos de PEMEX en México, son las extracciones clandestinas de gasolina de los poliductos, situación que ha repercutido negativamente en subsuelos que por sus características geológicas de permeabilidad favorecen la infiltración al manto freático contaminado acuíferos cuando está cerca de la superficie, de acuerdo con el Informe de Situación del Medio Ambiente en México 2012 (Álvarez-Manilla Aceves et al., 2002, p. 1; SEMARNAT, 2013a).

El fenómeno de huachicol es la actividad ilícita que se ha desarrollado sobre los ductos, por lo que, el huachicolero es una persona “delincuente que se dedica a robar gasolina perforando los oleoductos que la conducen” (Peinado, 2019, p. 1). El huachicol genera un golpe ambiental, repercutiendo generalmente en terrenos de cultivo, impactando directamente en el subsuelo y si las condiciones son favorables alcanza las aguas subterráneas utilizada para abastecer agua potable, provocando un problema de salud pública según análisis por la Universidad Iberoamericana de Puebla que argumenta: “Una vez que abren o perforan los ductos hay un derrame de cualquier índole, y aunque a lo mejor no es de gran escala, sí son constantes. Entonces el daño va contaminando los suelos aledaños que, en

muchos lugares del llamado Triángulo Rojo, los ductos pasan cerca o muy cerca de zonas de cultivo que son afectadas severamente por esta derrama de hidrocarburo” (León y Nacar Jonathan, 2017, p. 14).

En México la ubicación de los ductos, características y las tomas clandestinas son reservadas parcialmente ya que se consideran de seguridad nacional por lo que solo se tiene acceso a información del año 2000 al 2018. Según acuerdo CT 10.18.O.18 (CT_PEMEX, 2018). Sin embargo, en rueda de prensa el Gobierno de México, informó: de enero a julio de 2020, Petróleos Mexicanos (Pemex) reportó 5805 tomas clandestinas en sus ductos con un total de 16 121 perforaciones ilegales, según la Gerencia de Estrategia y Sistemas de Seguridad y Monitoreo (Herrera, 2020). El Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados 2021-2024 informó que, para diciembre del 2018, la Comisión Nacional del Agua identificó 40 sitios con aguas subterráneas contaminadas, de los cuales 32 se concluyó que su contaminación fue por tomas clandestina en ducto (SEMARNAT, 2021).

En tanto, las tomas clandestinas en Jalisco en el año 2020 representan el 1.07 % a nivel nacional. Esto es, de los 3 ductos, el León–Aguascalientes, Cactus–Guadalajara, y Salamanca–Guadalajara. En Tlajomulco se registraron 124, Zapotlanejo 55, Tala 47, Zapopan 27, Atotonilco el Alto 42, Ayotlán 15, Lagos de Moreno 38, El Arenal 13, Encarnación de Días 21, Tototlán 10, Degollado 7, El Salto 6, Unión de San Antonio 4, Tonalá 2 y San Juan de los Lagos 1 (Gobierno de México, 2020).

Ya que existen diferentes situaciones de las que se puede derivar contaminación por fuga de hidrocarburos en poliductos como las provocadas por corrosión y fallas del material, en este estudio se aborda el caso de las fugas en poliductos con las siguientes características:

- 1) El punto de contaminación es reportado por la ciudadanía debido a la observación y olor a hidrocarburos sobre pozos de aprovechamiento o afluentes donde confluyen flujos de agua subterránea.
- 2) No se conoce la ubicación geográfica de la fuente de contaminación;
- 3) Existe un desconocimiento de cantidad de contaminante y tiempo en el que ocurrió la contaminación.
- 4) Contaminación histórica no visible, por lo que no se pueden aplicar métodos de evaluación establecidos por la norma oficial (DOF, 2017).
- 5) Las líneas de poliductos que transportan hidrocarburos están dentro de la cuenca del punto de contaminación observado.

6) Se tiene conocimiento de que la contaminación buscada en el subsuelo se pudo haber iniciado a profundidad mayor a 1.2 m (poliductos enterrados), lo que hace inviable las metodologías de muestreo de sedimentos y el respectivo análisis químicos establecidos por la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 para determinar el tipo y grado de contaminación (SEMARNAT, 2013b).

La importancia de este caso de estudio es desarrollar mecanismo para delimitar el área o microcuenca hidrológica de investigación donde puede estar alojada la fuente de contaminación por hidrocarburos. Así sobre esta cuenca y mediante métodos de prospección geofísica determinar anomalías encajadas en suelos naturales que puedan asociarse al agente contaminante en el subsuelo como un principio para lograr la caracterización de sitios contaminados por hidrocarburos de manera alterna inicial, y aunque esta fuera del alcance de esta investigación, para después sobre el área de contaminación aplicar categóricamente los métodos oficiales establecidos por las normas (DOF, 2003).

Finalmente, con lo anterior favorecer la sustentabilidad ambiental de aguas subterráneas en los sitios por donde se transportan los químicos energéticos, lo que permitirá aportar conocimiento sobre la ubicación del contaminante y su comportamiento en el subsuelo. Una vez determinado el sitio tener bases sólidas para declarar la zona como pasivo ambiental para proceder a su remediación. Lo que dará paso a la remediación de sitios identificados que favorezcan la condición de coexistencia armónica entre el desarrollo económico, producción de bienes, servicios y su ambiente (Frecè y Harder, 2018, p. 184) dicho de otra manera, se favorecerá sostenibilidad ambiental.

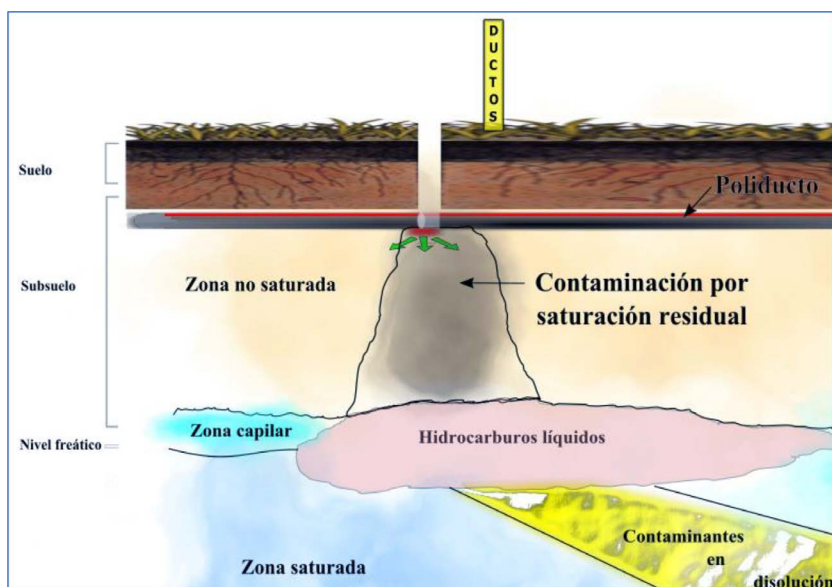
Las anomalías encajonantes (contaminación) en suelos naturales no contaminados pueden ser determinadas con métodos geofísicos sensibles a los procesos químicos, físicos, mecánicos y biológicos que surgen en la interacción de subsuelo con el agente contaminante por tiempos prolongados mayor 6 meses (Hanesch y Scholger, 2002).

El modelo conceptual de infiltración en el subsuelo (Castro, 2007, p. 38) debido a la contaminación por fuga de hidrocarburo por disposición clandestina de poliductos, presenta un proceso desplazamiento vertical ya que, ocurre directamente en el subsuelo a partir de la profundidad de los ductos (generalmente de entre 0.6 y 1.2 m), donde se inician los procesos

de acumulación adheridos por contaminación residual, hasta llegar a la zona capilar justo antes del nivel freático, donde se dispersan y se procede a la difusión, generando la zona de disolución, lixiviación y transporte del contaminante en dirección del flujo de agua subterránea. Mientras que, la zona de hidrocarburos líquidos insolubles, de metales pesados, pueden generar vapor (Figura 2).

Figura 2

Modelo conceptual de fuga en poliducto en el subsuelo, infiltración del contaminante, y procesos químicos



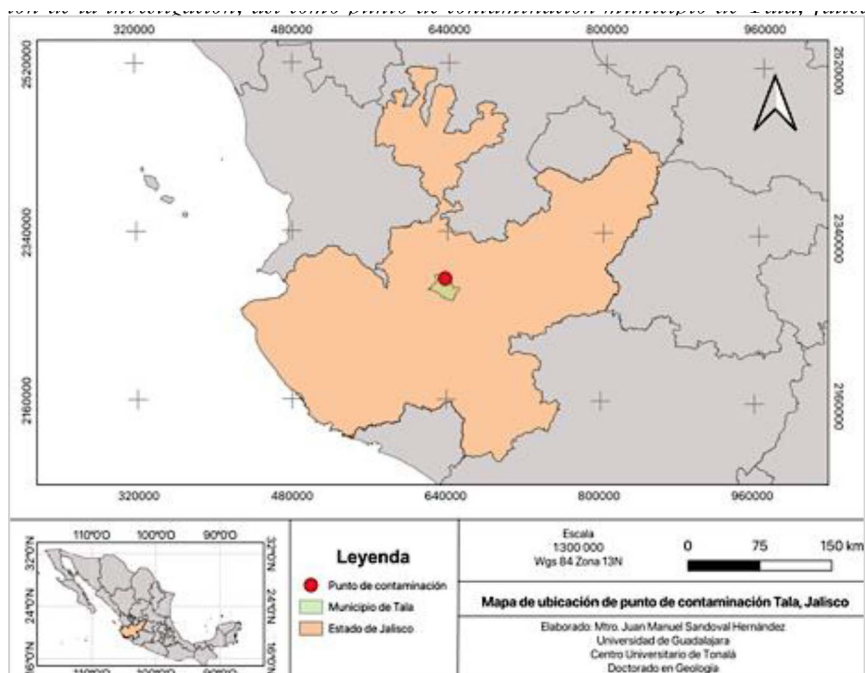
Fuente: Elaboración propia, con base en información de Castro Varela, 2007.

En el subsuelo se inicia la saturación residual del agente contaminante, es en esta zona en forma de cono donde inician los procesos de cambio físicos, químicos y biológicos debido a la interacción entre sedimentos y el fluido contaminante, esta interacción por tiempos prolongados transforma las propiedades características del suelo natural durante el proceso de oxidación (Hanesch y Scholger, 2002). La contaminación surge cuando la cantidad de hidrocarburos en el suelo natural es mayor a la capacidad de degradación de los microorganismos presentes, responsables de oxidar y mineralizar a sustancias inocuas el contaminante (Castro, 2007, p. 13).

En este estudio se aborda el caso en Jalisco, donde la Unidad Municipal de Protección Civil de Tala reportó el 13 de octubre de 2021 a la Unidad Estatal de Protección Civil y Bomberos de Jalisco (UEPCBJ), la presencia de sustancias químicas en el afluente del río El Salado en el Centro Acuático Recreativo (CAR) conocido como “El Chorro” en Tala, Jalisco. En visita de campo en abril de 2022, se identificó el punto de contaminación en las coordenadas 20.707622, -103.676577 en los límites del municipio de Tala y el Arenal Jalisco, ubicado en el centro poniente del estado de Jalisco, sobre la carretera federal 70, kilómetro 5.5 Guadalajara-Ameca, en el Centro Acuático Recreativo “Los Choros de Tala”, constatando olor a hidrocarburos, además de presencia de espejo aceitoso sobre la poza del nivel base de caída de agua de la cascada (Figura 3).

Figura 3

Mapa de ubicación de la investigación, así como punto de contaminación municipio de Tala, Jalisco, México

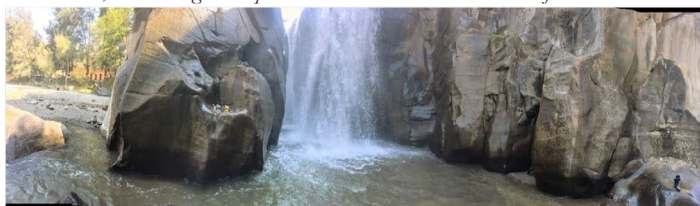


Fuente: Elaboración propia, 2024.

Las acciones previas realizadas por instituciones como UEPCBJ, el Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua (SIAPA), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Petróleos Mexicanos (PEMEX), Organismo Público Descentralizado Bosque La Primavera (OPDBLP), Comisión Estatal del Agua (CEA) y H. Ayuntamiento Tala, que realizaron en el ámbito de sus funciones. En la inspección se identificó en el afluente olor a gasolina, observándose espejo de agua aceitosa presuntamente gasolina emanando en bajas proporciones de entre las fracturas de las rocas de la cascada vertiéndose al afluente (Figura 4).

Figura 4

Río el Salado, donde se registra el punto de contaminación emanando al afluente



Fuente: Elaboración propia, 2024.

En los recorridos de inspección a empresas aledañas, tomas clandestinas resientes, mediciones de los niveles de explosividad baja por sus siglas en inglés Low Explosive Level (LEL), temperatura, conductividad, Potencial de Hidrógeno (pH), Oxígeno disuelto in situ para determinar compuestos orgánicos volátiles, Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) y compuestos orgánicos semi-volátiles. De lo que se obtuvo explosividad variante de entre 3 % y 55 % LEL, con máximos por mes de 35 % octubre, 50 % noviembre y 55 % diciembre del 2021, llegando a 0 % para enero y febrero del 2022 (Figura 5).

Figura 5

Gráfica de registro LEL, del periodo del 13 de octubre del 2021 al 4 de enero de 2022



Fuente: Elaboración propia con base a informe UEPCBJ, 2022.

Otra de las acciones en conjunto con PEMEX fue la revisión de segmento de poliducto (Salamanca- Guadalajara identificado como tramo Castillo–Zapopan) entre los kilómetros preliminares 315+500 y 317+500 con reporte reciente de fugas de hidrocarburos por tomas clandestinas, no se encontró derrame.

Metodología

El proceso metodológico de esta investigación parte de los resultados de análisis de laboratorio que confirman la presencia de hidrocarburos del grupo aromático, pero se desconoce la ubicación de la fuente de contaminación, de acuerdo con información proporcionada por UEPCBJ, por lo que se aplicaron metodologías como la entrevista, análisis cartográfico con Sistemas de Información Geográfica (SIG) del punto de contaminación, ubicación de infraestructura de poliductos, reportes de tomas clandestinas. Además del análisis de la red hidrológica, geohidrología, altimetría, geología, para determinar el área de investigación. La investigación documental sobre los procesos físicos y químicos producidos por la interacción del contaminante por tiempos prolongados en subsuelo natural, ayudó a determinar como método de prospección la magnetometría y cómo método

de exploración la resistividad eléctrica, ambos sensibles a los cambios en las propiedades físicas y mecánicas del suelo natural debidas a la oxidación.

La metodología de entrevistas cualitativas no estructuradas (Russell Bernard, 2011, p. 156), favorecieron improvisar las preguntas pertinentes, con base en las observaciones in situ durante el trabajo de campo, hasta profundizar en detalles; por lo que, se obtuvo mayor información del fenómeno en su tiempo de auge observado por la sociedad respecto a las tomas clandestinas y la contaminación desde la perspectiva de ciudadanos e institución UEPCBJ; como: problemática, antecedentes, comportamiento observado, posibles fuentes y causas.

Las metodologías SIG, permiten el análisis geoespacial al integrar mediante capas vectoriales georreferenciadas todo tipo de información conocida sobre el área de estudio (Longley et al., 2015), para dar soporte el proceso de conocimiento de la investigación. La información base utilizada procede de fuentes instituciones especializadas en las áreas de geología, hidrología, meteorología, Modelo Digitales de Elevación (DEM), infraestructura e información poblacional estadística. Con la información integrada en el sistema SIG, se calculó mediante módulo SWAT subcuencas, altimetría, áreas, longitudes y ubicar puntos referenciados. Finalmente, permitió el análisis de resultados integrando capas de resultados de los procesos metodológicos de datos obtenidos.

Una vez definida el área de estudio, mediante la exploración de base de datos publicada por Llano y Flore, 2017 que contiene ubicación georreferenciada de los reportes de tomas clandestinas en el periodo 2008 – 2015, se seleccionó como variables los nombres de localidades coincidentes en el área de estudio. Además, con base en el mapa ¿Por dónde circulan los hidrocarburos en México? (Llano y Flores, 2017), se desarrolló el análisis geoespacial del mapa vectorial de ubicación de infraestructura de poliductos con método de comparación visual con herramientas SIG. Una vez generada la capa mediante análisis cuantitativo se pudo medir los trazos vectoriales, de lo que se determinó la longitud de los poliductos de la infraestructura en Jalisco.

El análisis de la red hidrográfica parte del punto de contaminación, a este se le denominó punto de aforo, a partir del cual se calculó las microcuencas aguas arriba. Fue necesario determinar un segundo punto de afo-

ro para delimitar el área de investigación, este fue seleccionado mediante el análisis de confluencias de canales y escurrimientos al río principal de la microcuenca contigua aguas abajo.

Las microcuencas se determinaron por sus características geográficas y topográfica del terreno, considerando los límites de parte aguas, dirección de escurrimientos, confluencia a arroyos o ríos principales, mediante el proceso iterativo de análisis SIG generadas con la herramienta de evaluación de suelos, por sus siglas en inglés SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Una vez integrada la información del Modelo Digital de Elevación (DEM), SWAT calculó la red hidrológica. Además, para el balance hídrico se integraron datos de estaciones meteorológicas cercanas (CONAGUA, 2019), de registros de precipitación, temperatura y evaporación. Las estaciones y periodos de registro son: (Tala [01/67-12/21], Sta. Rosa [01/55-12/21], Ahualulco [01/38-07/21], La Vega [01/18-03/19] y Guadalajara [01/18-12/18]). Mientras que para obtener información de evapotranspiración potencial (ETP) de la subcuenca se utilizó la ecuación Penman con el método Penman-Monteith en función de variables de temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento (Penman, 1948), y la ecuación Muskingum para la simulación del flujo de agua en canales (Norouzi y Bazargan, 2024), basada en el balance de agua. Para la precipitación se obtuvo los valores de la media mensual.

El método geofísico de prospección magnética utiliza como instrumento el magnetómetro. Dicho instrumento, con tecnología avanzada de precesión de protones mediante el efecto Overhauser (Anet y Bourn, 1965, p. 5250), se produce cuando un líquido especial (con electrones no apareados) se combina con los átomos de hidrógeno y luego se exponen a la polarización secundaria de una frecuencia de radio en el campo magnético. Los electrones no apareados transfieren su polarización más fuerte a átomos de hidrógeno, generando así una señal de precesión fuerte que es ideal para mediciones de campo total de muy alta sensibilidad. Por lo que con sensibilidad de 0.022 nT se miden las variaciones magnéticas campo total entre el subsuelo natural y contaminado ligadas a los procesos de oxidación físico-químicos.

Los procesos de migración y dispersión del contaminante en el subsuelo pueden llegar a afectar subcuencas o microcuencas hidrológicas cuando

el medio de transporte del contaminante se desarrolla en el nivel freático. Los procesos de transporte del contaminante (lixiviación) surgen en dirección del flujo de aguas subterráneas que a su vez dependen de factores hidrogeológicos.

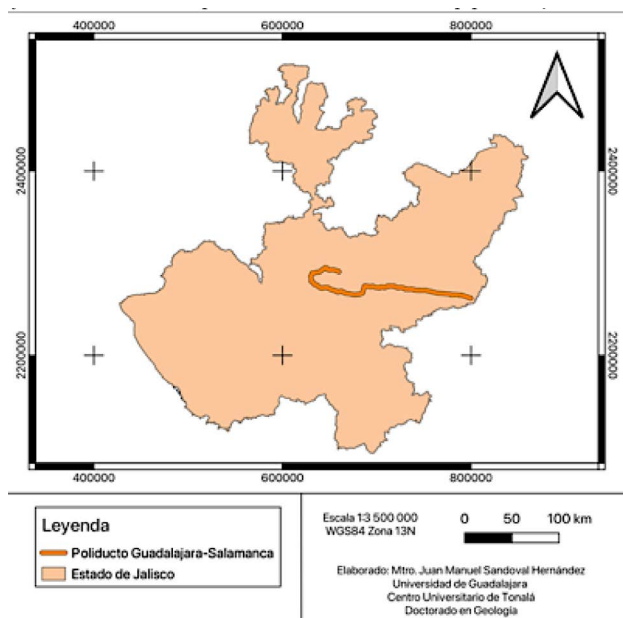
Resultados

Personal que labora en CAR confirman que en años previos 2019 y 2020, surgió el mismo suceso de contaminación, aunque en menor magnitud. La problemática en 2021 fue tal, que tuvo que ser reportada. Personal de UEPCBJ afirma que las muestras tomadas en diferentes días del año tienen olor a gasolina y/o diésel respectivamente, mientras que en 2022 y 2023 nuevamente surgió la problemática, pero en menor proporción.

En visitas de campo, en situ es posible identificar el punto de contaminación sobre los sedimentos de la poza en cualquier día del año. Además, durante la adquisición de datos geofísicos, los choferes transeúntes que circulaban por la México 70 confirman los hechos de la actividad de sustracción ilícita a unos metros de la carretera en sentido de la circulación vehicular de Guadalajara – Ameca, presumiblemente sobre los poliductos, justo en la zona de estudio, los que describieron que la sustracción de hidrocarburos perduró por tiempo prolongado sobre la zona y de forma descarada en dicho tramo carretero en años posteriores. La infraestructura de la red de poliductos de PEMEX en el estado de Jalisco, se calculó de una longitud de 230 804 Km de tuberías (Figura 6), estos poliductos transportan derivados de hidrocarburos líquidos, tales como gasolina, diesel y turbosina (Llano y Flores, 2017).

Figura 6

Ubicación de la infraestructura de la red de poliductos, tramo “Salamanca-Zapopan”, en Jalisco

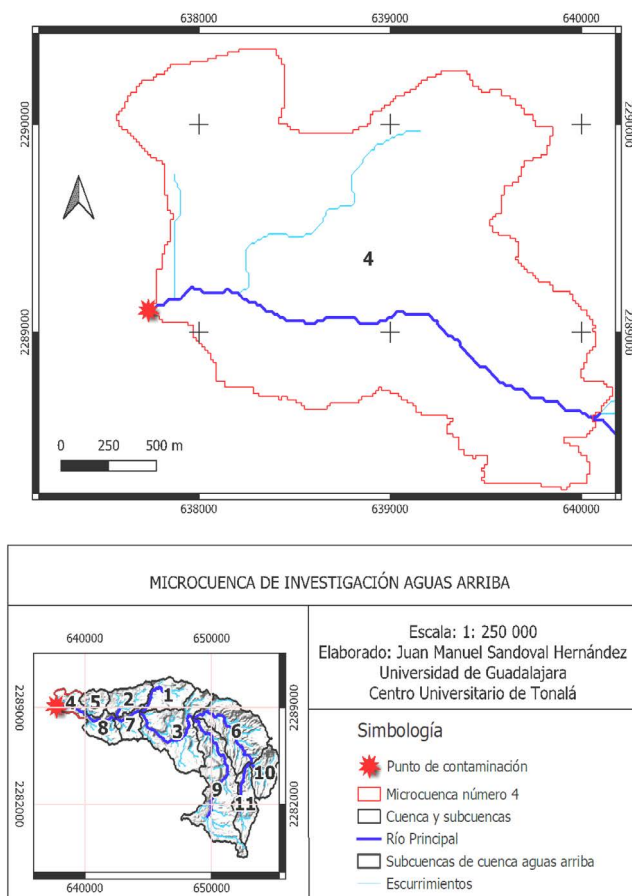


Fuente: Elaboración propia, 2024.

La Vega-Cocula (Figura 9) RH14-A (CEA Jalisco, 2005). Mediante el análisis con software SWAT, se generaron once microcuencas que conforman la subcuenca hidrográfica a partir del punto de contaminación. El río principal de la subcuenca es El Salado de caudal perene proveniente de la sierra La Primavera, a este confluyen los afluentes y escurrimientos de las microcuencas. De las microcuencas generadas con SWAT, destaca la cuatro por ser el lugar específico donde se identifica el punto de contaminación con área de 324 hectáreas (Figura 7), aforo donde se llevó a cabo el monitoreo de los niveles LEL de contaminación. Además de ser, el punto de aforo para generar la subcuenca de este caso de estudio.

Figura 7

Subcuenca, microcuencas y red hidrológica a partir del punto de contaminación



Fuente: Elaboración propia, 2024.

En el área cercana a la microcuenca cuatro se identificaron 42 tomas clandestinas (Tabla 1) que tienen como distancia promedio 1400 m al punto de contaminación identificado sobre la CAR, específicamente sobre la poza el a cascada.

Tabla 1

Base de datos georreferenciada de tomas clandestinas, periodo 2008-2015

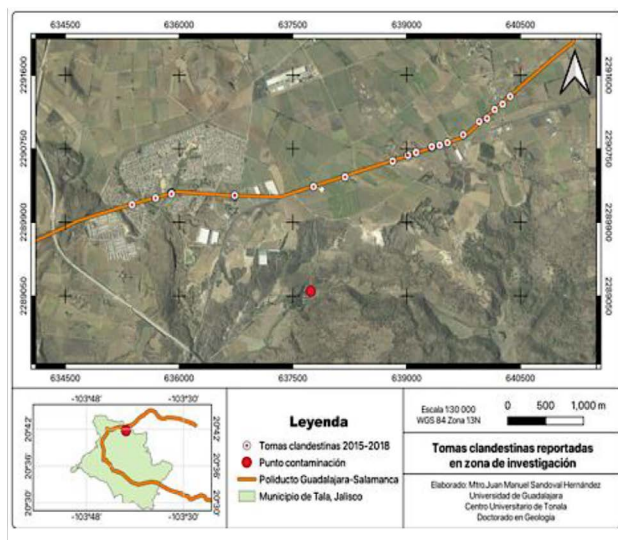
Fecha	Municipio	km	Fecha	Municipio	km
1 07/10/13	Arenal	322000	22 12/18/2012	Arenal	319750
2 06/30/2012	Arenal	321700	23 11/27/2013	Tala	218661
3 10/14/2014	Arenal	321600	24 03/21/2013	Tala	317778
4 03/07/14	Arenal	321537	25 10/20/2013	Tala	317810
5 01/28/2014	Arenal	322737	26 3/21/20003	Tala	317778
6 01/21/2009	Arenal	322600	27 11/24/2013	Tala	317778
7 07/10/10	Arenal	322737	28 3/19/2014	Tala	317575
8 11/18/2013	Tala	321150	29 03/28/2014	Tala	317575
9 11/18/2013	Tala	321151	30 11/04/09	Tala	317573
10 08/10/12	Tala	321284	31 01/05/13	Tala	31773.5
11 12/10/12	Arenal	321500	32 9/29/2012	Tala	317574
12 01/12/13	Arenal	321500	33 1/19/2013	Tala	317575
13 11/23/2012	Arenal	321500	34 1/24/2013	Tala	317575
14 03/07/14	Arenal	321537	35 03/21/2013	Tala	317778
15 10/14/2014	Arenal	321600	36 10/20/2013	Tala	317810
16 06/30/2012	Arenal	321700	37 11/27/2013	Tala	318660
17 05/27/2013	Arenal	320200	38 08/12/12	Tala	318637
18 11/18/2013	Arenal	320200	39 7/20/2015	Arenal	321605
19 03/11/11	Tala	320900	40 5/15/2015	Arenal	321660
20 12/12/12	Arenal	319750	41 07/10/13	Arenal	322000.35
21 12/06/12	Arenal	319750	42 3/20/2012	Arenal	322500

Fuente: Base de datos tomados de Llano y Flores, 2017.

Se graficó las tomas clandestinas identificadas cerca del punto de contaminación en el sistema SIG, de donde se identifican únicamente 18 puntos georreferenciados, los 24 restantes coinciden con un mismo punto de tomas clandestinas recurrentes, aunque en diferentes fechas (Figura 8).

Figura 8

Mapa de ubicación de tomas clandestinas en zona de estudio

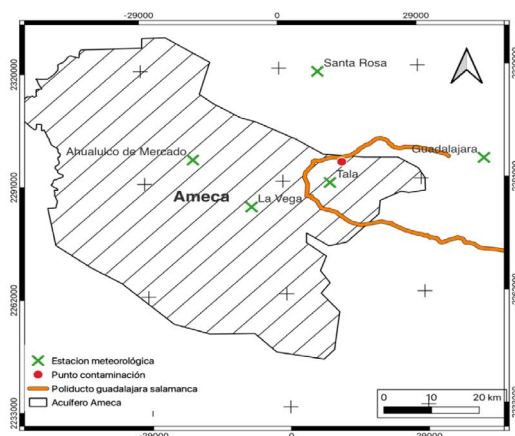


Fuente: Elaboración propia, 2024

La información de temperatura, precipitación y evaporación registrada por los sensores de las cinco estaciones meteorológicas más cercanas al punto de contaminación (Figura 9), así como, las características fisiográficas de la microcuenca, el tipo y uso de suelo, permitieron calcular y elaborar gráficas de precipitación, percolación, evapotranspiración y escurrimiento resultando el balance hídrico (Figura 10). Los valores máximos en el periodo de 2012 a 2021 registraron para la precipitación 200-330 mm; En tanto, la infiltración o percolación 10-22 mm; La evapotranspiración registrada de 130-160 mm; y la escorrentía de 7-60 mm. De los datos anteriores se deduce que el suelo de la zona de estudio presenta bajos valores de escorrentía, de lo que se puede deducir en el gráfico que la mayor parte de la precipitación se infiltra verticalmente hacia las capas profundas del subsuelo, lo que sugiere que alcanzaría el nivel freático, favorecido por el tipo y uso de suelo, condiciones geológicas, que contribuyen al incremento de flujo de agua subterránea.

Figura 9

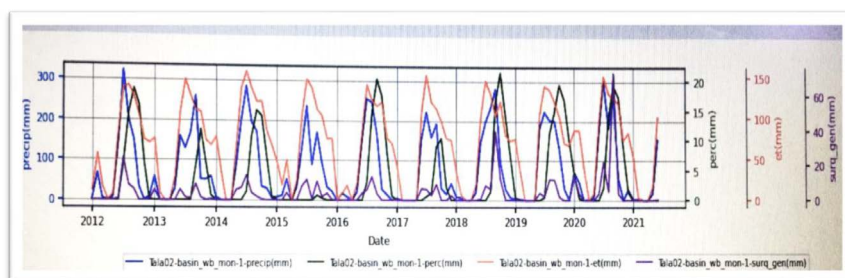
Ubicación de estaciones meteorológicas, acuífero Ameca, y punto de contaminación



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Figura 10

Gráfica de balance hídrico generada con información meteorológica con el software SWAT, periodo 2012-2021. Los valores están en milímetros, en color azul se muestra los valores de precipitación (precip), en verde infiltración o percolación (perc), en rojo la evapotranspiración (et), y en morado la escorrentía superficial (surq_gen).



Fuente: Elaboración propia, 2024. Con datos de CONAGUA.

Los niveles de percolación se asemejan al comportamiento de los niveles LEL medidos, o sea que, existe una relación del comportamiento hídrico de la microcuenca, temporada de lluvias con las emanaciones del contaminante transportado, aunque con un desfase de los niveles máximos

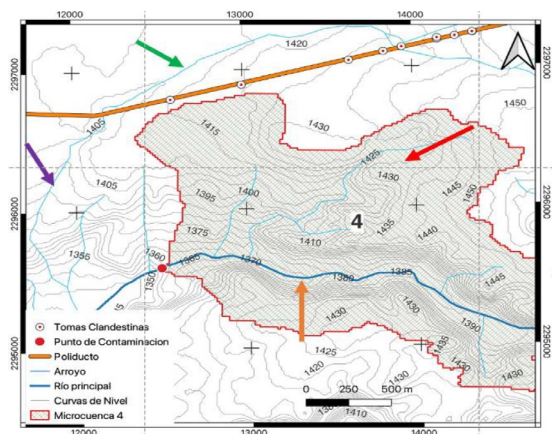
de emanación del contaminante de aproximadamente un mes. Lo anterior se adjudica al proceso de infiltración, en el que el volumen de agua precipitado supera el volumen escurrido y evapotranspirado, por lo tanto, se incrementa la saturación del nivel freático, que al incrementarse el flujo de aguas subterráneas favorece el transporte de lixiviados, situación contraria en temporada de estiaje, o sea, menor flujo de aguas subterráneas provocará la disminución de emanación del contaminante.

Los resultados del análisis anterior, sugieren que, debido al comportamiento de emanación del contaminante, la ubicación de la fuente de contaminación está presente en la microcuenca cuatro y que los lixiviados están siendo transportados por el incremento del flujo de aguas subterráneas, en la dirección al río principal, después hacia la presa de la vega (CONAGUA, 2015, p. 9). Este incremento es debido al fenómeno de infiltración por el incremento de la precipitación que favorece la saturación del manto freático. Se descarta que el contaminante provenga de cuencas aguas arriba transportado por el flujo perene de aguas superficiales del río El Salado, por una parte, por los resultados negativos del muestreo de aguas arriba (UEPCBJ, 2022). Por otro lado, el contaminante tendría emanaciones constantes que resultaría en una gráfica que mostraría contaminación lineal en cualquier época del año distinta a la gráfica de la figura 5. El parámetro de temperatura fue de utilidad para el cálculo de la evapotranspiración, que está en función de la temperatura media mensual. Los niveles máximos de evapotranspiración se dan cuando el suelo está provisto de agua. Los valores de evapotranspiración se toman para el balance hídrico.

Para la delimitación de la zona de estudio con base en la microcuenca cuatro, se realizó análisis hidrológico y altimetría (Figura 11). En tanto, para el análisis hidrológico y de acuerdo con CONAGUA se considerando que la dirección de flujo de aguas subterráneas en la microcuenca de estudio es hacia el río principal, en sentido de las principales corrientes superficiales y hacia la presa de la Vega (CONAGUA, 2015). Lo anterior se validó con SWAT añadiendo información de modelos digitales de información de uso y tipo de suelo para el estudio de escorrentía y caudal, lo que confirma mediante la simulación del flujo de agua en canales que proyecta la dirección de escorrentía del flujo de agua en la subcuenca hidrográfica es hacia el afluente principal, proporcionando información sobre el comportamiento hidrológico de la microcuenca.

Figura 11

Mapa que señala con flechas los límites considerados para la selección de la zona de estudio, indicados con las flechas

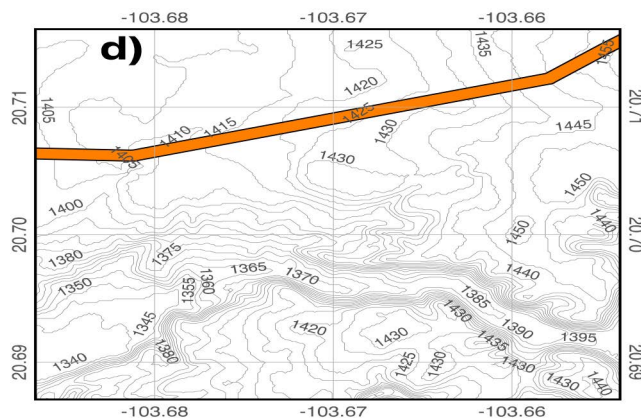


Fuente: Elaboración propia, 2024.

Finalmente, con la combinación del análisis hidrológico y la altimetría, se determinó los límites (Figura 11), al norte (flecha verde) el arroyo superior, al sur (flecha azul) el río principal, al este por la isolínea de nivel (flecha roja) en 1430 m y finalmente al oeste (flecha morada) el arroyo. Quedando como resultado el área de investigación delimitada por la línea en color rojo (Figura 12).

Figura 12

Límites de la zona de estudio

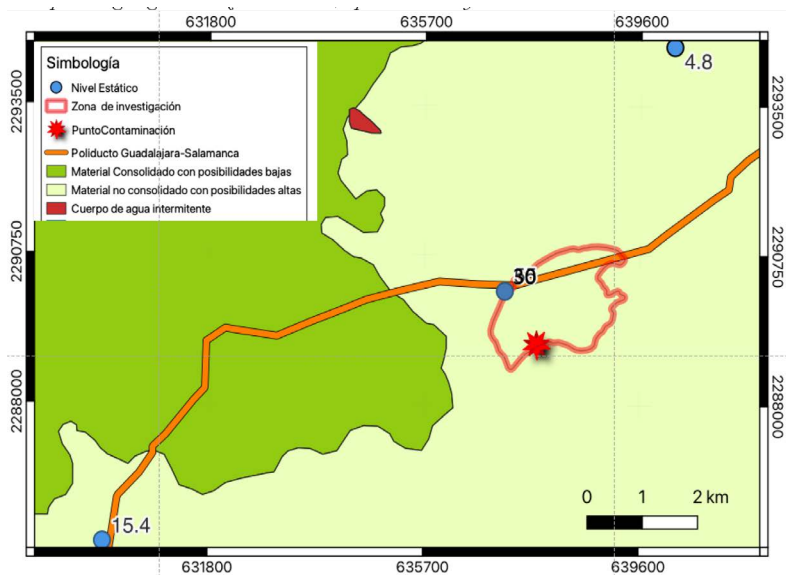


Fuente: Elaboración propia, 2024

Según mapa hidrogeológico con datos de INEGI, el nivel estático registrado en pozo de aprovechamiento ubicado dentro del área de investigación es de 30 m, con material no consolidado con posibilidades hidrológicas altas, permeabilidad del suelo favorable debida a granos finos (Figura 13), lo que concuerda con los resultados del balance hídrico.

Figura 13

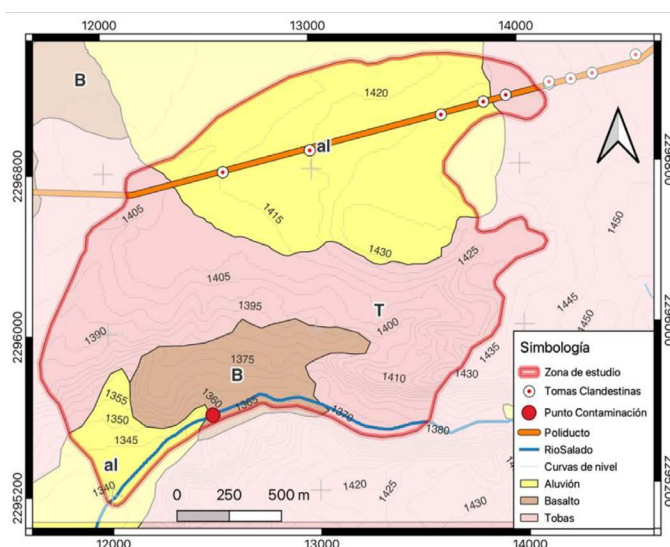
Mapa hidrogeológico de la zona de estudio, tipo de material y niveles estáticos



Fuente: Elaboración propia con base en información de INEGI, 2018.

La geología de la microcuenca que conforma parte del área de estudio, está conformada por aluvión, el cuál forma una planicie con altura de 1420 m.s.n.m. justo en la parte alta de la microcuenca, en el sur está conformada por rocas volcánicas del tipo toba con pendiente hacia el río principal que va desde 1430 a 1395 m.s.n.m., en tanto en el punto de contaminación se identifica rocas Basálticas que de igual manera forma una pendiente que va desde aproximadamente 1395 a 1340 m.s.n.m., (Figura 14). Por lo que la permeabilidad de los suelos es factor hidrogeológico de la infiltración al estar los ductos sobre aluvión favorecer la infiltración del contaminante.

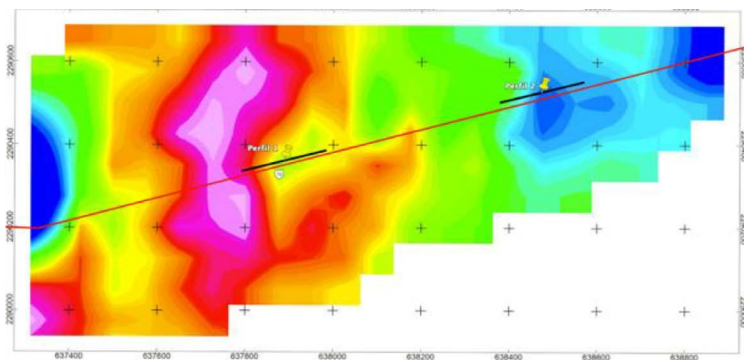
Figura 14

Mapa geológico de la zona de estudio*Fuente:* Elaboración propia, 2024.

La prospección magnética, se realizó en la zona de estudio, con recorridos paralelos en dirección Este Oeste, distanciamiento aproximado de 40m entre líneas de adquisición de datos. A las líneas de datos contiguas y paralelas al poliducto se interpolación aplicando la reducción al polo correspondiente, obteniendo con ello el campo magnético total. El mapa resultante muestra 800m de este a oeste, resultando una diferencia en los valores de campo total que van del suelo considerado como no contaminado 39994nT a suelo considerado anómalo con valores de 40417nT que se pudo asociar en una primera fase de procesamiento a una anomalía encajante en el suelo natural de área, que representa un diferencia de 423nT (Figura 15).

Figura 15

Anomalía de campo total, reducida al polo, la línea naranja representa poliducto y la negra perfiles de tomografía eléctrica

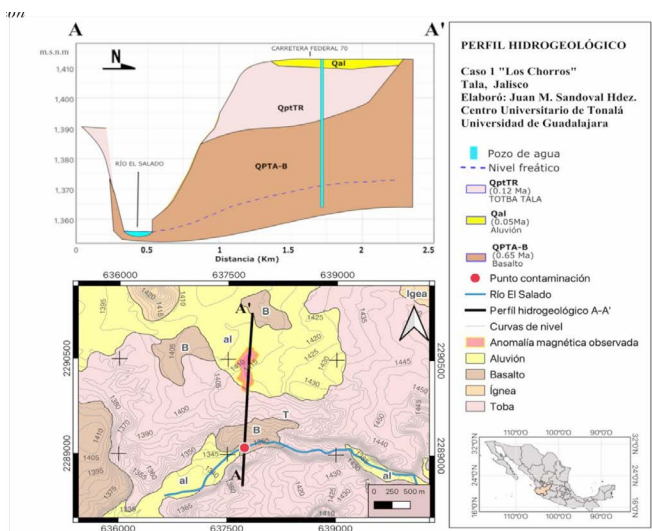


Fuente: Elaboración propia, 2024.

En una vista general de la zona de estudio se puede ver que la anomalía magnética tiene una forma alargada con dirección preferente NE, y que si se traza una línea hasta el punto de contaminación, se puede interpretar que lleva dirección hacia el punto de contaminación (Figura 16). La información hidrológica, hidrogeológica, altimetría, geología, la sísmica de refracción sugieren en el modelo Geohidrológico (Figura 16), una pendiente que podría favorecer el transporte de hidrocarburos desde la posible fuente de contaminación (anomalía magnética de campo total) hasta el punto de contaminación.

Figura 16

Modelo geohidrológico, perfil A-A', con dirección N del punto de contaminación hacia la posible fuente de contaminación



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Discusión

A pesar de los resultados obtenidos por autoridades municipales y estatales en muestras de análisis químicos y los niveles de LEL tomados durante la contingencia en 2021, que demostraron la presencia de hidrocarburos. Contradictoriamente, PEMEX presentó dictamen en marzo 2022 que revelan, que no es gasolina lo que contaminó el afluente del río el salado en Tala. Los resultados concluyen, buen estado hermético de los ductos, y aseguran que los químicos encontrados en las muestras no corresponden la fórmula química de gasolina o diésel y que no se registran índices de explosividad.

Dichos estudios, bastaron para que la paraestatal se deslindara de la problemática ambiental, no habiendo presentado ningún tipo de caracterización del subsuelo de las fugas selladas, de lo que se infiere la ausencia de seguimiento en la prevención impacto ambiental en aguas subterráneas.

Lo anterior, no aporta hacia la sostenibilidad del medio de transporte por ductos y el ambiente. Por lo que, la fuente de contaminación es desconocida. Lo que implica que, no existe pasivo ambiental, declaratoria de riesgo ambiental y por lo tanto no habrá remediación del subsuelo, hasta demostrar lo contrario. Aunque el desarrollo de esta investigación está en su primera fase, el objetivo es la búsqueda de la fuente de contaminación. Si bien, el modelo conceptual de infiltración en el subsuelo, determina que los lixiviados son transportados por y en dirección del flujo de aguas subterráneas. Se discute la posibilidad de interpretar la anomalía con los resultados de la exploración geofísica, geológica, hidrológica y geohidrológica para interpretar la posible fuente de contaminación.

Con base en la entrevista, en años anteriores a la contingencia ambiental del 2021, ya había iniciado la emanación del contaminante al afluente, aunque en baja proporciones. La relación del bajo nivel de precipitación para años posteriores, hizo que disminuyera la cantidad de contaminante que emanó al afluente, no llegando a ser importante en 2022 y 2023. Sin embargo, el químico sigue emanando en los sedimentos de la poza de la cascada. Lo que mantiene la discusión de que la fuente de contaminación sigue presente. Por lo que, no solo en este caso de estudio los lixiviados seguirán transportándose en dirección de flujo de aguas subterráneas contaminando cuerpos de agua subterránea. Si no que, seguirá en asenso el riesgo de contaminación de aguas subterráneas en sitios por donde se localiza la infraestructura de ductos que transportan derivados de hidrocarburos en donde se realizan actividades de sustracción ilícita, que mientras no se caracterice el subsuelo ante este fenómeno, el riesgo seguirá latente.

En materia de Seguridad Industrial, Operativa y Protección al Medio Ambiente, para el transporte terrestre por medio de Ductos de Petróleo, Petrolíferos y Petroquímicos, señala en el capítulo III, artículo 80 el establecimiento de programa de patrullaje como obligación, el capítulo IV administrar la integridad e identificar las amenazas potenciales entre otras obligaciones que señala la ley. ¿Qué no será entonces injusto el cobro del CTPNO, al usuario final? Sino que, más bien ¿Será necesario, el endurecimiento de contratos, eficiencia en protocolos y leyes, con la mira en acciones a quienes generen contaminación y degradan el valor de la propiedad?

Finalmente, con el CTPNO, se puede discutir la postura del gobierno, pues se puede inferir que se preocupa por las pérdidas económicas de la

industria, mas no por la sostenibilidad ambiental, lo que seguirá agravando la contaminación de cuerpos de agua subterránea, debida a la sustracción ilícita en ductos de transporte de hidrocarburo.

Conclusiones

La expansión de infraestructura de ductos a nivel nacional como medio de transporte de productos energéticos y materias primas industriales, favorecen el desarrollo industrial y económico globalizado. Además, de las formas de transporte conocidas, los ductos son un medio efectivo, económico y sostenible para el suministro de las cadenas de producción.

Las normas de manejo del transporte por ducto prevén excelencia operativa, control, mantenimiento, valores de sustentabilidad, rentabilidad, monitoreo tecnológico y software de información e indicadores en tiempo real, para evitar y responder oportunamente ante las acciones de fugas o derrames que amenacen la sostenibilidad y riesgo de contaminación de cuerpos de agua. Sin embargo, los daños provocados por la disposición clandestina afectan la sostenibilidad del medio de transporte de hidrocarburos por ducto, provocan mayor gasto al bolsillo del consumidor en las zonas donde se aplica el CTPNO, degrada el medioambiente, contamina el subsuelo, pone en riesgo la disposición de aguas subterráneas, afecta la salud pública de sus habitantes y genera violencia por el control de la actividad ilícita. Aunado a lo anterior, al no haber culpables, cuando se reporta contaminación en aguas subterráneas, los costos de caracterización de posible pasivos ambientales provocados por el negocio de la sustracción ilícita y remediación sí se llegarán a efectuar, serán absorbidos por la sociedad.

En México el incremento al costo final de hidrocarburos calculado con base en la disposición clandestina reportada por tramos de infraestructura de ductos CTPNO, es indicador de ineficiencia. Pues tiene como fin, cobrar al usuario final las pérdidas en forma de CTPNO. Recaudación bonificada a la industria energética para compensar las pérdidas económicas calculadas por las fugas. Por lo tanto, la actividad ilícita no genera pérdidas a la industria que transporta hidrocarburos debido al CTPNO. Tampoco, a la delincuencia organizada, pues este negocio es una actividad que solo genera importantes ganancias económicas.

Actualmente, los protocolos, métodos y procedimientos de detección y atención de fugas, se centran en el sellado de la misma, para inmediatamente después, continuar con el transporte del hidrocarburos lo antes posible. De lo anterior se deduce que, no es de interés evaluar daños al subsuelo y aguas subterráneas en cada fuga.

Por otro lado, al considerar los reportes de fuga como seguridad nacional, la información no está disponible para hacer un análisis de riesgo. Factor que se suma a la amenaza de contaminación de cuerpos de agua, a tal grado que la atención de sitios contaminados es necesaria, cuando los lixiviados ya contaminaron aguas subterráneas, siendo reportadas por la ciudadanía afectada.

El desarrollo de investigaciones para determinar el impacto ambiental de sitios reportados con fugas de hidrocarburos derivadas de tomas clandestinas, es de suma importancia para evaluar el riesgo de contaminación de aguas subterráneas y favorecer la sostenibilidad entre el medio de transporte de petroquímicos, el medioambiente y el desarrollo económico. Por lo que, se debe fortalecer la investigación de metodologías para caracterizar contaminación de hidrocarburos en el subsuelo, mediante métodos rápidos de ejecutar, no invasivos y económicos.

El estudio del comportamiento de lixiviados en el subsuelo es complejo debido a las condiciones hidrogeológicas, por lo que se requiere desarrollar investigación con metodologías complementarias, y valorar la importancia del agua contra el desarrollo industrial. Sobre los estudios presentados en este estudio, hasta el momento sugieren, la ubicación de la posible fuente de contaminación. Sin embargo, es necesario completar más estudios, con otras metodologías sensibles para finalmente realizar un muestreo de sedimentos profundo en el punto que los métodos geofísicos sugieran, realizar análisis químico apegado a la NOM correspondiente.

Referencias bibliográficas

- Álvarez-Manilla Aceves, A., Valadéz Castro, J. P., Garnica Anguas, P. & Martínez Peña, G. E. I. (2002). *La permeabilidad de los suelos en los problemas de transporte de contaminantes*. Aplicación en la infraestructura del transporte. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicacion-tecnica/pt195.pdf>
- Anet, F. A. L., & Bourn, A. J. R. (1965). Nuclear Magnetic Resonance Spectral Assignments from Nuclear Overhauser Effects. *Journal of the American Chemical Society*, 87(22), 5250–5251. <https://doi.org/10.1021/ja00950a048>
- ATSDR (1995). *Resumen de salud pública: gasolina para automóvil*. In CAS#: 80006-61-9. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs72.pdf
- Bernal Avendaño, A. (2020, September 29). Combate al huachicol un éxito, se ha disminuido en un 94% el delito: GMSI. *Regeneración Medio de Información Libre e Independiente*. <https://regeneracion.mx/combate-al-huachicol-un-exito-se-ha-disminuido-en-un-94-el-delito-gmsi/>
- Castro, V. G. (2007). *Informe Final: Diseño Monitoreo Frente Derrames De Hidrocarburos*. Prasa.
- CEA Jalisco (2005). Cuenca Presa La Vega-Cocula. www.ceajalisco.gob.mx/contenido/cuencas_jalisco/img/Cuencas%20Hidrologicas%20en%20Jalisco.pdf
- Celovic, A. (2019, May 6). Pipeline History: first modern pipeline commissioned 400 years ago. *Pipeline Technology Journal*. <https://www.pipeline-journal.net/news/pipeline-history-first-modern-pipeline-commissioned-400-years-ago>
- CONAGUA (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Ameca (1409), Estado de Jalisco*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103719/DR_1409.pdf
- CONAGUA (2017). *¿Sabes cuál es el lago más grande de México?* Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/sabes-cual-es-el-lago-mas-grande-de-mexico?idiom=es>
- CRE (2022). *Informe de labores 2022*.
- CT_PEMEX. (2018). ACUERDO-CT 10.18.O.18 PEMEX. *Reserva parcial de la información de tomas clandestinas*. <https://serendipia.digital/wp-content/uploads/2018/05/1857200120518-2.pdf>

- De los Reyes, P. R. (2022). *Energía, cambio tecnológico e impacto ambiental: una historia económica*. In AEHE (Ed.), *Lamentos y silbato: el oleoducto y la refinería de la Ciudad de México* [Plenaria 2] (pp. 1–38). XIII Congreso Internacional Asociación Española de Historia Económica, España. https://congresosaehe.es/wpcontent/uploads/2022/06/Plenaria2_ReynaldoReyes.pdf
- DOF (2003, October 8). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Última Reforma Publicada DOF 08-05-2023. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=688657&fecha=08/10/2003#gsc.tab=0
- DOF. (2017, March 31). *Disposiciones administrativas de carácter general que establecen los Lineamientos en materia de Seguridad Industrial, Seguridad Operativa y Protección al Medio Ambiente, para el transporte terrestre por medio de Ductos de Petróleo, Petrolíferos y Petroquímicos*. Secretaría de Gobernación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5478203&fecha=31/03/2017#gsc.tab=0
- Emanuel, R. E., Caretta, M. A., Rivers, I. L., & Vasudevan, P. (2021). *Natural Gas Gathering and Transmission Pipelines and Social Vulnerability in the United States*. *GeoHealth*, 5(e2021GH000442), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2021gh000442>
- Felice Uricchio, V., Paparella, S., & Falconi, M. (2023). *L'innovazione per la sostenibilità ambientale nell'epoca della multitransizione* (S. Di Marcello, Ed.). RemTech Expo 2023.
- Frago, C. H. (1993). *The Biodegradation Potential of Methanol, Benzene, and m-Xylene in a Saturated Subsurface Environment* [Tesis Doctoral, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University]. https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/42958/LD5655.V855_1993.F734.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- García, V. L. A., & Fernández, V. G. (2014). Health Risk Assessment of Zone 7 Contaminated with Benzene in the Environmental Liability Generated by the “March 18th Ex-Refinery” in Mexico City. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(3). [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(14\)70351-8](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(14)70351-8)
- Gobierno de México. (2020). *Estos son los 5 municipios de Jalisco con más tomas clandestinas de hidrocarburos* (Milenio, Ed.). <https://www.youtube.com/watch?v=M4z5KkE8K30>

- Gómez-López, C. S., Barrón Arreola, K. S., & Moreno Moreno, L. (2011). Crecimiento económico y medio ambiente en México. *Trimestre Económico*, 78(311). <https://doi.org/10.20430/ete.v78i311.42>
- González Pérez, M. G., Serafín González, S. L., García García, E. X. M. & Soto Felix, M. (2023). *Neociudades, Expresiones postcovid en la ciudad y el territorio* (Astra Ediciones). Universidad Politécnica del Estado de Nayarit. https://www.academia.edu/113654997/Neo_ciudades_Expresiones_post_covid_en_la_ciudad_y_el_territorio?uc-sb-sw=13426426
- Hanesch, M., & Scholger, R. (2002). Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. *Environmental Geology* 2002 42:8, 42(8), 857–870. <https://doi.org/10.1007/S00254-002-0604-1>
- Herrera, E. (2020, September 18). *Alentador, resultado de combate al huachicol, pero es necesaria más tecnología: GMSI*. Milenio, Negocios. <https://www.milenio.com/negocios/combate-huachicol-alentador-necesita-tecnologia-gmsi>
- Katyukha, P., & Mottaeva, A. (2021). Transformation of the global oil pricing structure in the conditions of increasing competition of leading players in the oil market. In *E3S Web Conf.* (Ed.), Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2021), 258, 1–9. <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/202125806064>
- Kolb, M. (2021, August 24). *What Is Globalization? And How Has the Global Economy Shaped the United States?* Peterson Institute for International Economics (PIIE). <https://www.piie.com/microsites/globalization/what-is-globalization>
- Le Sève, M. D., & De Souza, E. (2024). Stewardship at the Source. Driving water action across supply chains. Global Water Reporte 2023. CDP, *Disclosure Insight Action*, 1-40. https://cdn.cdp.net/cdp-production/cms/reports/documents/000/007/620/original/CDP_Water_Global_Report_2023_.pdf?1711030114
- León, L., & Nacar J. (2017, August 24). Del ejido al huachicol/Golpe ambiental. *Ejecentral*, *Semanario* #64, 13–17. <https://www.ejecentral.com.mx/del-ejido-al-huachicol/>

- Llano, M., & Flores, C. (2017, July). *Ductos. ¿Por Dónde Circulan Los Hidrocarburos En México?* https://cartocritica.org.mx/wp-content/uploads/2017/07/CartoCr%C3%ADtica_HBS_MapaDuctos_ALTA.pdf
- Longley, Paul. A., Frank Goodchild, M., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). Geographic Information Science and Systems. In J. Wiley & Sons (Eds.), *International Encyclopedia of Human Geography, Second Edition* (Second). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102295-5.10557-8>
- López Obrador, A. M. (2020). *Transporte de hidrocarburos por ductos en México*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/539262/1_PE-MEX_LOGISTICA-CENAPRED_-_17ene2020.pdf
- Norouzi, H., & Bazargan, J. (2024). Investigation of river water pollution using Muskingum method and particle swarm optimization (PSO) algorithm. *Applied Water Science*, 14(4), 68. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02127-0>
- OECD (2020). *Panorama de las Administraciones Públicas América Latina y el Caribe 2020*. OECD. <https://doi.org/10.1787/1256b68d-es>
- ONU (1987). *Our common future*. *World Farmers' Times*, 2(9). <https://doi.org/10.4324/9781315270326-140>
- Orozco Carbajal, J. (2011). Transporte de Hidrocarburos por Ductos. In *Asociación de Ingenieros Petroleros de México, A. C., Delegación México* (pp. 1-114).
- Peña García, L., Maciel Flores, R., Rosas Elguera, J. G., & Alatorre Zamora, M. Á. (2012). *Las aguas subterráneas en Jalisco: una aproximación a su situación actual*. https://www.ceajalisco.gob.mx/sites/MicrositioCAA/docs/2012/03_agua_subterranea_laura_pena_udg.pdf
- Penman, H. L. (1948). Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical. J. Franklin Inst*, 193(1032). <http://soilphysics.okstate.edu/teaching/soil-6583/references-folder/penman%201948.pdf>
- Reyes, M. (2021). *Determinación de compuestos derivados del petróleo como agentes contaminantes presentes en el agua subterránea de la ciudad industrial de linajes, Nuevo León, México* [Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/23814/1/1080328506.pdf>

- Russell Bernard, H. (2011). *Research Methods in Anthropology: Qualitative and Quantitative Approaches (FIFTH)*. Alta Mira Press. https://books.google.com.mx/books?id=Ngg-MNMH1YoC&pg=PA1&hl=es&source=-gbs_toc_r&cad=1#v=onepage&q&f=false
- SEMARNAT (2013a). *Atmósfera. Informe de La Situación Del Medio Ambiente En México*. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental.
- SEMARNAT (2013b, September 10). *Norma Oficial Mexicana NOM-138-SE-MARNAT/SSA1-2012*. Límites Máximos Permisibles de Hidrocarburos En Suelos y Lineamientos Para El Muestreo En La Caracterización y Especificaciones Para La Remediación. DOF Secretaría de Gobernación [Archivo PDF En Línea], Segunda Sección, 1–16. <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/6646/1/nom-138-semarnat.ssa1-2012.pdf>
- SEMARNAT (2021, november 4). *Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial de la Federación de México*. Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados 2021-2024, Programa Especial Derivado Del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5634656&fecha=05/11/2021#gsc.tab=0
- Solórzano Chamorro, J. J., Vera Basurto, J. S., & Buñay Cantos, J. P. (2022). Crecimiento económico y medio ambiente. *RECLAMUC203*, 6(1), 203–212. [https://doi.org/10.26820/reciamuc/6.\(1\).enero.2022.203-212](https://doi.org/10.26820/reciamuc/6.(1).enero.2022.203-212)

