

4. IDENTIFICACIÓN DE TRAMOS DE TUBERÍAS DE TRANSPORTE DE LÍQUIDOS PELIGROSOS CON POSIBLE AFECTACIÓN A ÁREAS SENSIBLES

Omar Javier Daza-Leguizamón
Enrique Vera-López

4.1 Introducción

La importancia de los Sistemas de Información Geográfica, radica en su capacidad para soportar procesos de análisis y modelizado espacial para mejorar la toma de decisiones de problemáticas de índole espacial. En este capítulo se presenta el desarrollo metodológico adelantado al interior del Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de los Materiales, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, para identificar tramos de tuberías de transporte de líquidos peligrosos, con afectación a áreas de alta consecuencia. Los procedimientos de análisis descritos tienen como objetivo aportar información que permita implementar métodos de análisis de riesgo dentro de programas de gestión de integridad de tuberías de transporte de líquidos peligrosos.

4.1.1 Sistemas de Gestión de Integridad de Tuberías - SGIT

La norma técnica colombiana define los SGIT como un “Conjunto de procesos de mejoramiento continuo liderados por la alta dirección de una compañía operadora, orientados a garantizar la integridad del sistema de transporte de líquidos peligrosos por tuberías, teniendo como base el Programa de Gestión de Integridad (PGI), con el fin de preservar en todo momento la vida de las personas y el medio ambiente” (ICONTEC, 2012, p. 9). Los procesos asociados con estos sistemas incluyen la dirección, planeación, verificación, medición de la integridad de la tubería (Mora, Hopkins, Cote, & Shie, 2016, p. 3), y sirven como marco de referencia para ejecutar una efectiva gestión de la integridad (Goodfellow & Jonson, 2018, p. 5). Desde el punto de vista operacional, un SGIT, sigue los principios de un sistema de gestión, por lo tanto, puede representarse mediante el ciclo de Deming (LeBlanc, Kresic, Keane, & Munro, 2016; Mora et al., 2016; Rees, 2009). Este mismo enfoque del ciclo Planear-Implementar-Chequeo-Ejecución, es presentado en detalle

por Goodfellow y Jonson (2018). Uno de los componentes centrales de un SGIT, es la evaluación del riesgo como metodología para la priorización de las acciones que permitan la adecuada gestión de la integridad de una tubería.

La estimación del riesgo puede expresarse matemáticamente como el producto entre la frecuencia de falla y las consecuencias. Lo cual conduce a que un incremento en cualquiera de los dos factores, o los dos a la vez, conlleva un incremento en el valor del riesgo. La estimación se suele hacer utilizando diferentes métodos que varían dependiendo de la forma en la que se valoran o calculan la frecuencia de falla, la consecuencia y el riesgo; los métodos se clasifican en cuantitativos, semicuantitativos, cuantitativos y cualitativos (Dziubinski, Fraczak, & S., 2006, p. 399; Mora et al., 2016, p. 144). Los métodos cualitativos dependen, principalmente, de las experiencias de los expertos, quienes, con base en su conocimiento del sistema y de las posibles consecuencias, pueden establecer clasificaciones de la tubería asignar índices y valorar el riesgo (American Petroleum Institute, 2013, p. 23; Mora et al., 2016, p. 144). Los métodos cuantitativos cubren todas aquellas técnicas que calculan el riesgo como una función matemática, que involucra el análisis de probabilidades de falla y cuantificación de los costos asociados con esta (American Petroleum Institute, 2013, p. 24; Cunha, 2016; ICONTEC, 2012, p. 46). En el medio de los métodos descritos están los métodos semicuantitativos, los cuales requieren del uso de una función matemática para calcular el riesgo, aunque, la estimación de la frecuencia de falla y las consecuencias pueden ser obtenidas a partir de clasificaciones y valoraciones relativas a partir de índices. Las metodologías propuestas e implementadas en este capítulo, se clasifican en este último grupo.

4.1.2 Consecuencias espaciales como componente de estimación del riesgo

Las consecuencias causadas por el derrame del líquido peligroso transportado por una tubería, pueden ser clasificadas dependiendo de si tienen, o no, un componente espacial. Las consecuencias a la seguridad, regulatorias financieras y al negocio, por ejemplo, no tienen un componente espacial y su magnitud no dependerá directamente de la localización de la tubería. Por otro lado, las consecuencias a la salud, al ambiente y a la comunidad dependen de su proximidad a la tubería, además de la ruta de derrame de un posible derrame hasta cada una de ellas. Dentro de esta última categoría, surgen los términos de “áreas de consecuencia”, “áreas de alta consecuencia” y “ubicaciones críticas”. Las ubicaciones críticas incluyen, según el RP API 1160, áreas pobladas, cuerpos de agua con navegación comercial, recursos de agua

para consumo humano o áreas ambientalmente sensibles. Estas ubicaciones críticas, coinciden con las estipuladas, como áreas de alta consecuencia, en el 49 CFR 195.450, y, por lo tanto, se concluye que estos términos se pueden adoptar como sinónimos. En cuanto a las áreas de consecuencia, definidas por la NTC 5901, incluye además de la categoría de alta consecuencia, las de media y baja consecuencia. De aquí en adelante, cada vez que se mencionen en este documento las áreas de consecuencias, se estará haciendo referencia a aquellas que tienen un componente espacial.

Las consecuencias dependen de la estructura y la dinámica espacial del territorio, por consiguiente, pueden incrementarse o reducirse dependiendo de los cambios de los elementos y de las interacciones entre ellos. Además, se deben considerar las características y propiedades de la tubería y del líquido transportado, junto con la estimación del volumen de líquido liberado, porque de ese depende el nivel de consecuencia (Cunha, 2016). Los principales aspectos a tener en cuenta durante el análisis de consecuencias son (Mora et al., 2016, p. 115):

- Tipo de fluido y propiedades.
- Características de la tubería y del flujo.
- Características del medio ambiente.
- Sensibilidad y proximidad de los receptores.

La selección de los elementos geográficos se puede hacer siguiendo los lineamientos establecidos por el código 49 CFR 195.450, y la norma NTC 5901. A continuación, se presenta la clasificación de áreas de alta consecuencia establecidas en el Código Federal de Regulaciones de los Estados Unidos, y el listado de aspectos a considerar para seleccionar las áreas de alta, media y baja consecuencia según la NTC colombiana. Las áreas de alta consecuencias están conformadas por:

- Cuerpo de agua con navegación comercial: cuerpo de agua en el cual existe alguna probabilidad de presentarse navegación comercial.
- Áreas densamente pobladas: áreas urbanizadas, de acuerdo con la definición y delimitación de la Oficina de Censo de los Estados Unidos (EU), que contenga 50.000 o más habitantes y que tenga una densidad de al menos 1.000 personas por milla cuadrada (386 personas por kilómetro cuadrado).
- Otras áreas pobladas: es un lugar, de acuerdo con la definición y delimitación de la oficina de censo de los EU, que contiene población concentrada, tales como una ciudad, pueblo villa, u otra área residencial o comercial designada, ya sean incorporadas o no incorporadas.
- Área inusualmente sensible: Están definidos en el 49 CFR 195.6 y se

mencionan las captaciones de agua para consumo humano, las áreas de protección de las fuentes de agua para consumo humano y las zonas de recarga de acuíferos.

Los aspectos por considerar para identificar las áreas de consecuencia (alta, media y baja), según la NTC son:

- a) “La densidad de población,
- b) Número de unidades habitacionales,
- c) Áreas recreativas y lugares públicos,
- d) La cantidad y calidad de los recursos naturales (áreas ambientalmente sensibles, áreas con especies en peligro de extinción, entre otras).
- e) Boca tomas y pozos de acueductos utilizados para consumo humano
- f) Planes de ordenamiento territorial
- g) Instalaciones industriales
- h) La(s) licencia(s) ambiental(es)
- i) Requisitos y prescripciones establecidas por las entidades competentes y regulaciones nacionales vigentes.
- j) Vías navegables, vías férreas, autopistas, carreteras nacionales”

El proceso para determinar la afectación causada por un derrame desde la tubería, requiere del procesamiento y análisis de datos espaciales de cada una de las áreas de consecuencia. En este contexto, los sistemas de información geográfica, han sido una herramienta de uso obligado cuando se presentan estudios para identificar y evaluar la afectación a elementos geográficos con diferentes niveles de vulnerabilidad.

En cuanto a los efectos negativos causados por un derrame sobre las áreas de alta consecuencia, existen varios estudios que los reportan. Estos efectos son muy variados y en este párrafo se describen algunos ejemplos. Laffon y otros (2016), realizaron una revisión de estudios en los que se clasificaron los efectos sobre la salud humana como efectos sobre la salud mental, efectos físicos o fisiológicos, y genotóxico, inmunotóxico y toxicidad endocrina. Las consecuencias también están asociadas a factores sociales, como se describe en la revisión hecha por Chang y otros (2014), existiendo un espectro completo de pérdidas socioculturales que puede tener un impacto en la estructura social y la estabilidad de la comunidad y erosionar aún más la productividad y la participación económica. Además, las poblaciones rurales o indígenas se pueden ver afectadas por el daño del entorno natural, del cual depende su subsistencia o sus actividades socioculturales. Desde el punto de vista del uso agrícola, los productos refinados del petróleo, pueden producir cambios en las características fisicoquímicas del suelo (Obire & Nwaubeta, 2002), situación

que logra implicar baja fertilidad del suelo y en consecuencia, reducción de la productividad agrícola (Osuji & Nwoye, 2007). Los efectos en ecosistemas acuáticos, pueden ser efímeros o duraderos. Algunos componentes químicos se disuelven en el agua y matan a las criaturas acuáticas, mientras que otros, por ejemplo, los hidrocarburos aromáticos policíclicos, pueden persistir en el agua y causar efectos crónicos sobre la salud de las especies acuáticas (Lee et al., 2015). La afectación de cuerpos de agua superficiales o subterráneos, desde los cuales se extrae agua para consumo humano, tiene una afectación sobre la continuidad de la distribución del recurso hídrico a las comunidades asociadas. Lo cual conlleva a efectos sobre la salud y calidad de vida de la población que sufre el desabastecimiento. En la revisión bibliográfica hecha por Chang y otros (2014), encontraron que las vías de toxicidad en diferentes especies son innumerables, y algunos ejemplos, pueden incluir la ingestión con petróleo, la acumulación de contaminantes en los tejidos, el daño al ADN, la disfunción cardíaca, la mortalidad masiva de huevos y larvas. En peces, la pérdida de flotabilidad y en aves, el aislamiento y la inhalación de vapores.

4.1.3 Análisis espacial

El análisis espacial es un término utilizado para agrupar las transformaciones, manipulaciones y métodos aplicados a datos espaciales, o geográficos, para crear nuevos datos, agregarles valor, revelar patrones y anomalías, mejorar nuestro entendimiento del fenómeno representado y soportar decisiones (Blyth et al., 2007, p. 40; Huisman & de By, 2009, p. 56; Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2015, p. 291). El término hace referencia al uso de datos localizados en el espacio, por lo que, en principio, se supone que su aplicación no es exclusiva a datos geográficos; sin embargo, los referentes bibliográficos citados en esta definición, están enmarcados en aplicaciones de sistemas de información geográfica y de la ciencia de la información geográfica. Estos datos geográficos son representaciones digitales de elementos o fenómenos, localizados en la superficie terrestre, a través de modelos de datos raster y vector. Los métodos, manipulaciones y transformaciones, son un vasto conjunto de algoritmos implementados en una gran diversidad de programas de computador y su uso depende del tipo de dato geográfico a ser analizado. A pesar de que el análisis espacial no está exclusivamente relacionado con el uso de computadores (también se pueden aplicar manipulaciones con datos y métodos análogos), hoy en día, es la forma más popular para procesar datos, gracias a los acelerados avances de las ciencias informáticas.

El término análisis espacial, también es ampliamente utilizado para referirse a la aplicación de métodos estadísticos, matemáticos o computacionales para describir, caracterizar, entender, crear y visualizar el orden, el patrón y la estructura de fenómenos geográficos (Wolf & Murray, 2017). En este contexto, se considera que la localización les confiere a los datos las propiedades de dependencia y heterogeneidad espacial (Anselin, 1992, p. 4; Anselin, Murray, & Rey, 2013), por lo que centra su aplicación a datos representados como patrones de puntos, datos geoestadísticos y datos reticulares (Cressie, 1993). Los datos de elementos discretos localizados en el espacio se representan por patrones de punto, los datos geoestadísticos, corresponden con valores muestreados de una variable continua en el espacio y los datos reticulares son valores asociados a áreas de forma regular o irregular. Este tipo de análisis espacial resalta la importancia de la integración de la localización y los atributos de los datos espaciales, considerando que la localización le aporta información valiosa adicional al dato, sin el componente de ubicación. Los métodos de análisis espacial, en este caso, incluyen el análisis exploratorio de datos espaciales, la regresión espacial, la optimización espacial y la geosimulación (Wolf & Murray, 2017).

4.1.4 Análisis espacial y áreas de alta consecuencia

Los sistemas de tuberías son generosamente utilizados para el transporte de hidrocarburos desde su lugar de explotación, o procesamiento, hasta el lugar de distribución. Las tuberías pasan por zonas con variadas características que pueden afectar tanto su integridad, como las consecuencias asociadas a fallas. Para minimizar los impactos ambientales negativos causados por la ruptura de estos sistemas, se implementan acciones que reduzcan los eventos de derrame y las consecuencias sobre el medio ambiente y la población. Para controlar las consecuencias, es necesario conocer la integridad de la tubería, así, como simular los derrames para identificar las áreas que podrían verse afectadas. Para la realización de estos estudios es recomendable considerar aspectos como la normatividad vigente, las metodologías a ser aplicadas y la disponibilidad de información. Para alcanzar estos objetivos, los operadores de la infraestructura de transporte de hidrocarburos han incluido, dentro de sus sistemas de gestión de ductos, métodos para la priorización de sus tareas de mantenimiento que involucren estos posibles impactos negativos. Para lo cual, se han implementado metodologías, que centradas en la gestión basada en el análisis del riesgo (Bertolini, Bevilacqua, Ciarapica, & Giacchetta, 2009), identifican la probabilidad de falla y la consecuencia ante una pérdida de líquido en la tubería. Finalmente, estas metodologías evalúan el riesgo para la

implementación y priorización de medidas de mitigación y de mantenimiento, con el fin de reducir la consecuencia o la probabilidad de falla.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son una herramienta para la toma de decisiones. Estos integran la información espacial y alfanumérica en un mismo entorno, facilitando el análisis de las relaciones espaciales de elementos del medio ambiente. De ahí, que, en la gestión de obras de infraestructura lineal se estén, desde hace más de una década, implementando sistemas de gestión basados en SIG. La gestión de oleoductos, por ejemplo, debe considerar información relacionada con la integridad de la tubería (Perich, Van Oostendorp, Puente, & Strike, 2003), las áreas de alta consecuencia (AAC), los costos de mantenimiento (Garaci, Sutherland, & Mergelas, 2002), la evaluación de riesgos y los planes de respuesta a emergencias (Palmer, 2004); información que al ser integrada, facilita el análisis en tiempos más cortos y de forma más precisa y confiable durante el ciclo de vida de la infraestructura (Dueñas Vaca, Sepulveda Hurtado, Vera López, Pineda Triana, & Africano Higuera, 2007; Kennedy, 2002). Un importante aporte de los SIG, a la gestión de integridad de oleoductos, está relacionado con la implementación de operaciones de análisis espacial para la identificación y cuantificación objetiva de los tramos de la tubería que pueden afectar un área de alta consecuencia. Esta identificación es insumo para la posterior evaluación del riesgo en la tubería y, en consecuencia, para la elaboración de planes de mantenimiento más efectivos.

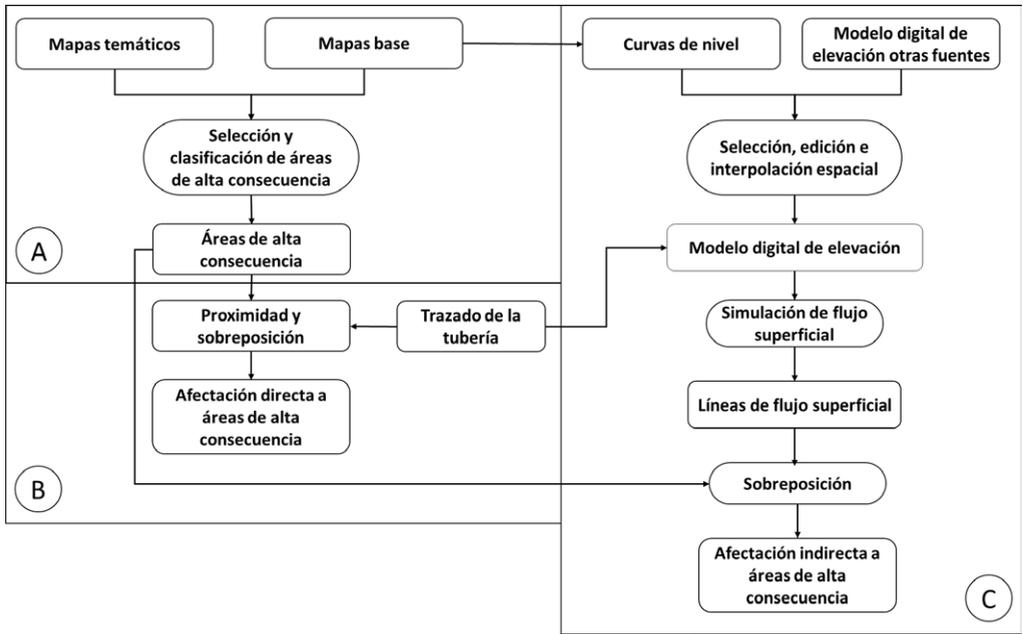
La identificación de tramos o puntos de la tubería, que pueden afectar áreas de alta consecuencia, debe considerar los casos en que el impacto es directo e indirecto con relación a su localización espacial (Odegard & Humber, 2005). En las AAC impactadas directamente, la tubería atraviesa el área y su identificación es sencilla, utilizando operaciones de análisis de sobreposición. En las áreas de alta consecuencia impactadas indirectamente, la tubería se encuentra a una proximidad determinada, y el derrame puede alcanzarla a través de transporte sobre la superficie de la tierra o a través de transporte por canales, por lo que los análisis a realizar suelen ser más complejos (Odegard & Humber, 2005; Paige, Park, & Posner, 2003). En general las herramientas para la modelación de derrames y determinación de impacto ambiental, tienen en cuenta tres fuentes de información principales: el trazado de la tubería, la localización de los elementos ambientalmente sensibles y los datos para la modelación del flujo superficial (Bertolini et al., 2009). Los requerimientos de información para la implementación de análisis exhaustivos, son el modelo digital de elevación, la localización del derrame, las características del derrame, el tipo de flujo, las propiedades del fluido y

las condiciones ambientales (Denby & Humber, 2004; Jia, Feng, Zhou, & Yu, 2009; Meehl, 2004; Odegard & Humber, 2005; Paige et al., 2003). En cuanto a la precisión de los datos espaciales ingresados en los análisis, se ha utilizado cartografía 1:50.000 (Jia et al., 2009), mientras que la información de más fácil adquisición puede variar de 1:100.000 a 1:500.000, situación que debe ser estudiada debido a la incidencia de la escala en la identificación de áreas a ser impactadas ambientalmente (Joao, 2002).

4.2 Metodología para la identificación de tramos

A continuación, se presenta una metodología, basada en análisis espacial con sistemas de información geográfica, para la determinación de tramos de tubería con afectación directa e indirecta, a áreas de alta consecuencia en sistemas de transporte de líquidos peligrosos. Los procesos de análisis implementados tienen en cuenta estudios adelantados internacionalmente y la experiencia que el Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de los Materiales, ha acumulado en los últimos años, prestando servicios de consultorio en esta área. El desarrollo metodológico tuvo en cuenta la norma técnica NTC-5901 (ICONTEC, 2012), el estándar API 1160 (American Petroleum Institute, 2001) y el Decreto 49 CFR 195 de los Estados Unidos. La metodología tiene tres componentes principales; en el primero, se realizó la identificación y selección de áreas de alta consecuencia a partir de información primaria y secundaria (Figura 4-1- A). En el segundo, se identificaron los tramos de la tubería que podrían afectar inmediatamente a las áreas de alta consecuencia (Figura 4-1- B). En el tercero, se identificaron de áreas de alta consecuencia afectadas después de presentarse un transporte del derrame por la superficie del terreno y por la red hídrica (Figura 4-1- C).

Figura 4-1 Metodología para identificar la afectación de derrames.



Fuente: Autores

Adicional a la identificación de tramos de afectación, se desarrolló una herramienta que permite simular el área afectada por el derrame, la cual fue complementaria a las desarrolladas con los componentes B y C de la figura. Teniendo en cuenta que el proceso de simulación del derrame para delimitar el área afectada requirió mayor tiempo de procesamiento en computador, se pretendió que esta herramienta sirviera para analizar con mejor detalle de zonas particulares con alta complejidad en su estructura y dinámica espacial. Sin embargo, la simulación no incluyó todos los fenómenos físicos asociados con el flujo superficial, por lo tanto, su uso se limitó al estudio de identificación de áreas de alta consecuencia.

4.2.1 Áreas de alta consecuencia y fuentes de información

La selección y definición de las áreas de alta consecuencia, se hizo utilizando como base la normatividad de los Estados Unidos y la norma técnica colombiana NTC 5901. Las áreas de alta consecuencia se dividieron en afectación a la población, afectación el medio ambiente y afectación a la infraestructura de transporte. En el primer grupo, se clasificaron las zonas urbanas y otras áreas con concentraciones de población. El segundo grupo, estuvo conformado por

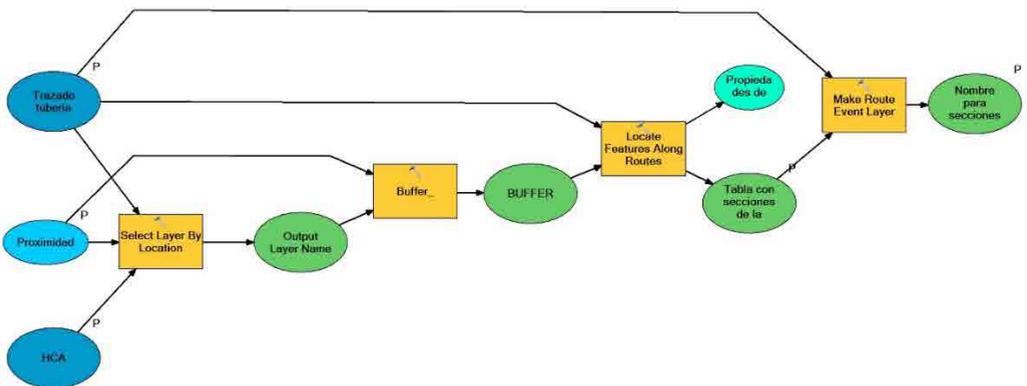
las áreas naturales protegidas, las corrientes hídricas, los puntos de captación de agua y las áreas de importancia ecológica. El tercer grupo, lo conformaron las corrientes hídricas navegables, las carreteras primarias y la red férrea. Las áreas con concentración de población como: iglesias, coliseos, cementerios, establecimientos educativos y hoteles. Las áreas protegidas incluyeron los parques nacionales naturales, las reservas forestales protectoras, los parques naturales regionales, los distritos de manejo integrado, los distritos de conservación de suelos y las áreas de recreación (Decreto 2372 de 2010). En las áreas de importancia ecológica se sobrepusieron las áreas de importancia para la conservación de aves, las áreas con bosque tropical seco, los complejos de páramos y los humedales Ramsar. Los cuerpos de agua navegables estuvieron conformados por todos aquellos ríos y cuerpos de agua en los que hay alguna posibilidad de transporte de forma permanente o en temporadas del año (ARCADIS Nederland BV & JESYCA S.A.S., 2015). Las carreteras nacionales incluyeron la red de carreteras que comunican a las capitales de los departamentos del país, y por las cuales se transportan los mayores volúmenes de carga. Las vías férreas, aunque son casi exclusivamente utilizadas para el transporte de carbón (Márquez, 2017), siguen siendo de gran importancia económica para el país.

La adquisición de datos espaciales de las áreas de alta consecuencia es relativamente sencilla hoy en día. El constante desarrollo de infraestructuras de datos espaciales facilita la distribución de datos, espaciales y no espaciales a través de servicios web, haciéndola asequible a cualquier usuario con acceso a internet. Las fuentes de datos para las áreas de alta consecuencia, fueron principalmente las entidades del estado que publican la información espacial a través de portales en internet. Los datos sobre distribución de la población se extrajeron directamente de la cartografía base, producida por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC y fueron descargados de la página <https://geoportal.igac.gov.co/>. Los datos del segundo grupo, el componente ambiental, fueron descargados del portal del Sistema de información ambiental de Colombia, <http://www.siac.gov.co/>. Las carreteras, vías férreas y corrientes hídricas navegables se extrajeron de la cartografía base del IGAC, siendo necesaria la clasificación de las carreteras utilizando los tipos establecidos por el Instituto Nacional de Vías (Invias, 2008). En cuanto a los modelos digitales de elevación requeridos para simular el flujo superficial, se obtuvieron mediante interpolación espacial de curvas de nivel de la cartografía base del IGAC y de descargas del sitio de *Alaska Satellite Facility* (ASF DAAC, 2015), de productos obtenidos a partir de imágenes de la misión ALOS PALSAR con tamaño de pixel 12.5 metros.

4.2.2 Identificación de tramos con afectación directa a AAC

Para la identificación de los tramos de tubería relacionados con impactos directos a AAC, se implementó un modelo basado en los desarrollos (Meehl, 2004; Gamarra, 2011; Jia, Feng, Zhou, & Yu, 2009), que utilizó herramientas de referencia lineal (Figura 2). El ducto se representó mediante modelos de datos vector con geometría línea, la cual estuvo compuesta por nodos y segmentos de líneas entre estos. Cada uno de los nodos estaba almacenado a partir de su localización con coordenadas en los ejes cartesianos X, Y y Z. Adicionalmente, se pudo complementar una característica anexa para cada nodo, la cual correspondió a la distancia medida desde el punto inicial de la tubería. La utilidad de esta característica adicional, radicó en que en la práctica la ubicación sobre elementos lineales se realizó con base en la medición de su longitud. Para el caso de la tubería, por ejemplo, una válvula se puede ubicar en la abscisa 45+500, es decir, a 45500 metros desde su inicio, y de igual forma, cada tramo con afectación a áreas de alta consecuencia, se puede expresar mediante su ubicación mediante referencia lineal.

Figura 4-2 Metodología para identificar la afectación inmediata de derrames.



Fuente: Autores

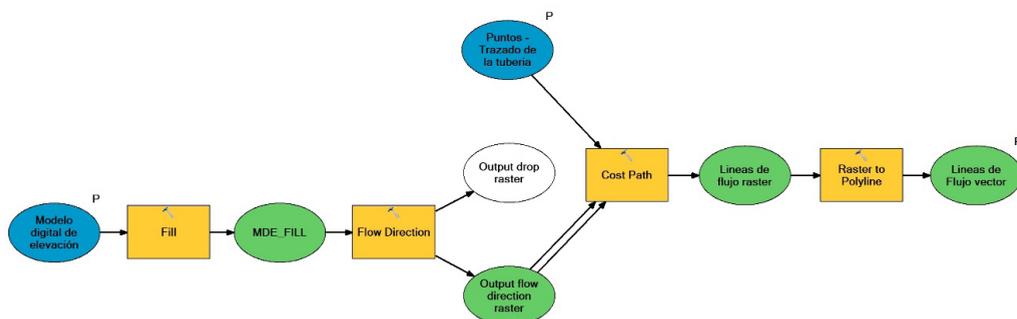
En los modelos generados con la herramienta *Model Builder* de ArcMap, los datos de entrada se representan de color azul, las herramientas de color amarillo y los datos intermedios y finales de color verde. Los datos de entrada, fueron el área de alta consecuencia (representada en geometría punto, línea o polígono), el trazado de la tubería (con el atributo adicional para poder realizar la referencia lineal) y la proximidad de análisis. Los valores de proximidad utilizados fueron de 265 metros para la afectación a población, 200 metros para

áreas ambientalmente sensibles, 100 metros corrientes hídricas navegables y 50 metros para carreteras y vías férreas. En el primer paso, se seleccionaron los elementos que pueden ser afectados directamente en la capa correspondiente. Esta selección se realizó para reducir el tiempo de ejecución de la herramienta, ya que los procesos siguientes solo se realizaban sobre los elementos seleccionados. La consecutiva operación de análisis, fue la delimitación de un área de proximidad alrededor del área de alta consecuencia. En este primer paso, se obtuvo un polígono que representó el AAC y su área de afectación inmediata. Partiendo del anterior resultado y del trazado del ducto calibrado, se implementó una sobreposición que permitió determinar las distancias (a lo largo del trazado) del punto inicial y final del tramo, con afectación inmediata a áreas de alta consecuencia. Este resultado se almacenó en una tabla que puede ser visualizada espacialmente mediante segmentación dinámica.

4.2.3 Identificación de tramos con afectación después de transporte a AAC.

Para la determinación de tramos de tubería con afectación por transporte del derrame a áreas de alta consecuencia, se requirió de un modelo digital de elevación para modelar el flujo superficial desde cualquier punto en el trazado de la tubería. Los datos de entrada al proceso de análisis, fueron, el modelo digital de elevación y los puntos equidistantes sobre el trazado de la tubería. El modelo digital de elevación utilizado, tiene una resolución espacial de 30 metros y fue obtenido mediante interpolación espacial, por medio del uso de la herramienta *Topo To Raster* de ArcGIS. La obtención de puntos equidistantes se realizó utilizando las herramientas de referencia lineal, creando una tabla en la que se ingresaron las distancias equidistantes sobre la ruta en cada fila, cada una de las filas de la tabla, fue representada espacialmente de acuerdo con valor de distancia almacenado. Esta representación era temporal por lo que, finalmente, se exportaron los puntos a una nueva capa.

Figura 4-3 Proceso de análisis espacial para representar líneas de flujo superficial.



Fuente: Autores

El modelo de la Figura 4-4., utilizó herramientas de análisis espacial para datos raster, y tuvo por objetivo, representar las líneas de flujo utilizando como criterio para su identificación la máxima pendiente del terreno. Tomando el MDE, se calculó la capa de dirección flujo, en la cual se representaron la dirección del flujo para una ventana móvil de 3x3 píxeles desde el píxel central hacia el píxel con mayor diferencia de elevación. En el raster de dirección de flujo, se almacenaron los valores de 1 para dirección este, 2 para dirección sur este, 4 para dirección sur, 8 para dirección sur oeste, 16 para dirección oeste, 32 para dirección noroeste, 64 para dirección norte y 128 para dirección noreste. Antes de calcular la dirección de flujo se debía tener un modelo digital de elevación sin sumideros, por lo que se aplicó el llenado de estos sectores con la herramienta *Fill*. Para la modelación del flujo superficial, se utilizaron herramientas de ruta más corta, que permitieron representar el camino predominante que seguiría un eventual derrame. El último paso del modelo, fue la transformación de las líneas de flujo de modelo de datos raster a vector.

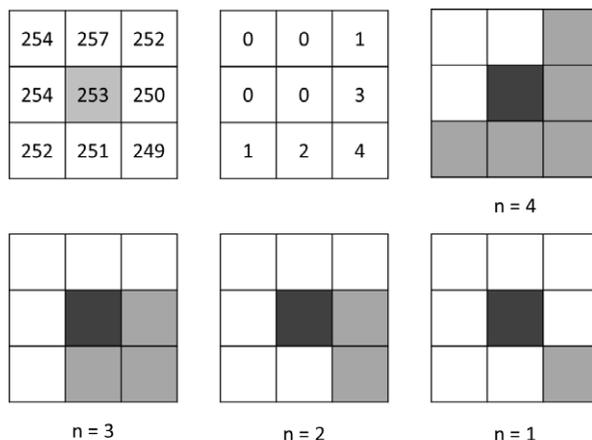
4.2.4 Representación del área afectada por un derrame

En los procesos anteriores, el objetivo fue identificar tramos con afectación directa e indirecta. En este apartado se muestra un ejemplo de cómo se logró una representación más detallada del fenómeno de derrame. Para esto, se hizo uso del modelo digital de elevación, para distribuir el derrame desde un píxel de origen hacia los píxeles de menor elevación. Un ejemplo de este tipo de representación de derrames, se puede encontrar en el trabajo publicado por Daza-Leguizamón y otros (Daza-Leguizamón, Vera-López, & Riaño-Cano, 2016). En ese estudio se tuvieron como datos de entrada, en el proceso de análisis espacial, el origen del derrame, el volumen del derrame y los

parámetros de la ecuación de Manning. En la primera iteración, el volumen se distribuyó, proporcionalmente a la diferencia de elevación, hacia las celdas vecinas de menor altura en una ventana de vecindad de 3x3. Este enfoque tuvo como principal limitante, que su aplicación con modelos digitales de elevación de media o baja resolución espacial, suele sobreestimar el área afectada, además de que por la pérdida de detalles del terreno el flujo no siguió la dirección correcta.

La propuesta presentada aquí, tiene el mismo principio utilizado en el estudio descrito, con la diferencia de que no se utilizó un volumen inicial de derrame ni la ecuación de Manning. El objetivo del proceso de análisis espacial fue identificar los píxeles que podrían ser afectados por el derrame. En esta propuesta, inicialmente se identificaron las diferencias de elevación en los píxeles vecinos, luego, se listan estas diferencias de menor a mayor, teniendo un máximo de 8 valores, para el caso en el que los píxeles vecinos tuvieran valores diferentes y fueran de menor elevación del píxel central, y un mínimo de 1. El número de píxeles afectados en la primera iteración, estuvo determinado por el parámetro n , el cual es el número de diferencias de elevación a considerar. El funcionamiento del algoritmo implementado como un *script* de Python para ArcGIS Desktop, se representa en la Figura 4-4. Para el caso de un $n = 4$ se consideraron las cuatro diferencias de elevación (1, 2, 3 y 4) con afectación a cinco píxeles, en el caso de $n = 3$, se tomaron tres diferencias de elevación con afectación a tres píxeles y de igual forma, para los valores de n iguales a 2 y 1, como se puede ver en la figura. El proceso descrito muestra la primera iteración, en las siguientes iteraciones los píxeles centrales fueron aquellos que se marcaron como afectados en la iteración anterior.

Figura 4-4 Distribución del derrame en una vecindad de 3x3 pixeles.



Fuente: Autores

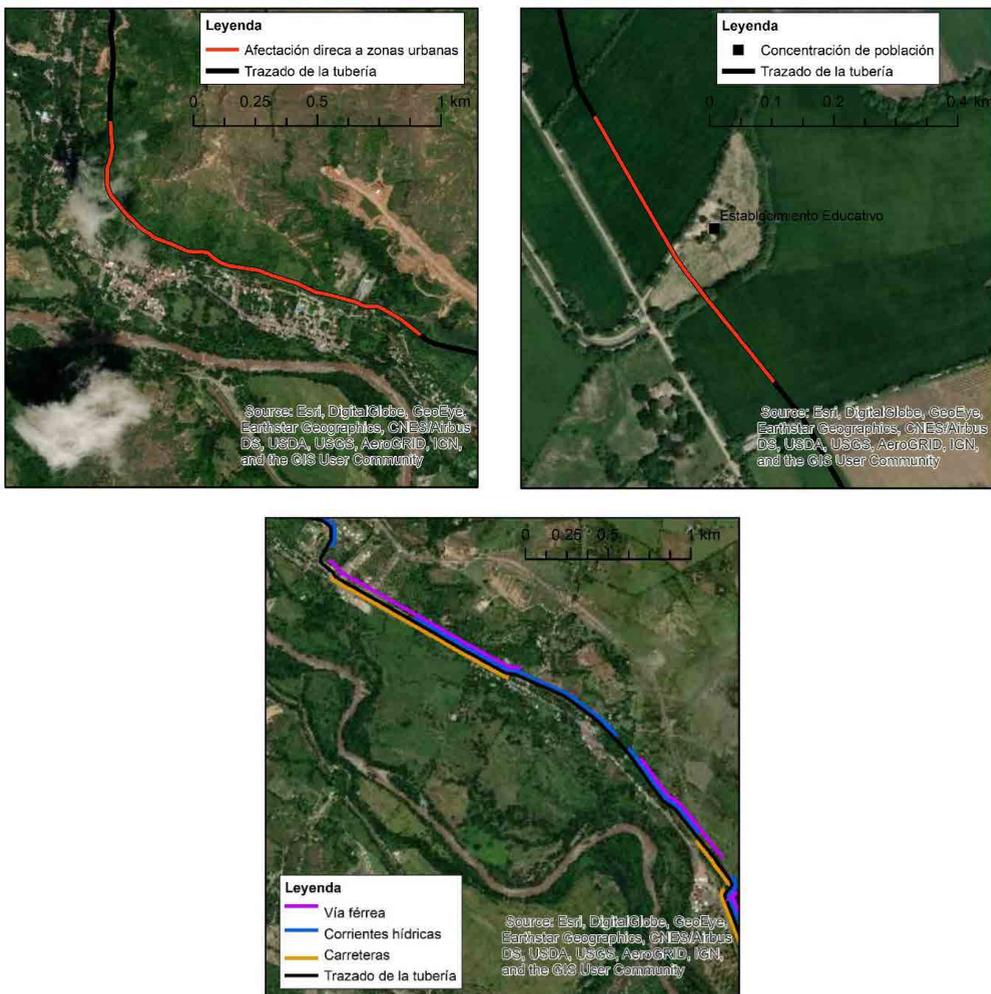
Este enfoque permitió controlar el área afectada, dependiendo de la resolución espacial del modelo digital de elevación. Se supuso que, para modelos de baja resolución espacial, se utilizaría un valor de n pequeño, para resoluciones espaciales medias valores medios y para modelos de alta resolución espacial valores altos. Es importante notar, que el caso de $n = 1$ el resultado será diferente al obtenido en la Figura 4-3., porque se tiene la posibilidad de afectar a más de un píxel; más adelante se presenta un ejemplo comparativo con diferentes valores de n . También es claro, que, al introducir un valor de n constante, el número de pixeles afectados en las siguientes iteraciones fue diferente al número de pixeles afectados en la primera iteración.

4.3 Aplicación de la metodología

La implementación de los procesos de análisis propuestos, permitió un análisis más apropiado de la interacción de la tubería con el medio. Para la identificación de tramos con afectación directa e indirecta, se eligió un tramo de aproximadamente 100 kilómetros de un poliducto ubicado en la vertiente occidental del del Río Magdalena. El área de afectación frente a eventos de derrames, se encuentra ubicada entre el trazado de la tubería y el mencionado río. En esta franja, se encontraron quince zonas urbanas, alrededor de 400 puntos con concentraciones de población, zonas de bosque seco, cuatro captaciones de agua superficial, una densa red de corrientes hídricas que vierten al Río Magdalena, carreteras nacionales y parte de la red férrea nacional. El trazado de la tubería fue obtenido del portal en internet de Sistema de Información Ambiental de Colombia.

A continuación, se muestran algunos ejemplos ilustrativos de los resultados de la aplicación de la metodología. Los resultados fueron presentados por medio de mapas que representan el trazado de la tubería y los tramos con afectación a cada uno de los elementos, permitiendo la identificación visual de los sectores con mayor posibilidad de ser afectados por el derrame. Los resultados también fueron presentados en forma de tablas, en las cuales se resumen los tramos, indicando su abscisa de inicio y finalización. Los datos tabulares podrían ser exportados para ser utilizados en otros softwares para la evaluación del riesgo dentro de los programas de gestión de integridad.

Figura 4-5 Ejemplo afectación directa a una zona poblada.



Fuente: Autores

En la Figura 4-5., se puede ver un ejemplo de un tramo con posible afectación a una zona poblada y a un establecimiento educativo. Las líneas rojas representan la longitud de la tubería que se encuentra a 265 metros o menos de cada elemento. La longitud con afectación a la zona urbana es de 1.7 kilómetros y 518 metros, al establecimiento educativo. De forma similar, se pudieron representar los resultados para las otras áreas de alta consecuencia. En este primer resultado no se tuvieron en cuenta las características del relieve, por lo que se asumió que la afectación directa se presentaría de forma independiente a la dirección que tome el fluido una vez liberado. En esta misma figura se puede ver un sector del ducto que presenta afectación a más de un área de alta consecuencia. El análisis visual es un gran aporte para la toma de decisiones, aunque estos resultados podrían ser sintetizados para identificar los tramos con afectación a varias áreas sensibles.

Un ejemplo de los resultados en forma tabular, se puede ver en la siguiente figura, donde se presentan los tramos con afectación directa a áreas de bosque seco. En total, se encontraron 14 tramos que suman aproximadamente 12 kilómetros de tubería, con posible afectación a esta área de alta consecuencia. El tramo de menor longitud tuvo 484.5 metros, el de mayor longitud 1846.4 metros y el promedio de longitud para los tramos fue de 861.5 metros.

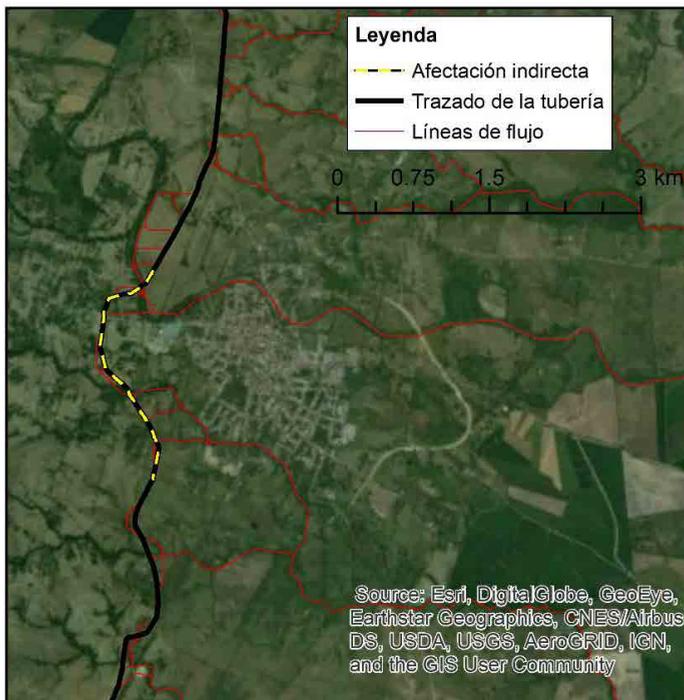
Figura 4-6 Tabla con tramos de afectación a bosque seco.

OBJECTID *	RID	FMEAS	TMEAS	Longitud
1	1	1403.0837	2597.5485	1194.4648
2	1	2986.7855	4498.7814	1511.9959
3	1	5943.7117	7790.1435	1846.4318
4	1	7997.7826	9075.5267	1077.7441
5	1	9319.8052	9925.8379	606.0327
6	1	10566.9117	11221.8233	654.9116
7	1	11801.4557	12368.6837	567.228
8	1	14172.2377	14722.7439	550.5062
9	1	16047.6803	16533.6946	486.0143
10	1	16542.3829	17026.8695	484.4866
11	1	18881.9405	19503.9028	621.9623
12	1	20133.6408	21415.6945	1282.0537
13	1	37684.9653	38361.9019	676.9366
14	1	91368.7839	91869.3756	500.5917

Fuente: Autores

La implementación del proceso para identificar la afectación indirecta a áreas de alta consecuencia, se inició con la conversión del trazado de la tubería, en geometría línea, a puntos equidistantes. Para este caso, se eligió una distancia de 200 metros entre puntos consecutivos. En la Figura 4-7., se muestra un ejemplo de un tramo con afectación indirecta a una zona urbana. El tramo identificado tenía una longitud de 2540 metros, desde los cuales inician las líneas de flujo, que convergieron a dos corrientes hídricas, que pasan a lado y lado de la zona urbana. Las líneas de flujo representadas, dieron un indicativo de la ruta principal seguida por el derrame, por lo tanto, no cuantificaron el área total afectada. Además, la propuesta presentada aquí, puede ser mejorada incluyendo simulaciones que consideren el tiempo de avance del derrame, el volumen infiltrado y el volumen evaporado. Para los propósitos de identificación de tramos con afectación el proceso de la Figura 4-3 se considera aceptable y eficiente.

Figura 4-7 Ejemplo afectación indirecta a una zona poblada.

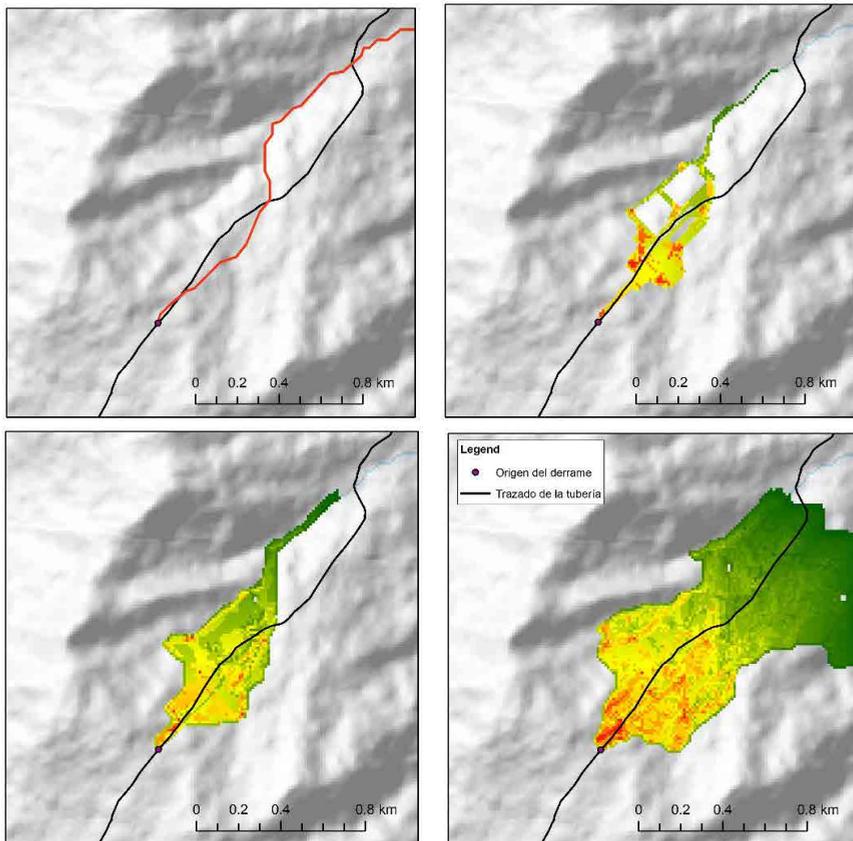


Fuente: Autores

Finalmente, la implementación del análisis espacial para simular el área afectada por el derrame, se aplicó para un modelo digital de elevación de 12.5

metros de resolución espacial. En la Figura 4-8.,Figura 4-8 están los resultados de la línea de flujo (superior izquierda), de la simulación del derrame con $n=1$ (superior derecha), con $n=2$ (inferior izquierda) y con $n=3$ (inferior derecha). Se aprecia la diferencia en el área total afectada en cada caso; en el primero, la línea de flujo, con una afectación mínima, fue insuficiente para estimar el área afectada; en el segundo; se logró un mayor ancho en la mancha del derrame y las posibles rutas que podría seguir; en el tercero, el área de la macha fue mucho mayor y para la resolución espacial, podría pensarse que está sobre estimada; finalmente, en el cuarto caso, la zona afectada muestra una magnitud muy superior a lo que posiblemente se pueda presentar en la realidad. A pesar de que no se tiene un derrame real para poder validar los resultados obtenidos, se podría utilizar la herramienta para analizar diferentes situaciones y poder tomar decisiones con base en los escenarios disponibles.

Figura 4-8 Ejemplo de simulación del área afectada por un derrame.



Fuente: Autores

4.4 Conclusiones y comentarios

La identificación de tramos de ductos de transporte de líquidos peligrosos, asociados a zonas de alta vulnerabilidad ambiental, realizada mediante la implementación de operaciones de análisis espacial en software de SIG, resultó ser una herramienta muy valiosa para aportar información que facilite la adecuada valoración del riesgo en el manejo de integridad de ductos. Los resultados obtenidos tienen como ventaja que involucran todas las variables de interés del medio ambiente. Además, la creación de herramientas ya sea modelos con *Model Builder* o mediante *scripts*, permite agilizar los procesos de identificación de áreas de alta consecuencia y tramos de la tubería que las puedan afectar.

Los modelos para la simulación de derrames y para la identificación de tramos con afectación (directa e indirecta), a áreas de alta consecuencia son satisfactorios. A pesar de la necesidad de validación de la herramienta basada en sistemas de información geográfica, si se puede asegurar la adquisición de datos de suficiente calidad y nivel de detalle, los resultados tendrán validez suficiente para afrontar un estudio de análisis de riesgo como parte de la gestión de integridad de ductos de transporte de líquidos peligrosos, y cumpliendo con los requerimientos de normas como el API 1160 y la NTC 5901.

Los modelos propuestos dependieron en gran medida en la experiencia de los autores y de los trabajos realizados al interior del Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de los Materiales. Como se ha mostrado en este capítulo, la solución a problemáticas espaciales con el uso de los SIG, es un proceso creativo, ya que este mismo problema puede tener diferentes enfoques con variaciones en los tipos de modelos de análisis propuestos y con diferentes niveles de complejidad de estos.

La información obtenida se puede interpretar directamente en el software de sistemas de información geográfica, o pueden ser exportados a otros programas diseñados para la gestión de integridad de ductos. Alternativamente, los resultados del análisis de probabilidad de falla del ducto pueden ser importados para realizar el análisis del riesgo directamente en el software de SIG, y presentar los resultados espacialmente, lo que permite la interpretación de dichos resultados de forma integrada con la modelación medio natural en el que se enmarca el ducto.

Los procesos de análisis presentados en este documento son susceptibles de mejora, ya que se pueden incluir simulaciones más exhaustivas que

involucren modelos físicos para involucrar procesos como la evaporación, la infiltración y la velocidad del flujo. En etapas posteriores de desarrollo, se pueden aplicar métodos como diferencias finitas o autómatas celulares para aproximar soluciones de las ecuaciones de flujo de aguas someras. Sin dejar de lado el desarrollo experimental para determinar parámetros como la conductividad hidráulica del suelo, la rugosidad de la superficie del suelo y la tasa de evaporación de los líquidos transportados.

El análisis espacial y el modelamiento con software SIG, permite mejorar la toma de decisiones para la gestión de integridad de ductos. Como se mostró en este capítulo, las herramientas de análisis facilitan las tareas de identificación con tramos de afectación a áreas de alta consecuencia y, por lo tanto, mejorar los tiempos de análisis para ductos de grandes longitudes. La automatización de los procesos de análisis y modelación resultan convenientes para abordar este tipo de problemáticas al permitir la estandarización de procesos y la comparación de resultados entre diferentes sistemas de ductos.

