



Vigilada Mineducación

IDENTIFICACIÓN DE POSIBLES AFECTACIONES DE ECOSISTEMAS EN COLOMBIA OCASIONADAS POR
CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS DERIVADOS DE ATENTADOS A LA INFRAESTRUCTURA PETROLERA

Identification of possible effects on ecosystems in Colombia caused by atmospheric pollutants derived from
attacks on the oil infrastructure

DANIELA ARENAS MANJARRÉS

Tipo de trabajo tesis

Asesor
Nicolás Pinel, PhD

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
BIOLOGÍA

Identificación de posibles afectaciones de ecosistemas en Colombia ocasionadas por contaminantes atmosféricos derivados de atentados a la infraestructura petrolera

Daniela Arenas Manjarrés

Asesor: Nicolás Pinel, PhD

Co-asesor: Sandra Enríquez Delgado

mayo de 2022

1. Introducción

Hace cientos de millones de años, la fuerte actividad volcánica, arrojó al planeta compuestos volátiles de dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno (N_2), vapor de agua, monóxido de carbono (CO) y gases de azufre (R. Pérez, 2006). Estos compuestos junto con el amoníaco, metano (CH_4) y agua, provenientes del bombardeo de asteroides, fueron formando gradualmente la atmósfera primitiva (Hartogh et al., 2011), que con ayuda de la gravedad se mantuvieron retenidos formando una capa gaseosa que recubrió la tierra (R. Pérez, 2006).

Durante los últimos cientos de años, la actividad volcánica ha descendido, disminuyendo la cantidad de gases volátiles emitidos que hacen parte de la atmósfera actual (Sánchez-Santillán et al., 2014). Algunas teorías indican que en los últimos 800.000 años, los niveles de dióxido de carbono oscilaron entre 130 y 320 partículas por millón (ppm), y que a lo largo de los últimos años se ha experimentado cambios en las concentraciones de la atmósfera (Olivo & Soto-Olivo, 2010). La reducción del ozono estratosférico (O_3), el aumento de la concentración de CO_2 y CH_4 , son unos de las principales causas que ha reducido la eficiencia de enfriamiento de la Tierra (Mooney, 2008; Olivo & Soto-Olivo, 2010).

El ascenso de la temperatura del aire está ocasionando en el planeta la reducción de la cubierta de nieve, el derretimiento glaciar, modificaciones en los patrones hídricos, la disminución de la biodiversidad, la alteración de ecosistemas terrestres y acuáticos y afectaciones a la salud (Parry et al., 2007). Las concentraciones promedio CH_4 en la atmósfera para el 2019 alcanzaron 1875 partes por billón (ppbv), 75 % más de los niveles preindustriales (Change, 2014).

1.1. Gases producto de la combustión del crudo y sus implicaciones sobre la cobertura vegetal y cuerpos de agua

La atmósfera es una capa gaseosa compuesta principalmente por nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2), además de pequeñas cantidades de otros gases y aerosoles como óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono estratosférico (O_3), vapor de agua (H_2O), y metano (CH_4) (Camilloni & Vera, 2007; M. E. F. Pérez & Arias, 2011). Estos gases y aerosoles son fundamentales para el mantenimiento de la vida, pues protegen a nuestros ecosistemas y especies de la radiación ultravioleta (UV), y aumentan la temperatura de la superficie terrestre (Camilloni & Vera, 2007).

Aerosoles como los SO_x y NO_x son emitidos naturalmente por volcanes, tormentas de polvo y fuegos en bosques y pastos, mientras que la descomposición de materia orgánica, filtración de gases del subsuelo o la digestión, son fuentes de emisión de CH_4 (Antonio, 2010). Actividades humanas, como la quema de combustible fósil, han aumentado las concentraciones de gases y aerosoles en la atmósfera, a ritmos tales que están conduciendo a importantes impactos en los ecosistemas (Antonio, 2010; M. E. F. Pérez & Arias, 2011).

El impacto de los gases producto de la combustión del crudo (NO_2 , SO_2 y CH_4) a los ecosistemas, dependen de variables de exposición como la concentración del gas, duración, y sensibilidad a la especie (Krupa & Manning, 1988). Propiedades intrínsecas del ecosistema como la capacidad para neutralizar ácidos, son importantes para resistir la formación de O_3 troposférico a partir del NO_2 (Bünger et al., 2012). El O_3 troposférico a diferencia del O_3 estratosférico, acidifica el suelo y reacciona con los elementos celulares de las plantas, provocando pérdida de la capacidad fotosintética, reducción del crecimiento y aumento de la sensibilidad al estrés (Bünger et al., 2012; Krupa & Manning, 1988).

Para organismos sensibles al nitrógeno como lo son las algas, líquenes y briófitos, concentraciones elevadas del gas, aumentan la cantidad de nutrientes disponibles en el medio agotando las concentraciones de oxígeno (Erisman et al., 2013; Krupa & Manning, 1988). La hipoxia y anoxia en las aguas superficiales y el suelo, aumenta las tasa de desnitrificación y liberación de N_2O a la atmósfera, un poderoso gas de efecto invernadero (Erisman et al., 2013).

El incremento de las concentraciones de NO_2 puede condicionar las dinámicas atmosféricas, ya que en la troposfera junto con el SO_2 , forman precipitados de lluvias ácidas, alcanzando incluso zonas urbanas y rurales lejanas al área de exposición (Bonilla Cárdenas & Lemus Flores, 2012; García et al., 2006).

En el 2006, García et al., publicó un estudio sobre la influencia del NO_2 en la formación de lluvias ácidas sobre una de las ciudades más contaminadas de México, Guadalajara. Durante un periodo de 3 años de observación y análisis, se concluyó que la variación en las concentraciones del gas dentro de la ciudad, estaban ligadas a la dirección y velocidad del viento a lo largo del año, pues favorecen el transporte atmosférico a larga distancia, y la formación de precipitaciones ácidas dentro de la ciudad.

Durante la última década, el medio ambiente ha sufrido las consecuencias de varios y notables incidentes a estructuras petroleras (Fernández-Carrera et al., 2016). Un claro ejemplo es la explosión ocasionado el 20 de abril del 2010 en la plataforma petrolera Deepwater Horizon, Golfo de México (Beyer et al., 2016; Fernández-Carrera et al., 2016). El derrame ha traído graves consecuencias no solo para los cuerpos de agua y fauna, como la pérdida de zonas fotosíntesis de corales y praderas marinas, debido a la obstrucción de la entrada de luz que genera la película de hidrocarburos, si no también para la atmósfera (Beyer et al., 2016; Miranda & Restrepo, 2005; White et al., 2012).

La gran explosión expulsó aproximadamente 838 kilotoneladas (kt) de crudo en sus aguas y 363 kt de CH₄ al aire (Fernández-Carrera et al., 2016). El gas liberado representó una gran carga atmosférica la cual favoreció la formación de grandes cantidades de aerosol orgánico, estos se desplazaron a favor del viento, empobreciendo la calidad del aire (de Gouw et al., 2011). El atentado ocurrido el 2 de marzo de 2018, en el pozo Lisama 158, en Chucurí, departamento de Santander, Colombia, también es otro ejemplo del impacto sobre los cuerpos de agua y fauna involucrada.

502 barriles de petróleo (87.443 litros) fueron derramados sobre la cobertura vegetal, afectando directamente las quebradas de Caño Muerto y la Lizama, llegando al río Sogamoso el cual desemboca en el Magdalena, uno de los ríos más importantes del país (Arévalo & Rodríguez, 2018). Esto originó que 16.000 cabezas de ganado perdieran praderas para alimentarse, muerte de comunidades de peces y contaminación de suministros de agua dulce (Arévalo & Rodríguez, 2018)

El crudo que se derrama sobre la cobertura vegetal contamina el suelo con compuestos altamente tóxicos tales como, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), hidrocarburos totales de petróleo (TPH) y bencenos cancerígenos (Zuzolo et al., 2021). La contaminación por hidrocarburos genera sobre la vegetación inhibición en la germinación de semillas, disminución del crecimiento y la muerte vegetal (Martínez, 2001).

1.2. Hidrocarburos en el contexto colombiano

Colombia posee una ubicación en el área tropical que hace que la atmósfera sobre el territorio tenga algunas particularidades. La distribución del Ozono estratosférico permite una mayor incidencia de los rayos UV a comparación de otras latitudes y en la zona tropical, la troposfera es más alta, alcanzando aproximadamente 16km de altitud (Forero & Daniel, 2019).

La actividad humana está produciendo cambios en la composición de la atmósfera del país, según las investigaciones en el 2008 por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), la contaminación atmosférica en Colombia es uno de los problemas ambientales de mayor preocupación para la población, pues estos afectan posteriormente el agua y el suelo (de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2008).

En algunas ciudades principales como Bogotá, el NO₂ por combustión de petróleo es la mayor fuente de contaminación del aire (Forero & Daniel, 2019). Estas emisiones producto de la quema

de combustible fósil inyectan a la atmósfera grandes cantidades de NO₂ y CH₄ (Suaréz, 2019). El petróleo que abastece las estaciones de gasolina en el país proviene de la empresa semi-privada Ecopetrol y sus centros de extracción y refinación (Mincomercio, 2021; Suaréz, 2019).

Ecopetrol es la principal compañía encargada de administrar y manejar los campos petroleros, oleoductos, refinerías y estaciones de abasto que se dedican a la exploración, explotación, transporte y refinación de petróleo y derivados (Vaca, 2001; Vita, 2021). En el 2020, la empresa colombiana representó el 60 % de la producción total de petróleo en el país, seguida de compañías internacionales asentadas en el territorio con porcentajes menores al 10 % como: Geopark con el 7.67 % y Oxy con el 6.84 % (Vita, 2021).

La industria de hidrocarburos se ha convertido en un importante motor de la economía Colombiana, representando para el 2019 el 5 % del PIB nacional (Hernández et al., 2016; Mincomercio, 2021). Los departamentos que contribuyen aproximadamente al 75 % de la actividad petrolera del país son el Meta, Casanare, Nariño y Santander (Mincomercio, 2021; Suaréz, 2019).

La amplia participación de las petroleras en el PIB nacional las convierte en uno de los principales objeto de ataque por grupos armados en sus actos de protesta contra el Estado (Mincomercio, 2021). Los ataques a los oleoductos han generado grandes problemas sobre los ecosistemas del país, conduciendo a la deforestación de extensas regiones de bosques y selvas tropicales como plan de emergencia, lo que trae consigo la pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos (Cerquera, 2016).

Las 63303 especies de fauna y flora registradas en Colombia están distribuidas a lo largo de 7 ecosistemas principales: (1) Bosques andinos. (2) Bosques de galería y riparios. (3) Cuerpos de agua. (4) ecosistemas secos. (5) Paramos. (6) Sabanas y afloramientos rocosos y (7) Selvas húmedas (Figura 1) (Álvarez et al., 2021).

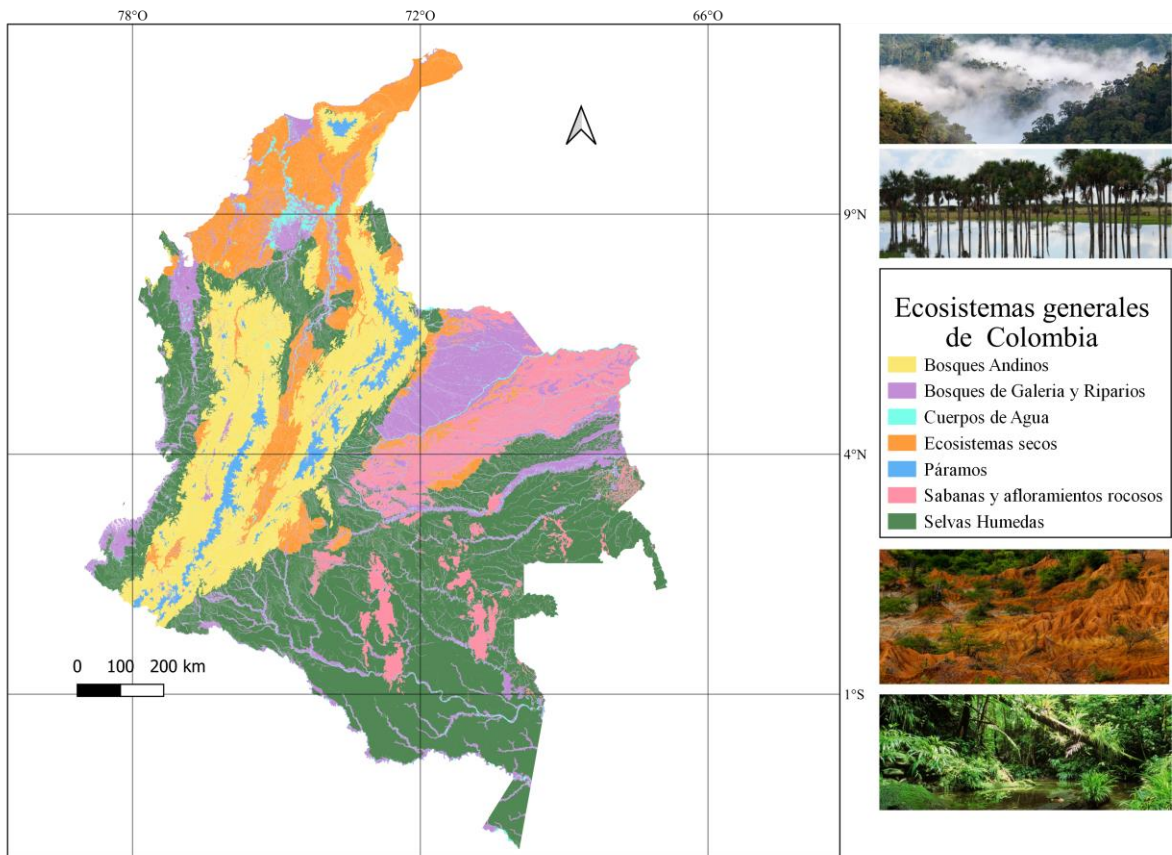


Figura 1: ecosistemas de Colombia: Colombia se compone de 7 ecosistemas generales que recubren todo el país, cada uno de ellos está representado por los colores descritos en la leyenda (Álvarez et al., 2021). Capa obtenida del Instituto Alexander Von Humboldt, con modificación personal.

Durante las temporadas de lluvias, generalmente entre octubre y marzo, los residuos volátiles generados durante la explosión, son exportados a los ecosistemas más cercanos causando un daño casi irreparable en los mismos (Arias Rincon, 2018). En zonas cercanas a una explosión de crudo se producen lluvias ácidas con altos contenidos de hidrocarburos que al llegar al suelo contaminan la cobertura vegetal y las fuentes de agua (Reyes & Ajamil, 2005).

Entre los principales impactos a los ecosistemas se encuentran cambios en la población de aves y murciélagos; cambios en el patrón de distribución; alteración en la estructura de las poblaciones de microorganismos como levaduras; y la disminución de las poblaciones de insectos, ya que se sienten atraídos por la luminosidad (onda infrarroja) generada por la quema de gas, y mueren incinerados por el calor (Reyes & Ajamil, 2005).

La migración de insectos y aves, afecta directamente la fauna que depende de las especies po-

linizadoras para reproducirse (Rangel-Ch et al., 1995; Reyes & Ajamil, 2005). Se ha registrado que los Parques Nacionales Naturales de los Picachos, El Tuparro y Tinigua, las dinámicas atmosféricas y poblacionales de las especies de fauna se ven afectadas por la exposición a CH₄ y NO₂ proveniente de las explosiones (Rangel-Ch et al., 1995).

Las emisiones de CH₄ y NO₂ podrían transportarse a favor del viento y alcanzar elevadas alturas, afectado incluso el Complejo de Paramos de los Santanderes, ubicado en el Noreste de la cordillera de los Andes, donde incluye localidades de paramos como el Mogotoroco, Anagá, Juradó, Mantilla, Berlín, Tona y Chitagá, lugares importantes para la generación de recursos hídricos (Capacho Navia, 2016; Latorre, 2015).

Algunas redes hídricas como el río Ele, río Lipa, río Cravo Norte, río Arauca y el complejo de humedales de Guarajas, ubicado en el corredor Puerto Vega-Teteyé, se ven afectados por el aumento de las contracciones de CH₄ y NO₂, pues exposiciones prolongadas de los gases provocan sobre los peces rupturas de los tejidos de los ojos y aletas, alargamiento de la vejiga natatoria y cambios en el sistema circulatorio (Bravo, 2007; Zuñiga et al., 2018). Son entonces los ecosistemas de páramos, bosques andinos, selvas tropicales, humedales y bosques secos asociados a los departamentos de Nariño, Putumayo, Arauca y Santander, los que se han identificado que se encuentran bajo mayor influencia de las zonas petrolíferas del país (Bayona, 2017; Zuñiga et al., 2018).

1.3. Instrumentos satélites para el monitoreo de gases

Dentro del país se ha implementado instrumentos satélites para el monitoreo de gases que contribuyen a la calidad del aire como el NO₂, SO₂ y O₃ y que pueden tener repercusiones en zonas lejanas (Forero & Daniel, 2019). Las concentraciones medidas por sus sensores son más precisas y abarcan una mayor cobertura espacial con mejor resolución (Guanter et al., 2015).

TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) es un instrumento de monitoreo troposférico a bordo del satélite Copernicus Sentinel-5-precursor (Veefkind et al., 2012). TROPOMI posee un espectrómetro de rejilla de escoba que combina una amplia franja de observación (2600 km), con alta resolución espacial (7 km × 7 km) y cobertura mundial diaria (Veefkind et al., 2012). La luz solar reflejada por la superficie y la atmósfera de la Tierra son captadas por el puerto de radiación de TROPOMI, permitiendo estimar las concentraciones de gases a nivel del suelo (Guanter et al., 2015; Veefkind et al., 2012). La alta resolución espacial de TROPOMI abarca una cobertura espacial mucho más pequeña, lo que permite centrarse en emisiones individuales de los gases, especialmente en los trópicos, donde son muy pocas las mediciones *in situ*.

Para el 2019 se publicó un estudio de la calidad del aire en Bogotá D.C. entre agosto del 2018 y agosto del 2019, por medio de la incorporación de datos de O₂, SO₂, CO y O₃ obtenidos en TROPOMI (Forero & Daniel, 2019). El estudio reveló las zonas de mayor contaminación basándose en las estaciones delimitadas por el RMCAB (La Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá). Las estaciones de Carvajal, Kennedy y Puente Aranda fueron las que representaron la mayor tendencia de las concentraciones, albergando grandes emisiones de gases en el ambiente (Forero & Daniel, 2019).

Gualteros en el 2020, publicó un estudio sobre la calidad del aire en el departamento de Cundinamarca durante la pandemia, para esto procesó datos CO descargados de TROPOMI, y encontró una reducción de las emisiones del gas desde el marzo del 2020 de hasta el 67,35 %, localizados principalmente en la capital del país, lo que coincide con la época de mayores restricciones en el aislamiento obligatorio (Gualteros et al., 2020).

El aumento de las emisión de NO_2 , y O_3 y CH_4 han incrementado la vulnerabilidad de ecosistemas como, paramos, bosques secos y áreas insulares, como el Amazonas, Andes y Caribe (Avellaneda, 1990). El gran desafío en la actualidad es utilizar los datos atmosféricos para mejorar los modelos predictivos del sistema terrestre y así poder entender mejor lo que nos espera en un futuro y desarrollar una política climática efectiva para mitigar el impacto de los gases en los ecosistemas.

La propuesta plantea una identificación de posibles afectaciones a ecosistemas en Colombia ocasionadas por CH_4 y NO_2 , derivados de atentados a la infraestructura petrolera durante los años 2019 y 2020, a partir de la identificación de coordenadas de los puntos geográficos de los siniestros. La búsqueda de coordenadas de atentados se rastreó por medio de noticias y reportes en medios de comunicación y periódicos nacionales e internacionales virtuales.

Los datos de las concentraciones atmosféricas de CH_4 y NO_2 fueron descargadas del instrumento satelital TROPOMI, y visualizadas por medio del software QGIS y Panoply, los cuales permitieron crear mapas de análisis a partir de los datos atmosféricos descargados del satélite. Se evaluaron estos gases debido a que los datos descargados para cada gas, no requiere más de 600MB de almacenamiento por archivo, a comparación de otros gases medidos por el satélite como CO y O_3 , que pueden requerir por archivo de descarga hasta 1GB. Un tamaño mayor de archivo de descarga requiere herramientas computacionales de mayor capacidad para poder procesar los datos.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

En este estudio se rastrearon puntos de voladuras a oleoductos causados por grupos al margen de la ley durante los años 2019 y 2020. El área de estudio delimitada para este trabajo comprende todo el territorio Colombiano, donde el conjunto de zonas petrolíferas cubre aproximadamente el 40 % del área del país (Avellaneda, 1990), abarcando un total de 1.036.400 Km^2 (figura 2).

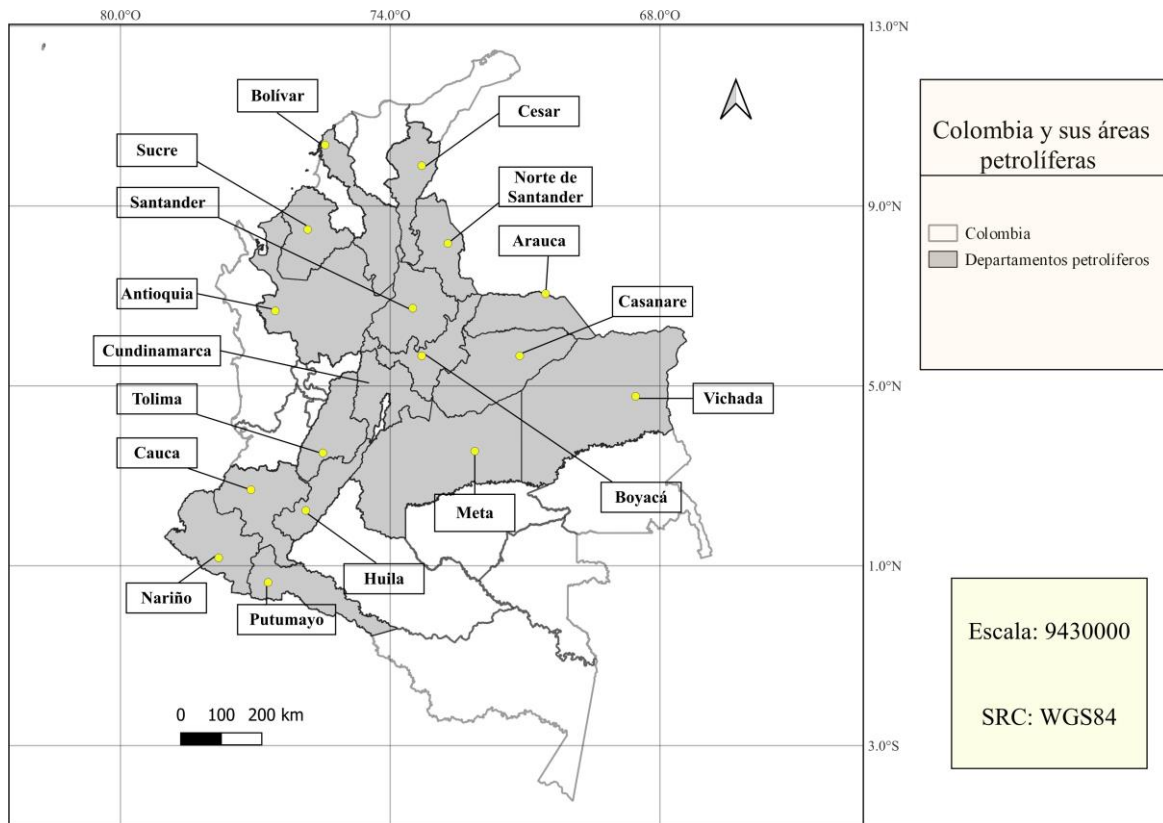


Figura 2: Colombia y sus áreas petrolíferas: departamentos que conforman la red petrolífera del país, abarcando el 40 % del área de Colombia.

El rastreo de los puntos se hizo por medio de noticias en periódicos nacionales e internacionales virtuales, encontrados en la sección de *Noticias* en Google. Dentro del buscador de Google noticias, se usó combinaciones de palabras para encontrar reportes relacionadas con atentados a oleoductos durante el periodo de tiempo establecido

Para cada una de las noticias se evaluaron los siguientes parámetros obligatorios: cobertura afectada (agua y/o suelo), motivo del atentado (terrorismo y/o robo de válvulas ilícitas), oleoducto afectado, fecha del atentado, departamento y municipio. Aquellas noticias con información no relacionada a los atentados o duplicada eran descartadas. Algunos puntos fueron encontrados con la combinación de varios reportes que en su conjunto lograban cumplir con los parámetros (Figura 3).

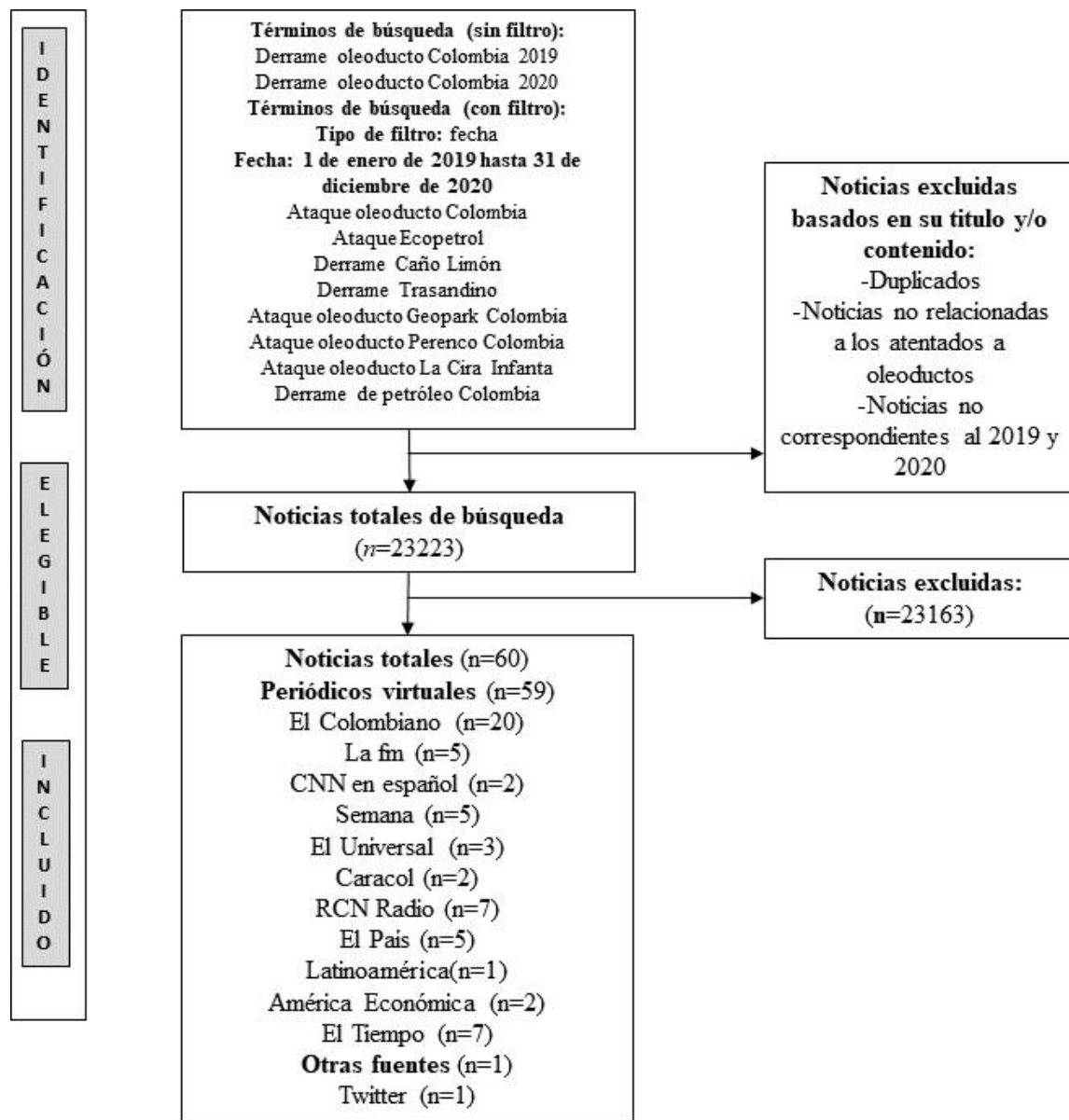


Figura 3: Flujo metodológico de búsqueda bibliográfica: la búsqueda de noticias consta de 3 etapas. La etapa de identificación contiene dos bloques de búsqueda. El primer bloque posee dos términos de búsqueda generales sin aplicar algún filtro. El segundo bloque abarca términos más específicos bajo un filtro de fecha. En la etapa elegible se seleccionan aquellos reportes que cumplen los parámetros obligatorios y depura aquellas noticias que no son relacionadas con atentado a oleoductos en Colombia, aquellas que estén duplicadas o que daten una fecha fuera del rango de estudio, basándose en el título y/o contenido. La etapa incluido son aquellas noticias finales distribuidas en diferentes periódicos virtuales y otras fuentes de comunicación incluidas en el análisis y de las cuales se tomaron las coordenadas.

Una vez seleccionado los reportes que cumplían con los requisitos anteriormente establecidos, se ubicó cartográficamente en Google Earth cada uno de los posibles puntos citados en las noticias. Para llegar a una aproximación más exacta de las coordenadas del atentado, se validó que cada posible punto estuviera relacionado al oleoducto afectado descrito en el reporte. A partir del Sistema de Información Geográfica QGIS, se trabajó con la capa vectorial de Infraestructura Petrolera de Colombia, proporcionada por la ANH, se identificó la zona petrolera del municipio y se ajustó la coordenada obtenida de Google Earth sobre la línea petrolífera más cercana. Se validó además, que la zona de influencia concordara con el tipo de cobertura afectada. Debido a la insuficiencia de información en la mayoría de las noticias, el tamaño del área afectada se hizo por medio de una identificación visual de fotos disponibles en algunos reportes. Sin embargo, por no ser un dato constante en todos los reportes, no fue incluido en los ajustes de las coordenadas ni análisis.

2.2. Datos atmosféricos

Para la estimación de las concentraciones promedio de CH₄ y NO₂ asociadas a atentados sobre la infraestructura petrolera, se trabajó con datos del instrumento TROPOMI a bordo de la misión Sentinel-5P. Los datos fueron descargados del portal del programa Copernicus (Sentinel-5P Pre-Operations (Data Hub: <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/>), utilizando las herramientas del CAMS Satellite Operator (<https://ci.tno.nl/gitlab/cams61/cso>; Sejers, comunicación personal). Los datos diarios fueron re proyectados (*regridded*) y sobre-muestreados utilizando las herramientas HARP (<https://atmospherictoolbox.org/harp/>) a una malla rectilínea con resolución espacial de 2.5 km denominada dominio MAUI.CO con límites longitudinales (-85°, -65°) y límites latitudinales (-5°, 15°), los cuales comprenden los límites territoriales continentales y marinos de Colombia.

Debido al alto número de celdas sin datos presentes en las latitudes tropicales, a las variables tipo “double” de los archivos .nc re proyectados se les añadió el atributo “_FillValue” con valor “NaN” utilizando el operador *ncatted* del paquete NCO versión 5.08-alpha01 (<http://nco.sourceforge.net/nco.html>). Los promedios zonales para ensamble de datos anuales o durante el período correspondiente a cada incidente fueron calculados mediante los operadores CDO del Instituto Max Plank en Meteorología (<https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/>). La inspección visual de los datos se realizó con la herramienta Panoply de la NASA (<https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>) y QGIS.

3. Resultados

Se encontró un total de 23223 noticias, donde 60 fueron útiles para el rastreo de las coordenadas y 23163 fueron descartadas (Figura 3). A partir de los 60 reportes se identificó 56 puntos de voladuras durante los años 2019 y 2020, 40 para el 2019 y 16 para el 2020 (Figura 4). Norte de Santander y Nariño fueron los departamentos más afectados por parte de grupos armados al margen de la ley, con un total de 19 y 16 voladuras, respectivamente (Figura 5).

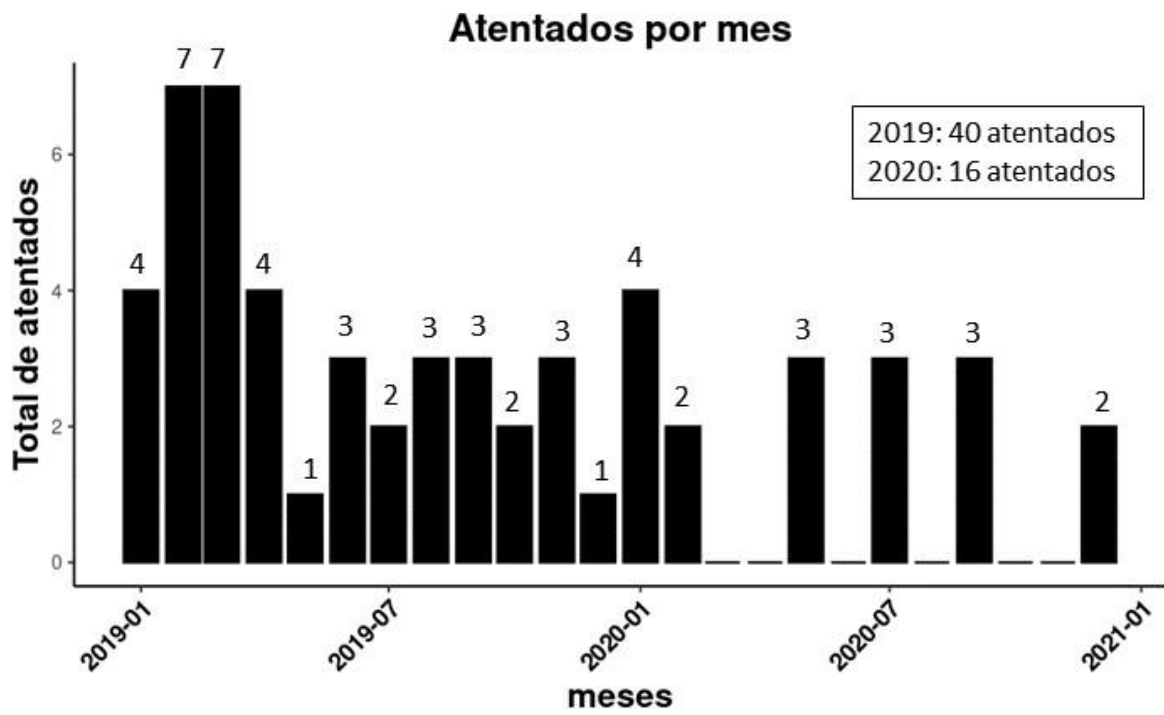


Figura 4: Atentados por meses: distribución de los atentados registrados durante el 2019 y 2020, esquematizado en barras. Los números encima de las barras representan el número de atentados.



Figura 5: Departamentos afectados: los 56 puntos se distribuyeron a lo largo de 5 departamentos. Estos representaron las zonas del país con mayor foco por parte de grupos armados para realizar ataques a la infraestructura petrolera. Los números en las barras significan la cantidad de atentados.

Dentro de los 7 ecosistemas que cubren el territorio colombiano, las 56 voladuras se concentraron en 5 de estos, Bosque Andino, Bosque de Galería y Ripiarios, Cuerpos de Agua, Ecosistemas Secos y Selvas Húmedas, donde el 46,42 % de los atentados fueron sobre ecosistemas de selvas húmedas, seguidas de un 19,64 % en ecosistemas secos (Figura 6 y 7).

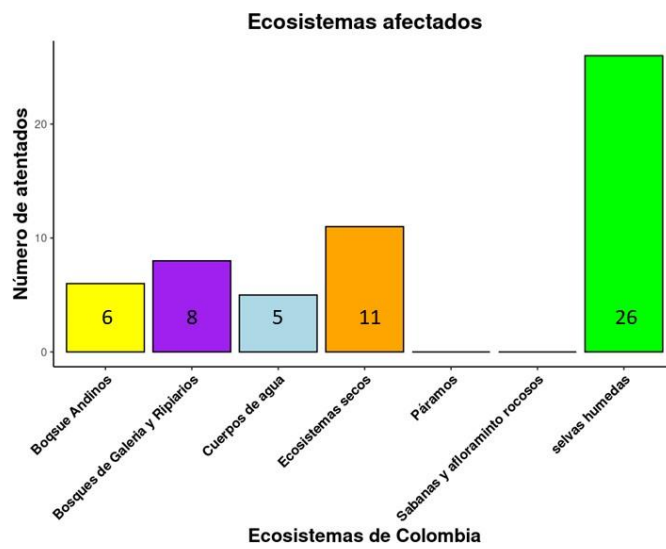


Figura 6: Ecosistemas afectados: diagrama de barras con la distribución de las voladuras a lo 7 ecosistemas de Colombia. Los números en las barras significan la cantidad de atentados. Desafortunadamente debido a la alta nubosidad durante la semana en el suroeste de Colombia no hubo una buena lectura de los gases.

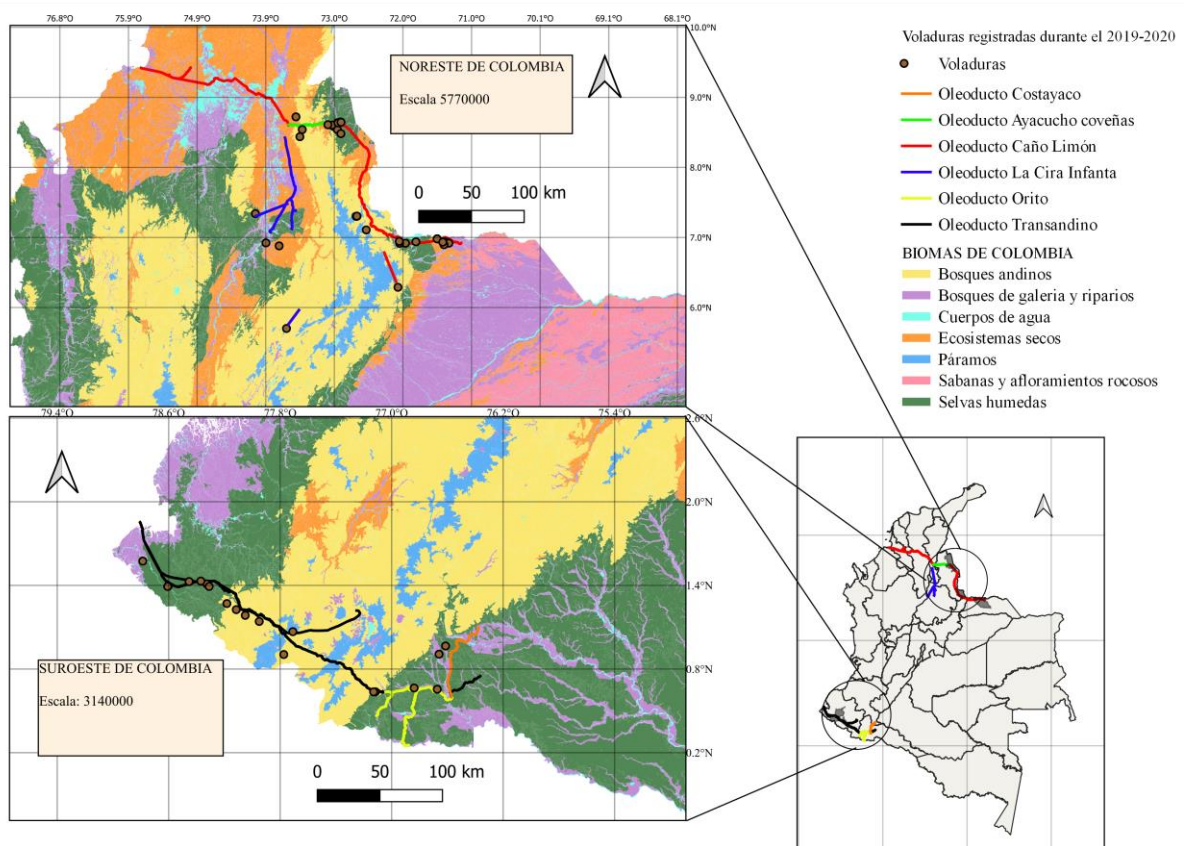


Figura 7: Voladuras registradas durante el 2019-2020: ubicación de las voladuras obtenidas durante el 2019 y 2020 en el territorio colombiano. Algunos puntos se superponen debido a que se repiten voladuras en el mismo oleoducto a lo largo del año. Dentro del círculo verde se encuentra los municipio que representaron el mayor numero de atentados durante el 2019 y 2020. Arauquita: 10 atentados, Tibú: 9, Toledo: 5, Barbacoas: 5 y Mallama: 5.

El 56,14 % de las coordenadas de atentados (Figura 8), fueron registradas a lo largo de los 772,9 km del oleoducto Caño Limón, el cual se extiende por la Cordillera Oriental de Los Andes, desde los campos de extracción en Arauquita, Arauca, hasta los puertos de exportación en Coveñas, Sucre (Guerrero-Useda, 2021).

Por otra parte, la red petrolífera Trasandino que se extiende desde Mansoya, Putumayo, hasta Tumaco, Nariño, representó el 32,14 % de las voladuras totales ubicadas a lo largo de 306,9 km de longitud (Guerrero-Useda, 2021). El municipio de Arauquita contiene el mayor porcentaje de voladuras registradas con un 17,85 % (10 atentados), seguida de Barbacoas y Mallama, Nariño y Toledo, Norte de Santander, con un 8,92 % (5 atentados) cada uno.

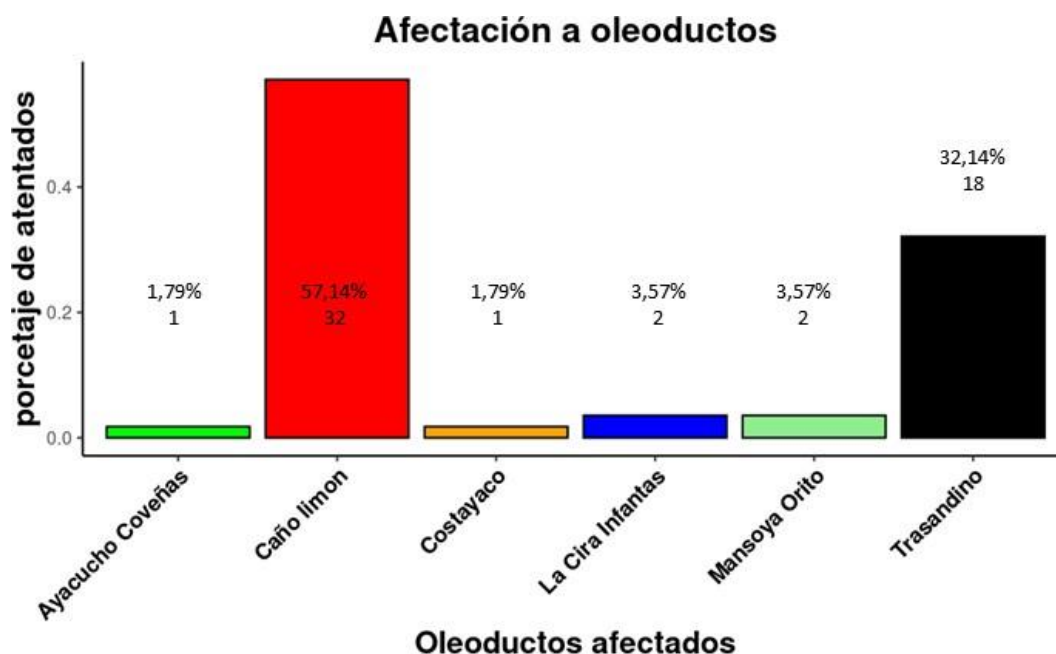


Figura 8: Afectación oleoductos: dentro de la infraestructura petrolera de Colombia, los oleoductos de Ayacucho Coveñas, Caño Limón, Costayaco, La cira Infanta, Mansoya Orito y el Trasandino fueron los que representaron los 56 puntos de voladuras. El número debajo de los porcentajes indica la cantidad de atentados por oleoducto.

Las visualización de las concentraciones durante los dos años de estudio reflejaron alta incidencia de emisiones de CH_4 y NO_2 sobre las zonas petrolíferas del país. La concentración anual promedio de CH_4 para el 2019 y 2020, evidenció los departamentos que tuvieron grandes descargas del gas durante los dos años. Sucre, Magdalena, Atlántico, Córdoba, Bolívar y Antioquia lograron alcanzar los valores máximos de concentración, hasta 1.943,09 ppbv. Hubo una disminución en las concentraciones promedio de CH_4 para el 2020, en comparación al 2019, pero las áreas

afectadas en ambos años se conservaron en el tiempo (figura 9).

Para las concentraciones de NO₂ promedio de ambos años, los departamentos de Atlántico, Antioquia, Valle del Cauca, Cesar y Bolívar representaron las emisiones más altas, alcanzando concentraciones de hasta 0.0009 ppbv (figura 10).

Concentraciones promedio de CH₄ 2019-2020

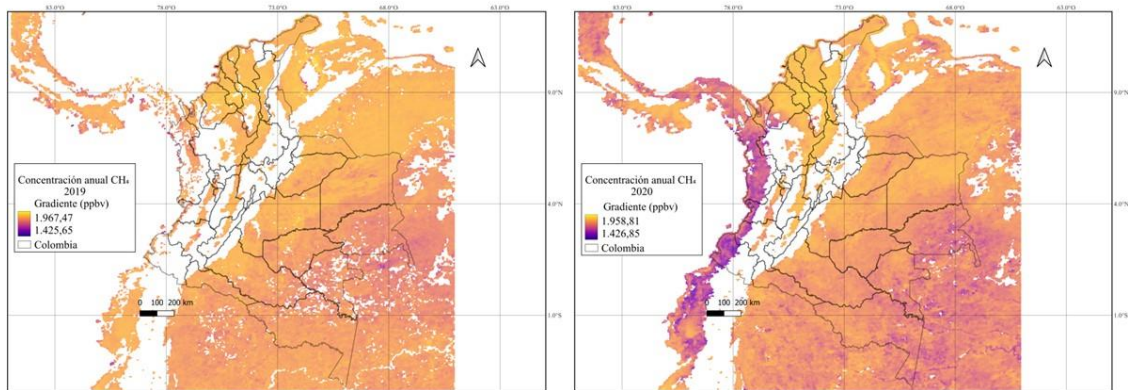


Figura 9: Promedios anuales para el 2019 y 2020 de CH₄: Promedio anual de todas las fuentes de emisión de CH₄ para Los dos años de estudio a partir de los datos atmosféricos obtenidos en TROPOMI, los puntos amarillos indican los departamentos que representaron mayores concentraciones.

Concentraciones promedio de NO₂ 2019-2020

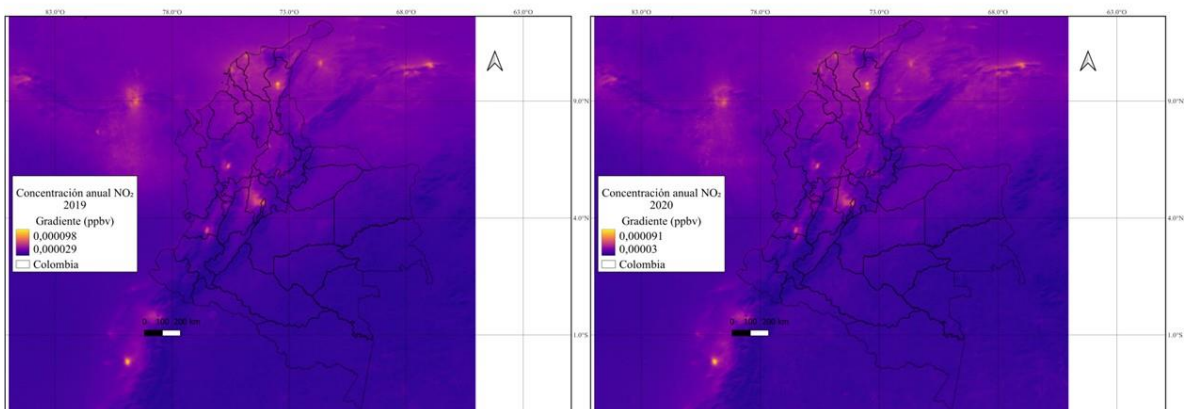


Figura 10: Promedios anuales para el 2019 y 2020 de NO₂: promedio anual de todas las fuentes de emisión de NO₂ para Los dos años de estudio a partir de los datos atmosféricos obtenidos en TROPOMI, los puntos amarillos indican los departamentos que representaron mayores concentraciones.

Para los 730 días descargados de cada uno de los gases evaluados, el metano representó la mayor cantidad de ausencia de datos para voladuras. Aproximadamente el 40 % de las coordenadas extraídas de los reporte, carecen de mediciones de CH₄, y el 20 % de NO₂. En la figura 11 se ejemplifica como el atentado ocurrido el 14 de abril de 2019, sobre el oleoducto Trasandino no muestra ninguna señal de CH₄ obtenida por el satélite durante el día del seceso, un días antes y 2 días después, caso contrario a la figura 12, donde el satélite si captó emisiones de CH₄ para el atentado ocurrido el 19 de diciembre de 2020 en el oleoducto Caño limón.

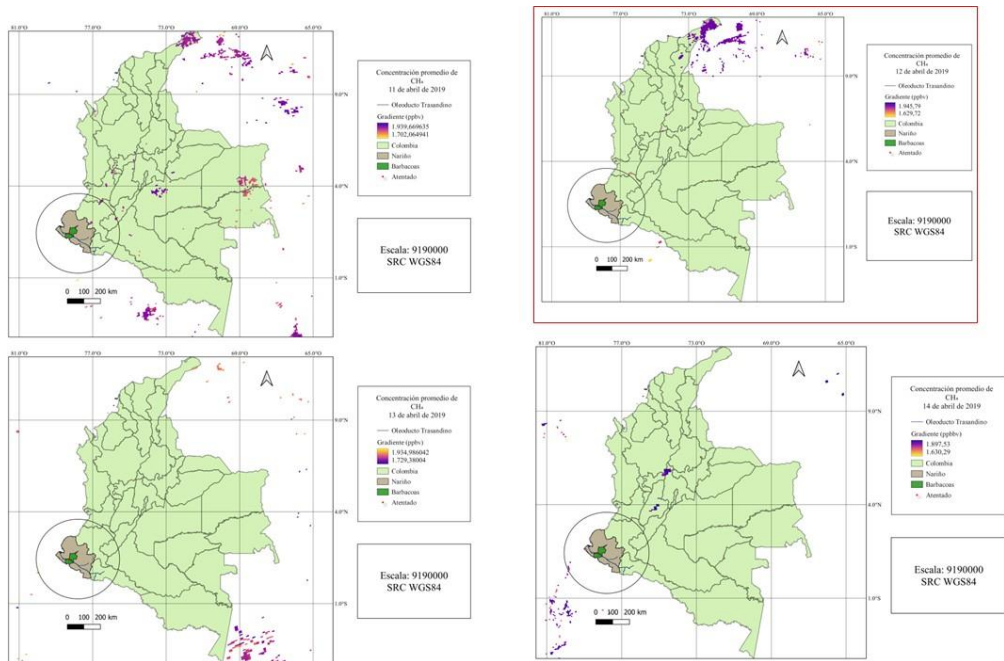


Figura 11: Concentraciones promedio de CH₄ 11 abril- 14 abril de 2019: visualización en Qgis de las concentraciones de CH₄ para la fecha 12/04/19 representado por el cuadro rojo a la 1:30 pm (zona horaria UTC -5). El atentado ocurrió en Barbacoas, Nariño sobre el oleoducto Trasandino afectando la cobertura vegetal.

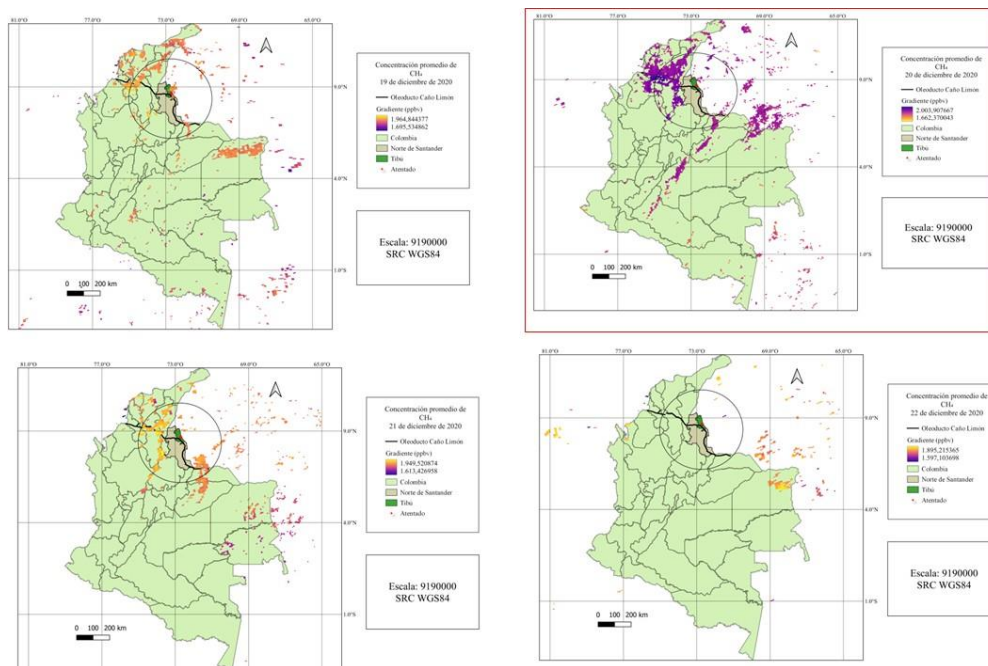


Figura 12: Concentraciones promedio de CH₄ 19 dic- 22 dic de 2020: visualización en Qgis de las concentraciones de CH₄ para la fecha 20/12/20 representado por el cuadro rojo a la 1:30 pm (zona horaria UTC -5). El atentado ocurrió en Tibú, Norte de Santander, sobre el oleoducto Caño Limón, afectando la cobertura vegetal.

Los mapas de concentración de CH₄ y NO₂ son una manera gráfica de visualizar las concentraciones sobre la zona dentro del país, sin embargo, para cada uno de los días de atentado se hizo una evaluación más profunda sobre las cantidades emitidas del gas, en comparación al promedio del mes. Debido a la ausencia encontrados durante el procesamiento de los datos atmosféricos, el 40 % de las coordenadas requieren procesos computaciones extra que me permitan realizar análisis cuantitativos del aporte real de las voladuras a las emisiones de CH₄ y NO₂ en el país (figura 13).

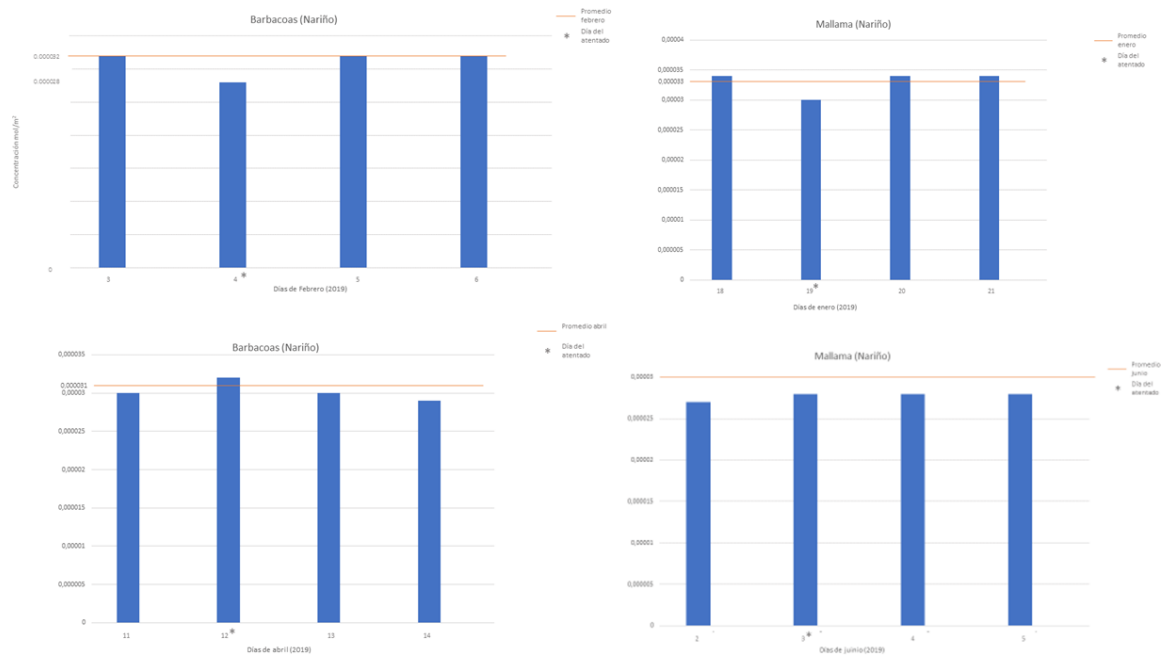


Figura 13: Concentraciones de NO₂ para fechas de atentados: visualización de las concentraciones de NO₂ para 4 fechas de atentados durante el 2019 sobre el oleoducto Trasandino. El día del atentado está representado por un asterisco (*) encima del número y su concentración fue comprada, un día antes y dos días después del siniestro. La línea naranja representa el promedio de concentración para el mes del atentado.

4. Discusión

La cantidad de eventos reportados durante el 2019 y 2020 se vio levemente reducida. La disminución de noticias sobre voladuras a oleoductos, pudo ser originado por la emergencia sanitaria que surgió a finales del 2019 por COVID-19. Al finalizar marzo de 2020, el gobierno Colombiano declaró al país en cuarentena total (Pinzón, 2020), ocasionando que la mayoría de las actividades de extracción, producción, refinación y transporte de combustible fósil se paralizaron y retrasaron en muchas zonas petrolíferas, sumándole la disminución de emisiones de otras fuentes fijas como el transporte y las industrias (Carvajal & Reina, 2020).

Según el informe generado por Ecopetrol para el último trimestre del año 2020, hubo un total de 51 atentados a oleoductos, en comparación al 2019 donde su cifra alcanzó los 72 ataques registrados. Sin embargo, la información de cada una de las explosiones a su infraestructura era de carácter privado (Ecopetrol, 2019, 2020).

Tibú, ubicado en el Norte de Santander, en la región del Catatumbo, es un municipio rico en recursos naturales de carbón y petróleo (Rodríguez, 2018). Debido a su riqueza natural

presenta dinámicas complejas sociales, económicas, políticas y ambientales (Rangel-Ch et al., 1995; Rodríguez, 2018). Los constantes ataques a la infraestructura e instalaciones, por parte de las guerrillas del Ejército de Liberación Nacional (ELN), y las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia-Ejército del Pueblo (FARC-EP), generan impactos ambientales que se evidencian en la contaminación de fuentes hídricas, la pérdida de la biodiversidad, el cambio del uso del suelo y dinámicas atmosféricas y la destrucción de hectáreas de selva (Rodríguez, 2018).

Grandes hectáreas de selvas han sido deforestadas por la construcción de infraestructura petrolera y mitigación ambiental cuando ocurre un vertimiento de crudo, evitando que los hidrocarburos traspasen la frontera de afectación (Guevara et al., 2004). El crudo es extraído de los campos petrolíferos y transportado por el oleoducto Caño Limón, atravesando los departamentos de Arauca, Boyacá, Norte de Santander, Cesar, Bolívar y Sucre, formando una red de distribución de petróleo a los centros de refinación y puntos de embarque de exportación (Rodríguez, 2018). El Caño Limón es el generador del mayor impacto ambiental por quema de crudo debido a voladuras en el país (Latorre, 2015), amenazando 1600 hectáreas de ciénagas y humedales cercanos (Capacho Navia, 2016; Latorre, 2015).

Por otra parte, aunque se promedió anualmente las concentraciones de gases, los resultados no abarcan el 100 % de puntos de coordenadas dentro de Colombia, especialmente para el CH₄, donde gran parte de la cordillera del territorio que quedó por fuera del radar, pues la nubosidad restringió la lectura de los gases por el satélite (figura 11).

La ausencia de absorción del metano depende en mayor medida de características del gas. Las propiedades espectroscópicas para el CH₄ son mucho más bajas que para el NO₂, pues el metano presenta sus principales bandas de absorción en la región del infrarrojo medio, en las longitudes que oscilan de 3 a 10 μm , en comparación al NO₂, las cuales se encuentran en 537 nm (Torres Noreña et al., 2009). Entre mayor sea la longitud de onda del gas, es más fácil la absorción de la energía en forma de luz ultravioleta o visible, energía necesaria para excitar los electrones a orbitales moleculares antienlazantes, lo que desfavorece la formación del enlace químico entre los dos átomos aumentando la señal en el satélite (Rodríguez et al., 2016).

A pesar de los esfuerzos, la realidad mostró un panorama diferente a la hora de manejar los datos, la ausencia de concentraciones a lo largo de la cordillera y pie de monte, condiciona el procesamiento de los datos, pues se necesita implementar un modelo de química y transporte que extrapole las concentraciones, para así obtener los valores en aquellos puntos donde no hay. La ausencia de datos imposibilitó la realización de análisis estadísticos como ANOVA, para identificar la varianza entre los datos y su grado de significancia, ya que no se posee el tamaño total del conjunto de datos.

En la figura 12 se puede observar como para el día del atentado y dos días posteriores no hay ninguna señal de CH₄, en comparación de la figura 14, donde se puede visualizar emisiones provenientes del Norte de Santander, tomando el municipio de Tibú, y que baja su intensidad al pasar los días. Sin embargo, para determinar la verdadera participación de los atentados en las concentraciones totales de CH₄ y NO₂ tomadas para ese día (figura 13), se requiere de modelos

de pluma que me identifique las diferentes fuentes de emisión y así filtrar la fuente que proviene del oleoducto atacado.

Aunque el uso de TROPOMI dentro del trópico aun es limitado, y más para puntos de emisiones no constantes y fijas como los atentados a oleoductos, se ha demostrado que es gran ayuda a la hora de medir grandes fuentes de emisión. Los datos del instrumento TROPOMI se han utilizado para detectar penachos de metano sobre algunas de las minas de carbón emisoras de metano más grandes de Europa, las cuales se encuentran ubicadas en Polonia (Agency, 2022). En conjunto, estas minas liberaron alrededor de 282 300 toneladas de metano a la atmósfera en 2020, el instrumento satelital ayudó a mejorar las estimaciones de la intensidad de las emisiones, observar el cambio en el tiempo y detectar fuentes de emisión previamente desconocidas (Agency, 2022).

5. Conclusiones

El CH₄ y NO₂ son gases atmosféricos necesarios para mantener los procesos biológicos dentro del planeta , sin embargo las acciones antropogénicas como la quema de combustible fósil, ha generado un incremento de las concentraciones de estos, originando que efectos adversos sobre los ecosistemas, como lluvias ácidas, eutrofización y pérdida de biodiversidad. A partir de los 56 datos obtenidos de los 60 reportes, durante el 2019 y 2020, se pudo observar una alta incidencia de atentados sobre los oleoductos Caño-Limón y Trasandino, esto ha generado afectaciones sobre las áreas de influencia cercanas, provocando cambios en las dinámicas ecosistemas.

Por medio de la identificación de los municipios y ecosistemas que representaban en los últimos años la mayoría de las voladuras registradas, se podría generar medidas ambientales especializadas al tipo de ecosistema y posibles zonas cercanos. Es importante realizar acciones para prevenir y mitigar las afectaciones a los ecosistemas en Colombia, ocasionadas por contaminantes atmosféricos derivados de atentados a la infraestructura petrolera.

El apoyo de herramientas satélites es una gran ayuda para realizar seguimientos diarios a los gases volátiles en el país, El amplio espectro de gases que mide TROPOMI permite analizar una gran cantidad de componentes que son contaminantes para los ecosistemas. Sin embargo, la nubosidad puede representar un obstáculo causando ausencia de mediciones en algún instante. A nivel de trópico la lectura del satélite es más efectiva si las emisiones de los gases son constantes y prolongadas, lo que deja en desventaja a emisiones pequeñas como las voladuras a oleoductos.

6. Referencias de reportes y cartografía

Capa	Referencia
Municipios de Colombia	Descargado de: SERIES (https://sites.google.com/site/seriescol/shapes) Fecha de descarga: 22 de febrero de 2021
Departamentos de Colombia	Descargado de: SERIES (https://sites.google.com/site/seriescol/shapes) Fecha de descarga: 22 de febrero de 2021
Ecosistemas de Colombia	Descargado de: Instituto Alexander Von Humboldt, con modificación personal (http://www.humboldt.org.co/es/) Fecha de descarga: 13 de abril de 2022
Oleoductos de Colombia	Descargado de: GeoVisor ANH (https://geovisor.anh.gov.co/tierras/) Fecha de descarga 27 de agosto de 2021

Cuadro 1: Referencia cartográfica.

Cuadro 2: Referencia reportes. Fecha de consulta: entre 1 de diciembre de 2021 y 30 enero de 2022.

Longitud	Latitud	Referencia
-72,70410556	8,642183333	Serrano, C. (5 de enero de 2019). Oleoducto Caño Limón-Coveñas sufrió nuevo atentado. La FM. https://www.lafm.com.co/colombia/oleoducto-cano-limon-covenas-sufrio-nuevo-atentado
-71,21293611	6,942125	Monsalve, R. (11 de enero de 2019). Otro año que no inició bien para los oleoductos. El Colombiano. https://www.elcolombiano.com/colombia/otro-ano-que-no-inicio-bien-para-los-oleoductos-GA10013353
-77,86457778	1,140816667	Reuter. (20 de enero de 2019). Petrolera Ecopetrol reporta ataque con explosivos contra oleoducto Trasandino en Colombia. América Economía. https://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/petrolera-ecopetrol-reporta-ataque-con-explosivos-contra-oleoducto-trasandino-en
-71,78415556	6,981919444	Caracol Radio. (1 de febrero de 2019). Van 9 atentado a oleoducto Caño Limón-Coveñas este año. Caracol Radio. https://caracol.com.co/radio/2019/03/01/regional/1551398725_592655.html
-78,24074167	1,409755556	El País. (5 de febrero de 2019). Redacción El País. Atacan el oleoducto trasandino en Tumaco- Pasto, Nariño. El País. https://www.elpais.com.co/colombia/atacan-el-oleoducto-trasandino-en-la-via-tumaco-pasto-narino.html
-71,63694	6,94937	CNN en español. (11 de febrero de 2019). Los riesgos que generan los atentados contra los oleoductos en Colombia. CNN. https://cnnespanol.cnn.com/2019/02/11/el-problema-de-los-atentados-contra-los-oleoductos-en-colombia/
-76,75248333	0,66345	Aguirre, R. (12 de febrero de 2019). Continúa atención tras ataque a oleoducto en Orito, Putumayo. El Colombiano. https://www.elcolombiano.com/colombia/asi-va-atencion-por-ataque-a-oleoducto-en-orito-putumayo-FD10208692
-73,24350833	8,534905556	Ecopetrol. (12 de febrero de 2019). Ecopetrol activó plan de contingencia del oleoducto Caño Limón-Coveñas al registrarse un nuevo atentado hoy, 12 de febrero de 2019, aproximadamente a las 4:45 e la tarde, en zona rural del municipio de Teorema, Norte de Santander. https://twitter.com/ECOPETROL_SA/status/1095466090061279242?ref_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etweetembed%7Ctwterm%5E1095466090061279242%7Ctwgr%5E%7Ctwcon%5Es1.&ref_url=https%3A%2F%2Fwww.semana.com%2Fmedio-ambiente%2Farticulo%2Fderrame-de-petroleo-ya-llego-al-rio-catatumbo%2F42961%2F
-73,570429	891565	Aguirre, R. (13 de febrero de 2019). Ecopetrol reporta nuevo ataque contra el Caño Limón-Coveñas. El Colombiano. https://www.elcolombiano.com/colombia/vuelven-a-atacar-el-oleoducto-cano-limon-covenas-LC10214069

Continúa en la siguiente página ...

Longitud	Latitud	Referencias
-76,40319167	0,902341667	Colprensa. (25 de febrero de 2019). Dos ataques contra oleoductos se registraron este fin de semana en el Putumayo. El Universal. https://www.eluniversal.com.co/colombia/dos-ataques-contraleoductos-se-registraron-este-fin-de-semana-en-el-putumayo-DG811324
-76,60482222	0,965255556	Colprensa. (25 de febrero de 2019). Dos ataques contra oleoductos se registraron este fin de semana en el Putumayo. El Universal. https://www.eluniversal.com.co/colombia/dos-ataques-contraleoductos-se-registraron-este-fin-de-semana-en-el-putumayo-DG811324
-71,86918611	6,957480556	Colprensa. (5 de marzo de 2019). Un ataque al oleoducto colombiano Caño Limón-Coveñas provoca un gran derrame de crudo. Notiamérica. https://www.notimerica.com/sociedad/noticia-ataque-oleoducto-colombiano-cano-limon-covenas-provoca-gran-derrame-crudo-20190305145354.html
-77,96781667	1,178605556	Aguirre, R. (6 de marzo de 2019). Atentado contra oleoducto Trasandino provoca incendio en Mallama, Nariño. El Colombiano. https://www.elcolombiano.com/colombia/confirman-nuevo-atentado-contra-el-oleoducto-transandino-MB10337821
-78,700649	1,57369	Aguirre, R. (6 de marzo de 2019). Atentado contra oleoducto Trasandino provoca incendio en Mallama, Nariño. El Colombiano. https://www.elcolombiano.com/colombia/confirman-nuevo-atentado-contra-el-oleoducto-transandino-MB10337821
-71,24489444	6,955569444	Angarita, J. (13 de marzo de 2019). Emergencia por nuevo atentado en el oleoducto Caño Limón- Coveñas en Arauca. https://www.rcnradio.com/colombia/lanos/emergencia-por-nuevo-atentado-al-oleoducto-cano-limon-covenas-en-arauca Arauca. (13 de marzo de 2019). Nuevo atentado al oleoducto Caño Limón-Coveñas en Arauquita. El Tiempo. https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/nuevo-ataque-a-oleoducto-cano-limon-covenas-en-arauquita-337354
-72,78741944	8,584663889	Colprensa. (19 de marzo de 2019). Derrame de crudo por atentado tiñó de negro el paradisíaco Pozo Azul, en Tibú. El País. https://www.elpais.com.co/medio-ambiente/derrame-de-crudo-por-atentado-tino-de-negro-al-paradisiaco-pozo-azul-en-tibu.html El ataque al oleoducto Caño Limón-Coveñas que desapareció las aguas cristalinas de Pozo Azul. (19 de abril de 2019). Semana. https://www.semana.com/nacion/articulo/poro-azul-las-aguas-cristalinas-que-desaparecieron-tras-ataque-a-oleoducto-cano-limon-covenas/610273/
-73,27692222	8,434266667	Reuter. (16 de marzo de 2019). Ataque a oleoducto Caño Limón en Colombia provoca contaminación en río Catatumbo. América Economía. https://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/ataque-oleoducto-cano-limon-en-colombia-provoca-contaminacion-en-rio-catatumbo
-78,02935	1,226444444	Redacción de El País. (23 de marzo de 2019). Denuncian derrame de crudo en el río Güiza por ataque contra oleoducto Trasandino. El País. https://www.elpais.com.co/judicial/denuncian-derrame-de-crudo-en-el-rio-gueiza-por-ataque-contra-oleoducto-trasandino.html

Continúa en la siguiente página ...

Longitud	Latitud	Referencias
-73,756719	6,933642	Aguirre, R. (4 de septiembre de 2019). Ecopetrol reporta un nuevo ataque a su infraestructura. El Colombiano. https://www.elcolombiano.com/colombia/por-ataque-se-registra-nuevo-derrame-de-petroleo-en-colombia-DB11545262
-78,14351667	1,668675	Quilindo, C. (12 de abril de 2019). Activan plan de contingencia tras atentado a oleoducto en Nariño. RCN radio. https://www.rcnradio.com/colombia/pacifico/activan-plan-de-contingencia-tras-atentado-oleoducto-en-narino
-72,81938	8,59182	Aguirre, R. (19 de abril de 2019). Ecopetrol refuerza plan para atender emergencia ambiental en Tibú. El Colombiano. https://www.elcolombiano.com/colombia/ecopetrol-refuerza-atencion-tras-emergencia-ambiental-y-social-en-tibu-DC10566063
-77,6872065	0,9250888	Colprensa. (27 de abril de 2019). Nueva emergencia ambiental por atentado del ELN al oleoducto Trasandino. El Colombiano. https://www.elcolombiano.com/colombia/atentado-del-eln-al-oleoducto-transandino-KH10606095
-72,741425	8,633619444	Cotamo, O. (11 de mayo de 2019). Emergencia tras explosión en oleoducto Caño Limón-Coveñas. La FM. https://www.lafm.com.co/colombia/emergencia-tras-explosion-en-oleoducto-cano-limon-covenas
-71,87246944	6,955041667	Colprensa. (25 de junio de 2019). Nuevo ataque contra oleoducto Caño Limón-Coveñas, reporta Ecopetrol. El País. https://www.elpais.com.co/colombia/nuevo-ataque-contra-oleoducto-cano-limon-covenas-reporta-ecopetrol.html
-71,25816111	6,945761111	Quintero, P. (28 de junio de 2019). Nuevo atentado a oleoducto Caño Limón-Coveñas en zona rural de Arauquita. RCN Radio. https://www.rcnradio.com/colombia/llanos/nuevo-atentado-al-oleoducto-cano-limon-covenas-en-zona-rural-de-arauquita
-72,48116111	7,308644444	Cúcuta. (12 de junio de 2019). Derrame de crudo en río Arauca fue ocasionado por atentado a oleoducto. El Tiempo. https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/causas-del-derrame-de-crudo-en-rio-arauca-387782
-72,70401944	8,642055556	Serano, C. (14 de julio de 2019). Ecopetrol sufre cuatro ataques terroristas en el noreste del país. RCN Radio. https://www.rcnradio.com/economia/ecopetrol-sufre-cuatro-ataques-terroristas-en-el-noreste-del-pais
-72,664167	8,578333	Colprensa. (8 de septiembre de 2019). La mancha que dejó derrame de crudo en el río Tibú. El Colombiano. https://www.elcolombiano.com/medio-ambiente/la-mancha-que-dejo-derrame-de-crudo-en-el-rio-tibu-ID11567791
-71,33690556	6,99245	Atentan contra el oleoducto Caño Limón Coveñas en Arauquita. (10 de agosto de 2019). La FM. https://www.lafm.com.co/economia/atentan-contra-el-oleoducto-cano-limon-covenas-en-arauquita
-72,48116111	7,308644444	Atentan contra el oleoducto Caño Limón Coveñas en Arauquita. (10 de agosto de 2019). La FM. https://www.lafm.com.co/economia/atentan-contra-el-oleoducto-cano-limon-covenas-en-arauquita

Continúa en la siguiente página ...

Longitud	Latitud	Referencias
-72,81981389	8,599188889	Blanco, S. (3 septiembre de 2019). Ataque a tubería en Ecopetrol ocasiona contaminación ambiental, en Santander. RCN Radio. https://www.rcnradio.com/colombia/santanderes/ataque-tuberia-de-ecopetrol-ocasiona-contaminacion-ambiental-en-santander
-72,48116111	7,308644444	Wlabrador. (12 de septiembre de 2019). Ecopetrol reportó atentado contra principal oleoducto colombiano. El Intra América News. https://elintranews.com/america/2019/09/12/atentan-contra-principal-oleoducto-colombiano-con-explosivos/
-77,03127222	0,664211111	Ecopetrol confirmó que el oleoducto Trasandino recibió atentado en el Putumayo. (19 de septiembre 2019). La República. https://www.larepublica.co/economia/ecopetrol-confirmando-que-el-oleoducto-transandino-recibio-atentado-en-el-putumayo-2910235
-71,16995	6,93005	Un militar muerto, dos heridos tras combates entre el ejército y la guerrilla. (7 de octubre de 2019). Caracol Radio. https://caracol.com.co/radio/2019/10/07/regional/1570466104_565139.html
-76,61088333	0,654522222	Ataque al oleoducto trasandino genera contaminación del río Guámez, en Putumayo. (6 de octubre de 2019). Semana. https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/nuevo-atentado-contra-el-oleoducto-transandino/46986/
-72,64018056	8,490269444	Derrame de crudo en vereda de Cúcuta. (15 de noviembre de 2019). La opinión. https://www.laopinion.com.co/cucuta/derrame-de-crudo-en-vereda-de-cucuta
-73,46656389	5,724616667	Derrame de crudo en vereda de Cúcuta. (15 de noviembre de 2019). La opinión. https://www.laopinion.com.co/cucuta/derrame-de-crudo-en-vereda-de-cucuta
-72,85605	8,625013889	Descubren otra válvula ilícita en el oleoducto Caño Limón-Coveñas. (30 de noviembre 2019). La Opinión. https://www.laopinion.com.co/judicial/descubren-otra-valvula-ilicita-en-el-oleoducto-cano-limon-covenas
-77,62386111	1,030711111	Rosero, A. (12 de diciembre de 2019). Afectación en oleoducto Trasandino, en Nariño, por atentado. La FM. https://www.lafm.com.co/colombia/afectacion-en-oleoducto-transandino-en-narino-por-atentado
-78,2378726	1,390556	Atentado contra oleoducto Trasandino dejó un taxista herido. (13 de enero de 2020). El Tiempo. https://www.eltiempo.com/colombia/cali/otro-atentado-contra-el-oleoducto-transandino-en-narino-451276
-78,51828889	1,389833333	Redacción BLU Radio. En lo corrido del 2020 el oleoducto Trasandino ha sido objeto de dos ataques terroristas. BLU Radio. https://www.bluradio.com/nacion/en-lo-corrido-del-2020-el-oleoducto-transandino-ha-sido-objeto-de-dos-atentados-terroristas
-78,52221	1,406944	Otra vez, atentado contra el oleoducto Trasandino en Nariño. (20 de enero de 2020). El Tiempo. https://www.eltiempo.com/colombia/cali/de-nuevo-atacan-oleoducto-transandino-en-narino-453532

Continúa en la siguiente página ...

Longitud	Latitud	Referencias
-71,24366111	6,911302778	Atentan contra el oleoducto Caño Limón Coveñas en Arauca. (30 de enero de 2020). Radio Nacional de Colombia. https://www.radionacional.co/cultura/atentan-contra-el-oleoducto-cano-limon-covenas-en-arauca
-72,33937778	7,11745	Cotamo, O. (12 de febrero de 2020). Nuevo atentado contra el oleoducto Caño Limón Coveñas en Norte de Santander. RCN Radio. https://www.rcnradio.com/colombia/santanderes/nuevo-atentado-contra-el-oleoducto-de-cano-limon-covenas-en-norte-de-santander
-73,33266389	8,714702778	Colprensa. (12 de febrero de 2020). Nuevo atentado con explosivos en el oleoducto Caño Limón Coveñas. El Universal. https://www.eluniversal.com.co/colombia/nuevo-atentado-con-explosivos-a-oleoducto-cano-limon-covenas-NC2370618
-77,043333	0,635556	Rosero, A. (19 de mayo de 2020). Nuevo atentado contra el oleoducto Trasandino en Nariño. RCN Radio. https://www.rcnradio.com/colombia/sur/nuevo-atentado-contra-el-oleoducto-transandino-en-narino
-77,918967	-11,756278	Monsalve, R. (18 de mayo de 2020). Autoridades alertan de nuevo derrame crudo en Norte de Santander. El Colombiano. https://www.elcolombiano.com/colombia/paz-y-derechos-humanos/oleoducto-cano-limon-covenas-sufre-nuevo-derrame-en-norte-de-santander-OD13017548
-72,738056	8,629167	Redacción BLU Radio. (31 de mayo de 2020). Atentado contra el oleoducto Trasandino en Nariño. BLU Radio. https://www.bluradio.com/judicial/atentado-contra-el-oleoducto-transandino-en-narino
-78,10194444	1,269166667	Más de 450 familias afectadas por derrame de petróleo en río de Nariño. (21 de septiembre de 2020). Semana. https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/en-narino-hay-alerta-por-derrame-de-petroleo-en-un-rio-colombia-hoy/55555/
-73,90293889	7,347633333	Continúan derrames de crudo en Puerto Wilches (Santander). (15 de julio de 2020). Radio Nacional de Colombia. https://www.radionacional.co/actualidad/continuan-derrames-de-crudo-en-puerto-wilches-santander
-71,89083333	3,06666667	Nuevo atentado contra el oleoducto Caño Limón-Coveñas, en Arauca. (24 de julio de 2020). El Tiempo. https://www.eltiempo.com/justicia/conflicto-y-narcotrafico/atentado-a-plataforma-de-oleoducto-cano-limon-covenas-en-arauca-522046
-72,48109167	7,309166667	Atentado al Oleoducto Caño Limón-Coveñas en Toledo. (16 de septiembre de 2020). Caracol Radio. https://caracol.com.co/emisora/2022/04/08/cucuta/1649433630_060524.html
-78,25305556	1,719722222	Más de 450 familias afectadas por derrame de petróleo en río de Nariño. (21 de septiembre de 2020). Semana. https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/en-narino-hay-alerta-por-derrame-de-petroleo-en-un-rio--colombia-hoy/55555/

Continúa en la siguiente página ...

... reportes de incidentes (cont.)

Longitud	Latitud	Referencias
-71,25816111	6,945761111	Veléz, J. (21 de septiembre de 2020). Colombia: siete atentados al oleoducto Caño Limón-Coveñas en menos de una semana. Panam Post. https://panampost.com/juan-felipe-velez/2020/09/21/col-atentados-cano-limon/
-72,69564444	8,638680556	Explosión en pozo petrolero deja dos personas muertas en el Catatumbo. (21 de diciembre de 2020). El Tiempo. https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/explosion-en-campo-petrolero-de-ecopetrol-en-catatumbo-norte-de-santander-556119

Referencias

- Agency, T. E. S. (2022). *Methane detected over Poland's coal mines* (inf. téc.). ESA. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Methane_detected_over_Poland_s_coal_mines
- Álvarez, C. F., Berrouet, L. M., Chaves, M. E., Corzo Mora, G. A., Gil, I., Gómez, R., González, A., González, V., Peñuela, R., Ramírez, W. et al., (2021). Evaluación nacional de biodiversidad y servicios ecosistémicos de Colombia: resumen para tomadores de decisión. *Chaves, ME, Gómez-S-R., Ramírez, W. y C. Solano.(Eds.) 2021. Evaluación Nacional de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos de Colombia. Resumen para Tomadores de Decisión. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo y el Centro Mundial de Monitoreo para la Conservación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania. Bogotá DC, Colombia.*
- Antonio, J. S. (2010). Forzamiento radiativo y cambios químicos en la atmósfera. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 104 (1), 149-173.
- Arévalo, D. C. S. & Rodríguez, C. M. (2018). Estudio de casos derrame de petróleo y la necesidad de su atención desde una salud. *FAGROPEC-Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 10 (1), 26-29. https://redib.org/Record/oai_articulo3181109-estudio-de-caso-derrames-de-petr%C3%B3leo-y-la-necesidad-de-su-atenci%C3%B3n-desde-una-salud
- Arias Rincon, J. J. (2018). Afectación del medio ambiente en el marco del conflicto armado: oleoducto Caño Limón Coveñas en el Catatumbo. <https://bonga.unisimon.edu.co/handle/20.500.12442/2897>
- Avellaneda, A. (1990). Petróleo e impacto ambiental en Colombia. *Revista de la Universidad Nacional (1944-1992)*, 6(24), 21-28.
- Bayona, L. M. (2017). *Gestión de riesgos ambientales para oleoductos en Colombia* (B.S. thesis). Fundación Universidad de América.
- Beyer, J., Trannum, H. C., Bakke, T., Hodson, P. V. & Collier, T. K. (2016). Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: a review. *Marine pollution bulletin*, 110 (1), 28-51. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X16304313?casa_token=BoovGuI3DoAAAAA:mcdtJ8EMyTIQw05WDaKr6hwO7mEj-la20R22SQR_bqGAjK2H1CTtSyMpb6KFLKI71b3pzp6g
- Bonilla Cárdenas, J. A. & Lemus Flores, C. (2012). Emisión de metano entérico por rumiantes y su contribución al calentamiento global y al cambio climático: Revisión. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 3(2), 215-246.
- Bravo, E. (2007). *Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad* (inf. téc.). Acción ecológica.
- Bünger, J., Krahl, J., Schröder, O., Schmidt, L. & Westphal, G. A. (2012). Potential hazards associated with combustion of bio-derived versus petroleum-derived diesel fuel. *Critical Reviews in Toxicology*, 42 (9), 732-750. <https://doi.org/10.3109/10408444.2012.710194>
- Camilloni, I. & Vera, C. (2007). *La atmósfera* (inf. téc.). Ministerios de Educación, Ciencia y Tecnología.

- Capacho Navia, D. I. (2016). La vegetación de los humedales altoandinos del sector de Presidente, páramo de Almorzadero (Norte de Santander, Colombia). https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/66114/1/tesis_capacho_navia.pdf
- Carvajal, O. H. & Reina, L. E. B. (2020). COYUNTURA DEL CORONAVIRUS COVID-19 EN PAÍSES MEDIANOS PRODUCTORES DE PETRÓLEO ¿QUÉ HACER EN EL CASO DE COLOMBIA? <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3764261>
- Cerquera, C. R. M. (2016). ¿ Quién responde en Colombia por el daño ambiental causado por el derrame de crudo? *Global lure*, 4, 145-168.
- Change, I. C. (2014). *Mitigation of climate change*.
- de Ambiente y Desarrollo Sostenible, M. (2008). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire* (inf. téc.). Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Protocolo+para+el+Monitoreo+y+seguimiento+de+la+calidad+del+aire.pdf/6b2f53c8-6a8d-4f3d-b210-011a45f3ee88>
- de Gouw, J. A., Middlebrook, A. M., Warneke, C., Ahmadov, R., Atlas, E. L., Bahreini, R., Blake, D. R., Brock, C. A., Brioude, J., Fahey, D. W., Fehsenfeld, F. C., Holloway, J. S., Henaff, M. L., Lueb, R. A., McKeen, S. A., Meagher, J. F., Murphy, D. M., Paris, C., Parrish, D. D., . . . Watts, L. A. (2011). Organic Aerosol Formation Downwind from the Deepwater Horizon Oil Spill. *Science*, 331 (6022), 1295-1299. <https://doi.org/10.1126/science.1200320>
- Ecopetrol. (2019). *Reporte cuarto trimestre: resultados 2019* (inf. téc.). Ecopetrol.
- Ecopetrol. (2020). *Reporte cuarto trimestre: resultados 2020* (inf. téc.). Ecopetrol.
- Erisman, J. W., Galloway, J. N., Seitzinger, S., Bleeker, A., Dise, N. B., Petrescu, A. M. R., Leach, A. M. & de Vries, W. (2013). Consequences of human modification of the global nitrogen cycle. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621), 20130116. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0116>
- Fernández-Carrera, A., Rogers, K. L., Weber, S. C., Chanton, J. P. & Montoya, J. P. (2016). Deep Water Horizon oil and methane carbon entered the food web in the Gulf of Mexico. *Limnology and Oceanography*, 61(S1), S387-S400. <https://doi.org/10.1002/lno.10440>
- Forero, C. & Daniel, D. (2019). *Metodología para la incorporación de datos del sensor tropomi del satélite sentinel 5-p al monitoreo de la calidad del aire en Bogotá DC* (inf. téc.). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/23649>
- García, M., Ramírez, H., Garcia, F., Alcalá, A., Arrelano, J., Espinoza, M. & de la Torre, O. (2006). Influencia de los contaminantes SO₂ y NO₂ en la formación de lluvia ácida en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, Mexico. *e-Gnosis*, 4(7), 3-16. <https://www.redalyc.org/pdf/730/73000407.pdf>
- Gualteros, J., Hernández, D. & Upegui, E. (2020). Monitoreo de CO usando Sentinel-5p y gee: caso Cundinamarca en tiempos de COVID-19. *Tecnología Investigación y Academia*, 3(8), 73-83. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tia/article/view/19125/17948>
- Guanter, L., Aben, I., Tol, P., Krijger, J. M., Hollstein, A., Köhler, P. & Landgraf, J. (2015). Potential of the TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) onboard the Sentinel-5 Precursor for the monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(3), 1337-1352. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/amt-8-1337-2015>

- Guerrero-Useda, M. (2021). Equilibrio ambiental, extracción petrolera y riesgo de desastres en el oleoducto transandino colombiano. *IPSA Scientia, revista científica multidisciplinaria*, 6(3), 86-101. <https://doi.org/10.25214/27114406.1113>
- Guevara, S., Sánchez-Ríos, G. & Landgrave, R. (2004). La deforestación. *Los Tuxtlas, el paisaje de la sierra*, 85-108. https://www.researchgate.net/profile/Sergio-Guevara-3/publication/267714794_La_Deforestacion/links/548f18530cf225bf66a7fb13/La-Deforestacion.pdf
- Hartogh, P., Lis, D. C., Bockelée-Morvan, D., de Val-Borro, M., Biver, N., Küppers, M., Emprechtinger, M., Bergin, E. A., Crovisier, J., Rengel, M. et al., (2011). Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley 2. *Nature*, 478 (7368), 218-220. <https://www.nature.com/articles/nature10519>
- Hernández, A., López, A. & Amado, N. (2016). *Meta, Casanare y Santander, principales motores del PIB petrolero en Colombia. Análisis del PIB departamental 2015* (inf. téc.). ACP.
- Krupa, S. V. & Manning, W. J. (1988). Atmospheric ozone: formation and effects on vegetation. *Environmental pollution*, 50(1-2), 101-137.
- Latorre, L. V. (2015). Identificación de área quemada por derrame de crudo en un sector del municipio de Arauquita-Oleoducto Caño Limón-Coveñas, por medio de imágenes de satélite, para determinar la afectación de las coberturas presentes en el año 1997. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/15412/0527723.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Martínez, V. E. (2001). Efecto de hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Terra latinoamericana*, 19(1), 9-17.
- Mincomercio. (2021). Contexto macroeconómico de Colombia. <https://www.mincit.gov.co/getattachment/1c8db89b-efed-46ec-b2a1-56513399bd09/Colombia.aspx>
- Miranda, D. & Restrepo, R. (2005). LOS DERRAMES DE PETRÓLEO EN ECOSISTEMAS TROPICALES – IMPACTOS, CONSECUENCIAS Y PREVENCIÓN. LA EXPERIENCIA DE COLOMBIA1. *International Oil Spill Conference Proceedings, 2005* (1), 571-575. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-571>
- Mooney, H. (2008). Extinciones masivas de especies siglo XXI.[Documento en línea].
- Olivo, M. d. L. & Soto-Olivo, A. (2010). Comportamiento de los gases de efecto invernadero y las temperaturas atmosféricas con sus escenarios de incremento potencial. *Universidad, Ciencia y tecnología*, 14 (57), 221-230. <http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-48212010000400002&script=sci.arttext>
- Parry, M. L., Canziani, O., Palutikof, J., Van der Linden, P., Hanson, C. et al., (2007). *Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge University Press. https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=TNo-SeGpn7wC&oi=fnd&pg=PA81&dq=+Climate+change+2007:+impacts,+adaptation+and+vulnerability.+Contribution+of+working+group+II+to+the+fourth+assessment+reports+of+the+Intergovernmental+Panel+on+Climate+Change.+&ots=vR7wnc_opA&sig=wXaSn4fxfPixxhDlvI5FtqLP2GA&redir_esc=y#v=onepage&q=Climate%5C%20change%5C%202007%5C%3A%5C%20impacts%5C%2C%5C%20adaptation%5C%20and%5C%20vulnerability.%5C%20Contribution%5C%20of%5C%20working%5C%20group%5C%20II%5C%20to%5C%20the%5C%20fourth%5C%20assessment%5C%20

- 20reports%5C%20of%5C%20the%5C%20Intergovernmental%5C%20Panel%5C%20on%5C%20Climate%5C%20Change.&f=false
- Pérez, M. E. F. & Arias, D. F. L. H. (2011). Estudio de los principales procesos que originan emisiones de gases a la atmósfera. *Ciencias Holguín*, 17(1).
- Pérez, R. (2006). Dinámica atmosférica y los procesos tormentosos severos. *Facultad Regional Mendoza. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional–UTN–*, 137p. http://www.edutecne.utn.edu.ar/dinam_atmos_et_al/Dinamica_Atmosferica.pdf
- Pinzón, J. E. D. (2020). Estudio comparativo entre el contagio durante la cuarentena obligada por el COVID-19 y el contagio durante la apertura gradual y controlada para algunos sectores de la economía en Colombia. *Revista Repertorio de Medicina y Cirugía*, 52-58. <https://revistas.fucsalud.edu.co/index.php/repertorio/article/view/1073/1245>
- Rangel-Ch, J. O., Sánchez-C, H., Lowy-C, P., Aguilar-P, M. & Castillo-G, A. (1995). *Áreas de reserva y centros de conservación de especies en Colombia* (inf. téc.). http://168.176.236.13/ciencias/fileadmin/Facultad_de_Ciencias/Publicaciones/Imagenes/Portadas_Libros/Colecciones/CDB/CDB_1_9789586081122.pdf#page=229
- Reyes, F. & Ajamil, C. (2005). *Descripción de los impactos de la actividad petrolera* (inf. téc.).
- Rodriguez, D. (2018). *Monitoreo de las afectaciones ambientales originadas por la extracción ilícita del crudo de la infraestructura petrolera en el campo de explotación de hidrocarburos Tibú* (thesis). Universidad Libre Seccional Cúcuta. <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/11714>
- Rodríguez, W., García, P. A. & Fajardo, A. (2016). Aplicaciones de técnicas espectroscópicas para el análisis de suelos. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 228-251. <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/view/2030>
- Sánchez-Santillán, N., Sánchez-Trejo, R., de la Lanza Espino, G. & Garduño, R. (2014). EVOLUCIÓN DEL CLIMA A TRAVÉS DE LA HISTORIA DE LA TIERRA CLIMATE EVOLUTION ACROSS THE EARTH'S HISTORY. *Rev. Reflexiones*, 93(1), 1021-1209. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1659-28592014000100009&script=sci_arttext
- Suaréz, M. F. (2019). *Oportunidades y retos del sector de hidrocarburos* (inf. téc.). Minenergía.
- Torres Noreña, H. d. J., Montoya Izquierdo, P. M. & Castaño González, J. G. (2009). Determinación de NO₂ atmosférico mediante captadores pasivos y cromatografía de intercambio iónico. *Ingeniería y desarrollo*, (25), 25-47. <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/n25/n25a02.pdf>
- Vaca, H. Y. (2001). Paradoja de la Ecopetrol de hoy. *Revista Fuentes, El reventón energético*, 1(1).
- Veefkind, J., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., Claas, J., Eskes, H., de Haan, J., Kleipool, Q., van Weele, M., Hasekamp, O., Hoogeveen, R., Landgraf, J., Snel, R., Tol, P., Ingmann, P., Voors, R., Kruizinga, B., . . . Levelt, P. (2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*, 120, 70-83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>
- Vita, L. (2021). Cinco empresas son responsables de 85 % de la producción de petróleo en Colombia. *La Republica*.
- White, H. K., Hsing, P.-Y., Cho, W., Shank, T. M., Cordes, E. E., Quattrini, A. M., Nelson, R. K., Camilli, R., Demopoulos, A. W., German, C. R. et al., (2012). Impact of the

Deepwater Horizon oil spill on a deep-water coral community in the Gulf of Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (50), 20303-20308. <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1118029109>

Zuñiga, F., Huertas, J., Guerrero, ., Dörner, J. & Burbano, H. (2018). Propiedades morfológicas de los suelos asociadas a los ecosistemas de Páramo, Nariño, Sur de Colombia. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 36 (2), 183. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.363>

Zuzolo, D., Guarino, C., Tartaglia, M. & Sciarrillo, R. (2021). *Plant-soil-microbiota combination for the removal of total petroleum hydrocarbons (TPH): An in-field experiment*. (Vol. 11).