

Índice

Resumen -----	02
Introducción -----	03
Procesos y Procedimientos -----	07
Principales contaminantes -----	12
Efectos de los contaminantes-----	21
Legislación -----	28
Metodología analítica -----	40
Formas de tratamiento -----	47
Técnicas aplicadas al análisis forense -----	55
Incidencia de los pozos con restricción de dominio en la planificación urbana -----	61
Conclusión -----	62
Referencias Bibliográficas -----	63

Resumen

El uso sustentable del territorio y sus recursos naturales promueve que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes sin comprometer las de las generaciones futuras y minimiza los impactos negativos que podrían ocasionar los diversos usos del territorio; garantizando el derecho a gozar de un ambiente equilibrado y logrando mayor calidad de vida.

El territorio de Comodoro Rivadavia, comparte el riesgo y la vulnerabilidad permanente en un contexto de problemáticas ambientales que requieren ser tratadas. En el presente trabajo se hará foco en la problemática ambiental vinculada al Abandono de Pozos Hidrocarburíferos en el Ejido de Comodoro Rivadavia, y su incidencia en la Planificación Urbana.

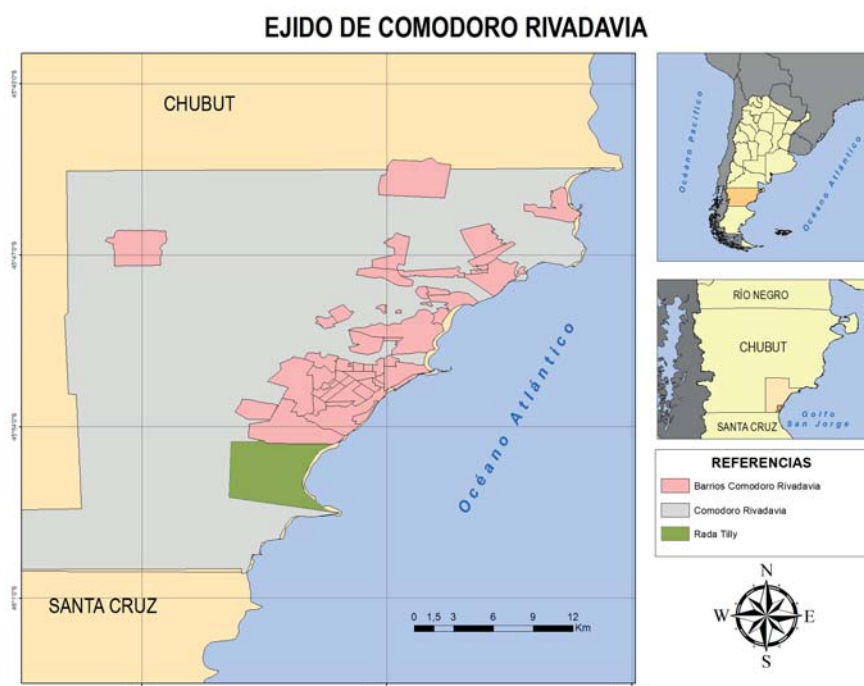
Se desarrollarán aspectos que hacen al Diagnóstico Ambiental, puntualmente se abordará la situación de pozos inactivos en condiciones de un cierre definitivo para los cuales podrían recuperarse áreas para la urbanización con el fin de la expansión y el crecimiento de la ciudad. En este sentido el impacto de la actividad hidrocarburífera se vincula con la dimensión ambiental y con el acceso al suelo urbano.

El abandono de pozos es una operación crítica para la protección ambiental del entorno, es por ello que se explicarán los procesos y procedimientos involucrados a esta actividad. Se analizarán los principales contaminantes asociados a la problemática, los efectos sobre la salud y el ambiente que estos podrían ocasionar. Como así también se discutirá acerca de la legislación aplicable, las formas analíticas de identificar esos contaminantes, sus formas de tratamiento, y finalizando se abordarán las técnicas forenses aplicadas.

Introducción

La ciudad de Comodoro Rivadavia se encuentra en la Patagonia Argentina, al sureste de la provincia de Chubut, en la zona central de la cuenca del Golfo San Jorge. Región comprendida entre el sur de la provincia de Chubut y Santa Cruz. Esta ciudad es el centro de las actividades sociales y económicas que se desarrollan en el Golfo. Es considerada una ciudad “Commodity” (Vázquez y Bachiller, 2019), en la cual el territorio posee una economía que se liga centralmente a la extracción de petróleo crudo.

El petróleo es considerado un recurso no renovable (Svampa, 2013). A partir de su descubrimiento en los primeros años del siglo pasado, la dinámica de la ciudad y la región ha estado ligada casi exclusivamente a esta actividad productiva, la cual determinó históricamente su conformación socioespacial (Usach y Freddo, 2016). Los modos históricos de ocupación del suelo en las primeras décadas determinaron que la ciudad creciera hacia el norte y que el territorio se orientara en el eje de referencia norte-sur, como se observa en la Figura N°1.



Las ocupaciones de suelo se organizaron en torno a dicha actividad y, en cercanía de los pozos petroleros, como puede observarse en las imágenes siguientes (Figura N° 2). La trama urbana

se ve afectada por construcciones que albergan pozos abandonados o inactivos, en condiciones de ser abandonados con los procedimientos técnicos exigidos por la normativa vigente.



Figura N°2 vista panorámica 1940 y 2017, Zona norte. (Montenegro y Biasotti, 2017)

La ciudad de Comodoro Rivadavia, cuenta con uno de los ejidos urbanos más extensos del país, tiene una superficie total de 563 km², con una densidad poblacional muy baja, siendo la cantidad de habitantes en área urbanizada para Comodoro Rivadavia de aproximadamente 37 hab/ha. Cuenta con una superficie urbanizada que ocupa 5590 ha (55,9 km²) (Subsecretaría de Ambiente, 2021).

Se emplaza en una estrecha franja costera flanqueada por el mar y los cerros, con relieve irregular (Hirtz et al., 2000). Las restricciones topográficas y las de la propia extracción hidrocarburífera la convierten en una ciudad que fue creciendo de manera fragmentada y dispersa (Fundación YPF, 2019) como se observa en la Figura N° 3.

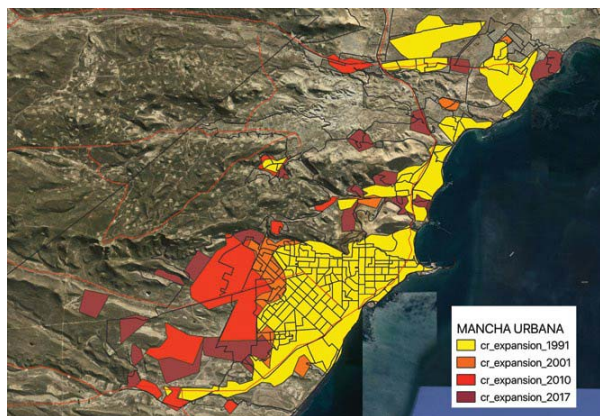


Figura N°3 Mancha urbana. (Fundación YPF, 2019)

Los pozos en estado de abandono los cuales tienen restricciones de dominio son parte importante de los pasivos ambientales que la actividad ha dejado en el ejido urbano de Comodoro Rivadavia. La mayoría de los pozos abandonados en el interior del ejido siguieron el procedimiento reglado por el Decreto 33.598/33 de orden nacional, que entre sus aspectos más importantes dejaba establecido un radio de seguridad de 60 metros. Esta afectación significa una superficie aproximada de tierra de 11304m² (1,13ha) de suelo ocioso por cada pozo sin abandonar de acuerdo a la legislación nacional vigente, que establece las Normas y Procedimientos para el abandono de Pozos de Hidrocarburos, de la Secretaría de Energía, Transporte y Comunicaciones (Res. 5/96). Esto puede traducirse en superficie de suelo que incide en la planificación urbana de la ciudad.

Desde el inicio de la actividad hidrocarburifera, en 1907, la cantidad de perforaciones en el territorio alcanzó la cantidad de 6272 pozos. De la totalidad de los pozos un 38 % están activos, un 58% abandonados y el 4% inactivos. Los valores absolutos y sus correspondientes porcentajes se presentan en la tabla N°1.

Tabla N°1: Clasificación según Res. 5/96 de pozos en el ejido urbano de Comodoro Rivadavia. (Ministerio de Hidrocarburos de la provincia Chubut, 2021)

Clasificación pozos del Ejido Urbano Comodoro Rivadavia según Res. 5/96				
Estado del pozo	B.1 - Pozo Activo	B.2-Pozo Inactivo	B.3 -Pozo Abandonado	Total
Cantidad	2367	280	3625	6272
Porcentaje (%)	58	4	58	100

La información mostrada en la tabla N°1 está en concordancia con lo expuesto por la Subsecretaria de Ambiente de la Municipalidad quienes dieron a conocer que “en el ejido municipal hay más de 6.000 pozos perforados, algunos de ellos abandonados, otros inactivos y otros en producción” (Municipalidad de Comodoro Rivadavia, 2024).

Por otra parte, conocer el Marco Geológico es importante para entender el contexto, y comprender la conformación de los pozos del ejido. Dentro del área correspondiente al ejido urbano de la ciudad, existen dos formaciones compuestas por rocas sedimentarias: la Fm. Sarmiento (Eoceno-Oligoceno) y la Fm. Patagonia de edad Oligocena, redefinida posteriormente como Fm. Chenque, (Hirtz et al, 2000).

El abandono definitivo de pozos se realiza para asegurar la aislación de los niveles productivos de hidrocarburos y las zonas de producción de agua someras. La formación con aporte de agua a escasa profundidad es la cuenca que se denomina Patagoniano, y puede ser encontrada en los pozos desde los 100 m hasta los 400 m de profundidad. En dicha formación, los niveles

productivos se caracterizan por tener elevada permeabilidad y elevada capacidad de admisión (Estudios y Servicios Ambientales SRL, 2016).

Procesos y procedimientos

Los pozos de la industria hidrocarburifera atraviesan las formaciones de sedimentos presentes en el subsuelo. La técnica adecuada aceptada por norma, para el abandono de pozos es la establecida según Res. 5/96, prevé el aislamiento de las capas que contienen hidrocarburos con respecto a los estratos superiores que podrían contar con acuíferos y otras capas. Se busca reforzar las protecciones originales de aislamiento en esos sectores de manera de evitar que haya comunicación entre ellos a través de la cañería del pozo por los deterioros propios del paso del tiempo. En la Figura N°4 se puede apreciar un corte longitudinal de un pozo, que muestra las capas y contenciones.

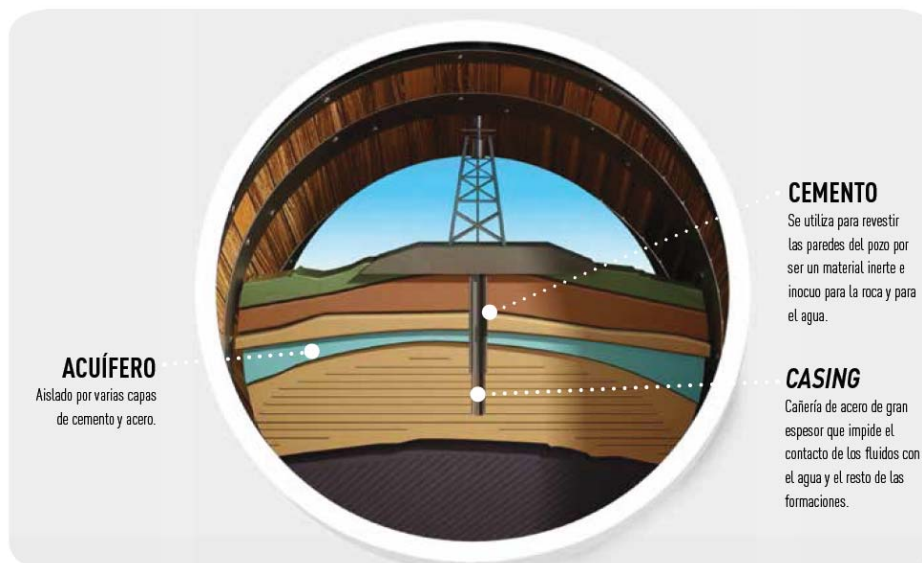


Figura N°4: Corte longitudinal de un pozo. (Fundación YPF, 2017)

La operación de abandono de un pozo se denomina en la industria hidrocarburifera como P&A (Plugging and Abandoning). Según la National Petroleum Council (NPC), esta operación tiene como objetivo el aislamiento de las zonas productoras de petróleo, gas o agua mediante tapones, comúnmente de cemento (Dick Bernal y Ojeda Triana, 2017). El abandono y taponamiento de pozos constituye una operación crítica para la protección del ambiente. Un taponamiento exitoso evitará que fluidos derivados de la actividad fluyan hacia otras estructuras geológicas o contaminen napas acuíferas (Sciacaluga, 2018). Evitando de esta manera incidencias negativas en el ambiente en cualquiera de sus compartimentos: suelo, subsuelo, aire, agua, en la biota y en la salud humana.

Dada la geología de la cuenca del Golfo San Jorge, existe una gran diversidad de pozos perforados, realizados a lo largo del tiempo y presentan abundantes y amplias variables que no permiten tener un programa guía o tipo de abandono para cumplir las exigencias de resoluciones Nacionales y/o Provinciales.

Es necesario controlar dos puntos clave en estas operaciones: Integridad de cañería y calidad del cemento que circunda al pozo.

La calidad de las cementaciones primarias entre el revestimiento y las formaciones es un factor clave en el éxito del abandono del pozo en el futuro. El cemento primario es aquella lámina de cemento que se coloca alrededor de la tubería o revestimiento, y cuyo objetivo es aislar el pozo y evitar que los fluidos circulen por fuera del espacio de la perforación, y proteger el revestimiento de elementos corrosivos que puedan tener las diferentes capas de formaciones (Sciacaluga, 2018).

Las barreras del pozo deben extenderse a través de la sección transversal completa del pozo, y sellar tanto vertical como horizontalmente Figura N°5.

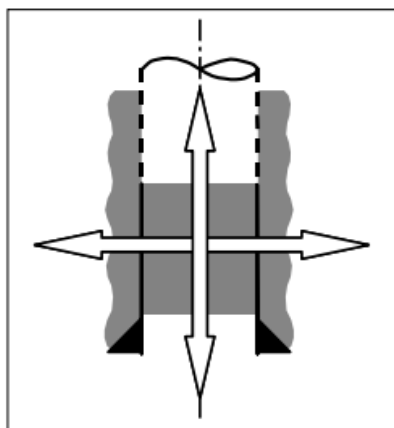


Figura N°5. Representación de barreras del pozo en secciones transversal y horizontal.
(Vieira do Paço Hallak, 2017)

Los pozos deben ser taponados en diferentes niveles:

:

1. En la superficie del suelo;
2. Sobre todas las zonas donde exista petróleo o gas y a lo largo de dichas zonas;
3. Sobre la cañería de revestimiento, y
4. Debajo de la napa de agua.

Los distintos niveles en los cuales se colocan tapones que actúan como barreras se presentan en la Figura N°6.

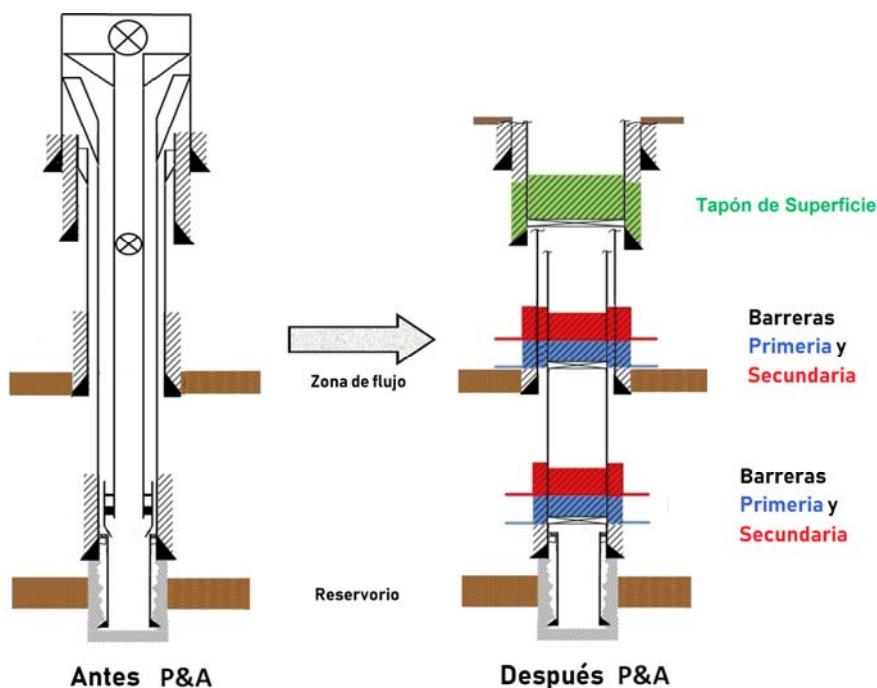


Figura N°6, Barreras de superficie, barreras primarias y secundarias en operaciones de abandono de pozos. (Vrålstad, 2019)

Para obtener un buen aislamiento en un pozo abandonado se debe seguir los siguientes criterios, (Dick Bernal y Ojeda Triana, 2017):

- ✓ Longitud. La longitud del tapón de cemento debe ser suficiente para ser calificado como permanente, y el requerimiento de la longitud del tapón es acorde a políticas de la empresa, ya que son una barrera física para el flujo de los fluidos de fondo a superficie.
- ✓ Sección Transversal. Es la sección radial del pozo que incluye tanto el espacio dentro de la tubería como el anular que debe estar cementado para sellar tanto de manera vertical como horizontal.
- ✓ Posicionamiento. El tapón debe colocarse en una sección de la tubería o si es hueco abierto en una formación con la integridad suficiente. Se debe poner el tapón lo más cercano a la zona productora.
- ✓ Verificación. Los tres aspectos anteriores deben ser verificados, a través de registros, pruebas de presión y bajando herramientas en fondo con el fin de asegurar que la operación fue exitosa.

La Res. 5/96, prevé los requisitos para el abandono de pozos efectuados por aquellos concesionarios o permisionarios que explotan un yacimiento.

Las empresas concesionarias o permisionarias, responsables de los abandonos podrán adoptar otras metodologías que pudieran adaptarse mejor técnica y económicamente a las características de cada pozo y/o zona, en la medida que éstas cumplan con los requerimientos respecto a normas de seguridad y protección del ambiente.

La metodología que plantea la Res. 5/96 se realiza con equipo de Work Over (WO), sin embargo, existen otras metodologías por ejemplo Rig Less también contempladas en la resolución. Esta tecnología tiene como ventaja el equipamiento requerido, así mismo hay condiciones previas que deben asegurarse, tales como adhesión del cemento, integridad de cañería. En la Figura N°7 se muestra la secuencia operativa con equipo de WO.

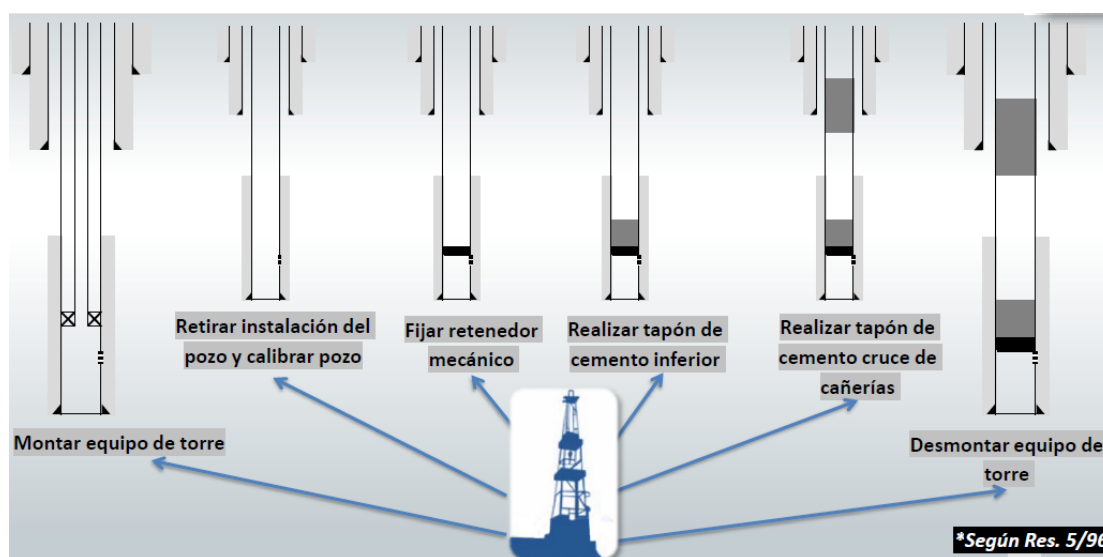


Figura N°7 Secuencia operativa abandono en equipo de torre WO. (Montenegro y Biasotti, 2017)

Es importante destacar que los pozos que sean abandonados en forma definitiva, en las condiciones establecidas en la Res. 5/96, disminuirán su radio tanto como sea posible, con el objetivo de tender a cero.

La resolución mencionada establece que las empresas permisionarias o concesionarias deben presentar el plan tentativo de abandono de pozos, con una frecuencia anual, la cual establece los criterios y plazos para el abandono de pozos en función de su categorización.

Los pozos tienen su categorización, de acuerdo a su ubicación,

Pozos A-1 Ejido Urbano (100 m)

Pozos A-2 Zona de Cursos de Agua, Plantaciones (lagos/ríos, Chacras, etc)

Pozos A-3 Campo, Yacimiento

Siendo la categoría A-1 la de interés ya que considera a pozos dentro del ejido urbano. La norma define como ejido urbano al área habitada o desarrollada con casas habitación o construcciones de carácter permanente y uso cotidiano o esporádico, que no sean las vinculadas a la actividad hidrocarburífera, o loteos actuales, y se incluyen a los pozos ubicados a una distancia inferior a los cien (100) metros de las áreas descriptas.

Principales contaminantes

Los pozos que fueron abandonados pueden proporcionar vías para la migración de fluidos subsuperficiales, especialmente aquellos que fueron intervenidos en el pasado, cuando los procedimientos eran menos rigurosos. En la Figura N°8 se muestran algunas de las posibles vías de acceso de los contaminantes a diferentes compartimentos ambientales.

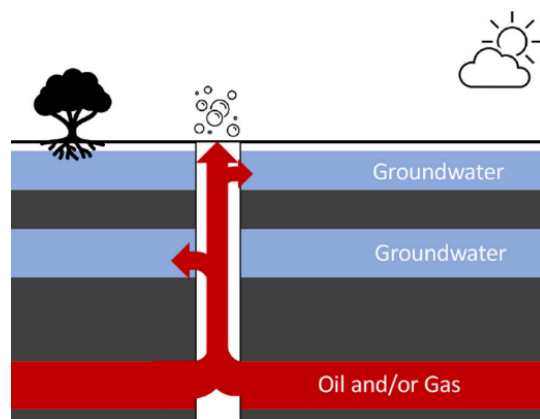


Figura N°8: Esquema de las posibles migraciones subsuperficiales, las vías de conexión entre yacimientos de petróleo y/o gas, con los acuíferos, la superficie del suelo y la atmósfera. (Kang et al., 2021)

Cuando el pozo no se encuentra suficientemente aislado de su entorno, los fluidos que contiene pueden migrar fuera del mismo afectando a diferentes compartimentos ambientales entre los que se encuentra:

- ✓ Entorno de la superficie: los fluidos pueden migrar hacia arriba y derramarse en la superficie del suelo, a menudo, formando costras viscosas.
- ✓ Agua subterránea: Los compuestos que componen al petróleo que presentan una baja solubilidad en agua son, se los conoce como líquidos en fase no acuosa (NAPL), se infiltran en el subsuelo y pueden alcanzar el agua subterránea.
- ✓ Atmósfera: los gases y vapores provenientes de los fluidos que contienen los pozos mal abandonados pueden llegar a la atmósfera.

Será necesario realizar estudios específicos en cada compartimento ambiental, suelo, agua, aire y/o biota, para los cuales se deben tener en cuenta propiedades fisicoquímicas tales como solubilidad, volatilidad, densidad, viscosidad y los mecanismos de transporte que permitan poder

comprender la trayectoria de los contaminantes desde la fuente emisora hasta el contacto con los distintos compartimentos.

Los principales contaminantes que pueden presentarse en los pozos abandonados de la actividad petrolera son compuestos de origen orgánico, pertenecientes al grupo de los hidrocarburos, que provienen del petróleo crudo.

El petróleo crudo se caracteriza por ser una mezcla compleja de hidrocarburos, que se componen de átomos de carbono y de hidrógeno. Además, tiene compuestos de azufre, nitrógeno y oxígeno y trazas de metales. A pesar de las amplias variaciones en la composición química de los crudos, sus composiciones elementales generalmente se encuentran dentro de los siguientes rangos estrechos (Yang et al, 2022):

- Carbono (84–87%),
- Hidrógeno (10–14%),
- Nitrógeno (0.1–2.0%),
- Oxígeno (0.05–1.5%),
- Azufre (0.05–6.0%), y
- Una pequeña cantidad de minerales y sales.

Estos hidrocarburos del petróleo existen naturalmente en estado gaseoso, líquido o sólido (Yang et al, 2022).

En general no es práctico cuantificar cada hidrocarburo individualmente debido a la complejidad de las mezclas, las cuales pueden variar su composición durante la exposición ambiental. Sin embargo, en principio, es útil medir la cantidad total de todos los hidrocarburos encontrados en muestras de suelo, agua, aire y/o biota.

Hidrocarburos totales de petróleo (TPH) es un término que se utiliza para describir una amplia familia de compuestos químicos que están formados casi enteramente de hidrógeno y carbono y provienen del petróleo crudo.

Los TPH tienen la capacidad de movilizarse, permitiendo la separación de sus componentes individuales según sus propiedades fisicoquímicas. Algunos de estos compuestos pueden adherirse a partículas en el suelo y mantenerse allí durante períodos prolongados, mientras que otros pueden ser degradados por microorganismos presentes en el suelo.

Además de los TPH, es útil la medición de las fracciones del petróleo crudo, las cuales se obtienen de dividir los TPH en grupos de hidrocarburos de petróleo que actúan de manera similar en

el suelo o el agua. Cada fracción contiene una gran cantidad de compuestos individuales. Se muestran las fracciones del petróleo crudo en la Figura N°9.



Figura N°9: Esquema de las estructuras predominantes en la mezcla de hidrocarburos del petróleo. Elaboración propia.

Los hidrocarburos del petróleo están caracterizados por su estructura, consisten en compuestos **alifáticos**: saturados de cadena lineal (alcanos), y cíclicos (cicloalcanos), y compuestos **aromáticos** conteniendo al menos un anillo bencénico en su estructura molecular.

Tanto los hidrocarburos alifáticos como los aromáticos se caracterizan por ser compuestos no polares o débilmente polares, por lo cual tienen una afinidad relativamente baja por el agua. Los compuestos no polares o débilmente polares tienen afinidad por las fases orgánicas hidrofóbicas en ácido húmico, de acuerdo a las fuerzas de Van der Waals o a la atracción hidrofóbica. Esto se traduce en una baja afinidad de estos compuestos orgánicos con el agua o sea en una baja solubilidad en ella (Riazi, 2005).

Los hidrocarburos alifáticos, pueden clasificarse, además, según la cantidad de carbonos que lo conforman o de la estructura que forman al agruparse los carbonos en:

- ✓ Parafinas volátiles: Es la fracción más volátil del crudo y por lo tanto la más susceptible de pérdidas abióticas por volatilización. Son n-alcanos e isoprenoides (alcanos ramificados) de

un tamaño de cadenas carbonadas que poseen entre 1 y 10 átomos de carbono (Gutiérrez Ramírez, 2017).

- ✓ Parafinas no volátiles: Son n-alcanos e isoprenoides (alcanos ramificados) de cadenas que poseen entre 11 a 40 átomos de carbono, aunque se han descrito cadenas más largas. Los componentes con cadenas que tienen entre 11 y 15 átomos de carbono son de volatilidad intermedia. (Gutiérrez Ramírez, 2017).
- ✓ Naftenos: Los compuestos más abundantes de esta familia son los cicloalcanos o ciclo parafinas. Esta familia engloba a los hópanos (Gutiérrez Ramírez, 2017).

Los grupos de hidrocarburos **aromáticos** más interesantes desde el punto de vista ambiental son: Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xilenos (BTEX), y los hidrocarburos aromáticos policíclicos, (PAHs por su sigla en ingles). Se los consideran tóxicos, esencialmente por su baja solubilidad en el agua, lo que prolonga su presencia en el ambiente y su difícil biodegradación (Castro Varela, 2007).

Los PAHs comprenden del 10 al 25% del petróleo crudo y son las fracciones más pesadas. La familia de los PAHs es un grupo de hidrocarburos que consisten en moléculas que contienen dos o más anillos aromáticos de 6 carbonos fusionados, se consideran compuestos orgánicos persistentes, por lo que pueden permanecer en el ambiente durante largos periodos de tiempo sin alterar sus propiedades tóxicas. Las propiedades semivolátiles de los PAHs les otorgan gran movilidad en el medioambiente (Luque, 2009).

La movilidad de los PAHs en el medio ambiente depende de las propiedades de cada uno de ellos en el agua, cuán fácilmente se disuelven en el agua y cuán fácilmente se evaporan en el aire. Por lo general, los PAHs no se disuelven fácilmente en el agua. Teniendo en cuenta las propiedades fisicoquímicas de los PAHs se espera que se adsorban sobre los sólidos en suspensión y sobre los sedimentos en el ecosistema acuático. En general, los PAHs de peso molecular más elevado se adsorben más fuertemente que aquellos de peso molecular más bajo (de Santana et al., 2014).

Cuanto mayor cantidad de anillos tenga el compuesto, mayor será la resistencia a la biodegradación. En general, los PAHs de 4 y 5 anillos son más difíciles de remover mientras que los de menor peso molecular son más biodegradables, más solubles en agua y más volátiles que de los de mayor peso molecular (Luque, 2009).

Además de la fracción principal de hidrocarburos, el petróleo también posee compuestos que contienen oxígeno, azufre, nitrógeno y cantidades traza de fósforo, así como una cantidad mínima de agua. El petróleo crudo también contiene una pequeña cantidad de metales pesados como el vanadio (V) y el níquel (Ni) (Yang et al, 2022).

El oxígeno, nitrógeno y azufre están a menudo asociados con la fracción de los asfáltenos (estructuras alifáticas y aromáticas de 100 a 300 átomos de carbono con sustituyentes alquílicos, sulfuros, nitrógeno y oxígeno unidos conformando grandes estructuras heterocíclicas), más las resinas (agregados de piridinas, quinolinas, carbazoles, tiofenos, sulfoxidos y amidas). Estos dos constituyentes son recalcitrantes o bien se metabolizan muy lentamente por largos períodos. La diferencia entre las resinas y los asfaltenos radica en mayor peso molecular, aromaticidad y contenido de nitrógeno, azufre y oxígeno por parte de los asfaltenos (Luque, 2009).

El tipo de azufre que se puede encontrar en el petróleo es de tipo orgánico e inorgánico. La presencia de azufre en el petróleo es perjudicial para el ambiente y la salud humana, debido a que la combustión produce gases que contribuyen a la lluvia ácida. El azufre es el heteroátomo más importante del petróleo y se puede encontrar en compuestos cíclicos y no cíclicos como mercaptanos ($R - S - H$) y sulfuros ($R - S - R'$), donde R y R 'son grupos alquilo. (Riazi, 2005)

El azufre se encuentra en el gas natural generalmente en forma de sulfuro de hidrógeno (H_2S). Es un gas altamente contaminante que proviene de la descomposición de hidrocarburos sulfurados. El H_2S puede originarse también a partir de la actividad de las bacterias sulfatoredutoras en condiciones de anaerobiosis. (Riazi, 2005)

El tipo de nitrógeno que contiene el petróleo es orgánico y se encuentra en compuestos aromáticos, como la piridina y los heterociclos aromáticos como el indol. Al igual que el azufre, la presencia de nitrógeno en petróleo resulta ser perjudicial, ya que la combustión del nitrógeno lleva a la formación de óxido de nitrógeno y junto con el azufre provocan lluvia ácida (Viñas Canals, 2005)

Finalmente, el vanadio y níquel son los metales más abundantes en el petróleo y en ocasiones pueden alcanzar concentraciones de varios miles de partes por millón. Pueden estar presentes ya sea como metales libres o bien formando complejos en los núcleos de las porfirinas (Botello, 2005).

En la Tabla N°2 se muestran de manera resumida las características de cada grupo, según los componentes en el petróleo. Y en la Figura N°10 siguiente se muestran ejemplos de estructuras de cada uno de los grupos descritos anteriormente.

Tabla N°2: Componentes en el petróleo y sus características. Adaptación de (García Cuellar, 2006)

Grupo	Sub Grupo	Características
Alifáticos	Alcanos: n-alcanos (parafinas) están directamente encadenados; los isoalcanos están ramificados Cicloalcanos Ceras: grandes compuestos saturados	Compuestos formados por enlaces simples, lineales o cíclicos. Alta tasa de degradación microbiana No polares Baja solubilidad en agua
Aromáticos	Monoaromaticos (BTEX), un solo anillo de benceno Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs): 2 o más anillos de benceno	Compuestos formados por anillos de benceno Muy lenta degradación microbiana/fisicoquímica No polares Muy baja solubilidad en agua
Compuestos polares	Resinas: compuestos de bajo peso molecular Asfaltenos: compuestos de alto peso molecular.	Hidrocarburos con heteroátomos de N, S o O Más lenta degradación microbiana que los compuestos saturados Alta solubilidad en agua

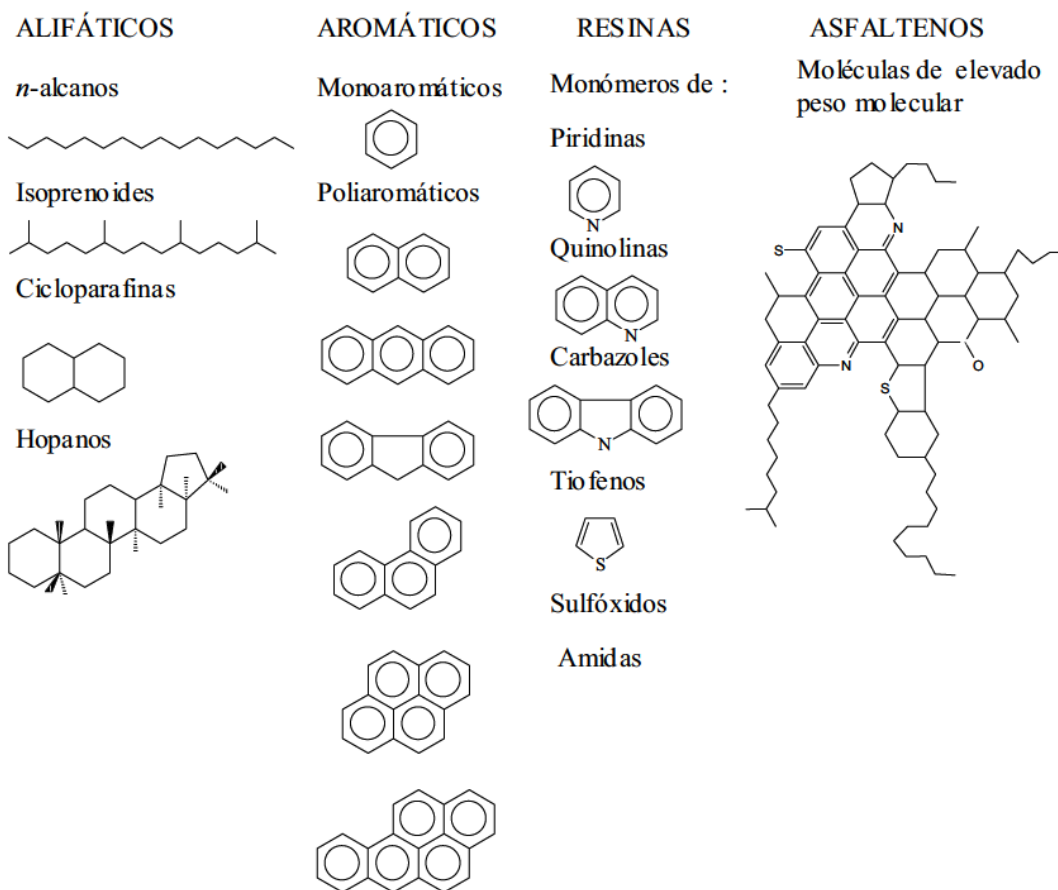


Figura N°10: Estructuras químicas de diferentes componentes mayoritarios de un crudo de petróleo. (Viñas Canals, 2005)

Petróleo en sistemas de aguas subterráneas y suelos pocos profundos

Los NAPL son inmiscibles en agua y existen como una fase separada en el subsuelo debido a su baja solubilidad. Estos se pueden dividir en NAPL ligeros (LNAPL) y NAPL densos (DNAPL) según su densidad (Xu et al, 2022).

Cuando se produce una liberación de NAPLs al subsuelo, bien por derrame o fuga, éstos se mueven hacia abajo a través del subuelo. Los LNAPLs se retienen generalmente, en la parte superior del nivel freático, mientras que los DNAPLs penetran a la zona saturada y migran hacia abajo hasta que son retenidos por una capa impermeable. Una vez que se liberan al medio ambiente, los LNAPLs migran verticalmente hasta que la saturación residual agote el líquido o hasta que se alcanza la franja capilar (Rosales Aranda, 2013).

Algunos NAPL tienden a quedar atrapados en espacios porosos durante la migración, representando una fuente de contaminación a largo plazo (Xu et al., 2022).

La representación de plumas de contaminación por LNAPL y DNAPL puede verse en la figura N°11.

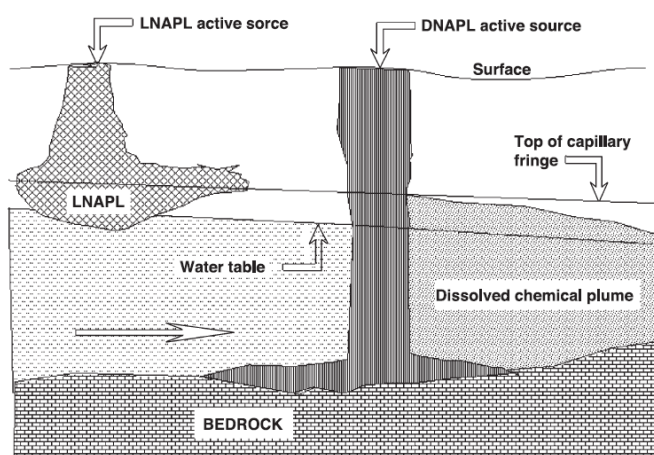


Figura N°11 Representación de plumas de contaminación por LNAPL y DNAPL. (Mulligan y Yong, 2004)

Migración de gases y vapores

Los pozos ofrecen numerosas rutas potenciales para la migración de gases como el CO₂, CH₄, H₂S, etc. y/o vapores provenientes de los hidrocarburos líquidos y sólidos más volátiles. Estas rutas se pueden observar en la Figura N°12:

- A- entre la tubería de revestimiento y el cemento del espacio anular,
- B- entre el tapón de cemento y la tubería de revestimiento,
- C- a través del tapón de cemento y el espacio poroso del cemento del espacio anular como resultado del deterioro,
- D- a través de la tubería de revestimiento como resultado de la corrosión,

E- a través de las fracturas presentes en el cemento del espacio anular,

F- entre el cemento del espacio anular y las rocas.

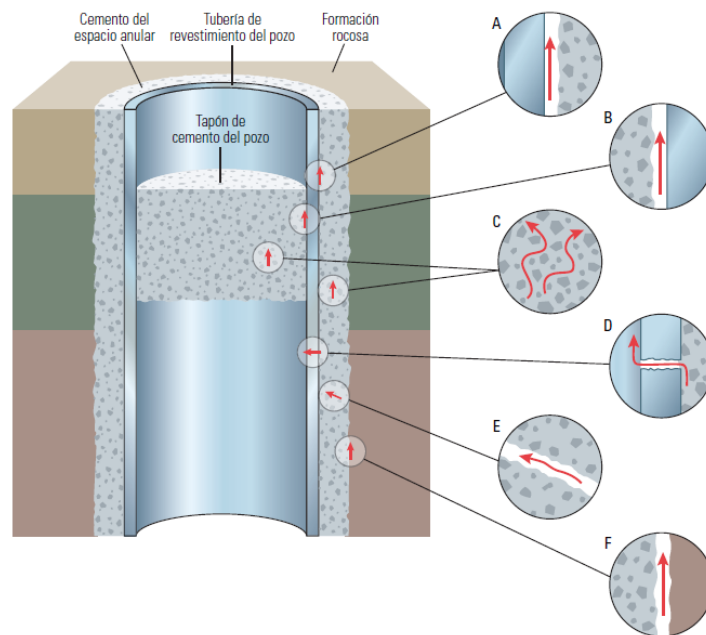


Figura N°12 Migración de gases. (Ansarizadeh et al., 2015)

Comúnmente los gases mencionados anteriormente migran hacia arriba para escapar a la superficie terrestre o se acumulan en estructuras geológicas poco profundas delimitado por estratos de baja permeabilidad.

Además de los contaminantes ya mencionados es necesario considerar la posible presencia de:

- Aguas de formación que, a menudo, tienen salinidad comparable al agua de mar y los fluidos utilizados durante la explotación petrolera que a menudo tienen una composición química incierta la cual varía según la historia de cada pozo. Estos podrían migrar a acuíferos de agua dulce.
- Otros metales y/o radionucleídos presentes en algunas formaciones naturales, incluido el uranio y el radio (Kang et al., 2021).

En la Tabla N°3 se muestran los posibles contaminantes según su estado de agregación en condiciones ambientales superficiales y el compartimento impactado.

Tabla N°3. Contaminantes de acuerdo al estado de agregación y el compartimento ambiental. Elaboración Propia

Compartimento	Estado de agregación de los contaminantes		
	Sólidos	Líquidos	Gaseosos
Aire	Hidrocarburos pesados que llegan al aire a partir de la evaporación de los livianos en los que originariamente estaban disueltos	Hidrocarburos livianos que son líquidos a las temperaturas y presiones superficiales y que pueden estar en el aire como gotitas fácilmente evaporables	Hidrocarburos livianos evaporados (ej. BTEX) y los que son gaseosos a temperatura y presión superficial (ej. CH ₄ , H ₂ S, CO ₂)
Agua	Aquellos hidrocarburos pesados que son inmiscibles con el agua estarán en una fase separada (ej. en el material particulado en suspensión) o disueltos en los hidrocarburos líquidos inmiscibles (ej. LNAPL o HNAPL). Los que son miscibles se disolverán en el agua (ej. componentes polares).	Hidrocarburos líquidos que son inmiscibles con el agua estarán en una fase separada (ej. formando emulsiones) o formando parte de los LNAPL o los HNAPL). Los que son miscibles se disolverán en el agua (ej. componentes polares).	Componentes gaseosos solubles en agua (ej. CO ₂ y H ₂ S) permanecen en fase acuosa. Los hidrocarburos gaseosos, dada su alta movilidad y baja solubilidad en agua, no permanecen en fase acuosa y van a la atmósfera (ej. CH ₄).
Suelo	En el suelo superficial, formando costras alrededor del lugar del derrame y en profundidad pegados a las partículas de suelo. En los sedimentos de los cursos de agua formando parte del material sólido.	En el suelo superficial, como mezclas de líquidos viscosos que con el tiempo y al evaporarse los más volátiles tienden a formar costras. En profundidad adsorbidos a las partículas minerales del suelo o absorbidos en la materia orgánica del suelo.	Si el derrame no es superficial los gases migrarán hacia las regiones de menor presión hasta llegar a la superficie. Si el derrame es superficial cambian rápidamente de compartimento y va a la atmósfera.
Biota	Los hidrocarburos sólidos pueden entrar en los organismos vivos, principalmente por ingestión o a través de la respiración del material particulado del aire.	Los hidrocarburos miscibles con el agua entran a través de la ingestión de agua y/o respiración (organismos acuáticos). Los hidrocarburos no miscibles con el agua pueden penetrar las paredes lipídicas de los organismos vivos.	Los gases penetran en los organismos a través de la respiración si están en el aire. Y si están disueltos en agua a través de la ingestión, contacto dermal o a través de la respiración (organismos acuáticos).

Efectos de los contaminantes

Los pozos de petróleo que no se abandonan adecuadamente presentan una amenaza para la salud humana y el ambiente. Cuando una sustancia se libera al ambiente, no siempre conduce a una exposición directa. Los efectos sobre la salud ante la exposición a estas sustancias peligrosas dependen de varios factores que incluyen, la dosis, el tiempo y la forma de exposición, la presencia de otras sustancias químicas, así como las características y los hábitos de la persona (ATSDR, 1999).

Los riesgos potenciales están estrechamente ligados a la ubicación del sitio contaminado y las áreas de influencia, considerando además los receptores ambientales, los mecanismos de transporte y la acumulación en dichos receptores. Para que exista un riesgo es necesario estar expuesto a una sustancia contaminante y que esta exposición represente un peligro para la salud. En la Figura N°13, se observa que para que exista riesgo deben coexistir tres componentes fundamentales: una fuente contaminante, los receptores y las vías de exposición (transporte), (Castro Varela, 2007).



Figura N°13 coexistencia de las tres variables que determinan el riesgo en la salud humana.
(Rhim y Anacona, 2004)

La correcta evaluación de los riesgos para la salud humana y el ambiente requiere la comprensión de la toxicología de los contaminantes involucrados (Pinedo Alonso, 2014).

En los pozos en situación de abandono, los principales contaminantes son los hidrocarburos del petróleo y el gas (HCs).

Los TPH se dividen en grupos de hidrocarburos basado en el comportamiento similar en el suelo y agua, de esta manera se puede tener una idea más clara acerca de lo que les sucede a estas sustancias en el ambiente. Estos grupos se conocen como fracciones de hidrocarburos del petróleo. Cada fracción contiene muchos componentes individuales.

Los hidrocarburos saturados (alcanos y cicloalcanos) los cuales pueden ser degradados por diferentes procesos físicos, químicos o biológicos, al igual que los compuestos orgánicos polares, pero los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HPA's), son considerados contaminantes de interés, debido a las afectaciones que ocasiona tanto a la salud humana como al ambiente (Araujo et al., 2016) por su persistencia.

Los posibles efectos de contaminación, ya sea por ocurrencias o por la perspectiva potencial de la manifestación del riesgo, deben ser considerados (Rivas, 2008). Estos son:

- Contacto con sustancias peligrosas. Asociado a inhalación de gas proveniente del reservorio, la interacción y contacto de las personas con la surgencia del hidrocarburo.
- Derrame y contaminación de hidrocarburos, afección del entorno inmediato por derrames de hidrocarburos. Los factores de afección en estos casos pueden ser ambientales: aire, agua, suelo, como también bienes personales.
- Contacto y afección de terceros, con la instalación del pozo, componentes que hayan quedado de un abandono no realizado según la normativa vigente.
- Contaminación de napas freáticas. Posible filtración de los fluidos provenientes de la capa productiva con la napa freática.
- Incendios y/o explosiones: dada la posibilidad de emisiones de hidrocarburos, fuga de gases, sustancias combustibles.

La peligrosidad del fenómeno va a depender en parte de factores históricos y técnicos asociados a cada pozo en particular. La cual está dada inicialmente por la vinculación entre la superficie y la capa productiva. La surgencia a la superficie de los hidrocarburos asociados a la formación puede manifestarse en al menos una de las formas mencionadas.

Efectos sobre la salud humana

Los efectos sobre la salud humana pueden variar según el tipo de TPH y la ruta de exposición. Generalmente, los compuestos químicos (principalmente hidrocarburos) presentes en el petróleo pueden causar irritación en la piel y los ojos si hay contacto directo. La inhalación de vapores puede provocar irritación en las vías respiratorias y el tracto respiratorio superior, así como mareos y dolores de cabeza. En algunos casos, la exposición a largo plazo a TPH puede estar asociada con efectos más graves, como daños en el hígado, los riñones y el sistema nervioso central (Ferguson et al, 2020).

Los hidrocarburos poseen varias vías de entrada a nuestro organismo. Pueden entrar y salir del cuerpo a través de la respiración; mediante la ingesta de agua, alimentos o tierra residual mediante la ingesta de agua, alimentos o tierra residual; o mediante contacto dérmico (Pinedo Alonso, 2014). La mayoría de estos hidrocarburos difunden rápidamente a la corriente sanguínea cuando se introducen por vía respiratoria en forma de vapor o aerosol o cuando son ingeridos por vía oral (ASTDR, 1999). En la Figura N° 14 se muestran las principales rutas de exposición para la salud humana.



Figura N°14: Principales rutas de exposición hacia las personas.
(Pinedo Alonso, 2014)

La respiración y la ingesta de los hidrocarburos son medios de absorción más rápidos y en mayores cantidades que el contacto dérmico. La mayoría de los hidrocarburos se eliminan rápidamente del organismo humano en la orina o en el aliento, sin embargo, existen algunos que pueden producir diversos efectos adversos en el organismo (ATSDR, 1999).

Algunos componentes de los hidrocarburos también pueden afectar la sangre, el sistema inmunitario, el hígado, el bazo, los riñones, los pulmones y el feto (Pinedo Alonso, 2014). Algunos componentes pueden irritar la piel y los ojos.

La mayoría de los efectos sobre la salud están basados en estudios específicos de compuestos o productos del petróleo. La toxicidad parece verse incrementada en la serie alcanos-alquenos-aromáticos. Los datos disponibles de toxicidad de cicloalcanos y cicloalquenos sugieren que estos compuestos son más tóxicos que los alcanos, llegando a ser en algunos casos más tóxicos que los aromáticos (Pinedo Alonso, 2014).

El número de átomos de carbono que posee un hidrocarburo modifica los efectos a la salud humana (Pinedo Alonso, 2014). Generalmente los compuestos más pequeños, como el grupo de los BTEX, pueden llegar a afectar el sistema nervioso de seres humanos (ATSDR, 1999).

Los PAHs se encuentran en la lista de contaminantes prioritarios de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de EE. UU. (EPA, por sus siglas en inglés). Aunque los efectos de salud causados por cada uno de manera individual no son exactamente los mismos. Se han considerado los siguientes 17 PAHs en forma grupal: acenafteno, acenaftileno, antraceno, benzo[a]antraceno, benzo[a]pireno, benzo[e]pireno, benzo[b]fluoranteno, benzo[g,h,i]perileno, benzo[j]fluoranteno, benzo[k]fluoranteno, criseno, dibenzo[a,h]antraceno, fluoranteno, fluoreno, indeno[1,2,3-c,d]pireno, fenantreno, pireno, (ATSRD, 2016).

Existen algunos estudios que han buscado recalcar la importancia de los PAHs como constituyentes del material particulado (PM, por sus siglas en inglés) del aire y como agentes contaminantes relevantes en el recurso hídrico (ATSDR, 2016). La partición atmosférica de compuestos PAHs entre las fases particulada y gaseosa influye fuertemente en su destino y transporte en la atmósfera y la forma en que entran en el cuerpo humano.

Muchos PAHs tienen propiedades tóxicas, mutagénicas y / o cancerígenas. Los PAHs son altamente solubles en lípidos y por tanto se absorben fácilmente en el tracto gastrointestinal de los mamíferos. Se distribuyen rápidamente en una amplia variedad de tejidos con una marcada tendencia a la localización en la grasa corporal.

En la Tabla N°4 se presenta un resumen de los distintos tipos de exposición humana a la contaminación por hidrocarburos, sus peligros y acciones a tomar.

Tabla N°4: Tipos de exposición humana a la contaminación por hidrocarburos. (Castro Varela, 2007)

Tipo de exposición	Peligros/síntomas agudos	Primeros auxilios
Inhalación	Vértigo somnolencia, vómitos, pérdida del conocimiento.	Acercar a la persona a un ambiente donde pueda respirar aire limpio, requiere reposo.
Piel	Absorción, enrojecimiento, quemaduras cutáneas.	Quitar las ropas contaminadas Aclarar y lavar la piel con abundante agua y jabón.
Ojos	Enrojecimiento, dolor, quemaduras profundas graves.	Enjuagar con abundante agua durante varios minutos y proporcionar asistencia médica
Ingestión	Dolor abdominal, sensación de quemazón, diarrea, náuseas, shock o colapso.	Enjuagar la boca y proporcionar asistencia médica.

Efectos sobre el ambiente

Los HCs liberados pueden moverse a través del suelo al agua subterránea. Los compuestos individuales pueden luego separarse de la mezcla original, dependiendo de las propiedades químicas del compuesto. Algunos de estos compuestos se evaporan en el aire y otros se disuelven en el agua subterránea y se alejan del área de liberación.

Como se mencionó, los HCs pueden afectar y migrar entre los distintos compartimentos ambientales:

- Suelo: el intercambio gaseoso con la atmósfera se ve afectado; además se producen procesos de penetración y percolación los cuales ocasionan pérdida de fertilidad y la capacidad de biodegradar; del mismo modo aumentan la salinidad y generan toxicidad (Ortiz Díaz y Silva Leal, 2019).
- Agua: la densidad de los hidrocarburos evita que penetren los rayos del sol y reduce la transferencia de oxígeno, afectando a las comunidades que viven en las profundidades de los cuerpos de agua (Ortiz Díaz y Silva Leal, 2019).
- Aire: los hidrocarburos generan emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, acrecentando la problemática del calentamiento global (Ortiz Díaz y Silva Leal, 2019).

Con relación al suelo, puede decirse que éste es un sistema dinámico, con un “papel vital en el medio ambiente porque se encuentra en la interfaz con otros medios: atmósfera, biosfera, aguas superficiales y subterráneas, subsuelo”. Un suelo se considera contaminado cuando las condiciones físicas, químicas y biológicas originales, implican una modificación (Ortiz y Silva Leal, 2019).

Los estudios realizados por Ortiz Díaz y Silva Leal (2019), señalan que conforme a la composición del suelo y a la cantidad de materia orgánica existente se puede determinar el impacto de los hidrocarburos del petróleo y la extensión del daño en el ecosistema. Además de esto, señalan que la contaminación por hidrocarburos de petróleo ejerce efectos adversos sobre las plantas indirectamente, generando minerales tóxicos en el suelo disponible para ser absorbidos. También indican que , conduce a un deterioro de la estructura del suelo; pérdida del contenido de materia orgánica y pérdida de nutrientes minerales del suelo, tales como potasio, sodio, sulfato, fosfato y nitrato de igual forma el suelo se expone a la lixiviación y erosión (Ortiz Díaz y Silva Leal, 2019).

El vertido de hidrocarburos en el suelo genera un cambio en el equilibrio existente de éste, específicamente en la relación carbono-nitrógeno (C:N) y carbono – fósforo (C:P), resultando

desfavorable para el desarrollo y crecimiento de los microorganismos debido al exceso de carbono al que se exponen el suelo y los microbios presentes (Abdel-Shafy y Mansour, 2016).

Las tasas de transformación del petróleo y de otros hidrocarburos en el ambiente implican complejos mecanismos, que dependerán de la naturaleza y la cantidad de petróleo o hidrocarburo presentes en el suelo.

La biodegradación del petróleo depende de la proporción de las fracciones de hidrocarburos presentes. La estructura lineal de los hidrocarburos alifáticos los hace la fracción con más posibilidades de ser biodegradable, en cambio la toxicidad dada por los hidrocarburos aromáticos, principalmente los de un anillo, y la baja biodisponibilidad de los hidrocarburos poliaromáticos, dificulta su biodegradación. La fracción polar es la más difícil de ser utilizada como fuente de carbono por los microorganismos, sin embargo, es la fracción del petróleo que presenta menos toxicidad en el ambiente principalmente por su baja solubilidad en agua, lo que representa una baja tasa de migración de este tipo de compuestos (Pucci et al, 2011).

Cuando se produce una liberación directa de hidrocarburos al agua a través derrames o fugas, ciertas fracciones flotarán en el agua y formarán películas superficiales delgadas, este comportamiento es de la fracción liviana de líquidos no acuosos (LNAPL).

Las fracciones más pesadas (DNAPL) se acumularán en el sedimento, en el fondo del agua, lo que puede afectar peces y organismos bentónicos que se alimentan del fondo. Es importante mencionar que algunos organismos que se encuentran en el agua (principalmente bacterias y hongos) pueden descomponer algunas de las fracciones de los TPH.

Los NAPL son compuestos que representan un riesgo para la salud humana y para la calidad ambiental debido a que pueden permanecer en el entorno durante varios años, esto ocurre porque su movilidad característica dificulta la localización y remediación de los suelos que contienen estos contaminantes (Jiménez Velasco, 2021).

La contaminación de las aguas por hidrocarburos en los sistemas de almacenamiento, en las fuentes de abastecimientos subterráneos y superficiales, así como en otros cuerpos de agua es un hecho que ocurre con relativa frecuencia. Este tipo de contaminación produce un cambio en las características organolépticas del agua que induce al rechazo de los consumidores y su ingestión representa un riesgo para la salud (Ortiz Díaz y Silva Leal, 2019).

En el **aire** se presentan efectos globales por presencia de los Gases de efecto invernadero (GEI). Entre los principales gases de efecto invernadero se encuentran dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄). Estos gases absorben la radiación solar entrante de onda corta (<4μm).

Igualmente tienen la capacidad de absorber parte de la energía irradiada por la tierra a unas longitudes de onda más largas ($>4 \mu\text{m}$), calentando la atmósfera y radiando de vuelta a la tierra y hacia el espacio exterior. Tienen el efecto de una manta térmica que eleva la temperatura. Se puede observar en la Figura N°15 una representación de la incidencia de las radiaciones mencionadas.

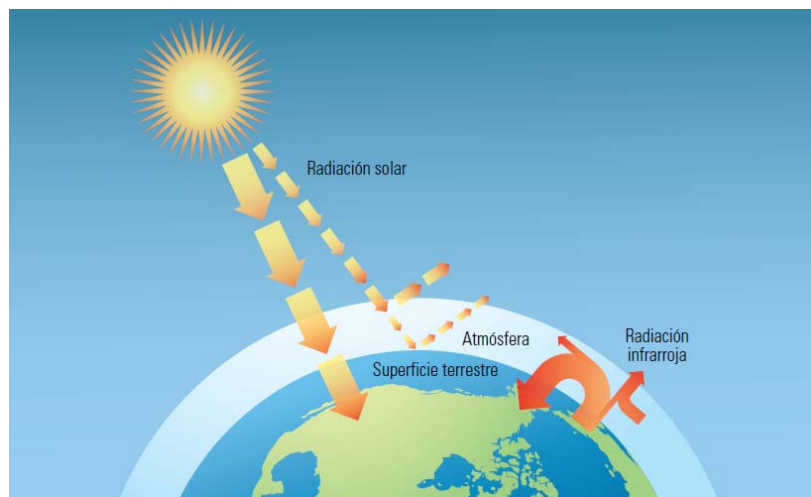


Figura N°15: Radiaciones y Emisiones fugitivas. (Ansarizadeh et al, 2015)

El efecto de cada gas sobre el cambio climático depende de tres factores principales: concentración, tiempo de permanencia en la atmósfera, fuerza de afección a la atmósfera. Algunos gases son más efectivos que otros en el calentamiento del planeta y en "espesar la manta de la Tierra". Para cada gas de efecto invernadero, se ha calculado un Potencial de Calentamiento Global (GWP por sus siglas en inglés) para reflejar cuánto tiempo permanece en la atmósfera (en promedio) y con qué fuerza absorbe energía. Los gases con un GWP más alto absorben más energía por kilogramo, que los que tienen un GWP más bajo y, por lo tanto, contribuyen más al calentamiento de la Tierra (EPA, 2022).

El CH_4 es el GEI más abundante después del CO_2 , y representa alrededor de 11% de las emisiones globales. Es considerado un "forzador del clima a corto plazo", lo que significa que su duración es relativamente corta en la atmósfera, con aproximadamente 12 años. Si bien el CH_4 permanece en la atmósfera durante un período más corto de tiempo y se emite en cantidades más pequeñas que el CO_2 , su potencial de calentamiento global (PCG) es entre 28 y 34 veces mayor de acuerdo a publicaciones del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). (Global Methane Initiative)

Legislación

En este apartado se hará un desarrollo de las normas que ordenan la problemática ambiental vinculadas a los pozos en situación de abandono y su incidencia en la planificación urbana. En la tabla N°5 se resumen las normas a tratar en el orden nacional, provincial, y municipal, como también los tratados y acuerdo internacionales.

Tabla N°5: Legislación vinculada a la problemática ambiental planteada.

Fuentes: www.infoleg.gov.ar; www.chubut.gov.ar/digesto; www.digesto.comodoro.gov.ar

Normativa Nacional	
Constitución Nacional	Art 41, 43, 75, 124, Reforma 1994
Ambiental/ Ordenamiento Territorial	LGA 25.675/02, 2002 Ley 24.585 Ley Nacional de Protección Ambiental para la actividad Minera, 1995
Hidrocarburos	Ley N° 1919, Código de Minería, 1887 Decreto 33598/33 de 1933 Ley N°17319/67, Ley Nacional de Hidrocarburos, 1967, y sus modificatorias, Ley N° 24145, Ley de Federalización de los Hidrocarburos, 1992 y Ley 26197/07 “Ley corta”, 2007. Decreto N° 456/97, 1997 Res. 05/96 de la Secretaría de Energía, Transporte y Comunicaciones de la Nación, 1996
Normativa Provincial	
Constitución Provincial	Capítulo VI “Medio Ambiente”. Art 109
Ambiental Ordenamiento territorial	Ley XI -No 35 Código Ambiental Provincial, 2010 Decreto 10/95
Hidrocarburos	Ley XVII (102) – Ley de Hidrocarburos Res. 11/04, 2004
Normativa Municipal	
Carta Orgánica Municipal	Art 30, 31
Ambiental Ordenamiento Territorial	Ordenanza 3771/91 Ordenanza 8095/04 Ordenanza 3614/90
Hidrocarburos	Ordenanza 7645/02

Marco normativo Nacional

La **Constitución Nacional** (CN) es la ley suprema. En ella se establecen los derechos y garantías fundamentales de los habitantes de la Nación y la forma de organizar los poderes del Estado. Existen algunos Tratados Internacionales de Derechos Humanos que tienen igual jerarquía que la CN. Esto último, a partir de la reforma constitucional de 1994, respaldado por el Art. 75 inc. 22 que los tratados y otros instrumentos internacionales de derechos humanos enumerados expresamente, tienen jerarquía constitucional. Incluso, la CN prevé de qué modo deben sancionarse

los nuevos tratados de derechos humanos en el futuro, a efectos de que revistan la jerarquía Constitucional (Henderson, 2004).

El impulso hacia el institucionalismo ambiental moderno en la Argentina comenzó con la Cumbre de la Tierra en 1992. (Nonna, 2017). Siendo en la reforma de la CN en el año 1994 que se contempla específicamente el tema de los recursos naturales en cuanto a su dominio y uso racional, como así también la cuestión ambiental desde una perspectiva integral y moderna incluyendo el derecho a un ambiente sano siguiendo la Declaración de Estocolmo del año 1972. (Nonna, 2017)

En el **Art. 41** CN el Derecho Ambiental es aceptado, esto se da con la reforma de 1994, mediante nuevos derechos y garantías. Adoptando el concepto nuevo y globalizador de “Ambiente” entendido como el entorno en el que se vive y en el que desarrollamos todas nuestras actividades en el cual interactuamos con otros componentes (Nonna, 2017). Así mismo el **Art. 41** CN consagra el derecho de todos los habitantes a un ambiente “sano y equilibrado”, y establece que el daño al ambiente generara “*prioritariamente la obligación de recomponer*”, incluyendo una concepción amplia de lo que se denomina ambiente, abarcando no solo los recursos naturales, sino también el patrimonio cultural de la nación.

En el tercer párrafo del **Art. 41** CN se delega a la Nación la facultad de dictar “normas de presupuestos mínimos” para la protección del ambiente. Las provincias podrán sobre esas bases mínimas dictar normas complementarias, sin que alteren las jurisdicciones locales.

El **Art. 124** CN establece que corresponde a las provincias el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio. Debe interpretarse que el dominio de los recursos naturales corresponde a la Nación o a las provincias según el territorio en que los mismos se encuentren.

La Ley General del Ambiente (**LGA**) **25675** es la principal norma de presupuestos mínimos. Esta norma establece el estándar de calidad ambiental que debe ser respetado por la legislación local y cumplido por cualquier proyecto en territorio argentino más allá de lo que establezca la normativa local. Se introdujo la categoría daño ambiental colectivo y con las leyes de presupuestos mínimos se abrió la posibilidad de aportar a la protección de los bienes colectivos según su especificidad, aunque faltaría sobre el patrimonio cultural o el paisaje.

Como Ley marco, la **LGA** plantea objetivos, principios e instrumentos de la política ambiental nacional constituyendo criterios y herramientas claves para que los legisladores provinciales y las administraciones de los diversos niveles puedan ejercer su poder de policía ambiental y para que la sociedad esté informada y participe en los procesos de decisión. Explícitamente en su **Art. 2 inc. a** plantea como objetivo asegurar la preservación, conservación,

recuperación y mejoramiento de la calidad de los recursos ambientales, tanto naturales como culturales, en la realización de las diferentes actividades antrópicas.

Las leyes de presupuestos mínimos y los decretos y resoluciones nacionales que las han reglamentado en el marco de las competencias del Gobierno Federal, constituyen lo que podemos denominar normativa ambiental de carácter nacional.

La **LGA** enumera una serie de instrumentos de gestión ambiental, los que son abordados en diferentes capítulos a través de su articulado; ellos son:

- a) El ordenamiento ambiental del territorio,
- b) La institución de la Evaluación de Impacto Ambiental,
- c) El sistema de control sobre el desarrollo de las actividades antrópicas
- d) El acceso a la información pública y el sistema de información ambiental
- e) La participación ciudadana en el tratamiento de cuestiones ambientales y la audiencia pública.

En el **Art. 27**, se define el daño ambiental como toda alteración relevante que modifique negativamente el ambiente. El daño ambiental se restablecerá al estado anterior a su producción de acuerdo al **Art. 28** de la misma Ley.

Es importante mencionar dos principios claves: el precautorio y el preventivo. Los cuales son aplicables al instrumento de ordenamiento ambiental del territorio, considerando los riesgos de la problemática planteada.

El principio **precautorio** desestima la ausencia de información o certeza científica como razón para postergar la adopción de medidas eficaces, frente a un peligro grave o irreversible (riesgo) en el ambiente, en la salud, o en la seguridad pública. La precaución apunta a impedir la creación de un riesgo con efectos todavía desconocidos y, por lo tanto, impredecibles (Cafferatta, 2005).

El principio de **prevención** impone la atención de las causas y fuentes de los problemas ambientales en forma prioritaria e integrada, tratando de prevenir la ocurrencia de efectos negativos sobre el ambiente. La prevención tiende a evitar un daño futuro pero cierto y mensurable. (Cafferatta, 2005)

Otro principio también aplicable es el principio de **progresividad**, el cual busca el avance gradual, constante y sistemático hacia la más plena realización de los derechos humanos ambientales. Busca la evolución sostenida de la normativa mediante medidas sucesivas y continuas

cada vez más favorables, y con ello asegurar las condiciones ambientales más aptas para las generaciones presentes y futuras. (Peña Chacón, 2020)

En materia de Hidrocarburos, en los **Art. 2 y Art. 3**, Título I, del Código de Minería (**Ley N° 1919**) establece que las minas se dividen en tres categorías. En la cual los hidrocarburos se encuentran en la categoría “Minas de las que el suelo es un accesorio, que pertenecen exclusivamente al Estado, y que sólo pueden explotarse en virtud de concesión legal otorgada por autoridad competente”. El **Art. 12** establece que las minas son inmuebles. Como así también se consideran inmuebles las cosas destinadas a la explotación con el carácter de perpetuidad. En el **Art. 18**, las minas se conceden a los particulares por tiempo ilimitado.

Ley Nacional de Hidrocarburos, N° 17319. En el **Art. 1** establecía que los recursos Hidrocarburíferos líquidos y gaseosos situados en el territorio de la República Argentina y en su plataforma continental pertenecían al patrimonio inalienable del estado nacional. Esta ley tiene sus modificatorias de acuerdo a las leyes N° 24145 y N° 26197. La Ley N° 24145 de 1992 transforma a YPF en una Sociedad Anónima de capital abierto; además, otorga a las provincias la potestad de negociar sus yacimientos, de ahí que la reforma de 1994 en su **Art. 124 CN** dice: corresponde “a las provincias el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio”.

El Decreto N° 456/97 aprueba el texto ordenado del Código de Minería e incorpora la modificación de la Ley N° 24585. La Ley N° 24585 sancionada en 1995 establece una serie de modificaciones al Código de Minería a los efectos de llevar adelante la protección del ambiente y la conservación del patrimonio natural y cultural que pueda ser afectado por la actividad minera. Incorpora además el instrumento de Informe de Impacto Ambiental y una sección completa referida a la protección ambiental en la actividad minera en todas sus etapas.

Esta Ley, en relación a la Declaración de Impacto Ambiental, establece en el **Art 26** que toda actividad minera debe ser precedida por una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA). Este proceso implica evaluar los posibles efectos ambientales que pueda tener la actividad minera y adoptar medidas para prevenir, mitigar o compensar dichos impactos.

En el **Art. 41**, esta ley establece que las empresas mineras son responsables de la rehabilitación y el cierre de las minas una vez que termina la explotación. Esto incluye medidas para restaurar el área afectada y garantizar que no queden pasivos ambientales significativos después de la actividad minera.

El **Art. 50**, dice que las actividades mineras estarán sujetas a fiscalización y control por parte de la autoridad minera y la autoridad ambiental competente, con el objeto de asegurar el cumplimiento de las normas ambientales y evitar daños al ambiente.

La ley además promueve la participación Ciudadana en el **Art. 54** dice: "La autoridad de aplicación deberá promover la participación ciudadana en los procesos de evaluación de impacto ambiental, incluyendo la posibilidad de que las organizaciones no gubernamentales y los vecinos presenten observaciones, comentarios y propuestas."

En cuando al procedimiento de abandono de pozos, el **Decreto 33598/33** en su **Art. 36** establece las distancias mínimas al ubicar cualquier pozo petrolero: 60 m entre el pozo y las viviendas. Respecto al abandono de pozos en su **Art. 66** establece que será obligación de los concesionarios, antes de abandonar un pozo, ejecutar todos los trabajos necesarios y con los métodos aprobados por la inspección minera para aislar las aguas encontradas en la perforación evitando que puedan penetrar en las formaciones conteniendo gas o petróleo, y proteger debidamente las aguas potables o aptas para irrigación, de la contaminación de sustancias nocivas.

En sus **Art. 67 y 68** establece los canales de aviso, control y aprobación de los trabajos de abandono por parte de la inspección. No se establecen criterios técnicos o procedimientos para la realización de abandono de pozos.

Actualmente el procedimiento de abandono de pozos hidrocarburíferos, se rige por la **Res. 5/96** de la Secretaría de Energía, Transporte y Comunicaciones de la Nación la cual es una norma que, en líneas generales, dispone diferentes categorías de pozos, plazos de abandono y la obligación de las empresas permisionarias o concesionarias de presentar, cronograma anual de actividades de abandono de pozos como el informe anual de actividades llevadas a cabo durante el año precedente. También da estipulaciones precisas para el procedimiento de taponamiento en caso de abandono de pozos de hidrocarburos. En ella se establecen los criterios ambientales a adoptar en estas operaciones.

Esta norma clasifica los abandonos de pozos en temporarios y definitivos. Los abandonos temporarios son aquellos que se realizan cuando el operador / concesionario prevé su reutilización. La norma otorga amplias facultades al concesionario para decidir qué tipo de abandono realizar, con justificación en razones operativas, técnicas y / o comerciales. También establece que pese a las recomendaciones técnicas de cómo debe abandonarse el pozo, el concesionario podrá adoptar otras metodologías derivadas de conveniencias técnicas y económicamente a las especiales características de cada pozo o zona," en la medida en que cumplan con los requerimientos respecto a normas de seguridad y protección ambiental". Estas aparentes libertades del concesionario encuentran, sin embargo, ciertas restricciones que explicaremos a continuación.

La norma categoriza los pozos en "función a su ubicación" conforme se encuentre:

- A1. ubicados a menos de 100 m del ejido urbano,
- A2. ubicados a menos de 200 m de zonas cultivadas, bosques o cursos o espejos de agua y
- A3. ubicados en otras zonas; y también las clasifica «en función a su estado» conforme se encuentren activos, inactivos o abandonados.

Los abandonos de pozos en ejidos urbanos, deben siempre ser definitivos. Esta norma, fundada en razones de protección socioambientales, tiene como objetivo reducir el impacto negativo que pudiere ocasionarse por taponamientos temporarios mal efectuados.

Marco normativo en Chubut

La Constitución Provincial (CP), en el Capítulo VI “Medio Ambiente” en su **Art. 109**, en coincidencia con el **Art. 41 CN**, expresa la integridad del Ambiente: “Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano que asegura la dignidad de su vida y su bienestar y el deber de su conservación en defensa del interés común. El Estado preserva la integridad y diversidad natural y cultural del medio, resguarda su equilibrio y garantiza su protección y mejoramiento en pos del desarrollo humano sin comprometer a las generaciones futuras. Dicta legislación destinada a prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, impone las sanciones correspondientes y exige la reparación de los daños”.

La norma en materia ambiental a nivel provincial se enmarca dentro de la **Ley XI N° 35**: Código Ambiental Provincial. El **Art. 1** tiene por objeto la preservación, conservación, defensa y mejoramiento del ambiente de la Provincia, estableciendo los principios rectores del desarrollo sustentable y propiciando las acciones a los fines de asegurar la dinámica de los ecosistemas existentes, la óptima calidad del ambiente, el sostenimiento de la diversidad biológica y los recursos escénicos para sus habitantes y las generaciones futuras.

En el **Art. 3** en virtud del marco de derechos y garantías establecidos por la Nación y la Provincia de Chubut en sus respectivas Constituciones y los principios generales contenidos en la Declaración de Río de Janeiro en 1992 la política ambiental se rige por los siguientes criterios:

En su capítulo V (de los instrumentos de la política ambiental) en el **Art. 7 inc c** establece que el Planeamiento y ordenación ambiental es instrumento de la política ambiental.

En el **Art. 111** se introduce el concepto de amparo respecto al deterioro ambiental. “Todo habitante puede interponer acción de amparo para obtener de la autoridad judicial la adopción de medidas preventivas o correctivas, respecto de hechos producidos o previsibles que impliquen deterioro del medio ambiente”.

El **Decreto 10/95** de la provincia de Chubut representa la legislación ambiental de la misma sobre la Actividad Petrolera. Esta norma establece que las Resoluciones **105/92** y **341/93** y sus normas modificatorias, dictadas por la Secretaría de Energía de la Nación, son aplicables en la Provincia del Chubut para el control ambiental de las actividades de exploración y explotación petroleras.

La **Res. 11/04** con el objetivo de cuantificar los daños y pasivos causados al medio ambiente, a la salud de la población y a los fundos superficiarios por la exploración y explotación de hidrocarburos establece la creación del Registro de Pozos de la actividad petrolera con la información consecuente sobre la ubicación y estado de los pozos hidrocarburíferos, activos, inactivos y abandonados, de manera tal de elaborar estrategias y planificación urbana.

La información para el registro de pozos activos, inactivos y abandonados existentes en la zona o área a cargo deberá contener: Individualización de los pozos existentes en la zona o área a cargo, con indicación de las coordenadas de cada uno en sistema de coordenada planas Gauss Krüger faja 2, sistema geodésico W.G.S. 84 y en formato digital Shape File (S.H.P.) del Software de Sistema de Información Geográfica Arcview Gis utilizado para la cartografía provincial y municipal. De tratarse de pozos abandonados con anterioridad a la **Res. 05/96**, se adjuntará la información relacionada al historial del pozo.

Marco normativo en Comodoro Rivadavia

El **Art. 31** de la Carta Orgánica Municipal procura para los vecinos un ambiente sano y equilibrado que asegure la satisfacción de las necesidades presentes, sin comprometer las generaciones futuras. Desarrolla una política de planeamiento y gestión del ambiente urbano integrado a las políticas de desarrollo económica, social y cultural. Instrumenta un proceso de ordenamiento territorial y ambiental participativo y permanente que propende a proteger el ecosistema humano, natural y biológico, y en especial el aire, el agua, el suelo y el subsuelo; eliminar o evitar todos los elementos contaminantes no aceptables que puedan afectarlo. El daño ambiental genera prioritariamente la obligación de recomponer según lo establezca la legislación. Efectuar la evaluación del impacto ambiental y social de proyectos públicos y privados de envergadura. En el caso de obras que afecten el ambiente, las normas deben poner límites temporales para su solución. Asimismo, debe crear órganos de control municipal y prever la realización de audiencias públicas.

La **Ordenanza 3771/91**. Declara de interés público la preservación, conservación, defensa y mejoramiento del Medio ambiente y aprueba el Código Ecológico Municipal de aplicación en todo el ejido municipal. El municipio procura para los vecinos un ambiente sano y equilibrado que asegura la satisfacción de las necesidades presentes, sin comprometer las generaciones futuras. Desarrolla una política de planeamiento y gestión del ambiente urbano integradas a las políticas de desarrollo económico, social y cultural.

En cuanto a normativa ambiental la **Ordenanza 8095/04**, se sanciona en desarrollo de la competencia del Municipio de Comodoro Rivadavia en materia ambiental, conforme con las previsiones de la Constitución de la Nación Argentina, la Constitución de la Provincia del Chubut y la Carta Orgánica Municipal. Tiene por objeto la preservación, conservación, defensa y mejoramiento del ambiente del Municipio de Comodoro Rivadavia, incluida la Zona Franca y los lugares y establecimientos de utilidad nacional mediante el establecimiento de las normas que, en el ámbito de la autonomía municipal, configuran el sistema de defensa, protección, conservación y restauración, en su caso, del ambiente en la jurisdicción municipal y aseguran una utilización racional de los recursos naturales.

En relación al abandono de pozos, la **Ordenanza 7645/02** en su **Art. 1** establece que el Poder Ejecutivo municipal deberá exigir a todas y cada una de las empresas operadoras o en áreas de servicio dentro del ejido municipal, un informe con planos actualizados con los pozos abandonados y en actividad, anexando listado de coordenadas de ubicación (x, y, cota) croquis de ubicación y detalle de cada pozo. En su **Art. 2** se indica que la entrega de la información se realizará anualmente. Mediante el **Art. 3** afirma la necesidad imperativa de saber el procedimiento técnico utilizado para el abandono de pozos. De acuerdo a los criterios técnicos establecidos por la Res 5/96 o a criterio de sellado anteriores. Como así también en su **Art. 4**, fija como objetivo instrumentar medidas pertinentes para salvaguardar los derechos de los habitantes de la ciudad.

La Carta Orgánica en el **Art. 30** establece las facultades del Municipio en materia de Desarrollo Urbano y la gestión del espacio público. Algunos de los puntos más relevantes en relación al abordaje de la temática son:

- Planificar el desarrollo urbano atendiendo a las necesidades cotidianas de los vecinos y la integración de las diferentes actividades que forman parte del quehacer ciudadano.
- Instrumentar, en tanto resulte necesario, mecanismos de participación y consulta mediante concursos abiertos para la elaboración de ideas y proyectos en obras municipales y acciones de significación urbana, sin perjuicio de la actuación del personal técnico de planta de las dependencias municipales.

En materia de Ordenamiento Territorial, uno de los antecedentes más relevantes es el Diagnóstico Urbano Expositivo de 1989, desarrollado por profesionales de la Dirección de Planeamiento Urbano de la Municipalidad de Comodoro Rivadavia. Dentro de las acciones recomendadas, establecía la necesidad de contar con un Código de Planeamiento Urbano que contemplara la tendencia de crecimiento urbano, los usos de suelo, etc.

En 1990 se formuló y sancionó la **Ordenanza 3614/90** (de Usos de suelo), la cual reglamenta actualmente la subdivisión de usos de suelo para el ejido de la ciudad de Comodoro Rivadavia.

El plan estratégico de 1999 El Código de Edificación, **Ordenanza 6874/99**, funciona incorporando ciertas excepciones a través de la entrega de Certificaciones de factibilidad que requieren de la aprobación de la oficina de Planeamiento y Desarrollo Urbano.

La antigua **Ordenanza 3614/90** ha sufrido muchas modificatorias. Una de las más relevantes es la **Ordenanza 3614-7/12**, la cual incorpora una nueva zonificación imprecisa a una superficie extensa de suelo bajo la designación de “zonas de ampliación urbana” (cambios de zonas rurales y sub-rurales a urbanas).

En 2007 se promulgó la **Ordenanza 9185/07**, denominada “Modelo de ocupación territorial y Plan de desarrollo Sustentable 2007-2027”, la cual planteaba lineamientos y propuestas estratégicas, programas de desarrollo urbano y gestión territorial a implementar en el transcurso de 20 años. Para llevar adelante la coordinación del trabajo y la ejecución del instrumento normativo, incluía talleres participativos entre diversos actores pertenecientes a sectores públicos, privados y académicos. Se contrató a profesionales del Foro Latinoamericano de Ciencias Ambientales (FLACAM). Si bien la ordenanza continúa vigente, los programas y proyectos contemplados nunca se reglamentaron ni se hicieron efectivos de forma completa. (Bachiller et al., 2022).

Existe una propuesta de un Código de Ordenamiento Urbano (COU) del Ministerio del Interior, Obras públicas y Vivienda presentada en 2018 la cual surge ante la necesidad de adoptar y sancionar un COU. Dicho proyecto incorpora algunos instrumentos de gestión de suelo y desarrollo urbano y se encuentra actualmente en tratamiento en el Concejo Deliberante, aunque no ha alcanzado el consenso necesario para su aprobación.

Actualmente, las excepciones suelen resolverse a partir de la emisión de un Certificado de Factibilidad Urbanística o Certificado Urbanístico, instrumento emitido por la Dirección General de Planeamiento Urbano que determina la zonificación, los indicadores urbanísticos y usos de suelo admisibles para obras nuevas, las ampliaciones y el análisis de urbanizaciones integrales establecido en el Anexo VIII menciona los “Procedimientos para el otorgamiento del Certificado Urbanísticos y

de Localización de Usos”. En el año 2013, a partir de la **Res. 4296/13**, el ejecutivo municipal establece la obligatoriedad de dicho instrumento a partir de dos instancias, Certificados de Prefactibilidad Urbanística y Certificado de Factibilidad Final. Este con el fin de “controlar las actividades que se desarrollan en el ejido y prever el impacto a mediano y largo plazo. (Bachiller et al., 2022).

Normativas de Entes Internacionales que regulan las operaciones abandono de pozos

Los estándares establecidos por la industria petrolera de Noruega (NORSOK D10) y Instituto Americano del Petróleo (API, por sus siglas en inglés) son normas desarrolladas para garantizar la seguridad adecuada, el valor agregado y la rentabilidad de los desarrollos y operaciones de la industria. Además, los estándares de NORSOK y API están destinados, en la medida de lo posible, a reemplazar las especificaciones de las compañías petroleras y sirven como referencias en las regulaciones de las autoridades. API es la asociación más reconocida en la industria hidrocarburífera, y es un referente a nivel global para las buenas prácticas y operaciones petroleras.

El capítulo 9 de la Norma Norsok D10 “Desvíos, Suspensión y Abandonos” cubre los requisitos y las pautas relacionadas con la integridad del pozo durante la conexión de los pozos en relación con:

- Suspensión temporal de actividades y operaciones en pozo.
- Abandono temporal o permanente de pozos.
- Abandono permanente de una sección del pozo, para construir un nuevo pozo con un nuevo objetivo de pozo geológico

El propósito de esta sección es describir el establecimiento de barreras de pozos mediante el uso de Well Barrier Elements, (WBE) y las características adicionales requeridas para ejecutar esta actividad de manera segura, con un enfoque en el aislamiento de formaciones permeables / depósitos / fuentes de salida, ambos entre sí en el pozo, y desde la superficie.

El capítulo 11 “Operaciones con Coiled Tubing (CT)” cubre los requisitos y pautas relacionadas con la integridad del pozo durante las operaciones de CT. Una operación de CT es una técnica para el despliegue de varias herramientas (herramientas de registro, herramientas de perforación, empacadores, etc.) y como un conducto para circular o colocar fluidos en el pozo. La CT puede desplegarse en pozos presurizados o en pozos muertos.

En el API existen dos documentos, en referencia al abandono de pozos, su operación, cuestiones ambientales, de seguridad entre otros aspectos importantes. Estos son el API E3 y el API 51R

API E3

Este documento aborda la prevención del ambiente durante las prácticas petroleras ejecutadas en las operaciones de abandono. Busca prevenir la contaminación de acuíferos de agua dulce, define los procedimientos en cuanto al aislamiento de las zonas de producción de hidrocarburos y los intervalos de inyección de agua, la protección de los suelos y las aguas superficiales.

Por otra parte, define el riesgo que existe al contaminar los acuíferos de agua que existan en los pozos. Por medio de este documento el operador debe ser capaz de identificar los pozos existentes en los cuales concurra un potencial de migración y contaminación de los fluidos.

Se definen conceptos relevantes para entender las operaciones de abandono de un pozo como lo son, pozo inactivo, presión de formación, programas de pozos inactivos, migración de fluido, programas de monitoreo entre otros, para estandarizar los procedimientos para todos en la industria.

Para determinar la categoría del potencial de migración del fluido, se tiene como guía la Tabla N°6, en donde se categoriza y se clasifica, según la presión de formación y el estado de la cementación del revestimiento, la posibilidad a futuro de la migración y contaminación de fluidos por el pozo hacia superficie o comunicación entre formaciones permeables.

Tabla N°6. Clasificación del riesgo según la presión de formación y el estado de cementación y revestimiento. (Dick Bernal y Ojeda Triana, 2017)

Riesgo	Niveles de protección	Presión de superficie	Presión en el anular del revestimiento	Presiones altas de la formación de interés	Presiones adicionales
Bajo	2	No	No	No	No
Moderado	1	No	Si	Si	No
Alto	0	si	si	si	Si

Orienta acerca de los procedimientos de taponamiento y abandono de un pozo, la configuración de los tapones de cemento y los intervalos críticos a tener en consideración para evitar que el pozo se convierta en un conducto de migración para los fluidos. Los objetivos principales en una operación de abandono, son:

- Aislar el pozo de los acuíferos de agua dulce.
- Aislar zonas productoras o no completadas.

- Proteger los suelos de superficie y las aguas superficiales.
- Aislar intervalos de inyección.

Estos objetivos se logran, con tapones de cemento los cuales van en intervalos seleccionados para evitar el movimiento de los fluidos; cualquier intervalo que deba aislarse para cumplir los objetivos mencionados anteriormente es uno crítico.

API 51R

Este documento, aborda temas para la protección del medio ambiente. Los temas más importantes se resumen a continuación.

El objetivo primordial, es la recuperación íntegra del suelo y la completa revegetación y arborización con plantas, semillas, hierbas y especies de la zona.

Las obras civiles de excavación, deben ser aprobadas antes de que se dé inicio a la construcción de cunetas, alcantarillas, desagües entre otros y deben ser aseadas e inspeccionadas regularmente para permitir el libre paso de agua.

En cuanto al abandono de los pozos, los procedimientos deben cumplir los requisitos normativos, las obligaciones contractuales con el terrateniente o arrendador de los predios. Debe existir un estudio previo para generar el mínimo impacto ambiental. El hábitat y el ecosistema deben ser restaurados y se debe minimizar la erosión del suelo.

Se define en el documento, los términos de abandono permanente y abandono temporal. El abandono permanente del pozo se realiza cuando ya no hay utilidad. Los abandonos temporales se realizan cuando el pozo puede tener utilidad a futuro por medio de proyectos de sistemas de levantamiento o rutinas de reacondicionamiento de pozos las cuales puedan restablecerlo.

Según la norma **API 51R**, el propósito de cementar las zonas es evitar la migración de fluidos, la contaminación de acuíferos, la superficie y sus aguas, para realizar la correcta explotación de los intervalos productores. La contaminación se previene al realizar una buena práctica de cementación, no solo en las operaciones de abandono, sino en las cementaciones primarias durante la etapa de perforación y completamiento de pozos.

Esta norma proporciona prácticas respetuosas con el medio ambiente para las operaciones nacionales de producción de gas y petróleo en tierra. Está destinado a ser aplicable tanto a contratistas como a operadores. Las instalaciones dentro del alcance de este documento incluyen todas las instalaciones de producción, incluidas las instalaciones de manejo de agua producida. La cobertura operativa comienza con el diseño y construcción de caminos de acceso y ubicación de pozos, e incluye operaciones de recuperación, abandono y restauración.

Metodologías analíticas

Un análisis preciso permitirá determinar las medidas a adoptar para eliminar o minimizar los riesgos que implican la presencia de contaminantes para la salud humana y el ambiente.

En la Figura N°16 pueden evidenciarse las etapas implicadas en un análisis. Como punto de partida ante un evento de contaminación (problema a resolver), es importante conocer la naturaleza y extensión de la contaminación e identificar tanto los receptores del riesgo como los factores locales específicos que afectan a la exposición de éstos a la contaminación en los diferentes compartimentos ambientales.



Figura N°16: Esquema de las etapas implicadas en un análisis.
(Acuña, 2019)

El diseño del plan de muestreo tiene que estar en consonancia con el objetivo planteado para el problema a resolver. De esta manera se tomarán muestras lo más pequeña y representativa posible que permita reflejar las condiciones de cada compartimento analizado de manera precisa y confiable, evitando errores en esta primera etapa, y minimizando los errores de resultados obtenidos en laboratorio, los cuales siempre tienen sus errores asociados. En la Figura N°17 se esquematizan los pasos mencionados.

La planificación del diseño de muestreo debe asegurar la obtención de información referida a la presencia y concentración de los contaminantes de interés que serán investigados. El primer paso para elaborar un diseño de muestreo es:

(1) Recopilar antecedentes vinculados a las actividades desarrolladas en el sitio de la investigación, tales como informes técnicos, monitoreos, cartografías, material bibliográfico de referencia, entre otros.

(2) Seleccionar los puntos de muestreo con mayor probabilidad de contaminación, considerando los antecedentes recopilados del sitio y su uso. Además, de un análisis del medio físico y biótico de su entorno.

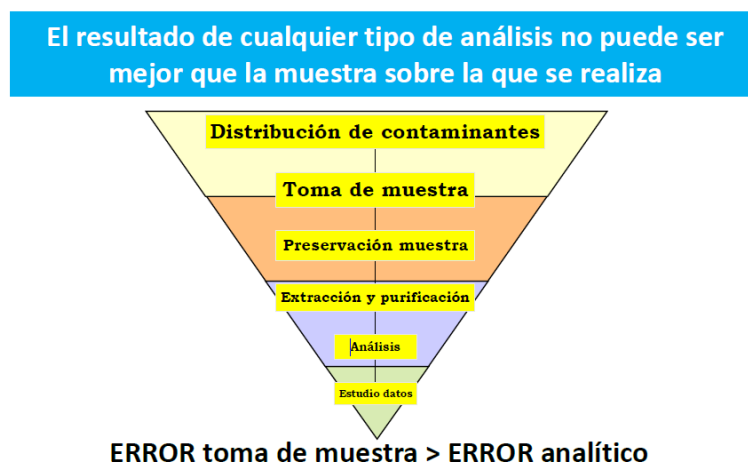


Figura N°17 Pasos del diseño de un plan de muestreo.

(Acuña, 2019)

Las normas con mayor aceptación a nivel global son las desarrolladas por la EPA, ASTM (American Society for Testing and Materials) e ISO (International Organization for Standardization), las cuales se detallarán en párrafos posteriores.

Enfocándonos en la problemática del trabajo, el estudio ambiental de un sitio contaminado con petróleo se basa, generalmente en la obtención de muestras, cuidadosamente tratadas para evitar su deterioro y/o contaminación, seguida de la extracción, fraccionamiento y cuantificación por diferentes métodos analíticos y/o espectroscópicos de los hidrocarburos. De esta manera se logra caracterizar al sitio contaminado desde el punto de vista químico, considerándose estos resultados en las evaluaciones de riesgo ambiental, para establecer criterios del punto final en una remediación.

Los análisis de TPH son usados frecuentemente con el fin de encontrar áreas de contaminación y resulta un indicador ambiental necesario; la determinación de TPH provee información acerca del conjunto de compuestos químicos provenientes del petróleo evaluados por una técnica analítica determinada. Sin embargo, este dato no da información acerca de cuáles son los hidrocarburos de petróleo específicos que están en la muestra.

Una gestión eficiente de los riesgos ambientales y a la salud humana requiere la comprensión de la toxicología de los contaminantes ambientales en suelo (Pinedo Alonso, 2014). Sin embargo, la estrategia de calidad del suelo basada en la concentración de TPH C10-C40 no tiene en cuenta las diferentes propiedades fisicoquímicas y toxicológicas de los compuestos individuales incluidos en el parámetro TPH, por lo que no resulta útil para la realización de un análisis de riesgos para la salud humana y ambiente. La evaluación de la toxicidad requiere mayor información a la suministrada por un valor de TPH individual (Pinedo Alonso, 2014).

Las sustancias volátiles presentes en los hidrocarburos (conteniendo de 6 a 10 carbonos) no están incluidas en este parámetro de TPH. Por ello, el estudio de análisis de riesgos de los productos derivados del petróleo debe ser complementado con la evaluación de otros grupos de sustancias características, como los PAHs y BTEX. Con ello se complementa el estudio de TPH, incluyendo sustancias más volátiles y que poseen riesgos tanto tóxicos como cancerígenos. Sin embargo, el estudio de PAH y BTEX conlleva métodos más costosos en cuanto a esfuerzo y dinero. Se han desarrollado métodos analíticos para la identificación y cuantificación de todo el rango de TPHs, desde 6 carbonos hasta 40 carbonos, como la agrupación de compuestos en fracciones. Los métodos de fraccionamiento de hidrocarburos distribuyen los compuestos individuales de acuerdo a sus propiedades fisicoquímicas y toxicológicas (Pinedo Alonso, 2014). Para ello se diferencia entre sustancias alifáticas y aromáticas, y de acuerdo al número de carbonos equivalente (EC). El parámetro EC se emplea para determinar el número de carbonos efectivos de cada sustancia en relación a la volatilidad y movilidad de la misma (ATSDR, 1999).

Desde el punto de vista ambiental, sin embargo, esta caracterización no resulta ser completa, debido a que cualquier sustancia expuesta en el ambiente es capaz de modificar su comportamiento debido a la interacción con el suelo, el agua, el aire y con los componentes bióticos del mismo. Esto puede ocasionar, una sub o sobreestimación del riesgo real. Hoy en día se estudia la implementación de bioensayos como una herramienta complementaria al análisis químico. Los bioensayos o ensayos ecotoxicológicos permiten determinar el efecto de agentes físicos y químicos sobre organismos de prueba bajo condiciones experimentales específicas y controladas (Barquín et al., 2011).

Las técnicas más recientes de evaluación de sitios contaminados con hidrocarburos se fundamentan en la metodología del análisis de riesgo, las cuales se basan en la valoración del efecto que producen agentes químicos presentes, en la salud humana y el ambiente debido a la sumatoria de riesgos individuales (Alvaro et al., 2017)

Análisis de TPH

Existe una gran variedad de métodos de análisis de TPH, que deben ser seleccionados adecuadamente en función del tipo de hidrocarburo que se sospecha está presente en las muestras. Puesto que las propiedades de los hidrocarburos dependen del tamaño de sus moléculas, es muy habitual clasificarlos en función del número de átomos que contienen. De forma general, la volatilidad y solubilidad disminuye según aumenta el número de carbonos.

Otro aspecto importante al seleccionar un método de análisis de TPH es que, mientras que algunos, como la espectrometría por absorción en el infrarrojo (IR), solo ofrecen información cuantitativa sobre el contenido de hidrocarburos, los métodos de cromatografía gaseosa (CG) pueden además proporcionar información cualitativa sobre el tipo de hidrocarburo presente en la muestra.

Métodos analíticos para la determinación de hidrocarburos

Los métodos más comunes para TPH son:

- Método EPA 418.1 o 418.1 Modificado,
- Método EPA 413.1 para grasas y aceites,
- Método 9070 y 9071 para hidrocarburos aceites y grasas en suelos, barros y lodos,
- Método EPA 8015 M para Orgánicos del Rango Diesel (DRO),
- Método EPA 8015 M para Orgánicos del Rango de las Gasolinas (GRO),
- TNRCC 1005 y 1006.

El Método 418.1 consiste de una extracción con solvente seguido de un tratamiento en una columna con sílica gel y seguida de una determinación por espectroscopia de infrarrojo.

Los Métodos 9070 y 9071 que aplican a sólidos, la medición es gravimétrica.

El Método modificado EPA 8015 para DRO y GRO se realiza mediante extracciones con solventes, seguida de una determinación por GC.

El Método TNRCC 1005 también es una extracción en este caso con n -Pentano seguido de una GC y se complementa con el método TNRCC 1006 que implica una separación en columna, seguido de dos CG para identificar fracciones de alifáticos y aromáticos.

Todos los métodos comparten los siguientes pasos.

- a) Colección, preservación de muestras
- b) Extracción y separación del analito de interés de la matriz de la muestra.

- c) Concentración y aumento de los analitos de interés. En caso de ser necesario los extractos son filtrados, secados y concentrados antes de ser analizados.
- d) Remoción de compuestos de interferencia.
- e) Medición y cuantificación de los analitos.

Cada etapa puede afectar el resultado final, y es fundamental la comprensión de cada una para interpretar correctamente la información obtenida.

Una vez concluida la preparación de la muestra, se realiza la cuantificación, existiendo diversos métodos para la detección y cuantificación de los hidrocarburos del petróleo:

- o Cuantificación de los TPH;
- o Cuantificación de un grupo de compuestos de hidrocarburos del petróleo;
- o Cuantificación de los componentes individuales.

La cuantificación de componentes separados o de un grupo de componentes tales como los BTEX y/o los PAH's ó de algún otro componente en particular se realiza utilizando técnicas cromatográficas.

Métodos para TPH basados en espectroscopia de infrarrojo (IR)

La mayoría de los métodos basados en IR miden la absorbancia a una frecuencia particular (usualmente 2930 cm^{-1}) correspondiente a las tensiones de grupos alifáticos C-H. En todos los métodos para TPH basados en IR, la absorbancia producida por la absorción de radiación por las uniones C - H es cuantificada comparando las absorbancias con las de estándares de concentración conocida. Se asume que el estándar tiene una relación aromático/alifático y una respuesta similar a la de la muestra. El método 418.1 de la EPA especifica una mezcla de calibración de 15:15:10 de n-hexadecano: isooctano: clorobenceno respectivamente.

Métodos para TPH basados técnicas cromatográficas.

Los métodos más comúnmente utilizados para TPH son el EPA 8015 mod, y los TNRCC 1005 y 1006. Se basan en la extracción de la muestra con un solvente adecuado y luego la cuantificación de todas las señales cromatográficas comparándolas contra estándares de distintas concentraciones de TPH. Los estándares en este caso se preparan utilizando soluciones con combustibles comerciales.

En las Tablas siguientes se muestran comparaciones entre distintos métodos aplicados a muestras de suelo (Tabla N°7) y muestras de agua (Tabla N°8).

Tabla N°7: Compartimento suelo. (Caliba, 2014)

Método	Solvente	Extracción	Clean up	Cuantificación	Información
EPA 418.1	PerCloroetileno	Liq Liq	Silicagel o alumina neutra	IR	Solo concentración total
EPA 8015	Cl ₂ CH ₂	Liq Liq	no	GC	Algunos compuestos individuales, fracción GRO y DRO
TNRCC 1005	n Pentano	Liq Liq	no	GC	Solo concentración total
TNRCC 1006	n Pentano, Cl ₂ CH ₂	Liq Liq	Silicagel o alumina neutra	GC	Fracción de alifáticos y aromáticos por número de carbonos

Tabla N°8: Compartimento agua. (Caliba, 2014)

Método	Solvente	Extracción	Clean up	Cuantificación	Información
EPA 418.1	PerCloroetileno	Ultrasonido	Silicagel o alumina neutra	IR	Solo concentración total
EPA 9070 y 9071	Cl ₂ CH ₂	Soxleht	Silicagel	Gravimétrica	Solo concentración total
EPA 8015	Cl ₂ CH ₂	Ultrasonido	no	GC	Algunos compuestos individuales, fracción GRO y DRO
TNRCC 1005	n Pentano	Ultrasonido	no	GC	Solo concentración total
TNRCC 1006	n Pentano, Cl ₂ CH ₂	Ultrasonido	Silicagel o alumina neutra	GC	Fracción de alifáticos y aromáticos por número de carbonos

Métodos analíticos para la determinación PAH

En el Método EPA 8270D, el análisis de los PAHs, se realiza aplicando la técnica de cromatografía de gases acoplado al detector de Espectrometría de Masas (CG/EM)

Se efectúa primero la extracción de compuestos orgánicos no volátiles y semivolátiles de una matriz sólida (suelos, barro y residuos) con la metodología EPA 3550C, mediante ultrasonido, asegurando un íntimo contacto de la muestra con el solvente de extracción. Los compuestos semivolátiles se introducen en el CG/EM inyectando el extracto de muestra en un cromatógrafo gaseoso equipado con un tubo de sílice fundida de diámetro estrecho columna capilar. La columna

de CG tiene una temperatura programada para separar los analitos, que luego se detectan con un espectrómetro de masas.

El Método EPA 8310, es utilizado para determinar la concentración de ciertos PAH's en aguas subterráneas y desechos para determinar las siguientes sustancias:

Acenafteno	Criseno
Acenaftileno,	Dibenzo(a,h)antraceno
Antraceno	Fluoranteno
Benzo(a)antraceno	Fluoreno
Benzo(a)pireno	Indeno(1,2,3-cd)pireno
Benzo(b)fluoranteno	Naftaleno
Benzo(ghi)perileno	Fenantreno
Benzo(k)fluoranteno	Pireno

El análisis consta de tres etapas: Extracción, Concentración y Clean up y determinación.

En suelos y lodos la extracción se realiza de acuerdo a EPA 3550 B, consiste en extracción por ultrasonido. Y para lixiviados y agua la extracción se realiza de acuerdo a EPA 3510 C, que consiste en extracción Líquido-Líquido con ampolla de decantación.

El método se basa en la utilización de Cromatografía Líquida de Alto Rendimiento (HPLC) para la detección de hidrocarburos aromáticos polinucleares en niveles de partes por billón (ppb).

Para su aplicación debe efectuarse previamente la extracción del analito de las muestras. En la HPLC se inyecta una alícuota del extracto y los compuestos se detectan a través de detectores de espectrometría ultravioleta y de fluorescencia.

Formas de tratamiento

El primer tratamiento que debe realizarse a los pozos en situación de abandono está vinculado con acciones preventivas, esto se refiere a realizar las adecuadas y pertinentes tareas de abandonos de pozo. Estas tareas de abandono deben ser tales que garanticen que se han minimizado las probabilidades de producir infiltraciones en los distintos compartimentos ambientales.

De acuerdo lo expuesto en el Apartado “Proceso y Procedimientos” esta operación tiene como objetivo el aislamiento de las zonas productoras de petróleo, gas o agua mediante tapones, generalmente con cemento. Para ello se debe proceder según la normativa establecida en la Res. 5/96 a fin de asegurar el aislamiento adecuado en los pozos, lo que implica garantizar el estado óptimo del cemento, principalmente en el primer tramo casing guía. Esto es fundamental para aislar los cuerpos de agua del interior del pozo, y de esta manera proteger el acuífero. Además, un correcto aislamiento es esencial para evitar fugas de gas y surgencias de fluidos que pueda vincular la superficie con la capa productiva.

Esta primera etapa de tratamiento requiere de una adecuada gestión por parte de las autoridades de aplicación tanto a nivel provincial como municipal, así como por parte de la operadora responsable del pozo en situación de abandono definitivo.

En situaciones donde se produzca un evento de contaminación, deben realizarse técnicas de remediación para recomponer el daño ambiental, y para ello se recurre a seleccionar las técnicas de tratamiento más apropiada, de acuerdo a factores tales como el tipo de contaminantes, las características propias del sitio. Cada lugar afectado tiene sus particularidades, por lo cual no existe una fórmula generalizada que permita establecer una ruta de acciones para mitigar las afectaciones ambientales que se puedan llegar a presentar.

La remediación es la eliminación o reducción, a niveles aceptables, de los riesgos para la salud de las personas o el ambiente asociados a la contaminación del sitio (Barreto, 2020). Para remediar un sitio contaminado se pueden emplear distintos métodos, los mismos pueden ser fisicoquímicos, térmicos o biológicos. Las técnicas de evaluación de sitios contaminados con hidrocarburos se fundamentan en la metodología del análisis de riesgo y se basan en la valoración del efecto que producen agentes químicos presentes en un sitio contaminado en la salud humana y el ambiente debido a la sumatoria de riesgos individuales (ASTM, 2010).

Los principales factores que inciden en la eficiencia de un proceso de remediación de contaminantes son: el tipo de contaminante, las características del medio (condiciones geológicas y químicas) y tipo de interacciones existentes, como se puede observar en la Figura N°19.

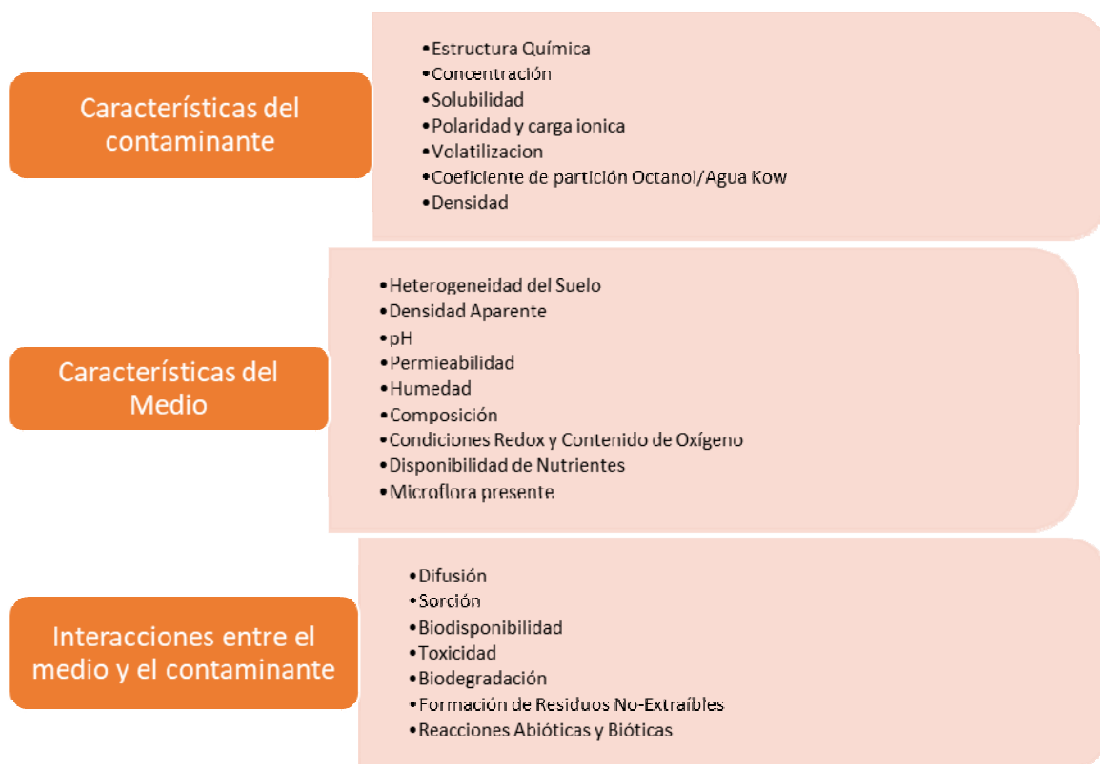


Figura N°19: Principales factores que inciden en la eficiencia de una remediación. (Fundación Chile, 2015)

El término “tecnología de tratamiento” implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (Fundación Chile, 2015).

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras, en base a los siguientes principios: (i) estrategia de remediación; (ii) lugar en que se realiza el proceso de remediación, y (iii) tipo de tratamiento. Es importante mencionar que cada una de estas clasificaciones proporciona diferente información acerca de las tecnologías de remediación. (Velasco Trejo y Volke Sepúlveda, 2002)

Clasificación de tecnologías de remediación según el tipo de tratamiento

Los tratamientos biológicos utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar (destrucción), transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos (Velasco Trejo y Volke Sepúlveda, 2002).

Los tratamientos fisicoquímicos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para la destrucción, separación o contención de la contaminación. Este tipo de tecnologías generalmente son efectivas en cuanto a costos y pueden concluirse en periodos cortos, sin embargo, los costos pueden incrementarse cuando se utilizan técnicas de separación donde los contaminantes pueden requerir de tratamiento o disposición final. Al igual que las tecnologías de remediación, las fisicoquímicas pueden realizarse *In Situ* o *Ex Situ*.

Al igual que las tecnologías físico-químicas y a diferencia de las biológicas, los tratamientos térmicos incluyen la destrucción, separación y/o inmovilización de los contaminantes presentes en el medio. Las tecnologías térmicas de separación producen vapores que requieren de tratamiento; las destructivas producen residuos sólidos y, en ocasiones, residuos líquidos, que requieren de tratamiento o disposición final. Los procesos térmicos ofrecen tiempos rápidos de limpieza, pero son generalmente de alto costo debido a los costos propios en demanda de energía y equipos específicos, además de ser intensivos en mano de obra. La mayoría de las tecnologías térmicas pueden aplicarse *In Situ* y *Ex Situ*.

La biorremediación es una tecnología que actúa a través de las intervenciones de la diversidad biológica con el propósito de lograr la mitigación de los efectos negativos que se causan por la contaminación ambiental a la que se sometió un lugar específico (Ortiz Díaz y Silva Leal, 2019). Esta tecnología permite reducir o remover los residuos potencialmente peligrosos presentes en el ambiente, siendo efectiva para limpiar tanto terrenos como aguas contaminadas, ya que actúa para cada uno de los estados de la materia (Ortiz Díaz y Silva Leal, 2019). Estos tratamientos cuando se aplican a hidrocarburos del petróleo dependen de diversos factores: presencia de una población microbiana activa, estructura y concentración del contaminante, disponibilidad de oxígeno y nutrientes, tipo de suelo, cantidad de materia orgánica (MO) y minerales presentes en el mismo, entre otros. En este sentido, las condiciones ambientales y las características físicas y químicas del suelo afectan la población microbiana nativa existente, por lo cual su estudio constituye un requisito previo para adecuar el crecimiento bacteriano a condiciones de laboratorio.

La estructura molecular del contaminante es el factor químico más importante de esta tecnología, ya que al afectar las propiedades físicas y químicas incide en su capacidad de ser

biodegradado. Adicional a esto, hay que tener en cuenta que la biodegradabilidad de un hidrocarburo depende de su estructura química, por ende, analizar su composición molecular es uno de los más importantes puntos para determinar la capacidad de biodegradación de un hidrocarburo (Ortiz Díaz y Silva Leal, 2019).

Las tecnologías de tratamientos fisicoquímicas y térmicas son rápidas, pero tiene el inconveniente principal de ser inseguras para el medio ambiente. Por lo tanto, con el ambiente en el centro del escenario, los tratamientos biológicos han ganado importancia (Barreto Franco y Reyna Gaspar, 2020). Un resumen de los tratamientos de remediación y se muestran en las Tablas N°9, N°10 y N°11.

Tabla N°9: Biotecnologías utilizadas en la remediación de suelos contaminados

Tecnología	Descripción
Bioestimulación	Consiste en la adición de cualquier material estimulante, enmiendas de nutrientes, agentes de carga y fertilizantes de liberación lenta para mejorar y apoyar el crecimiento microbiano para que pueden llevar a cabo la biorremediación de los suelos contaminados por hidrocarburos. El nitrógeno y el fósforo son los nutrientes esenciales que limitan el crecimiento microbiano (Barreto Franco y Reyna Gaspar, 2020).
Bioaumentación	Consiste en la adición de cultivos microbianos exógenos, comunidades microbianas autóctonas o microbios genéticamente modificados que se han adaptado y demostrado degradar contaminantes para mejorar la degradación. El uso de hongos autóctonos logra una eficiencia de eliminación de contaminantes del 79.7% (Barreto Franco y Reyna Gaspar, 2020).
Fitorremediación	Es un tratamiento que utiliza la capacidad de las plantas para remover los contaminantes, tolerar su toxicidad y remediar los suelos con la ayuda de enzimas específicas de la planta. Es un método no invasivo, sostenible y puede ser una tecnología atractiva para la restauración ecológica de sitios contaminados por hidrocarburos (Barreto Franco y Reyna Gaspar, 2020).
Biolabranza	Radica en airear por cúmulos el suelo contaminado, y agregar agua y fertilizantes; los microorganismos que se encuentran en este suelo ya están adaptados a él y –al recibir oxígeno a través del aire, agua y fertilizantes en cantidades precisas y con el ambiente y temperatura adecuados– degradarán el hidrocarburo (Chan-Quijano et al, 2015).
Bioventeo	Estriba en estimular la biodegradación aerobia de un contaminante por medio del suministro de aire en el sitio contaminado, a través de pozos de inyección o extracción en la zona no saturada por el derrame, y, si es

	necesario, se le añaden nutrientes (Chan-Quijano et al, 2015).
Biorreactores	Optimiza el uso de los microorganismos. Permite la combinación controlada y eficiente de procesos químicos, físicos y biológicos que mejoran y aceleran la biodegradación. Uno de los reactores más utilizados para biorremediar suelos es el biorreactor de lodos, en él el suelo contaminado se mezcla constantemente con un líquido, y la degradación se lleva a cabo en la fase acuosa por microorganismos en suspensión o inmovilizados en la fase sólida. (Chan-Quijano et al, 2015)
Atenuación natural (In situ)	Consiste en la utilización de los procesos fisicoquímicos de interacción contaminante suelo y los procesos de biodegradación tienen lugar de forma natural. Estos procesos se conocen como procesos de biotransformación natural, que van a reducir la concentración de los contaminantes. Entre ellos se encuentra la dilución, la dispersión, volatilización, adsorción, biodegradación y las reacciones químicas que se producen en el suelo. (de Mesa et al, 2006).

Tabla N°10: Tecnologías de remediación fisicoquímicas

Tecnología	Descripción
Lavado de suelos, extracción por solvente e inundación de suelos	<p>Estas tres tecnologías separan contaminantes orgánicos e inorgánicos del suelo por medio de un líquido de extracción. El fluido líquido requiere de un tratamiento posterior para remover o destruir los contaminantes. Cada una de estas tecnologías relacionadas entre sí, trabajan de manera diferente sobre los contaminantes.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Lavado de suelos Los contaminantes sorbidos en las partículas finas del suelo son removidos con el uso de soluciones acuosas en un suelo excavado. De esta manera se reduce el volumen del material contaminado, ya que las partículas finas son extraídas del resto del suelo. - Extracción por solventes. Este tipo de procesos, utiliza solventes orgánicos para disolver los contaminantes y así removerlos del suelo. - Inundación del suelo. Grandes cantidades de agua, en ocasiones con algún aditivo, se aplican al suelo o se inyectan en cuerpos de agua cercanos, para aumentar el nivel del agua en la zona contaminada, favoreciendo así el paso de los contaminantes del suelo hacia el cuerpo de agua. Un sistema de inundación, debe incluir la extracción y tratamiento del agua contaminada (Velasco Trejo y Volke Sepulveda, 2002).

Extracción de vapores (EV)	Tecnología conocida también como ventilación del suelo, vaporización y volatilización. Se aplica un vacío al suelo, para inducir un flujo controlado y continuo de aire, y remover así contaminantes volátiles y semivolátiles del suelo. La EV usualmente se lleva a cabo in situ. Sin embargo, en algunos casos, puede usarse como una tecnología <i>ex situ</i> . La efectividad del sistema de EV depende principalmente de la volatilidad de los contaminantes y de la permeabilidad y homogeneidad del suelo (Velasco Trejo y Volke Sepulveda, 2002).
Oxidación UV	Consiste en la destrucción de contaminantes mediante la adición de compuestos de oxígeno muy oxidantes, como el Peróxido de Hidrógeno o el Ozono, en conjunción con luz ultravioleta. Este tratamiento se lleva a cabo en un reactor, donde la oxidación de los contaminantes se produce por contacto directo con los oxidantes, por fotólisis ultravioleta (rompiendo enlaces químicos) y a través de la acción sinérgica de la luz ultravioleta y el Ozono. Si se alcanza la mineralización completa, los productos finales de la oxidación serán agua, dióxido de carbono y sales. La oxidación química es una tecnología que oxida y reduce suelos contaminados, se puede aplicar para remediar sitios contaminados por hidrocarburos de petróleo como en el área de la zona de origen y un marco de tiempo limitado (Barreto Franco y Reyna Gaspar, 2020).
Solidificación/estabilización (S/E)	La S/E es un proceso en el que el suelo contaminado se mezcla con aditivos para inmovilizar los contaminantes, disminuyendo o eliminando la lixiviación. La solidificación se refiere a las técnicas que encapsulan (atrapan físicamente) al contaminante formando un material sólido, y no necesariamente involucra una interacción química entre el contaminante y los aditivos solidificantes. La estabilización limita la solubilidad o movilidad del contaminante, generalmente por la adición de materiales, como cemento Portland, cal o polímeros, que aseguren que los constituyentes peligrosos se mantengan en su forma menos móvil o tóxica (Velasco Trejo y Volke Sepulveda, 2002).

Tabla N°11: Tecnologías de remediación de tratamientos térmicos

Tecnología	Descripción
Oxidación Térmica (Incineración)	Es un método que tiene la ventaja de eliminar el contaminante presente en el suelo y remediar rápido los sitios contaminados por hidrocarburos. En los procesos de oxidación térmica tanto in situ como ex situ, se utilizan

	<p>altas temperaturas que van desde 850 °C y 1200°C, con la finalidad de volatilizar y quemar compuestos orgánicos y halogenados en presencia de oxígeno. Por otro lado, esta técnica incluye un alto costo incurrido por el equipo, mantenimiento y la combustión incompleta que conduce a la liberación de partículas y contaminantes al aire (Barreto Franco y Reyna Gaspar, 2020).</p>
Desorción Térmica	<p>La desorción térmica es una tecnología que consiste en la separación física que implica la volatilización y desorción de los contaminantes del suelo a través de la aplicación directa o indirecta de calor al vacío o un gas. El suelo puede alcanzar temperaturas altas entre 90 y 540 °C, el calor acelera la liberación y el transporte de contaminantes a través del suelo, para luego ser dirigidos hasta un sistema de tratamiento de gases con el uso de un gas acarreador o un sistema de vacío (Barreto Franco y Reyna Gaspar, 2020).</p>
Pirólisis	<p>Es la descomposición química de materiales orgánicos inducida por calor en ausencia de oxígeno. El proceso normalmente se realiza a presión y temperaturas de operación mayores a 430 °C. Los hornos y equipos utilizados para la pirólisis pueden ser físicamente similares a los utilizados para la incineración, pero se deben operar a temperaturas menores en ausencia de aire. Los productos primarios formados de la pirólisis de materiales orgánicos, en diferentes proporciones de acuerdo con las condiciones del proceso, son: (i) gases residuales (metano, etano y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros); (ii) condensados acuosos y aceitosos y (iii) residuos sólidos carbonosos (coque) que pueden usarse como combustible. Tiene aplicación <i>Ex situ</i> (Velasco Trejo y Volke Sepulveda, 2002).</p>
Vitrificación	<p>Utiliza una corriente eléctrica para fundir los suelos contaminados con temperaturas que van de 1.600 a 2.000 °C. Es un proceso de S/E que estabiliza la mayoría de los contaminantes inorgánicos y destruye los orgánicos. El producto de la vitrificación es un material cristalino químicamente estable que no produce lixiviados, en el cual quedan incorporados los compuestos inorgánicos. Durante el proceso, las altas temperaturas, provocan la destrucción o remoción de los materiales orgánicos (EPA 2001). Puede realizarse tanto <i>In situ</i> como <i>Ex situ</i> (Velasco Trejo y Volke Sepulveda, 2002).</p>

Las técnicas de recuperación para acuíferos contaminados más empleadas son el bombeo de agua contaminada y posterior tratamiento en superficie, inyección de soluciones acuosas con reactivos e inyección de aire para eliminar sustancias volátiles y el uso de microorganismos para transformar y degradar el contaminante (de Mesa et al., 2006).

La Agencia de EPA propone siete criterios para evaluar las alternativas de remediación utilizadas para la mejora del ambiente afectado, estos son:

1. Protección a la salud humana y del ambiente.
2. Compatibilidad con las leyes ambientales y aceptación por las autoridades ambientales.
3. Efectividad y permanencia de la remediación a corto y largo plazo.
4. Reducción de toxicidad, movilidad o volumen del contaminante por medio del tratamiento.
5. Implementación.
6. Bajo costo.
7. Aceptación y visto bueno de la comunidad

Lo anterior implica no solo entender los criterios que cada técnica tiene establecidos sino, además, analizar las diferentes opciones. Así, se podrá determinar el desempeño de cada alternativa e identificar cuál es la óptima, y, en consecuencia, hacer uso de ella (Chan-Quijano et al, 2015).

Técnicas aplicadas al análisis forense

La disciplina Ambiental Forense combina metodologías científicas y de investigación histórica para reconstruir eventos de contaminación pasados y presentes, en particular, las partes involucradas y cuándo y cómo se produjeron las contaminaciones en diversos lugares. (Murphy y Morrison, 2007).

Para reconstruir la historia del sitio se necesita de la conjunción de tres fuentes de información, como se muestra en la Figura N° 20.



Figura N°20 Fuentes de información de la investigación forense.
(Acuña, 2019)

La principal fuente de información para conocer la historia de un pozo es el acceso a documentación histórica. Las características técnicas e históricas de los pozos que se encuentran en la categoría B1 (Pozos activos) podría decirse que están controladas. En cambio, los pozos B2 (inactivos) y B3 (abandonados), aquellos que no se han sellado bajo Res 5/96, pueden presentar incertidumbres. En los pozos que están en situación B2 y B3 aumenta la probabilidad de migración de fluidos desde el reservorio a la superficie.

La caracterización de un sitio contaminado por hidrocarburos implica en primer lugar la ubicación geográfica, verificada mediante imagen satelital, como se muestra en la Figura N°21



Figura N°21: imagen satelital, ubicación geográfica

El estudio de las características técnico históricas de cada pozo requiere un análisis individual acerca de:

- historial de producción del pozo: cantidad de gas o hidrocarburo producido,
- perfil del pozo: profundidad de punzados y de la formación productiva,
- edad del pozo: cuanto más viejo es el pozo, mayor desgaste y corrosión presentan la instalación y sus componentes,
- estado de mantenimiento: el desgaste y corrosión del casing, instalación y componentes es más probable cuando los mantenimientos disminuyen,
- historia de presión de boca de pozo o condiciones de inseguridad: la probabilidad de ocurrencias de contingencias aumenta en aquellos pozos con antecedentes de surgencias y descontrol.

Las investigaciones de sitios afectados por operaciones de petróleo se deben basar en una revisión completa de las operaciones históricas para comprender que elementos podrían estar presente en suelo, aguas subterráneas y superficiales.

En casos de detección de fugas de gas es fácil identificar el origen de la pérdida. Sin embargo, es importante destacar que el lugar físico donde se detecta la contaminación no siempre coincide o se encuentra en las cercanías del pozo de donde proviene. Esto se debe, por ejemplo, a que la boca del pozo puede estar muy lejos del fondo (ej. pozos dirigidos en tierra y off shore).

Además, la forma de explotación petrolera debe ser tenida en cuenta (ej. recuperación primaria, secundaria, terciaria, fracking, etc.) por lo cual es importante conocer la historia de explotación del subsuelo en cada caso en particular.

Cuando se desconoce la fuente de una pérdida de petróleo, y se quiere determinar si proviene de la migración de un pozo específico pueden ser útiles técnicas forenses aplicables según las necesidades de la investigación.

Cada petróleo tiene huellas químicas únicas, que proporcionan una base para distinguir petróleos e identificar posibles fuentes de petróleo derramado (Murphy y Morrison, 2007).

La variedad de tipos de hidrocarburos genera desafíos en su identificación y caracterización, además hay alteraciones que se pueden presentar por procesos fisicoquímicos (fotooxidación, evaporación, dilución) o por efectos de los microorganismos que se encuentren en el agua o en sedimentos. De igual manera la composición química de los petróleos puede variar por sus diferentes compuestos químicos originados y por su formación geoquímica (Botello, 2005).

Una de las grandes herramientas que nos proporcionan los **biomarcadores** es la de poder contrastar dos o más muestras de crudo con el fin de determinar si se asemejan entre sí. Esto permite determinar cuál ha sido la fuente de un derrame que ha ocasionado un impacto en el medio ambiente (Tomas y Acuña, 2022).

Los biomarcadores o marcadores biológicos o fósiles geoquímicos son moléculas complejas presentes en el petróleo y que se caracterizan por su elevada estabilidad química durante los procesos que le dieron origen (diagénesis, catagénesis y metagénesis), es decir, son aquellos compuestos que pueden ligarse de forma inequívoca con sus precursores biológicos ya que el esqueleto de carbonos se preserva (Tomas y Acuña, 2020).

Dependiendo de su estructura química los biomarcadores se pueden clasificar en dos grandes familias:

- Alifáticos:
 - n-alcanos,
 - isoprenoides (aciclicos, terpenos, esteranos)
- Aromáticos:
 - Esteranos monoaromáticos,
 - Esteranos triaromáticos

Los biomarcadores más estudiados debido a la facilidad con la que se determinan por las técnicas analíticas son el Pristano (P) y el Fitano (F), compuestos alifáticos ramificados que derivan de la molécula de fitol asociada a la estructura de la clorofila. Otros compuestos son los hopanos, de naturaleza policíclica que pueden presentar aromaticidad en algunos casos. Su presencia está relacionada con los ácidos hopanoides de las bacterias. Un tercer grupo son los esteranos, también policíclicos pero menos complejos que los hopanos, que derivan de los esteroides de células eucariotas. Los hopanos y los esteranos se identifican en espectrometría de masas mediante los iones $m/z = 191$ y $m/z = 217$ respectivamente (Tomas y Acuña, 2020).

Los biomarcadores se encuentran presentes en las muestras geológicas, en concentraciones menores al 1%, formando parte de mezclas complejas con otros compuestos de diversas clases químicas. Para lograr detectarlos es necesario, primero, separar los extractos de roca o aceites en familias de compuestos utilizando cromatografía líquida (García et al., 1999).

El petróleo se puede separar en fracciones: alifática, aromática, resina y asfáltenos como se muestra en el esquema de la figura N° 22. En cada una de ellas están presentes los biomarcadores,

pero las resinas y los asfaltenos no se volatilizan por debajo de 350°C por lo que sólo se trabaja con los biomarcadores presentes en las fracciones más livianas del crudo (Tomás y Acuña, 2020).

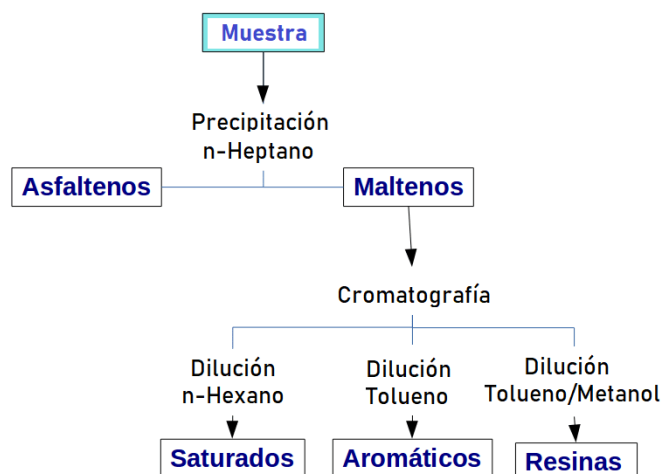


Figura N°22. Separación por cromatografía líquida en columna de compuestos SARA. (Acuña, 2020)

Una vez obtenidas las fracciones más simples y concentradas en biomarcadores, éstas son analizadas por CG-EM computarizada (García et al., 1999). Al monitorear únicamente la variación en intensidad de los iones característicos para los diferentes biomarcadores, en lugar de adquirir un espectro de masas completo en cada barrido, la sensibilidad del espectrómetro se incrementa en varios órdenes de magnitud. Este modo de detección se conoce como monitoreo de iones seleccionados (SIM, por sus siglas en inglés) y la gráfica resultante que relaciona la intensidad de un ion particular en función del tiempo de retención, se conoce como fragmentograma (o perfil de la corriente iónica seleccionada PCIS), el cual permite conocer el número de carbonos de cada isómero y la distribución de éstos en una familia particular de biomarcadores (García et al., 1999). La tabla N°12 presenta las relaciones masa/carga más utilizadas para la identificación de los biomarcadores.

Tabla N°12. Iones comunes utilizados para la identificación de biomarcadores. (Navas Rivas, 2017).

Grupo	Compuestos	m/z
Biomarcadores acíclicos	n-alcanos, isoprenoides	99, 113
Biomarcadores cíclicos	Terpanos tricíclicos, Tetracíclicos y pentacíclicos	191
	25-norhopanos	177
	Esteranos	217,218
	Diasteranos	259
	Oleanano	412
Biomarcadores aromáticos	Esteranos monoaromáticos	253
	Esteranos triaromáticos	231

En la figura N°23 se muestra un fragmentograma de los iones de m/z 191, típico de terpenos, y en la figura 2b se presenta un fragmentograma, típico de esteranos, obtenido por monitoreo de los iones de m/z 217.

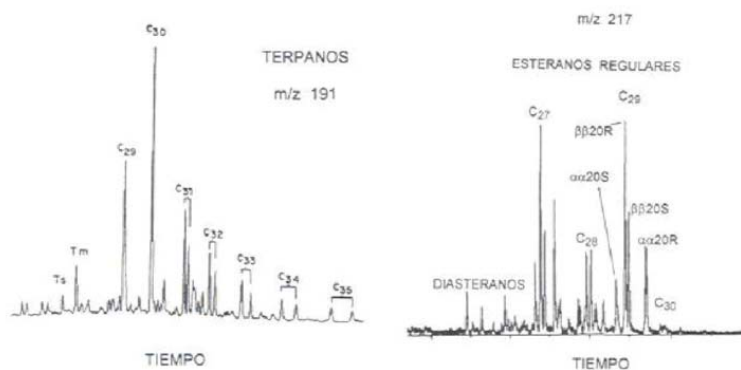


Figura N°23: Fragmentogramas de relación masa/carga (m/z), de m/z 191, típico de terpenos (a), y de m/z 217, típico de esteranos (b). (García et al., 1999)

Al momento de procesar toda la información obtenida en un estudio de biomarcadores, es decir, analizar la presencia/ausencia y concentración de estos en las muestras analizadas, los resultados más importantes derivan de las Relaciones de Diagnóstico. Para obtener estas relaciones se debe tomar uno o más biomarcadores pertenecientes a un grupo en particular y dividirlos con uno o más biomarcadores de otro o del mismo grupo (Acuña, 2020).

Un complemento en la identificación de derrames de petróleo es el análisis estadístico y numérico. El **análisis de componentes principales (PCA)** es la técnica de análisis multivariado más utilizada y de gran alcance. Se utiliza para transformar datos originales de composición de la muestra en los llamados componentes principales. Para conjuntos de datos con gran número de variables interrelacionadas, PCA es una herramienta poderosa que permite el análisis de la estructura de los datos y la reducción de la dimensionalidad de los vectores de patrón (Pujana, 2019)

Por otro lado, la aplicación de **técnicas isotópicas**, mediante el uso de isótopos radiactivos se utilizan para identificar la fuente de hidrocarburos de petróleo y para estimar los tiempos de migración de transporte de contaminantes (Philp, 2007). Las relaciones de isótopos se ven menos afectadas por la intemperie que otras relaciones de concentración química y relaciones de isótopos de las fracciones más ligeras que son más susceptibles a la intemperie que las fracciones más pesadas. Esta técnica es usada para la datación por edad y la identificación de la fuente del petróleo. (Philp, 2007).

Pueden determinarse isótopos estables de Carbono (^{13}C) o Hidrogeno (^2H ó D). La primera implica la combustión de las muestras a CO_2 y H_2O a elevadas temperaturas, seguido por el análisis de la composición isotópica del CO_2 purificado usando un espectrómetro de masas de relaciones isotópicas (IRMS). La proporción de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ se informa en partes por mil (‰) en relación el estándar “PeeDee belemnite” (PDB) (Pujana, 2019).

Existen otras técnicas que se están empleando en Estados Unidos para localizar los pozos mediante métodos que contemplan "Estudios electromagnéticos, registros antiguos, respuesta transitoria de presión, vegetación estresada, estudios de perturbación del sitio y otros métodos” (Kang et al, 2021). También ha habido avances recientes en la teledetección y reconocimientos aéreos aunque estos últimos pueden resultar costosos (Kang et al, 2021).

Incidencia de los pozos con restricción de dominio en la planificación urbana

Los pozos con restricciones de dominio tienen una incidencia en la planificación urbana del ejido de Comodoro Rivadavia, siendo el municipio el responsable de las políticas públicas sobre el territorio, como se establece en el Art. 30 de la Carta Orgánica.

En este sentido, la Res. 5/96 marca un antes y un después con respecto la condición de sellado de los pozos abandonados e inactivos que se emplazan en la ciudad y a los radios de seguridad, condicionando el uso y ocupación de suelo. Esto impacta en el desarrollo urbano, ya que establece un radio de seguridad de 60 metros sobre cualquier pozo anterior a la emisión de la misma (Bachiller et al., 2022). Muchos de estos pozos se encuentran en los actuales barrios consolidados que nacieron como campamentos petroleros (General Mosconi, Presidente Ortiz, Don Bosco, entre otros). Debido a su conformación histórica y al verse afectados por esta restricción, buena parte de los mismos carecen de normativas de zonificación urbana; asimismo, su proximidad a ductos o a pozos abandonados, obstaculiza la autorización de obras en lotes particulares.

Las empresas concesionarias cuentan con criterios propios para seleccionar los pozos del plan anual de abandono que establece la Res. 5/96. Ante esta situación, cada vez que el municipio prevé avanzar en nuevas urbanizaciones, en caso de encontrar zonas afectadas por radios de seguridad debe realizar el requerimiento ante el Ministerio de Hidrocarburos de la Provincia de Chubut, titular del dominio originario de los recursos naturales y organismo a cargo de la gestión de la reducción de los mismos.

A pesar de la existencia de antecedentes como el Plan Estratégico de 1999 y otros estudios, aún no se ha concretado un plan urbano específico para la ciudad de Comodoro Rivadavia (Bachiller et al., 2022).

El Ordenamiento Territorial (OT) se presenta como el instrumento para orientar el desarrollo urbano de manera coherente con las aptitudes y restricciones ambientales y sociales de cada área. Este ordenamiento no es una ordenanza de uso del suelo, sino un proceso, dinámico, multidisciplinario, el cual debe contar necesariamente con la participación ciudadana como requisito legal y como factor legitimante. Se deben planificar las políticas públicas destinadas al territorio, de manera tal de que todas las personas gocen de sus derechos, ya sean estos personales, sociales, económicos, o de cualquier otra índole, y las comunidades puedan decidir sobre su futuro y el de las generaciones futuras, prescindiendo de políticas de corto plazo que responden a otros intereses. (Azparren, 2011).

Conclusión

Desde una mirada integral del diagnóstico ambiental es importante destacar respecto a la problemática investigada, la necesidad de contar con una adecuada contextualización y acotamiento del problema, así como comprender sus procesos y procedimientos. Es fundamental también tener el conocimiento de los principales contaminantes para prever posibles impactos en el ambiente y la salud humana, así como los tratamientos adecuados para intervenir si fuese necesario. Todo esto debe estar enmarcado dentro de la legislación vigente de los distintos niveles de organización, a nivel municipal, provincial y nacional.

A partir de lo expuesto, se concluye que los pozos inactivos con restricciones de dominio, en el ejido de Comodoro Rivadavia, representan una problemática ambiental que conlleva un riesgo potencial para el ambiente y la salud humana. Por tal motivo la gestión y regulación del abandono técnico de estos pozos es una necesidad que requiere de un cambio de paradigma en cuanto a la forma de abordar el problema.

Así mismo es importante resaltar que las acciones deberían estar orientadas a mejorar la eficiencia en el uso del suelo dando origen a normativas que consideren las actividades y regulación del uso del mismo. Permitiendo un equilibrio entre los actores intervinientes: ambiental, social y económico, en el presente y el futuro. Al ser el ambiente un derecho colectivo y un bien general, debería primar sobre los intereses particulares o individuales si se quiere avanzar hacia una sociedad más justa, equitativa y sustentable”, las decisiones deberían contar participación ciudadana según lo marca la LGA.

En este sentido sería necesaria la existencia de normas vinculadas al Ordenamiento Ambiental Territorial como instrumento para integrar las variables ambientales, sociales y económicas, para favorecer un desarrollo sustentable. Se destaca la importancia de contar con el compromiso participativo de diversos actores, así como la necesidad de decisiones consensuadas entre los distintos niveles de gobierno.

Bibliografía

- Abdel-Shafy, H. I., y Mansour, M. S. (2016). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian journal of petroleum*, 25(1), 107-123.
- Acuña, A. J. (2019), Apuntes de la cátedra, Química Analítica A, EDA. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
- Acuña, A. J. (2020), Apuntes de la cátedra, Química Ambiental Forense, Comodoro Rivadavia. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), (1999), Toxicological Profile Information of Total Petroleum Hydrocarbons (TPH).
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), (2016). Resumen de Salud Pública: Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) [Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PHA)].
- Alvaro, C. E. S., Arocena, L. A., Martínez, M. Á., y Nudelman, N. E. S. (2017). Biodegradación aerobia de fracciones de hidrocarburos provenientes de la actividad petrolera en un suelo de la región Patagonia Norte, Argentina. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 33(2), 247-257.
- Ansarizadeh, M., Dodds, K., Gurpinar, O., Pekot, L. J., Kalfa, Ü., Sahin, S., y Whittaker, S. (2015). Carbon dioxide—challenges and opportunities. *Oilfield Review*, 27(2), 36-50.
- Araujo, J., Yegres, C. F., Barreto, C. G., Antequera, A. A., Depool, B., y Rojas, Y. (2016). Biocatalizadores fúngicos hidrocarbonoclasticos del género *Aspergillus* para la descontaminación de agua con Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (HPAs). *Revista Cubana de Química*, 28(2), 703–735.
- ASTM 2010b (2010). Standard guide for risk-based corrective action applied at petroleum release sites E1739-95. American Society for Testing and Materials. Manual. West Conshohocken, EUA.
- Azparren, M (2011), Ordenamiento Ambiental del Territorio en la Provincia del Chubut. La Minería y la Meseta Central”, Tesina. Universidad Nacional del Litoral.
- Bachiller, S., Carrasco, M. L., y Vázquez, L. (2022). Políticas públicas de acceso al suelo y a la vivienda en Comodoro Rivadavia. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 14(1), 61–89.
- Barquín, M., Ríos, S. M., y Nudelman, N. (2011). Test de toxicidad sobre la especie *Atriplex lampa*, su aplicación para la evaluación de riesgo asociado a derrames de petróleo en suelos de la Patagonia. *Revista de Toxicología*, 28(2), 135-139.
- Barreto Franco, J. M., y Reyna Gaspar, M. M. (2020). Revisión bibliográfica del uso de tecnologías de remediación para suelos contaminados por hidrocarburos. Repositorio de la Universidad Cesar Vallejo.

- Botello, A. V. (Ed.). (2005). Golfo de México: contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. Univ. J. Autónoma de Tabasco.
- Cafferatta, N. A., (2005), La prueba del daño ambiental, Revista Brasileira de Directo Ambiental, No 1 Sao Paulo, Editora Fiuza Ltda.
- Cámara Argentina de Laboratorios Independientes, Bromatológicos, Ambientales y Afines (CALIBA), (2014), Nota Técnica, http://www.caliba.org.ar/inicio/notatecnica_ene_2014.pdf
- Castro Varela, G., (2007), Informe Final Diseño monitoreo frente derrame de hidrocarburos, Asesoría SAG, Quillota, Chile.
- Chan-Quijano, J. G., Jarquín-Sánchez, A., Ochoa-Gaona, S., Martínez-Zurimendi, P., López-Jiménez, L. N., y Lázaro-Vázquez, A. (2015). Directrices para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Teoría y Praxis*, (17), 123-144.
- de Mesa, J. B. L., Quintero, G., Vizcaíno, A. L. G., Cáceres, D. C. J., Riaño, S. M. G., & García, J. M. (2006). Bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. *Nova*, 4(5), 82-90.
- de Santana, A. F., Vázquez, E. V., González, A. P., y Beretta, M. (2014). Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en sedimentos del río São Francisco-Estado de Bahía-Brasil. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, 2(1), 122-137.
- Digesto Municipal: Municipalidad de Comodoro Rivadavia, recuperado el día 05 de septiembre de 2021, de <https://www.digestocomodoro.gob.ar>
- Digesto y recopilación histórica de leyes y decretos de la provincia de Chubut, <http://www.legischubut.gov.ar/hl/index.php/digesto-juridico>
- Dick Bernal, L. E. y Ojeda Triana, P. C., (2017), Diseño de un plan de reabandono de un pozo tipo en el campo de La Cira Infantas, Fundación Universidad de América, Facultad de Ingenierías Programa de Ingeniería de petróleo, Bogotá, D. C., Director Wuilmer Correa Meza.
- EPA, (2022), All emission estimates from the *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2020.* <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2020>
- Ferguson, A., Solo-Gabriele, H., y Mena, K. (2020). Assessment for oil spill chemicals: Current knowledge, data gaps, and uncertainties addressing human physical health risk. *Marine pollution bulletin*, 150, 110746.
- Fundación Chile, (2015), Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados, Gobierno de Chile.
- Fundación YPF. (2017). Energía Para Aprender. Un Recorrido por el Mundo de la Energía. Buenos Aires, Argentina: Fundación YPF.
- Fundación YPF, (2019), Plan de Acción de Ciudades sostenibles-Comodoro Rivadavia Sostenible, https://fundacionypf.org.ar/Documents/Publicaciones/Comodoro_Sostenible.pdf

- García, J. A., Sánchez, J. A., y Guzmán, M. A. (1999). Esteranos y terpanos como marcadores biológicos en la prospección petrolera. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 43(1), 1-6.
- García Cuéllar, J. A. (2006). Análisis del impacto de la industria petrolera en el ecosistema y su relación con las pesquerías de la Sonda de Campeche, México.
- Gutiérrez Ramírez A. C., (2017). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos empleando lodos de aguas residuales como fuente alterna de nutrientes. Universidad del Bío-Bío. Concepción, Chile.
- Hallak, T. V. D. P. (2017). *Plugging & Abandonment Techniques For Offshore Wells*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Henderson, H. (2004). Los tratados internacionales de derechos humanos en el orden interno: la importancia del principio pro homine. *Revista IIDH*, 39(29), 02-023.
- Hirtz, N., Grizinik, M. y Blachakis, A., (2000), Evaluación Geohidrológica aplicada al desarrollo urbano de la ciudad de Comodoro Rivadavia-Chubut-Argentina, 1st Joint World Congress on Groundwater
- Infoleg. Información Legislativa y Documental, Ministerio de Justicia y Derechos Humanos. República Argentina, <http://www.infoleg.gob.ar/>
- Jiménez Velasco, J. H. (2021). Determinación de la pluma de contaminación de un derrame de combustible en la vía Santo Domingo de los Tsáchilas-Esmeraldas utilizando el software NAPL Simulator.
- Kang, M., Brandt, A. R., Zheng, Z., Boutot, J., Yung, C., Peltz, A. S., y Jackson, R. B. (2021). Orphaned oil and gas well stimulus—Maximizing economic and environmental benefits. *Elem Sci Anth*, 9(1), 00161.
- Luque, J.L (2009), Desempeño de cuatro especies vegetales para fitorremediar suelos contaminados con hidrocarburos en patagonia, Tesis de Maestría en Manejo Ambiental, Director: Dr. Gustavo A. Zuleta, Univ. Maimónides, Buenos Aires, Argentina
- Montenegro, C. y Biasotti, H., (2017), Nueva Metodología de Abandono RIG LESS, 3er Congreso Latinoamericano y del Caribe de Perforación, Terminación y Reparación de Pozos, IAPG.
- Murphy B. L., Morrison R. D., (2007) *Introduction to Environmental Forensics*. Ed. Academic Press. Elsevier. USA.
- Mulligan, C. y Yong, R. 2004. Natural attenuation of contaminated soil- review article. *Environmental International* 30: 587-601.
- Municipalidad de Comodoro Rivadavia, (2024) <https://www.comodoro.gov.ar/2024/06/13/el-municipio-realizo-fuertes-controles-en-yacimientos-para-relevar-los-pasivos-ambientales/>
- Navas Rivas, G. A. (2017). Caracterización geoquímica de crudos del Campo Carito (subcuenca de Maturín) a través del análisis de biomarcadores y marcadores de las fracciones de hidrocarburos saturados y aromáticos (Doctoral dissertation).

- Nonna, S. (2017), Derecho Ambiental, La protección del ambiente. Esquema constitucional y de presupuestos mínimos en Argentina, *Revista Anales de la Facultad de Ciencias Jurídicas y Sociales*. UNLP. Año 14 / N° 47 - 2017. Impresa: ISSN 0075-7411 Electrónica: ISSN 2591-6386.
- Ortiz Díaz, D., Silva Leal, J. A. (2019), Efectos ambientales de los hidrocarburos. Una revisión. *Especialización en Control de la Contaminación Ambiental*. Universidad Santiago de Cali
- Peña Chacón, M. P. (2020), El ABC del principio de progresividad del derecho ambiental. *Direito Ambiental e Sociedade*. 10. 122-178. 10.18226/22370021.v10.n2.05.
- Philp, R. P. (2007). The emergence of stable isotopes in environmental and forensic geochemistry studies: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 5, 57-66.
- Pinedo Alonso, J., (2014), Tesis evaluación de riesgos en suelos afectados por hidrocarburo de petróleo, Universidad de Cantabria. Departamento de Ingenierías Química y Biomolecular, <http://hdl.handle.net/10803/133094>
- Pucci, G. N., Acuña, A. J., y Pucci, O. H. (2011). Biodegradación de hidrocarburos en la meseta patagónica, un resumen de la optimización de los parámetros a tener en cuenta. *Ingen Sanit Amb*, 115(3), 36-41.
- Pujana, L. (2019), Procesos y principales contaminantes en operaciones de transporte y tratamiento de petróleo crudo en la provincia del Chubut, Facultad de Ciencias Naturales, UNPSJB.
- Rhim S. A., y Anaconda, C., (2004). Riesgos ambientales asociados a sitios contaminados. Proyecto FDI, CORFO, Santiago, Chile.
- Riazi, M. R., (2005), *Characterization and Properties of Petroleum Fractions*, ISBN 13: 9780803133617
- Rivas, N. (2008), Riesgo ambiental asociado a los pozos petroleros dentro del ejido urbano de Comodoro Rivadavia, Directora Ruiz, Sonia, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, TESINAS/363.738 2/R.19'
- Secretaría de Energía, Transporte y Comunicaciones. Argentina, Resolución 5/96 - Normas y Procedimientos para el abandono de Pozos de Hidrocarburos.
- Sciactaluga, E. A., (2018), Abandono de pozos en la actividad hidrocarburífera, MJ-DOC-12758-AR | MJD12758
- Subsecretaría de Ambiente, (2021), Plan Local de acción climática, Comodoro Rivadavia, <https://ambientecomodoro.gob.ar/plan-local-de-accion-climatica-2021/>
- Svampa, M. (2013). Consenso de los commodities y lenguajes de valoración en América Latina. *Fundación Friedrich Ebert; Nueva Sociedad*; 244; 4-2013; 30-46
- Tomas, G., y Acuña, A., (2022). Biomarcadores aplicados al estudio de crudos extraídos de la Formación Magallanes, Cuenca Austral, Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 74(1).

- Tomas, G., y Acuña, A. J., (2020). Geoquímica orgánica de biomarcadores en petróleos de las Cuencas del Golfo de San Jorge y Austral. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 12(3), 53–65.
- Usach, N. y Freddo, B. V. (2016). Dispersión y fragmentación socioespacial en el crecimiento reciente de una ciudad petrolera de la Patagonia argentina. *Papeles de Población*, 90, 265-301.
- Vázquez, L. y Bachiller, S. (2019); Políticas de acceso al suelo urbano: sobre la conformación de prioridades y desigualdades en la ciudad de Comodoro Rivadavia durante los últimos 20 años; Universidad de do Estado do Rio de Janeiro; *Revista de Direito da Cidade*; 11; 2; 1-2019; 76-100
- Vázquez, L y Romero, G., (2019). “Acceso al suelo urbano y riesgo ambiental. Comodoro Rivadavia, Patagonia argentina”. *Revista Bitácora Urbano Territorial*, vol. 29, núm. 2, Universidad Nacional de Colombia.
- Velasco Trejo, T, Volke Sepulveda, J, (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. Instituto Nacional de Ecología. Mexico, año 2002, pp 27-51.
- Vieira do Paço Hallak, T., (2017), *Plugging & Abandonment Techniques for Offshore Wells*, Federal University of Rio de Janeiro, Polytechnic School, Petroleum Engineering
- Viñas Canals, M. (2005). *Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: caracterización microbiológica, química y ecotoxicológica*. Universitat de Barcelona.
- Vrålstad, T., Saasen, A., Fjær, E., Øia, T., Ytrehus, J. D., y Khalifeh, M. (2019). Plug & abandonment of offshore wells: Ensuring long-term well integrity and cost-efficiency. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 478-491.
- Xu, J. C., Yang, L. H., Yuan, J. X., Li, S. Q., Peng, K. M., Lu, L. J., ... y Liu, J. (2022). Coupling surfactants with ISCO for remediating of NAPLs: Recent progress and application challenges. *Chemosphere*, 303, 135004.
- Yang, C., Wang, Z., Yang, Z., Hollebone, B., Fieldhouse, B., Lambert, P., y Fingas, M. (2022). Chemical Fingerprints and Chromatographic Analysis of Crude Oils and Petroleum Products. *The Chemistry of Oil and Petroleum Products*; De Gruyter, 47-126.