



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PATAGONIA SAN JUAN BOSCO
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PATAGONIA AUSTRAL**

**Programa de Posgrado Interinstitucional en Ciencias Hídricas
(con mención ambiental)**

**Tesina de la carrera de
Especialización en Contaminación de Aguas Subterráneas**

**ANÁLISIS TEMPORAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL
AGUA SUBTERRÁNEA EN ESTACIÓN DE
SERVICIO EN LA CIUDAD DE RIO GRANDE, TIERRA
DEL FUEGO, ANTÁRTIDA E ISLAS DEL
ATLÁNTICO SUR**

Natalia Yamila NOHRA

Director de tesina: Geol. Mario Grizinik

Jurados: Dr. Claudio Lexow, Dr. Federico Horne, Esp. Érico Bianchi
Suplente: Dr. Juan Serra

Ushuaia, noviembre 2025



Programa de Postgrado Interinstitucional en Ciencias Hídricas (con Mención Ambiental)

ANÁLISIS TEMPORAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN ESTACIÓN DE SERVICIO EN LA CIUDAD DE RIO GRANDE, TIERRA DEL FUEGO, ANTÁRTIDA E ISLAS DEL ATLÁNTICO SUR

Lic. en Protección y Saneamiento Ambiental, Natalia Yamila NOHRA

Director de tesina:
Geol. Mario Grizinik

Línea de investigación:
Hidrogeología

Universidad por la que cursa la carrera:
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PATAGONIA SAN JUAN BOSCO

Unidad académica por la que cursa la carrera:
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES

Ushuaia, noviembre 2025



AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer, en primer lugar, a mi director, a los docentes y al personal administrativo de las universidades, su guía académica, el tiempo y sus valiosas orientaciones, enriquecieron mi camino durante la realización de este trabajo.

A mi hermosa familia: a mi mamá, a mis hermanos, y principalmente a Federico, Lázaro y Julieta, por su apoyo incondicional, paciencia y confianza a lo largo de este proceso, que me motivaron a seguir adelante en cada etapa.

A mis compañeros y amigos, por los intercambios, las palabras de aliento y la compañía en este camino.

A las instituciones y organismos que brindaron acceso a la información y al material necesario, contribuyendo de manera significativa al desarrollo de esta investigación.

A todos, gracias por acompañarme en este desafío y por ser parte de la concreción de una meta tan importante en mi formación profesional.

¡Gracias totales a la Universidad Pública, porque sin ella nada de esto hubiera sido posible!

ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN ESTACIÓN DE SERVICIO EN LA CIUDAD DE RÍO GRANDE

RESUMEN

El presente estudio evaluó la evolución de la contaminación por hidrocarburos en un sitio de expendio de combustibles en la ciudad de Río Grande, provincia de Tierra del Fuego A. e I.A.S., Argentina, durante el período 2012–2023. Se analizaron en el agua subterránea compuestos de interés tales como: hidrocarburos totales del petróleo (HTP), Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xilenos Totales (BTEX) y Metil Ter Butil Éter (MTBE). Mediante un abordaje estadístico y espacial apoyado por Sistemas de Información Geográfica se buscó cumplir con el objetivo de determinar la eficacia de las medidas de remediación y los riesgos ambientales residuales.

Los resultados muestran que la fase activa (2013–2015) redujo rápidamente la fuente primaria y que la fase pasiva (2016–2023) consolidó un proceso de atenuación natural. Sin embargo, persisten niveles de HTP y benceno que superan lo establecido por la normativa vigente, lo que evidencia riesgo sanitario y ambiental.

La integración de análisis estadístico y la visualización temporal permitió caracterizar la pluma y elaborar una propuesta de monitoreo integral incorporando matrices ambientales más la implementación del seguro ambiental obligatorio como herramienta de gestión preventiva.

Palabras clave: *hidrocarburos, agua subterránea, remediación, monitoreo ambiental.*

ABSTRACT

This study evaluated the evolution of hydrocarbon contamination at a fuel distribution site in the city of Río Grande, Tierra del Fuego Province (AelAS), Argentina, during the period 2012–2023. Groundwater was analyzed for compounds of interest, such as total petroleum hydrocarbons (TPH), benzene, toluene, ethylbenzene, total xylenes (TXE), and methyl tert-butyl ether (MTBE). Using a statistical and spatial approach supported by Geographic Information Systems, the objective was to determine the effectiveness of remediation measures and residual environmental risks.

The results show that the active phase (2013–2015) rapidly reduced the primary source, and the passive phase (2016–2023) consolidated a natural attenuation process. However, levels of TPH and benzene persist above current regulations, demonstrating health and environmental risks.

The integration of statistical analysis and temporal visualization allowed us to characterize the plume and develop a comprehensive monitoring proposal incorporating environmental matrices and the implementation of mandatory environmental insurance as a preventive management tool.

Keywords: *hydrocarbons, groundwater, remediation, environmental monitoring.*



TABLA DE CONTENIDOS

1- INTRODUCCIÓN	6
2- OBJETIVOS	6
3- ÁREA DE ESTUDIO	7
4- METODOLOGÍA	9
5- RESULTADOS	11
6- DISCUSIÓN	17
7- CONCLUSIÓN	19
8- BIBLIOGRAFÍA	20
LISTA DE TABLAS	22
LISTA DE FIGURAS	28



Lista de símbolos y abreviaturas

HTP: hidrocarburos totales del petróleo
BTEX: Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xilenos Totales
MTBE: Metil Ter Butil Éter
ETBE: Etil Ter butil Éter
ES: Estación de servicio
CDI's: compuestos de interés
HAPs: hidrocarburos aromáticos policíclicos
SIG: Sistemas de información geográfica
Esc: Escuela
VP: vía pública
NF: Nivel freático
FLNA: Fase Libre No Acuosa
SE: Sureste
SASH: Sistema de Almacenamiento Subterráneo de Hidrocarburos
DPE: Dual Phase Extraction,
VGI: Valores Guía de Intervención
IDW: Interpolación por Distancia Inversa
MBBP: metros bajo la boca de pozo
GRO: compuestos orgánicos de rango gasolina
DRO: compuestos Orgánicos de rango diésel
RBCA Acción Correctiva Basada en el Riesgo
GSI ®: Geological Survey of Ireland

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de aguas subterráneas por hidrocarburos derivados del petróleo constituye una de las problemáticas ambientales más relevantes en los entornos urbanos. Las estaciones de servicio (ES) con sus instalaciones de almacenamiento y expendio de combustibles, representan focos potenciales de liberación al subsuelo de contaminantes cancerígenos, a través de fugas en tanques y cañerías subterráneas. Los compuestos de interés (CDI's) presentes en los combustibles —como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos Totales (BTEX), hidrocarburos totales del petróleo (HTP), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y aditivos oxigenantes (ej. metil terbutil éter (MTBE), Etanol, entre otros)— poseen elevada movilidad y persistencia en el medio hidrogeológico. En consecuencia, pueden originar plumas de contaminación que alcanzan viviendas, establecimientos educativos entre otros receptores sensibles, incrementando el riesgo ambiental y sanitario.

Se presenta un caso real acontecido en la ciudad de Río Grande provincia de Tierra del Fuego A.e.I.A.S., donde se detectó en el año 2012, la afectación de suelos y del acuífero freático somero en las inmediaciones de una ES emplazada en el casco urbano. El hallazgo se produjo tras identificarse la intrusión de vapores de hidrocarburos refinados en el sótano de una escuela ubicada lindante al predio. A raíz de esta situación, se implementaron medidas inmediatas de control, entre ellas un sistema de extracción en doble fase (para líquidos y vapores) y un programa de monitoreo de agua subterránea. El análisis técnico de la información generada desde entonces constituye una oportunidad para evaluar la evolución de la pluma contaminante y la eficacia de las acciones de remediación.

El abordaje del caso se enmarca en el cumplimiento de la normativa ambiental vigente. A nivel provincial, se destacan el Decreto Reglamentario N° 1.333/1993 de la Ley provincial N° 55 aplicable a uso de suelo mixto: comercial y residencial, el Decreto Reglamentario N° 599/94 de la Ley provincial N° 105 de Residuos Peligrosos, en la categoría de “Generador” y el Decreto Reglamentario N° 450/2021 de la Ley provincial N° 1.126, que establece niveles guía de calidad para aguas subterráneas en tres categorías: *referencia*, *alerta e intervención*. En el plano nacional, resultan de aplicación la Ley General del Ambiente, Ley N° 25.675 y la Ley N° 24.051 de Residuos Peligrosos, estas leyes marco regulan la gestión de contaminantes y define la obligación de remediación, además de la contratación de un seguro ambiental obligatorio para actividades riesgosas.

Este trabajo aporta criterios técnicos y metodológicos para la gestión de sitios contaminados por hidrocarburos en ámbitos urbanos sensibles. Se emplean herramientas estadísticas, sistemas de información geográfica (SIG) y representaciones espacio-temporales con el fin de analizar la evolución de la contaminación y la efectividad de las medidas aplicadas en Río Grande. De este modo, se busca generar conocimiento científico-técnico que contribuya a la toma de decisiones en materia de gestión ambiental y a la protección de los recursos hídricos subterráneos en la Provincia.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL: Evaluar la eficacia de las acciones de remediación implementadas en una estación de servicio urbana de Río Grande, analizando la evolución temporal y espacial de hidrocarburos derivados del petróleo entre 2012 y 2023.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Sistematizar los antecedentes técnicos y analíticos disponibles (HTP, BTEX y

MTBE).

- Caracterizar la distribución espacial de contaminantes en el acuífero.
- Analizar la evolución temporal de concentraciones en pozos seleccionados.
- Comparar los resultados con los niveles guía de la normativa provincial (Decretos N° 1.333/1993 y N° 450/2021).

3. ÁREA DE ESTUDIO

Se realizó la revisión de informes ambientales inéditos del sitio en los expedientes físicos de la autoridad hídrica provincial. La ES se encuentra emplazada en el casco urbano céntrico de la ciudad de Río Grande; es un área donde se presenta un centro comercial y administrativo, rodeada de locales, supermercados, establecimientos educativos y viviendas residenciales siendo el uso del suelo del tipo mixto (comercial y residencial).

En las inmediaciones de la ES, se instalaron pozos de monitoreo o freatómetros para delimitar la zona de afectación (Figura 1). Los mismos fueron instalados hasta una profundidad final de entre seis (6) y siete (7) metros bajo el nivel de la calle; en total se instalaron veintiocho (28) pozos de monitoreo dos (2) de los cuales a la fecha se encuentran obstruidos ubicados según lo indicado en la Tabla N° 1.

En la Tabla N° 2 se presenta la programación de actividades vinculadas al seguimiento ambiental del sitio, incluyendo el registro histórico de presencia y espesor de (Fase Libre No Acuosa) FLNA, así como las tareas de monitoreo asociadas. En ella se detallan, para cada mes del año, los períodos en los cuales se han documentado mediciones de NF/FLNA y los momentos cuando se ejecutaron las tomas de muestras de agua subterránea y de FLNA. Esta organización permite visualizar de manera integrada la periodicidad de los muestreos y el comportamiento temporal del contaminante, facilitando la evaluación del estado del sitio.

3.1. UBICACIÓN DE LA RED FREÁTICA

En la Tabla N° 1 se presenta la ubicación geográfica de la red de monitoreo freática, la cual fue separada en tres grupos:

- A. Los pozos ubicados en la manzana de la **Escuela (Esc)**:
 - En la vía pública: PV1, PV2, PV3, PV4, PV5, PV6 y P8
 - En el patio de la escuela: FA1, FA2, P4 y P5
- B. Los pozos que se encuentran ubicados en la manzana de la **Estación de Servicio (ES)**
 - En la vía pública de la ES están PE1, PE2.
 - En el predio de la ES están PE3, PE4, PE5, PE6,
- C. Los pozos ubicados en la **vía pública (VP)**
 - En el boulevard frente a la ES: FB1, FB2, FB3,
 - En la vereda del supermercado, de la tienda de ropa y las esquinas opuestas a la ES: PA1, PV7, PV8 y PV9.

3.2. GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA LOCAL

La ES se localiza sobre una planicie fluvio-glacial en el sector norte de la ciudad de Río Grande, Figura N°2. Esta unidad fisiográfica está compuesta por depósitos litorales del Pleistoceno (Formación Sara), constituidos principalmente por sedimentos de origen eólico, fluvial y costero, entre los que predominan arenas finas, limos y gravas (SEGEMAR, 2008). En el emplazamiento específico del sitio de estudio se observa una secuencia litológica heterogénea, donde dominan los limos y arenas finas compactas, intercalados con lentes de gravas y arenas gruesas de matriz limo- arcillosa que representan los estratos de mayor permeabilidad (Lirio, Olivero & Scasso, 2003). Se

registrar también intercalaciones ocasionales de arcillas de baja permeabilidad, aunque no se ha identificado la presencia de una barrera arcillosa continua hasta los niveles máximos de profundidad investigados (>40 m), lo que sugiere un sistema subsuperficial en general permeable, favorable a la migración de contaminantes líquidos (INA, 2001; SEGEMAR, 2008).

De los primeros informes inéditos realizados, se extrae la información sobre los ensayos “slug tests” efectuados en los pozos de monitoreo Pe1 y Pv6. Los pozos se ensayaron succionando en forma súbita el volumen de agua contenido en los caños y midiendo la recuperación de nivel con un transductor digital de presión hidrostática o “diver”. El instrumento fue seteado con un paso de 10 segundos y una duración de 12 horas para poder registrar todos los detalles de las pruebas. Se intentó ensayar el pozo Pv-1, sin éxito debido a la operación de succión. Los ensayos de permeabilidad puntual arrojaron los siguientes por pozo (Pe1: $K = 0,0603 \text{ m/d}$ ($6,98 \times 10^{-5} \text{ cm/seg}$) y Pv6: $K = 0,1267 \text{ m/d}$ ($1,47 \times 10^{-4} \text{ cm/seg}$), un valor de permeabilidad promedio de 0,0935 m/d, propios de arenas finas y limos arenosos. Estos resultados coinciden con las clasificaciones de permeabilidad propuestas por Freeze y Cherry (1979) para sedimentos de granulometría fina.

Por otra parte, se aplicó el método G.O.D. por sus siglas en inglés: Groundwater occurrence, Overall lithology, Depth; ya que su enfoque resulta especialmente útil en zonas urbanas de alta densidad de infraestructuras, donde los acuíferos someros están más expuestos a la contaminación (Custodio & Llamas, 1983; Foster et al., 2002; Kissar & Khammoudj, 2023) y donde se presentan estructuras subterráneas que faciliten la migración de vapores. La vulnerabilidad hidrogeológica en el sitio de estudio se consideró como ALTA debido a factores como: *el tipo de acuífero, la litología suprayacente y la profundidad de la napa freática* (Figura N°3).

En total se efectuaron 1696 mediciones de la red freática, donde se registró el **Nivel freático (NF)** y el espesor de FLNA en distintos meses entre los años 2012 y 2023. En cada oportunidad se tomó registro de la presencia de FLNA y en caso de hallazgo se registró espesor. En la Tabla N° 3 se presenta el promedio de los niveles freáticos por pozo, el cual oscila entre 2 y 7 metros de profundidad respecto de la superficie del terreno con variaciones estacionales moderadas. Se determinó el sentido predominante **de flujo que es SURESTE (SE)**, alineado con la topográfica local en dirección a la costa Atlántica.

Estas características geológicas favorecen la formación de plumas contaminantes móviles, donde la FLNA flota sobre la napa y se dispersa lateralmente, mientras las fracciones disueltas son arrastradas rápidamente por la alta permeabilidad en dirección predominante el flujo subterráneo hacia la costa atlántica.

3.3. DESCRIPCIÓN DEL SITIO

La ES ocupa una superficie construida de 903 m^2 , en la esquina de las calles Rivadavia y Av. San Martín, rodeada de locales de comerciales, supermercado, e instituciones educativas, una de ella funciona un jardín de infantes que por debajo se presenta un sótano ventilado con una caldera, en los cuadrantes Este y Sur. En la Figura 4 se puede observar la instalación del Sistema de Almacenamiento Subterráneo de Hidrocarburos (SASH); la estación cuenta con una playa de expendio con 3 islas de surtidores, edificio comercial sin sótano, y tanques subterráneos de doble pared fabricados en acero con certificación de estanqueidad aprobada. Según los planos técnicos, los tanques y cañerías están correctamente ubicados, con rejillas y sellos de hormigón. El sector cuenta con servicios públicos de red de agua potable, gas natural, cloacas y recolección de

residuos. La cobertura superficial es en gran parte impermeable (concreto, asfalto en calles y veredas), lo cual aumenta la escorrentía superficial y facilita la acumulación de hidrocarburos bajo las losas, al limitar la disipación natural por lluvias.

La existencia del sótano con un quemador en el colegio implica un riesgo adicional debido a la intrusión de vapores del combustible. En julio de 2012 se detectó presencia significativa de gas natural en el aire ambiente del sótano, lo que motivó el inicio de la investigación ambiental, recomendándose en el ambiente cerrado la ventilación continua y cierre de válvulas. Este escenario urbano, donde se junta la actividad humana densa, un acuífero somero, y edificios sensibles; confiere al área una alta sensibilidad ambiental. Cualquier fuga no detectada o no contenida podría exponer a la población local (especialmente niños) a contaminantes volátiles.

4. METODOLOGÍA

4.1. ORGANIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS

El análisis partió de los registros históricos de Nivel freático, Espesor de FLNA, HTP, BTEX y MTBE, obtenidos a partir de campañas de monitoreo realizadas entre los años **2012 y 2023** (Tabla N° 2) en los pozos de monitoreo que obtuvieron los datos más relevantes de los tres sectores diferenciados:

- **Estación de servicio (ES):** PE1 al PE6.
- **Escuela:** PV1 al PV6, P8, FA1, FA2, P4 y P5.
- **Vía pública (VP):** P9, FB1, FB2, FB3, PA1, PV7, PV8, PV9.

Los datos fueron consolidados en una base única de Excel, normalizados en unidades de concentración (mg/L) y organizados por fecha, pozo y parámetro analizado. También se elaboró la base de datos con los datos obtenidos de las mediciones de nivel freático y del espesor de la FLNA, expresado en las unidades “*metros bajo la boca de pozo (mbbp)*”. Se excluyeron los registros incompletos o sin validez analítica.

4.2. DELIMITACIÓN DE PERÍODOS DE ESTUDIO

Se establecieron tres etapas de análisis en función al esquema de remediación implementado en el sitio:

- **2012:** período inicial, ejecución de la línea de base ambiental del medio.
- **2013–2015:** período de remediación activa; implementación del sistema de extracción en doble fase (Dual Phase Extraction, DPE), que remueve líquidos y vapores mediante vacío. Este sistema permite extraer FLNA y compuestos volátiles tanto de la zona saturada como no saturada, y resulta especialmente útil en medios de alta permeabilidad y en sitios con riesgo de intrusión de vapores a edificaciones (EPA, 2006).
- **2016–2023:** período de remediación pasiva, con atenuación natural asistida por medio de dispositivos oleofílicos de recuperación de fase libre (skimmers). La atenuación natural incluye biodegradación aerobia y anaerobia, sorción y dispersión. Aunque es un proceso más lento que las tecnologías activas, contribuye a la reducción de contaminantes. Por ello, es recomendable mantener un monitoreo prolongado tras desactivar los sistemas activos, para confirmar la estabilidad de la pluma y prevenir reactivaciones (Connor et al., 2015).

Esta división permitió evaluar la evolución temporal de la pluma contaminante y comparar

estadísticamente el efecto de ambos enfoques.

4.3. ANÁLISIS ESPACIAL CON QGIS 3.2.3

Para evaluar la dispersión espacial de los contaminantes, se empleó el complemento TimeManager de QGIS, que permitió generar mapas dinámicos de concentración en los distintos pozos de monitoreo para cada período.

- Se georreferenciaron los puntos de muestreo sobre cartografía a escala 1:2000. El sistema de referencia de coordenadas POSGAR 2007/Argentina 3 EPSG: 5345.
- Por medio de la interpolación IDW, se representó la evolución espacial de la pluma contaminante con los valores de concentración de HTP, BTEX y MTBE
- Los resultados cartográficos permitieron identificar las áreas de mayor impacto, la dirección de migración preferencial y la contracción espacial entre períodos.

4.4. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE DATOS

Los análisis estadísticos fueron realizados agrupando los pozos por sitio (Escuela, Estación de Servicio y Vía Pública), independientemente de la cantidad de pozos disponibles en cada uno. La comparación entre sitios se realizó considerando que las estadísticas descriptivas (tendencia central, dispersión y percentiles) representan la distribución de concentraciones observadas en cada sector. Si bien la cantidad de pozos difiere entre los sitios, los análisis se enfocan en las características relativas de la contaminación y en la frecuencia de excedencia respecto al Valores Guía de Intervención (VGI). El procesamiento se realizó en **Google Colab**, empleando las librerías *pandas*, *numpy* y *matplotlib*. El tratamiento incluyó:

4.4.1. Resumen descriptivo: cálculo de media, mediana, desviación estándar, percentiles 25, 50, 75 y 90 para cada parámetro y período.

4.4.2. Boxplots comparativos: elaborados para HTP, BTEX totales y MTBE, con diferenciación de los dos períodos de análisis e incorporación de líneas de referencia según los VGI del Decreto Reglamentario N° 450/2021 de la Ley provincial N° 1126, Tabla N° X.

4.4.3. Comparación de períodos: cálculo de reducciones porcentuales de la mediana y el percentil 75 (p75) entre 2013–2015 y 2016–2023.

4.4.4. Estimación de superaciones normativas: proporción de muestras con concentraciones superiores a los VGI, expresada en porcentaje y graficada por sector de análisis.

4.5. INTEGRACIÓN DE RESULTADOS GRÁFICOS Y NUMÉRICOS

El enfoque metodológico combinó:

4.5.1. Mapas dinámicos (QGIS) para identificar la dispersión espacial y la contracción de la pluma utilizando el complemento Time Manager y la Interpolación por Distancia Inversa (IDW) por ser un método robusto y adecuado para redes de monitoreo con baja densidad de puntos.

4.5.2. Gráficos de evolución temporal de pozo relevantes para evidenciar picos históricos, repuntes recientes y tendencias de estabilización.

4.5.3. Boxplots y tablas estadísticas para caracterizar la variabilidad y medir objetivamente la reducción entre períodos.

5. RESULTADOS

Entre el año julio de 2012 y junio de 2023. En total se ejecutó un total de 65 campañas de medición de niveles freáticos y 16 campañas de toma de muestras de aguas subterráneas y en 4 campañas se pudo tomar muestras de FLNA para la caracterización en el laboratorio.

5.1. LÍNEA DE BASE INICIAL: PERÍODO 2012

Los datos de la campaña de **julio-agosto de 2012** representan la línea de base antes de la implementación de medidas correctivas.

Los trabajos de campo consistieron en la ejecución de diez (10) pozos de monitoreo utilizando un equipo helicoidal Bobcat tipo hoyadora con barras de extensión hasta siete (7) metros. Se perforó a seco, sin uso de inyección de agua o fluido, ya que es el método recomendado para tomar muestras representativas de suelo y agua. Se logró atravesar la zona no saturada hasta llegar a traspasar unos metros de la zona saturada sin llegar al hidro apoyo, razón por la cual se desconoce su espesor del mismo, debido al largo disponible de las barras.

Por las características sedimentológicas del terreno (predominio de arena y grava de distintos tamaños) se dificultó la tarea de perforación, haciendo lenta la maniobra de extracción de la herramienta de perforación provocando derrumbes. Logrado la profundidad, se encamisó los pozos y se dispuso del material autóctono como prefiltros ocasionando en el tiempo que algunos queden fuera de funcionamiento (los actualmente obstruidos son: P1-P2-P3-P6-P7-P10).

Se perforaron tres (3) freáticos en el interior de la ES (P1, P2, P3) y siete (7) pozos exteriores (P4, P5, P6, P7, P8, P9 y P10), entre la VP y la Escuela. Se recolectaron muestras de gases, suelo, agua subterránea y FLNA en los pozos de monitoreo ubicados estratégicamente a fin de considerar los posibles receptores ubicados en los sitios con potencial riesgo de afectación a la salud humana. Los análisis relevados de los informes han manifestado lo siguiente:

5.1.1. MEDICIONES DEL NIVEL FREÁTICO PERÍODO 2012:

La figura N°5 representa por codificación de color, la profundidad del nivel freático y los espesores FLNA medidos en el año 2012. Se observa que en la zona interna del predio de la ES (cercana a los pozos P1, P2 y P3) que el nivel freático se presenta relativamente alto y en esa misma área se detectaron espesores de FLNA entre 0.01 y 1.3 mbbp. En cambio, hacia SE el nivel freático se encontró más profundo (entre 5–6 m según el escurrimiento regional) y se hallaron espesores de FLNA entre 0.2 y 1.1 mbbp.

En conjunto, el mapa evidencia que el foco de la contaminación inicial estaba centrado bajo la ES, donde se registró la mayor presencia de producto flotante y se trata de un acuífero con un nivel freático promedio de 5.08 mbbp.

5.1.2. GASES PERÍODO 2012:

Se realizó prospección geoquímica de gases en el subsuelo efectuando un muestreo y análisis de 32 gases, entre gases ocluidos, gases ambiente y patrón de gas natural distribuidos en la vereda de sobre las veredas de la Av. Rivadavia, Av. San Martín (Figura N°6), en el sótano del colegio y en zona de la ex usina. En la mencionada figura se presenta la ubicación de los puntos de muestreos denominados 16 a 25 ubicados en torno a la ES. En la Tabla N°5 se puede observar los resultados obtenidos de la totalidad ensayada de los hidrocarburos gaseosos (metano, pentano, BTEX en aire) ocluidos en la zona no saturada próxima a la superficie. El metano presentó un máximo de concentración en el sótano del colegio (donde opera una caldera de gas), lo cual sugiere una fuente local de gas natural, y también estuvo presente a lo largo de la Av. San Martín.

El pentano mostró un patrón parcialmente coincidente con el metano –indicando mezcla de gas natural y vapores de hidrocarburos líquidos– salvo en las veredas de la ES, donde el pentano concordó con la presencia exclusiva de gas de red. Las concentraciones detectables de BTEX en aire subsuperficial fueron escasas (solo en puntos muy localizados).

5.1.3. FLNA PERÍODO 2012:

Se confirmó la presencia de fase libre en cuatro pozos dentro del predio (P1, P2, P3, P7). Los espectros cromatográficos de estas muestras mostraron que la FLNA era principalmente nafta (fracción GRO, cadenas ligeras $C \leq 10$), con trazas subordinadas de gasoil (identificadas por pristano y fitano). Dado que la composición coincide con una nafta que no tiene alta volatilidad y tampoco coincide con el gasoil moderno que se comercializaba en el momento, lo cual sugiere que es una fuente histórica producto de fugas antiguas en la ES.

5.1.4. SUELO PERÍODO 2012:

Se tomó muestras de suelo por cada metro de avance y se logró entubar a siete (7) de los diez (10) perforaciones realizadas a fin de monitorear el acuífero freático. Los perfiles de suelo obtenidos fueron descriptos en campo para cada pozo. Los registros confirman el predominio de material arenoso con presencia de gravas de 7 a 0.5 cm con distintas proporciones de arcilla.

Los análisis de laboratorio efectuados en la matriz suelo (Tabla N°6) revelaron concentraciones elevadas de HTP a partir de los 5 metros de profundidad. Pozos internos a la ES (P1, P2, P6) mostraron también hidrocarburos en suelo principalmente DIESEL (DRO) en niveles menores. En los primeros metros de perforación no se encontraron HTP elevados, siendo >5 mg/kg de peso seco, lo que sugiere que la zona fuente de la contaminación está en niveles profundos del tanque. La mayor afectación de suelo se manifestó a partir de los 6 metros de profundidad, en el pozo P7 (HTP= 110360mg/kg) ubicado en las instalaciones de la Escuela; le siguen los pozos P1 (HTP= 3355 mg/kg) y P2 (HTP= 3123 mg/kg) ubicados en la vereda de la ES. El pozo P7 es el único que ha superado la normativa tomada como referencia (Tabla N°7).

5.1.5. AGUA SUBTERRÁNEA PERÍODO 2012:

Los pozos internos P1 y P6 registraron las concentraciones más altas de CDI's en agua, superando lo establecido en la normativa (Tabla N° 4). En ellos, los niveles de HTP disuelto superaron 1000 mg/L, con BTEX totales hasta 600 mg/L. Otros pozos (P4, P5) mostraron HTP bajos o no detectables, indicando que la pluma inicial estaba concentrada en torno a la ES y extendiéndose en dirección Este hacia el pozo P6.

En la figura N° 7 se presenta el mapa de Mapa interpolación IDW de concentraciones de los CDI's, periodo 2012, se elaboró teniendo en cuenta los siete (7) pozos que pudieron ser encamisado en julio y los construidos el mes de agosto 2012 cuando se amplió la red de monitoreo para la instalación del sistema de extracción por doble fase. Este mapa reveló un foco principal de contaminación frente a la estación (cercano a P2), con concentraciones de HTP >5000 mg/L y benceno con concentraciones aproximadas a 600 mg/L. También se observaron elevadas concentraciones en el pozo P6, ubicado en la vereda del colegio. En cambio, los pozos periféricos (PA1, FB2, FB3, etc.) no mostraron concentración de CDI's disueltos en el agua subterránea, razón por la cual se puede considerar que la pluma de contaminación de hidrocarburos disuelto se presenta delimitada por los freáticos construidos y la afectación se encuentra delimitada en extensión, no así en profundidad.

La etapa inicial evidenció que el acuífero está severamente impactado por hidrocarburos: presencia de FLNA típica de nafta histórica y altos niveles de HTP y BTEX disueltos en pozos claves. Este diagnóstico confirmó la necesidad urgente de intervención y sirvió de referencia para medir los cambios posteriores.

5.2. ANÁLISIS TEMPORAL Y ESPACIAL 2013-2023

Los datos de las mediciones del nivel freático y del espesor de FLNA se registraron entre los años 2013 y 2023 cuando se desarrolló un proceso de remediación activa y pasiva. En la ronda de medición de julio- 2017 se registró un espesor de 0,92 m de FLNA en el pozo PE1 y presencia en el PE4; en octubre se produjo el cierre de la estación para acondicionar el sistema SASH. Tras su reapertura en 2018, los muestreos pasaron a ser anuales: en 2019, 2021 y 2022 se realizaron en diciembre, mientras que, en 2020, debido a la pandemia de COVID-19, solo se registraron niveles freáticos en marzo sin análisis de laboratorio. En 2023 el muestreo de agua subterránea se efectuó en el mes de junio, detectándose FLNA en el pozo PV3 y el pozo PV4 el cual lo continúa en dirección Sureste se presentó “Seco”. En todos los pozos de la estación con presencia de producto libre (PE3-PE4) se instalaron skimmers para su absorción, con recambios según la necesidad operativa.

5.2.1. ANÁLISIS DE FLNA

En el período transcurrido entre el año 2012 y el año 2023 se analizó cuatro (4) veces la FLNA detectada en los pozos de monitoreo PE1 en Ago-2016; PE4 en Nov-2016; PE4 en Feb-2017 y PV3 en Jun2023. Del análisis cromatográfico de la FLNA recuperada se observa un perfil caracterizado por la presencia de hidrocarburos en el rango C9–C30, con predominio en el intervalo C10–C16. La similitud de los resultados obtenidos en los diferentes muestreos permite inferir que se trata de un mismo tipo de producto, históricamente vinculado al almacenamiento y despacho de combustibles en la ES. Asimismo, se observa una reducción relativa de los compuestos más volátiles (C9–C12) a lo largo del tiempo, atribuible a procesos de volatilización y biodegradación natural, mientras que las fracciones más pesadas (C14–C20) muestran mayor persistencia. Se presenta en la Tabla N° 8 los resultados analíticos obtenidos en los distintos pozos en los diferentes años ensayados.

5.2.2. MEDICIONES DEL NIVEL FREÁTICO PERÍODO 2013-2023:

La figura N°8 representa por codificación de color de la profundidad del nivel freático promedio en el año 2013-2023. Se observa que en la zona interna del predio ES el nivel freático se presenta relativamente alto y en esa misma área se detectaron espesores de FLNA entre 0 y 0.92 mbbp. En cambio, hacia SE el nivel freático se encontró más profundo (entre 5–7 m según el escurrimiento regional), se ha registrado secos varios pozos a lo largo del periodo, pero el PV4 se destaca por su relevancia. En el periodo analizado, el espesor de FLNA fue entre 0.001 y 0.2 mbbp, registrado este último valor en el año 2013 en el pozo PV3. Los últimos registros de ese pozo indican un espesor de 0.01 mbbp de FLNA.

La figura N° 9 muestra el análisis estadístico mediante boxplots donde se evidencia la evolución del nivel freático (NF) y del espesor de FLNA entre 2013 y 2015 bajo condiciones de remediación activa. La distribución anual del NF presenta rangos intercuartílicos (IQR) estrechos y medianas estables, lo que indica baja variabilidad interanual y ausencia de desplazamientos significativos en la profundidad del acuífero. Esta estabilidad hidráulica descarta efectos hidrodinámicos como factor condicionante

en la movilidad vertical del contaminante.

En contraste, la distribución del espesor de FLNA muestra medianas iguales a cero en todos los años evaluados, acompañadas por una elevada dispersión de valores atípicos (outliers) de baja magnitud. Este patrón es consistente con un sistema en etapa avanzada de remediación, donde la presencia de producto libre se limita a eventos esporádicos y no a láminas continuas.

En conjunto, la tendencia estadística observada sugiere una reducción sostenida de la FLNA atribuible al sistema de doble extracción, con un comportamiento residual del contaminante y sin indicios de recuperación significativa de fase libre a lo largo del período analizado.

La figura N° 10 presenta la evolución estadística NF y del espesor de FLNA durante el período 2016–2023, bajo un esquema de **remediación pasiva mediante atenuación natural**, complementado con la utilización puntual de skimmers para la remoción de producto libre.

En la distribución del NF se observa que las **medianas anuales se mantienen estables**, con valores comprendidos aproximadamente entre 4,0 y 5,5 mbbp. Los rangos intercuartílicos (IQR) son moderados y relativamente constantes entre años, lo que refleja una **baja variabilidad hidrogeológica** y una estabilidad en la posición del nivel freático. Los outliers presentes en algunos años (particularmente 2017, 2018 y 2020) indican fluctuaciones locales o estacionales, sin evidencias de cambios estructurales en el comportamiento del acuífero.

Por su parte, la distribución del espesor de FLNA muestra medianas iguales a cero en todos los años, lo que evidencia la ausencia sistemática de láminas continuas de producto libre. Los valores atípicos, de magnitud reducida y presentes principalmente entre 2017 y 2019, representan **eventos esporádicos de aparición residual de FLNA**, consistentes con remanentes atrapados en la zona saturada o con pequeñas acumulaciones inducidas por leves variaciones del NF. A partir de 2020 se registra una disminución significativa en la frecuencia y magnitud de estos outliers, lo cual sugiere una transición hacia un estado más estable del sistema, característico de fases avanzadas de atenuación natural.

En conjunto, la gráfica indica que, durante el período de remediación pasiva, el acuífero mantuvo condiciones hidráulicas estables y no se evidenció recuperación sostenida de FLNA, limitándose su presencia a eventos residuales puntuales. Este comportamiento es consistente con un sitio en proceso de estabilización y con una reducción progresiva de la masa disponible de hidrocarburos libres en la interfaz freática.

5.2.3. Mapas dinámicos

- Durante el período **2013–2015** (Figura N°11), la pluma se extiende hacia la escuela y la VP, con concentraciones máximas en la ES. Los HTP fueron los compuestos que ha registrado las concentraciones más elevadas, superando ampliamente el valor guía de intervención (VGI = 0,5 mg/L), mientras que los BTEX mostraron picos agudos en sectores puntuales. La determinación química del MTBE inicio en el año 2015, con anterioridad este parámetro no era analizado.

- En el período **2016–2023** (Figura N°12), en línea se observó una reducción progresiva en extensión y magnitud de la pluma, con persistencia de focos en la ES y episodios en la escuela. El último monitoreo del año 2023 evidenció la presencia de FLNA en el pozo PV3 y la dilución de compuestos de interés en elevadas concentraciones (HTP 103mg/l- Benceno 2.5 mg/l), mientras que el pozo PV4, el que delimita la pluma hacia el este, se halló SECO en reiteradas oportunidades.

5.3. RESULTADOS POR SECTOR

5.3.1. Vía Pública (VP) -Pozo FB1

- **Resumen estadístico descriptivo Vía Pública:**

El pozo ubicado en la VP frente a la ES presenta concentraciones generalmente bajas para los compuestos de interés analizados, aunque se observan episodios de elevación que generan una dispersión significativa. En la Tabla N° 9 se presenta el resumen estadístico del pozo FB1 que fue analizado desde su construcción durante la totalidad de las campañas ejecutadas. El HTP muestra un promedio reducido (3,94 mg/L) pero con un máximo de 48,10 mg/L y un 50,6% de casos por encima del VGI, El BTEX total presenta una media de 233,76 mg/L pero con desviación estándar muy elevada y un valor máximo que supera los 19000 mg/L, evidenciando la presencia de picos aislados. Los compuestos individuales mantienen valores centrales mínimos, aunque el benceno presenta un 60,24% de excedencias respecto al VGI, constituyendo el principal contaminante del sector.

- **Evolución temporal (2013–2023) de las concentraciones de CDI's en FB1-VP**

La figura N°13 muestra la evolución temporal de las concentraciones medias de HTP, BTEX y MTBE en el pozo FB1 entre 2013 y 2023. Se observa una clara tendencia decreciente en las concentraciones medias de los tres compuestos, siendo particularmente notable en el caso de los HTP, que presentaban los valores absolutos más elevados al inicio del período. Los HTP muestran una reducción de aproximadamente dos órdenes de magnitud, mientras que el BTEX y el MTBE experimentan disminuciones igualmente significativas, aunque en rangos de concentración absoluta menores. La tendencia general confirma una reducción sostenida, donde la remediación activa inicial (2013-2015) logró controlar los picos de contaminación más agudos, y la remediación pasiva (2016-2023) permitió consolidar estos avances y alcanzar una estabilización progresiva de las concentraciones medias en el pozo. El uso de la escala logarítmica en el eje Y refuerza visualmente la magnitud de esta disminución, mostrando cómo las concentraciones medias de todos los compuestos se mantuvieron en órdenes de magnitud inferiores durante la segunda mitad del período de estudio.

- **BOXPLOT – Vía Pública (VP) Periodo de remediación activa y pasiva**

El análisis comparativo de los valores medios de HTP, BTEX y MTBE entre los períodos 2013-2015 y 2016-2023, se presenta en la Figura N° 14, donde se revela una evolución positiva en la calidad ambiental. Durante el primer período, los tres compuestos presentaron valores medios elevados con amplia dispersión, particularmente notorios en HTP y BTEX. En el segundo período, se observa una reducción drástica en las concentraciones medias de todos los compuestos, junto con una notable disminución en la variabilidad. La desaparición de valores atípicos en el período 2016-2023 confirma una mayor estabilización del área y la efectividad de las estrategias de remediación implementadas.

5.3.2. ESCUELA (PV1, PV2, FA1)

- **Resumen estadístico descriptivo Escuela:**

El área de la Escuela presenta un patrón de contaminación mucho más significativo y persistente. Según se observa en la Tabla N° 10: resumen estadístico Escuela, el HTP alcanza un promedio de 78.69 mg/L y BTEX un valor medio de 6208.42 mg/L, ambos acompañados por desviaciones estándar muy altas que reflejan una mezcla de

contaminación crónica con eventos de fuerte concentración. Los máximos registrados son excepcionalmente elevados (BTEX llega a 333,545 mg/L; xileno supera los 277,819 mg/L), lo que indica la presencia de fuentes activas o residuales cercanas. Los porcentajes de superación del VGI resultan elevados en casi todos los compuestos: 72.58% en HTP, 71.77% en benceno y entre 25% y 47% en el resto de los parámetros. La gran diferencia entre los percentiles bajos y los máximos evidencia un sistema **altamente heterogéneo**, con concentraciones que se elevan marcadamente en determinados sectores o momentos. Esta situación sugiere un escenario de **contaminación persistente y de alta intensidad** asociada a focos locales y migración en el acuífero.

- **Evolución temporal (2013–2023) de las concentraciones de CDI's ESCUELA (PV1, PV2 y FA1):**

El análisis temporal de las concentraciones medias en los pozos PV1, PV2 y FB1 muestra una tendencia decreciente consistente en los tres puntos de monitoreo. FB1 presentó los valores medios más elevados al inicio del período de estudio, mientras que PV1 y PV2 mostraron niveles menores. La convergencia progresiva de las concentraciones medias hacia 2023 sugiere una homogenización de las condiciones del acuífero y la efectividad de las medidas correctivas aplicadas en el área.

- **BOXPLOT – REMEDIACIÓN PASIVA Y ACTIVA ESCUELA:**

La Figura 16 representa el boxplot de los CDI presentes en los pozos analizados de la Escuela en los dos periodos analizados, durante la remediación pasiva y activa.

La comparación de las concentraciones medias de CDI's en el entorno escolar entre los dos períodos evidencia una mejora significativa. El período 2013-2015 mostró valores medios elevados con presencia de eventos puntuales de contaminación, mientras que el período 2016-2023 presenta una reducción sustancial en las concentraciones medias y una menor dispersión de los datos. Esta mejoría es particularmente relevante por tratarse de un entorno sensible, donde la reducción en los valores medios de contaminantes implica una disminución directa en el riesgo para la población estudiantil.

5.3.3. Estación de Servicio (ES)

- **Resumen estadístico descriptivo:** La Estación de Servicio presenta las concentraciones más elevadas del análisis, coherente con la naturaleza de las actividades del sitio. En la tabla N°11 se presenta el resumen estadístico descriptivo, el promedio de HTP alcanza 183.5 mg/L, mientras que BTEX presenta un valor medio de 4359 mg/L, con máximos extremadamente elevados (BTEX llega a 207,060 mg/L y xileno a 177,222 mg/L). Las desviaciones estándar muy grandes reflejan un ambiente con alta variabilidad espacial y temporal, donde la presencia de picos domina la estadística. La frecuencia de superación del VGI es muy significativa: 84.48% en HTP, 72.41% en benceno y valores altos para el resto de los compuestos, con más del 60% en el caso del xileno.
- **Evolución temporal (2013–2023) de las concentraciones de CDI's ES:**

La Figura N° 17 representa la evolución temporal de las concentraciones medias en los pozos PE1 y PE3 muestra una tendencia decreciente en ambos casos, aunque con comportamientos diferenciados. PE3 presentó valores medios iniciales más elevados y una disminución más pronunciada, posiblemente asociada a su mayor proximidad a fuentes contaminantes originales. La reducción consistente en las concentraciones medias de ambos pozos refleja la efectividad de las estrategias de gestión

implementadas en el sitio.

- **BOXPLOT – Estación de Servicio (ES):**

La Figura 18 representa el boxplot de los compuestos de interés HTP, BTEX y MTBE en los pozos analizados de la ES durante el periodo de remediación activa y pasiva. El análisis comparativo de las concentraciones medias de los CDI's en la ES entre los dos períodos muestra una reducción significativa en el período 2016-2023. La disminución en los valores medios se acompaña de una reducción en la variabilidad de los datos, indicando no solo una mejoría en los niveles promedio de contaminación, sino también una mayor estabilidad en las condiciones del sitio. Estos resultados reflejan el éxito de las medidas de remediación en reducir el riesgo ambiental asociado a estos compuestos.

5.4. ESTADO DE CUMPLIMIENTO CON NORMATIVA VIGENTE

La Figura N° 19 muestra el porcentaje de muestras de agua subterránea que superaron los **VGI** establecidos en la normativa provincial (Decreto Provincial N° 450/2021) para los principales compuestos analizados. Los compuestos con mayor frecuencia de superación son los HTP y el benceno, ambos con porcentajes cercanos al 70% de las muestras. En segundo orden se encontraron los BTEX totales con un porcentaje de superación cercano al 40% y mientras que los xilenos se han superado en un 38%. El tolueno presenta porcentajes superior cercana al 30%, mientras que el etilbenceno muestra un porcentaje menor de incidencia (20%). Finalmente, el MTBE registra un nivel prácticamente nulo de superaciones, con porcentaje cercano al 2%, lo que coincide con su baja presencia en las formulaciones de combustibles utilizadas en la región.

6. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten evaluar la eficacia de las estrategias de remediación implementadas en el sitio, diferenciando la fase activa (2013–2015) de la fase pasiva (2016–2023). En términos generales, se observaron reducciones significativas en las concentraciones disueltas de hidrocarburos analizados (HTP y BTEX), así como una contracción espacial de la pluma, lo cual sugiere un proceso de atenuación natural complementado por la extracción inicial. Sin embargo, la persistencia de focos críticos y las limitaciones en el diseño de monitoreo obligan a matizar la interpretación.

6.1. Efectividad del proceso de remediación

Durante la fase activa, la extracción de fase libre y la reducción inicial de contaminantes generaron una disminución rápida de las concentraciones. Posteriormente, la fase pasiva consolidó esa tendencia mediante procesos de biodegradación natural asistida, lo que se refleja en la disminución de la mediana y del percentil 75 de HTP y BTEX. Estos hallazgos son consistentes con lo reportado por la literatura, donde la atenuación natural asistida se considera un mecanismo eficiente una vez controlada la fuente principal (USEPA, 2012).

No obstante, los datos también muestran que los HTP se mantuvieron por encima de los valores guía en la mayoría de los pozos, y los BTEX, aunque reducidos, presentaron episodios puntuales de superación. Esto confirma que, si bien la remediación redujo la magnitud de la contaminación, no alcanzó a garantizar la plena recuperación de la calidad del acuífero, quedando un remanente de producto que se visibiliza en los momentos donde se eleva o descendiendo el nivel freático. No se cuenta con datos relacionado a las características de las aguas, su composición catiónica y aniónica, como así tampoco se ha encontrado información sobre la influencia de la marea en las aguas freáticas, generando un sesgo en la característica físico-químicas del acuífero freático.

6.2. Atenuación Natural Asistida por skimmers

Durante la fase pasiva, en varios pozos se implementaron skimmers para la extracción de la FLNA. Si bien esta práctica redujo la presencia visible de hidrocarburos en superficie, impidió disponer de un registro confiable del espesor acumulado de fase libre. Esta falta de información limita la posibilidad de evaluar con precisión la masa remanente de contaminantes en la zona fuente, y por lo tanto dificulta estimar la eficacia real de la remediación.

Además, la disminución de concentraciones disueltas observada podría atribuirse tanto a procesos de atenuación natural como a la acción intermitente de los skimmers, lo que introduce un sesgo interpretativo. En este sentido, la fase pasiva no refleja un proceso exclusivamente natural, sino una combinación de factores.

Para conocer el desarrollo y control de un proceso de Atenuación Natural, se propone la implementar el software Bioscreen de Geological Survey of Ireland (GSI®), que simula la biodegradación mediante reacciones aerobias y anaerobias asociada a la atenuación natural de hidrocarburos disueltos, está basado en el modelo analítico de transporte de solutos de Domenico. Para llevar adelante el análisis es necesario tener conocimiento de algunas variables ambientales como pH, sulfatos, alcalinidad, entre otros.

6.3. Riesgos ambientales y matrices no monitoreados

Otro punto crítico del análisis es la ausencia de monitoreo en matrices complementarias. La fase gaseosa constituye una vía de exposición relevante en sitios contaminados con hidrocarburos, debido al riesgo de intrusión de vapores hacia edificaciones cercanas, como fue el caso en la escuela. De hecho, antecedentes en el sitio ya habían reportado presencia de vapores en el subsuelo escolar, lo que refuerza la necesidad de incluir monitoreos sistemáticos de gases del suelo (ITRC, 2007; Hilpert et al., 2015).

Por su parte, la matriz suelo también cumple un rol relevante como reservorio de hidrocarburos adsorbidos, liberando compuestos al acuífero de forma lenta y sostenida (Berruecos, 2012; Custodio & Llamas, 1983). Solo se ha observado análisis en el año 2012, por lo cual, la ausencia de análisis contemporáneos en el suelo implica que el balance de masa está incompleto, y que la persistencia de la contaminación podría estar subestimada.

Las principales matrices contaminantes en el subsuelo son: el *agua subterránea (fase disuelta)*, *suelo (hidrocarburos adsorbidos)*, *fase libre no acuosa (FLNA)* y *gases del suelo (vapores)*. La interacción dinámica entre estas, a través de procesos de disolución, volatilización, difusión y desorción, hacen necesario un monitoreo integral que considere múltiples matrices, ya que el análisis exclusivo de la fase disuelta puede subestimar el riesgo ambiental y sanitario asociado a la persistencia de hidrocarburos en el medio subterráneo.

En este sentido, un abordaje integral debería incluir la evaluación de fase disuelta, fase libre, vapores del suelo y suelo, lo cual permitiría una caracterización más robusta de la evolución del sistema. El uso del software RBCA (Acción Correctiva Basada en el Riesgo) es utilizado para realizar un análisis de riesgo para la salud humana, con el fin de gestionar sitios contaminados priorizando las intervenciones de remediación según el riesgo real y asegurando soluciones efectivas y eficientes. Esta metodología permite determinar los objetivos de limpieza, optimizar los recursos al enfocarse en los riesgos críticos y reducir los costos totales del proceso.

6.4. Adecuación de los valores guía de intervención (VGI)

El análisis comparativo se realizó en función de los valores guía de intervención establecidos por la normativa vigente. Sin embargo, surge la necesidad de debatir su adecuación en un contexto actual, considerando la evolución de los combustibles. En particular:

Los VGI están centrados en compuestos tradicionales (PAH, BTEX y Aceite Minera/HTP), pero no incluyen oxigenantes emergentes como ETBE o Etanol, que en otros países han demostrado ser contaminantes persistentes en acuíferos (Connor et al., 2015;), por lo que su incorporación en los análisis sería de gran interés para conocer el tipo de oxigenante que componen las naftas en la isla.

Los criterios de vapor intrusivo no están contemplados en la normativa local, lo que impide evaluar adecuadamente el riesgo por inhalación en áreas sensibles como escuelas o viviendas (ITRC, 2007). Por otro lado, para facilitar el uso de propiedades afectadas por productos químicos, la norma ASTM E2435, es una guía estándar para aplicación de controles de ingeniería para mejorar la seguridad y minimizar los riesgos asociados a la exposición sustancias químicas nocivas.

Por lo tanto, aunque los VGI utilizados resultan útiles como referencia, deberían complementarse con nuevos parámetros de control que incluyan tantos contaminantes emergentes como criterios de exposición inhalatoria y niveles objetivo de remediación con criterio de riesgo. En tal sentido la RESOL-2023-227-GCABA-APRA, es un modelo a considerar para la implementación de normativa para la evaluación de Sitios Potencialmente Contaminados y su Recomposición Ambiental.

En síntesis, si bien la remediación implementada tuvo un efecto positivo en la reducción de la contaminación, la falta de registros reales de espesor de FLNA, la ausencia de monitoreo en matrices suelo y gas, y la falta de análisis de otros oxigenantes plantean vacíos en la interpretación de los resultados. Se propone que la gestión futura del sitio se realice bajo un enfoque integral, que contemple la inclusión de múltiples matrices (agua, suelo, gas), la actualización de los parámetros normativos, y la incorporación de nuevas herramientas de análisis (Tabla N°12), como indicadores microbianos de biodegradación con el uso de softwares para el análisis de evolución (Chen et al., 2024).

7. CONCLUSIONES

El análisis integral de la evolución de la contaminación entre 2013 y 2023, comparada con la Línea de Base en el año 2012, demuestra que la remediación aplicada fue eficaz como medida inicial de control, reduciendo significativamente las concentraciones de hidrocarburos disueltos y la extensión de la pluma visualizada en el año 2012. Sin embargo, no alcanzó la restauración completa del acuífero, manteniéndose superaciones críticas respecto de los VGI, siendo necesario ampliar el área de estudio hacia el sentido sureste de PV4 y hacia la Ex Usina, efectuando nuevas perforaciones y toma de muestras que permitan tener información integral de las distintas matrices, para evaluar la necesidad de implementar otro tipo de tecnología de remediación para el sector.

La fase activa (2013–2015) permitió un rápido control de la fuente primaria, mientras que la fase pasiva (2016–2023) consolidó un proceso de atenuación natural asistida, evidenciado por la disminución de la media, la mediana y el percentil 75 de HTP y BTEX, así como por la contracción espacial de la pluma. No obstante, el uso de skimmers restringió la cuantificación del espesor de FLNA y, por ende, la estimación de la masa residual.

El análisis normativo puso de manifiesto que, si bien los VGI vigentes constituyen una

herramienta útil para la gestión, resultan insuficientes frente a contaminantes emergentes (ETBE, etanol) y carecen de criterios específicos para exposición inhalatoria. Asimismo, se evidencia la necesidad de un cumplimiento estricto del marco legal nacional, que incluye la contratación de un seguro ambiental obligatorio (Ley General del Ambiente N° 25.675, art. 22) y la evaluación de sitios potencialmente contaminados y su recomposición ambiental, a fin de garantizar la responsabilidad objetiva de los operadores de estaciones de servicio en la prevención, mitigación y recomposición de pasivos ambientales.

En síntesis, esta triangulación metodológica permitió obtener una visión integral del problema, combinando análisis espacial, temporal y estadístico para evaluar la eficacia de la remediación y la persistencia de contaminantes en el subsuelo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (Agency for Toxic Substances and Disease Registry – ATSDR). (2004). *Toxicological profile for benzene*. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services.
- Büro für Umweltfragen GmbH (BfU) de Argentina S.A. (2016-2017) Informe monitoreo trimestrales de agua subterránea Estación de Servicio. Inédito.
- Bujalesky, G. (2007). Coastal geomorphology and evolution of Tierra del Fuego (Southern Argentina). *Geológica Acta* 5(4): 337-362. 2011. The flood of the Beagle Channel (11,000 YR B.P.), Tierra del Fuego. *Anales del Instituto de la Patagonia* 39: 5-21.
- Chen, H., Xuexia Chen, Shuai Zhang, Lijin Yi, Zheng Wei Liu, Xiangyu Ye, bo yu, Shuai Shi & Xiaoxia Lu (2024). *In situ biodegradation of BTEX in groundwater: long-term evidence from a former industrial site*. *Environmental Pollution*, 336, 122619.
- Clean World SRL (2012) Estudio de sitio en la Estación de Servicio Rio Grande. Inédito.
- Connor, J. A., Kamath, R., Walker, K. L., & McHugh, T. E. (2015). Review of quantitative surveys of the length and stability of MTBE, TBA, and benzene plumes in groundwater at UST sites. *Groundwater*, 53(2), 195–206. <https://doi.org/10.1111/gwat.12233>
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrogeología* (Tomo 1). Barcelona: Ediciones Omega.
- Decreto Provincial N° 450/2021. *Anexo II – Tabla N.º 10: Niveles guía para agua subterránea*. Gobierno de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur (Argentina).
- Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (1996) "BIOSCREEN, Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones sobre Atenuación Natural - Manual del Usuario, Versión 1.3 (PDF) " (100 págs., 1,15 MB, Acerca del PDF). Publicación n.º EPA/600/R-96/087. Agosto de 1996.
- Environmental Protection Agency (U.S. EPA). (2006). *Regulation of underground storage tanks*. Washington, DC: U.S. EPA.
- Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2006). Dual Phase Extraction. United States Environmental Protection Agency.
- Environmental Protection Agency. (U.S. EPA) (2012). *EPA's vapor intrusion database: Evaluation and characterization of attenuation factors for chlorinated volatile organic compounds and residential buildings* (EPA 530-R-10-003). Office of Solid Waste and Emergency Response.

- Foster, S. & Hirata, R. (1988). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. CEPIS.
- Foster, S., Chilton, J., Moench, M., Cardy, F., & Schiffler, M. (2002). *Groundwater quality protection: A guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies*. Washington, DC: World Bank.
- Freezer, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- Hilpert, M., Adria-Mora, B., Ni, J., Rule, A. M., & Nachman, K. E. (2015). Hydrocarbon release during fuel storage and transfer at gas stations: Environmental and health effects. *Current Environmental Health Reports*, 2(4), 412–422. <https://doi.org/10.1007/s40572-015-0074-8>
- Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC). (2007). *Vapor intrusion pathway: A practical guideline*. VI-1. Washington, D.C.: ITRC
- Instituto Nacional del Agua (INA). (2001). *Diagnóstico hidrogeológico de la ciudad de Río Grande, Tierra del Fuego*. Subprograma de Recursos Hídricos Subterráneos. Informe técnico interno.
- Kissar, S., & Khammoudj, K. (2023). Assessment of groundwater vulnerability to pollution using GOD method in the Soummam catchment area (Northern Algeria). *Food and Environment Safety*, 22(1), 68–79. <https://fens.usv.ro/index.php/FENS/article/view/979>
- Ley Nacional N° 25.675 de Presupuestos Mínimos para el Ambiente. (2002). República Argentina.
- Ley Provincial N° 1126. Sancionada en el año 2016. *Marco para la gestión integral de los recursos hídricos*. Ushuaia: Gobierno de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur (Argentina).
- Lirio, J. M., Olivero, E. B., & Scasso, R. A. (2003). Geología de la región de Río Grande, Tierra del Fuego, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58(1), 3–20.
- Michelsen & Boyce (1993) Normas de Limpieza para Hidrocarburos de Petróleo. Parte 1-2. Revisión de Métodos y Avances Recientes. DOI: 10.1080/15320389309383443
- Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). (2008). *Mapa geológico de la provincia de Tierra del Fuego – Hoja 5669-I Río Grande*. Buenos Aires: SEGEMAR.
- Zhou, D., & Blunt, M. (1997). Multiphase flow in porous media: A review of recent progress. *Transport in Porous Media*, 27(1), 1–24.

Bibliografía consultada:

- Berruecos, J. (2012). *Contaminación por hidrocarburos en el subsuelo: fundamentos y comportamiento*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- BIOSUM SRL (2012) Estudio Hidrogeológico. Afectación subterránea con hidrocarburos Estación de Servicio Río Grande. Inédito.
- ERM de Argentina S.A. Reporte de medición e Informe de Monitoreo 2021, 2022, 2023 Estación de Servicio Río Grande. Inédito.
- Tema 2000 (2013-2014-2015) Informes de avance de obra Estación de Servicio Río Grande. Inédito.

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1: Ubicación geográfica de la red de medición freática.

Pozo_ID	Lat. Sur	Long. Oeste	Ubicado
FA1	-53.787153°	-67.700131°	Escuela (Esc)
FA2	-53.787419°	-67.700650°	Escuela (Esc)
P4	-53.787250°	-67.701000°	Escuela (Esc)
P5	-53.787028°	-67.700667°	Escuela (Esc)
P8	-53.787028°	-67.700194°	Escuela (Esc)
P9	-53.786444°	-67.701250°	Escuela (Esc)
PV1	-53.786872°	-67.700369°	Escuela (Esc)
PV2	-53.786953°	-67.700225°	Escuela (Esc)
PV3	-53.787036°	-67.700067°	Escuela (Esc)
PV4	-53.787156°	-67.699833°	Escuela (Esc)
PV5	-53.786919°	-67.700581°	Escuela (Esc)
PV6	-53.786994°	-67.700700°	Escuela (Esc)
PE1	-53.786608°	-67.700864°	Estación Servicio (ES)
PE2	-53.786714°	-67.700706°	Estación Servicio (ES)
PE3	-53.786783°	-67.700900°	Estación Servicio (ES)
PE4	-53.786722°	-67.700842°	Estación Servicio (ES)
PE5	-53.786703°	-67.701042°	Estación Servicio (ES)
PE6	-53.786614°	-67.701056°	Estación Servicio (ES)
P1	-53.786500°	-67.700833°	Sin funcionar- ES
P2	-53.786667°	-67.700750°	Sin funcionar- ES
P6	-53.786944°	-67.700528°	Sin funcionar- ES
FB1	-53.786564°	-67.700542°	Vía Pública (VP)
FB2	-53.786694°	-67.700247°	Vía Pública (VP)
FB3	-53.786489°	-67.700444°	Vía Pública (VP)
PA1	-53.786486°	-67.701114°	Vía Pública (VP)
PV7	-53.786964°	-67.700922°	Vía Pública (VP)
PV8	-53.786171°	-67.701643°	Vía Pública (VP)
PV9	-53.786638°	-67.702833°	Vía Pública (VP)

Tabla N° 2: Actividad de medición en la red freática entre julio 2012 y junio 2023

Mes	Años de registro de NF y Espesor de FLNA	Toma de muestra de Agua subterránea	Toma de muestra FLNA
Enero	2013-2014-2015-2017-2018		
Febrero	2013-2014-2015-2016-2017-2018	2017-2018	2017
Marzo	2013-2014-2015-2020	2015	
Abril	2013-2014-2015-2017	2014	
Mayo	2013-2014-2015	2017	
junio	2013-2014-2015-2017-2023	2023	2023
Julio	2013-2014-2015-2017-2023	2012	2012
Agosto	2012-2013-2014-2015-2016-2017-2022-2023	2012-2013-2016-2017	2016
Septiembre	2012-2013-2014-2015-2016-2017-2022		
Octubre	2012-2013-2014-2015-2016-2017		
noviembre	2012-2013-2014-2016-2017	2016-2017	2016
Diciembre	2012-2013-2014-2016-2017-2021-2022	2019-2021-2022	

Tabla N° 3: Profundidad promedio del nivel freático (NF) en los pozos de monitoreo que componen la red freática. Periodo 2012/2023

Pozo_ID	NF_mbbp
PV9	2.39
PV8	3.99
PV7	3.41
PV6	4.19
PV5	4.44
PV4	7.26
PV3	6.91
PV2	6.13
PV1	5.61
PE6	4.91
PE5	4.81
PE4	5.21
PE3	4.96
PE2	5.09
PE1	4.93
FA1	6.02
FA2	3.94
FB1	5.14
FB2	6.81
FB3	5.90
FB2	4.15
P8	3.76
P9	2.64
PA1	4.15

Tabla N° 4: Valores guía de Decreto Reglamentario N° 450/2021 de la Ley Provincial N° 1126.

Tabla N° X-Decreto Reglamentario N° 450/2021				
Parámetro	Unid	A-Referencia	C- Alerta	B-Intervención
Aceite mineral/ HTP	mg/L	0.05	0.2	0.6
Benceno	mg/L	0.0002	0.001	0.005
Etilbenceno	mg/L	0.0002	0.02	0.06
Tolueno	mg/L	0.0002	0.015	0.05
Xilenos	mg/L	0.0002	0.02	0.06
MTBE	mg/L	-	-	9.4

Tabla N° 5: Resultado de los gases (g/m³) ocluidos y los tomados en el sótano de en julio 2012.

Ident.	Metano	Etano	Propano	Butano	Pent.	BTEX	Benceno	Tolueno	Et. Benc.	Xilenos
G1	2,5	< L.D.	< L.D c	2,4	50,0	< L.D	< L.D.	< L.D	< L.D.	< L.D
G2	12,6	< L.D.	< L.D.	2,6	47,5	< L.D	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
G3	2,7	< L.D.	< L.D.	2,6	56,2	< L.D	< L.D.	< L.D.	< L.D	< L.D
G4	330	< L.D.	4,6	82,6	113,5	< L.D	< L.D.	< L.D.	< L.D	< L.D
G5	335	< L.D.	3,2	3,2	62,3	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D.	< L.D
G6	279	17,4	6,6	7,7	67,0	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D.	< L.D.
G7	57,2	< L.D.	17,2	16,0	132,4	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G8	245	< L.D	4,5	7,8	110,2	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G9	122770	5850	538	211	131,3	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G10	487	< L.D.	113	51,9	98,7	< L.D	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D
G11	368	< L.D.	8,1	116,4	61,4	< L.D	< L.D.	< L.D	< L.D	< L.D
G12	495	< L.D.	13,4	15,7	13,5	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G13	42,3	< L.D.	< L.D.	4,8	47,5	< L.D	< L.D.	< L.D	< L.D.	< L.D
G14	146	< L.D.	3,2	7,0	104,4	< L.D	< L.D.	< L.D	< L.D	< L.D
G15	329	< L.D.	4,8	6,7	96,6	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D.	< L.D
G16	21,4	< L.D.	< L.D	4,6	54,7	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G17	127	< L.D.	1,9	336	55,8	32,4	2,7	11,8	4,8	12,1
G18	412	< L.D.	10,5.	7,0	33,6	< L.D	< L.D.	< L.D	< L.D	< L.D
G19	47,1	< L.D	< L.D	2,3	45,4	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G20	14,3	< L.D.	< L.D	5,0	54,2	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G21	21,0	< L.D.	< L.D	3,0	52,1	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G22	636	< L.D.	1,9	5,2	46,9	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G23	2430	< L.D.	7,6	6,2	47,5	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G24	59,1	< L.D.	< L.D.	2,7	55,7	< L.D	< L.D.	< L.D	< L.D	< L.D
G25	7,4	< L.D.	5,7	8,6	71,9	< L.D	< L.D.	< L.D	< L.D.	< L.D
G26	52,3	3,2	1,8	15,4	125,5	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G27	75,5	< L.D.	< L.D.	4,9	56,6	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G28	5,8	< L.D.	< L.D.	39,0	139,4	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G29	479	< L.D.	7,1	5,4	40,2	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G30	8,7	< L.D.	3,0	173,1	558,4	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G31	33,1	< L.D	11,1	623	1424,3	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D
G32*	130340	< L.D	743	180,2	170,8	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D	< L.D

Ubicación: G1 a G5 sobre las veredas de Rivadavia y Av. San Martín San Martín en la zona de la ex usina, G6 a G9 en la vereda de la Av. Gral. San Martín y G10 a G15 sobre la vereda de la calle Rivadavia que corresponden al Colegio María Auxiliadora. De la misma forma, G16 a G21 han sido tomados sobre la vereda de la calle Rivadavia y G22 a G25 en la vereda de la Av. Gral. San Martín que corresponden a la mano de la estación de servicio. Los gases G26 y G27 se encuentran dentro del predio del colegio, junto a la pared externa del sótano. Los gases G28 y G30 corresponden al aire ambiente del sótano del colegio María Auxiliadora y los G29 y G31 se tomaron de una pequeña perforación realizada en el piso del sótano. Finalmente, G32 corresponde a una muestra de gas de red.

Tabla N° 6: Concentraciones de hidrocarburo en suelos en julio 2012.

Sondeo	GRO (mg/kg)	DRO (mg/kg)	TPH (GRO + DRO) (mg/kg)	Profundidad (m)
P1	1263	2092	3355	6
P2	2852	271	3123	7
P3	247	269	516	5
P5	-	-	-	0-6
P6	1269	78	1347	6
P7	88354	22006	110360	7
P8	-	-	-	0-5
P9	5	-	5	5
P10	5	-	5	5

Los colores en negrita indica que se encuentra por encima de normativa tomada como referencia. El valor de intervención límite para la remediación en suelo es de 5.000mg/Kg para el aceite mineral que se compara con HTP.

Tabla N° 7: Valores guías establecidos en la normativa vigente provincial para los CDI's en suelo. NL: No Legislado.

Decreto Reglamentario N° 1333/1993- Uso Suelo				
Parámetro	Unid	Agrícola	Residencial	Industrial
HTP	mg/Kg	NL	NL	NL
Benceno	mg/Kg	0.05	0.5	5
Etilbenceno	mg/Kg	0.1	3	30
Tolueno	mg/Kg	0.1	5	50
Xilenos Totales	mg/Kg	0.1	5	50
BTEX (suma)	mg/Kg	0.35	13.5	135

Tabla N°8: Análisis cromatográfico de FLNA en distintos pozos y años

Pozo		PE1	PE4	PE4	PV3
Ubicación	Unidad	VP-ES	ES-Isla 3	ES-Isla 4	VP-Escuela
Fecha		ago-16	nov-16	feb-17	jun-23
GRO	%	-	23.97	18.57	42.86
DRO	%	-	76.03	81.43	56.82
Benceno	%	0.01	0.02	0.03	0.04
Tolueno	%	0.05	0.3	0.1	2.58
Etilbenceno	%	0.11	2.86	0.16	0.61
Xilenos T	%	1.73	1.57	3.78	10.66
>nC6 a nC8	%	14.14	2.54	0.19	-
>nC8 a nC10	%	33.21	16.68	14.31	-
>nC10 a nC12	%	39.49	16.97	17.86	-

Programa de Postgrado Interinstitucional en Ciencias Hídricas (con Mención Ambiental)

>nC12 a nC16	%	10.22	25.51	30.35	-
>nC16 a nC21	%	1.04	31.34	29.9	-
>nC21 a nC35	%	<0,01	2.21	3.32	-
Relación C17/pristano	-	1.1	1.1	1.9	0.85
Relación C18/fitano	-	1	0.9	1.5	0.85
Viscosidad Dinámica	cP	0.99	1.97	1.5	impracticable
Densidad	g/cm ³	0.7	0.78	0.83	impracticable

Tabla N°9: Resumen estadístico de la Vía Pública (VP)

	HTP	BTEX	MTBE	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	Xileno
count	83.00	83.00	82.00	83.00	83.00	83.00	83.00
mean	3.94	233.76	0.27	0.04	233.63	0.02	0.07
std	8.42	2128.21	2.32	0.12	2128.22	0.07	0.32
min	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25%	0.30	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50%	0.60	0.04	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
75%	4.30	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
90%	5.32	0.35	0.01	0.05	0.06	0.01	0.06
max	48.10	19389.03	21.00	0.63	19389.00	0.56	2.79
% > VGI	50.60	10.84	1.20	60.24	12.05	4.82	10.84

Tabla N° 10 Resumen estadístico de la Escuela

	HTP	BTEX	MTBE	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	Xileno
count	124	124	124	124	124	124	124
mean	78.69	6208.42	0.42	97.34	976.04	419.81	4715.24
std	207.53	35677.20	2.49	1079.75	6995.10	2722.47	29069.39
min	0.1000	0.0004	0.0000	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
25%	0.5000	0.0400	0.0010	0.0010	0.0042	0.0010	0.0100
50%	5.0000	0.1201	0.0020	0.0100	0.0100	0.0100	0.0478
75%	41.95	5.47	0.01	0.11	0.26	0.06	4.16
90%	188.29	75.75	0.02	1.15	6.89	1.01	38.06
max	1448	333545	22	12024	68183	22215	277819
% > VGI	72.58	47.58	1.61	71.77	37.10	25.00	46.77

Tabla N°11: Resumen estadístico ES

	HTP	BTEX	MTBE	Benceno	Tolueno	Etilbenceno	Xileno
count	58	58	58	58	58	58	58
mean	183.5	4359.0	0.5	0.3	515.3	0.2	3843.2
std	721.5	27402.1	2.8	1.0	3917.7	0.8	23537.6

Programa de Postgrado Interinstitucional en Ciencias Hídricas (con Mención Ambiental)

min	0.01000	0.00040	0.00000	0.00010	0.00010	0.00010	0.00010
25%	2.3250	0.0470	0.0010	0.0011	0.0100	0.0015	0.0100
50%	12.8	0.5527	0.002	0.02135	0.0385	0.01	0.2301
75%	64.15	4.11	0.01	0.28	0.30	0.17	3.32
90%	387.85	19.92	0.17	0.64	1.48	0.48	13.26
max	5398.6	207060	18.7	7.15	29837	4.89	177222
% > VGI	84.48	63.79	3.45	72.41	48.28	31.03	60.34

Tabla N°12: Parámetros propuestos para un monitoreo integral.

Matriz	Parámetros recomendados	Objetivo principal
Agua subterránea	HTP, BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos), MTBE, ETBE, etanol, HAPs; pH, Eh, O ₂ disuelto, conductividad, temperatura, nitratos, sulfatos, hierro y manganeso disueltos	Determinar la extensión y evolución de la pluma; evaluar condiciones redox y capacidad de atenuación natural
Suelo	HTP, BTEX, HAPs, metales asociados (Pb, Zn, Cu), materia orgánica total	Identificar contaminantes adsorbidos en la matriz sólida y evaluar riesgos de lixiviación
Gases del subsuelo / del aire interior	BTEX, metano, dióxido de carbono, oxígeno, humedad relativa	Evaluar riesgo por intrusión de vapores y procesos de biodegradación en zona no saturada
Fase libre (FLNA/FDNA)	Espesor medido, volumen recuperado, caracterización química (fracciones de hidrocarburos)	Cuantificar la masa residual de contaminantes y su potencial de disolución al acuífero

LISTA DE FIGURAS

Figura N°1: Mapa de la zona de estudio

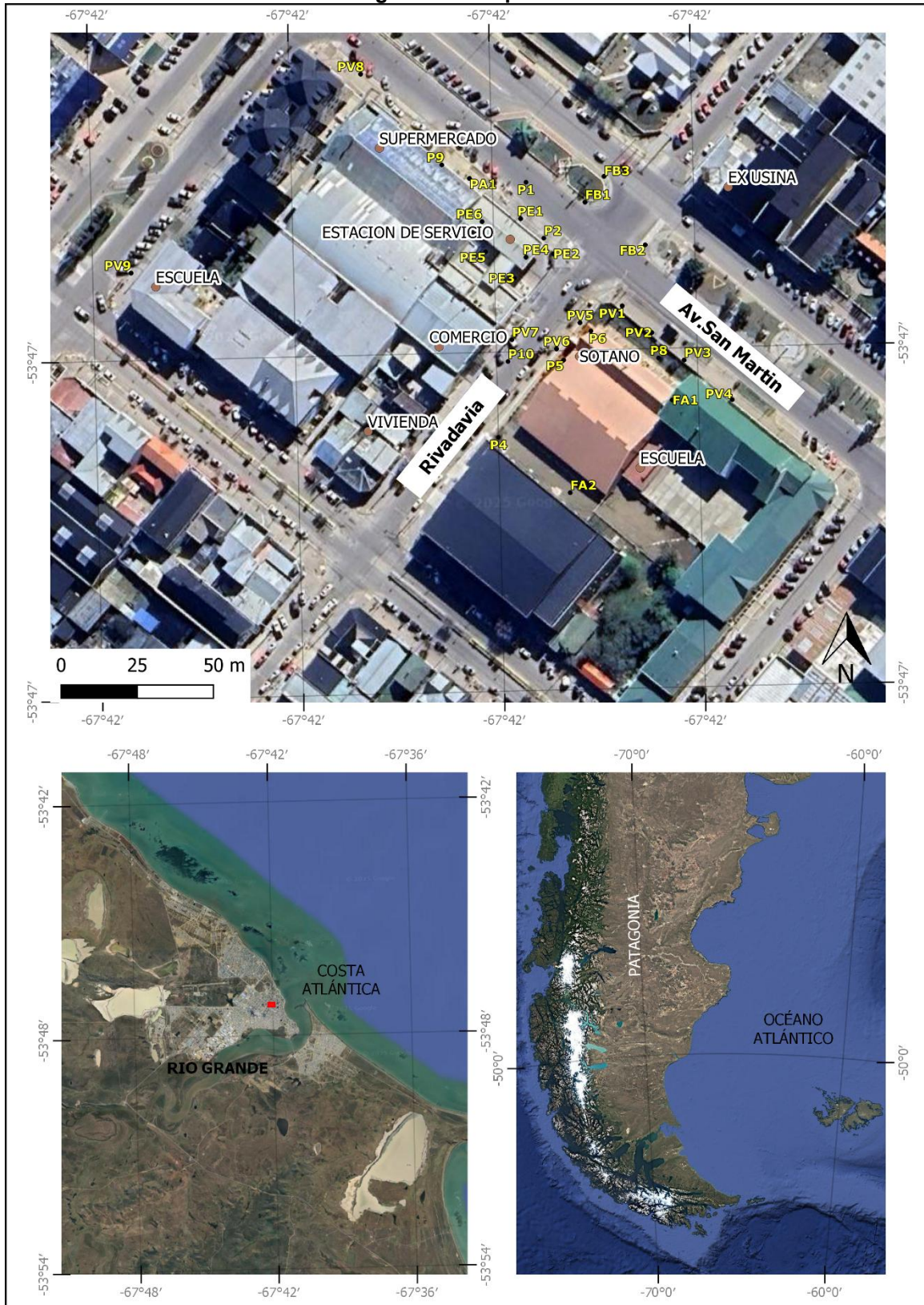


Figura N°2: Geomorfología litoral entre el río Grande y cabo Peñas. Profundidades en metros referidas a la bajamar de sicigia. Fuente: Bujalesky (2007).

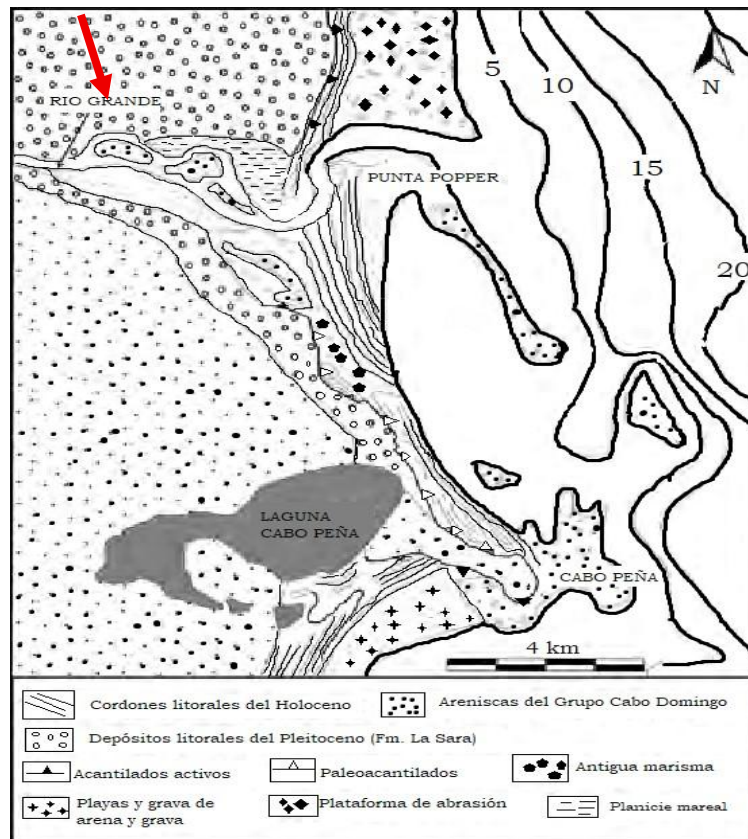


Figura N° 3: Método GOD: evaluación de vulnerabilidad. Fuente: CEPIS-Foster/Hirata 1988.

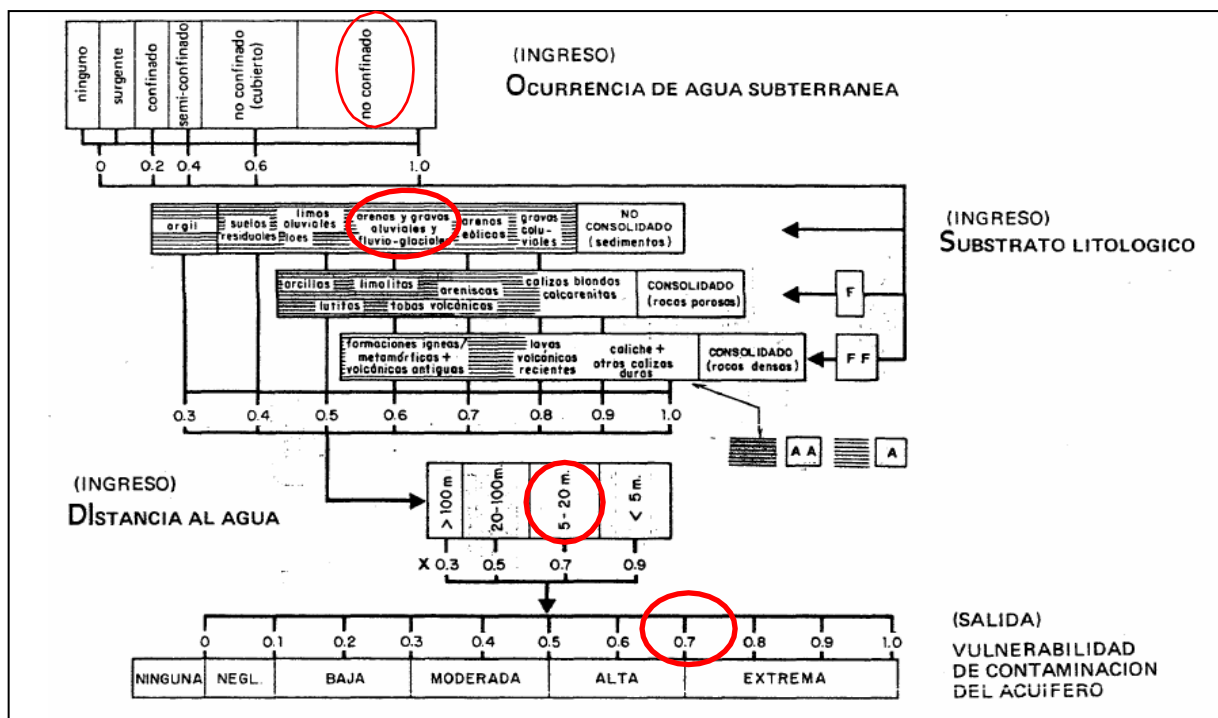
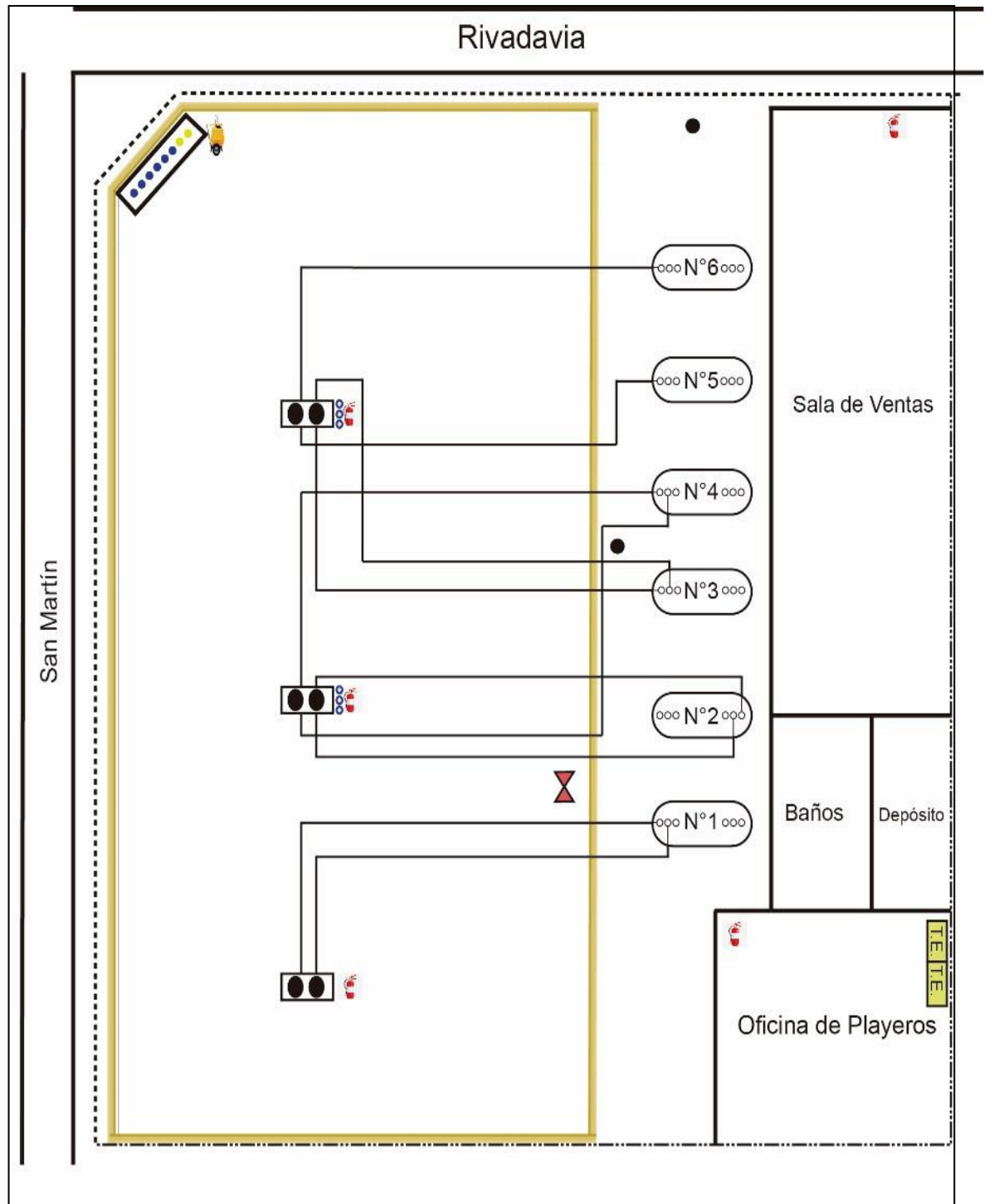


Figura N° 4: Instalación interna SASH. Fuente: Certificación SASH



Referencias

- | | | | | | | | |
|---------|--------------------|---|----------------------|------|-------------------|--|------------------|
| ----- | Línea Municipal | o | Venteo | T.E. | Tablero Eléctrico | | Carro Espumígeno |
| -.-.-.- | Medianera | ● | Descarga Remota | | Cámara Estanca | | Matafuegos |
| — | Rejilla Perimetral | ● | Recuperador de Gases | ● | Pozo de Monitoreo | | |

Figura N°5: Mapa del nivel freático y el espesor de FLNA en el periodo 2012.



Figura N° 6: Ubicación de los pozos de monitoreo de gases en torno a la ES

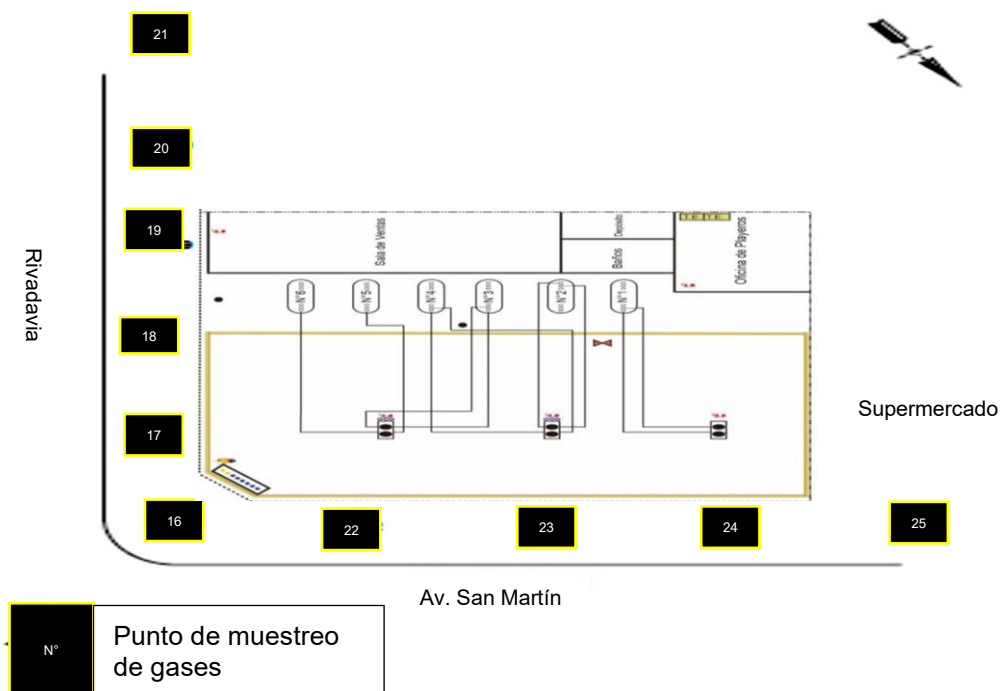


Figura N° 7: Mapa interpolación IDW de concentraciones de los CDI's. Periodo 2012

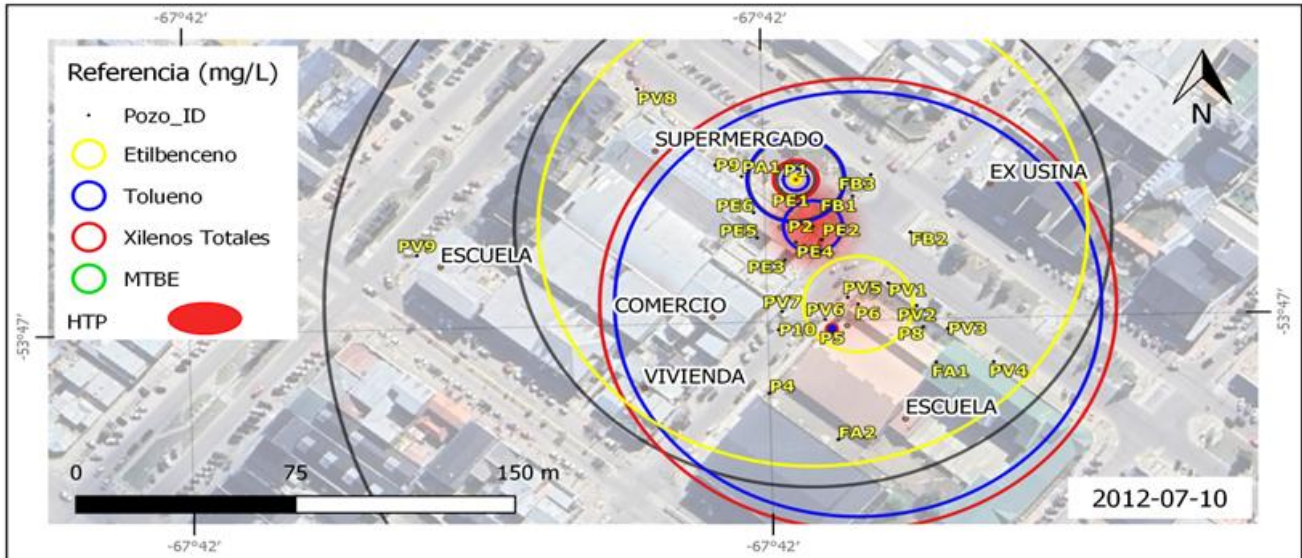


Figura N° 8: Mapa isofreático promedio Periodo 2013-2023



Figura N°9: Boxplot nivel freático y espesor de FLNA durante la remediación activa.

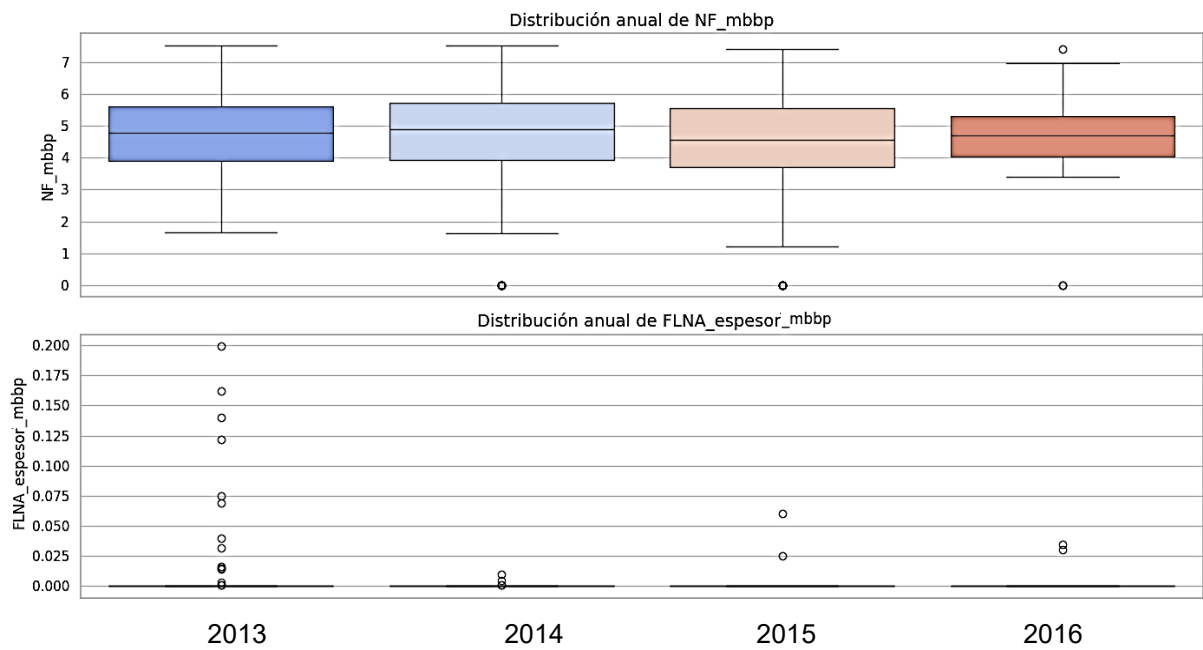


Figura N°10: Boxplot nivel freático y espesor de FLNA durante la remediación pasiva.

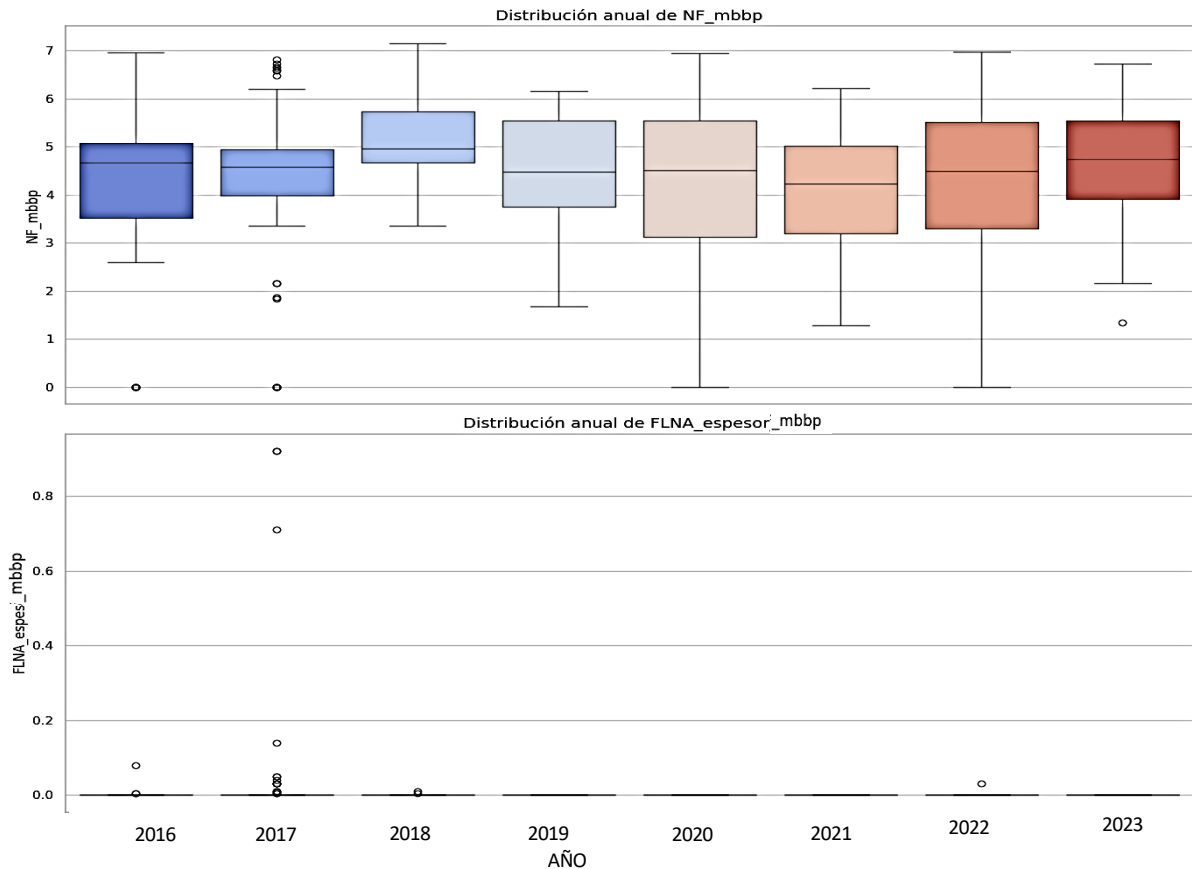


Figura N° 11: Mapa interpolación IDW de concentraciones de los CDI's. Periodo 2013-2015

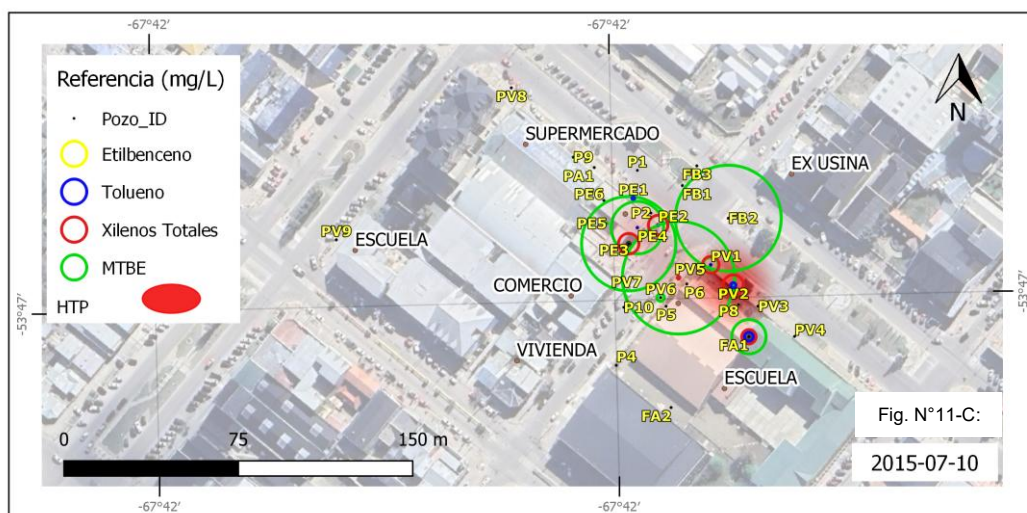
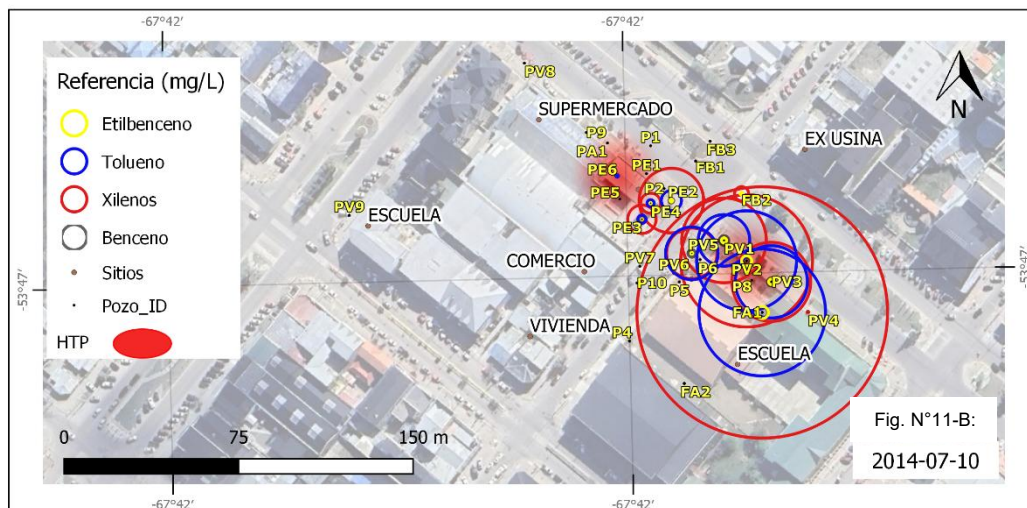
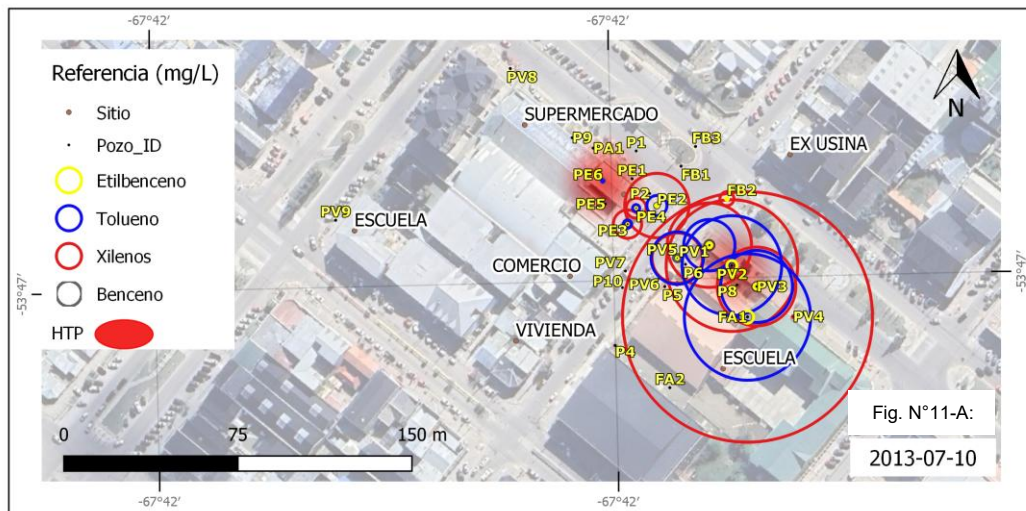
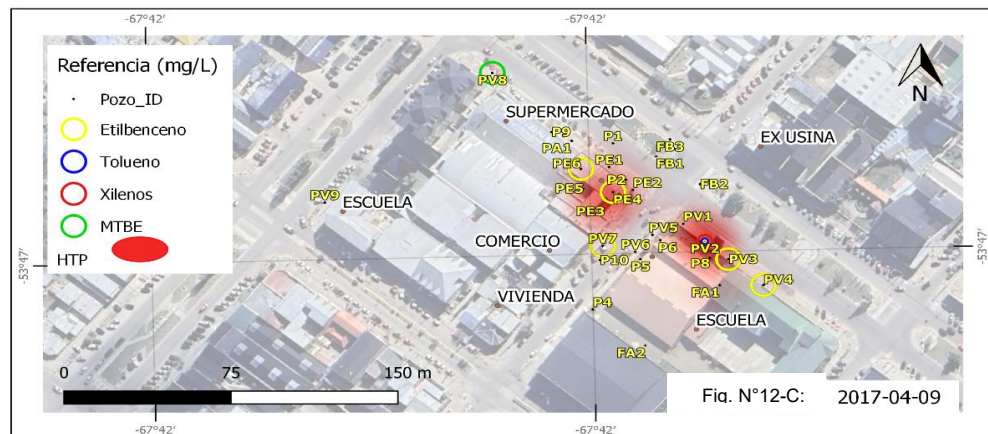
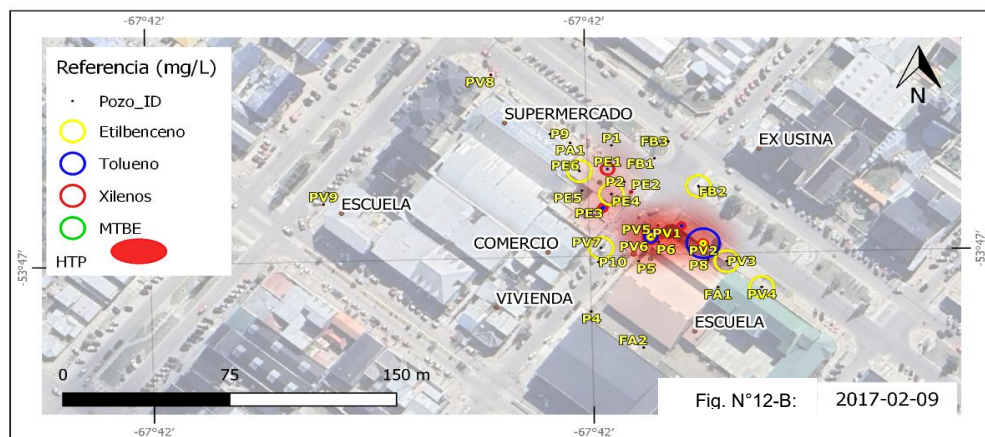
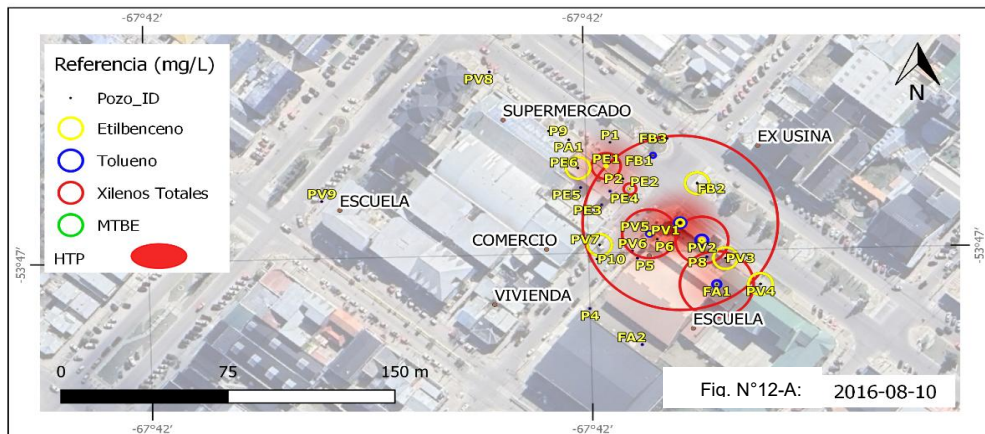
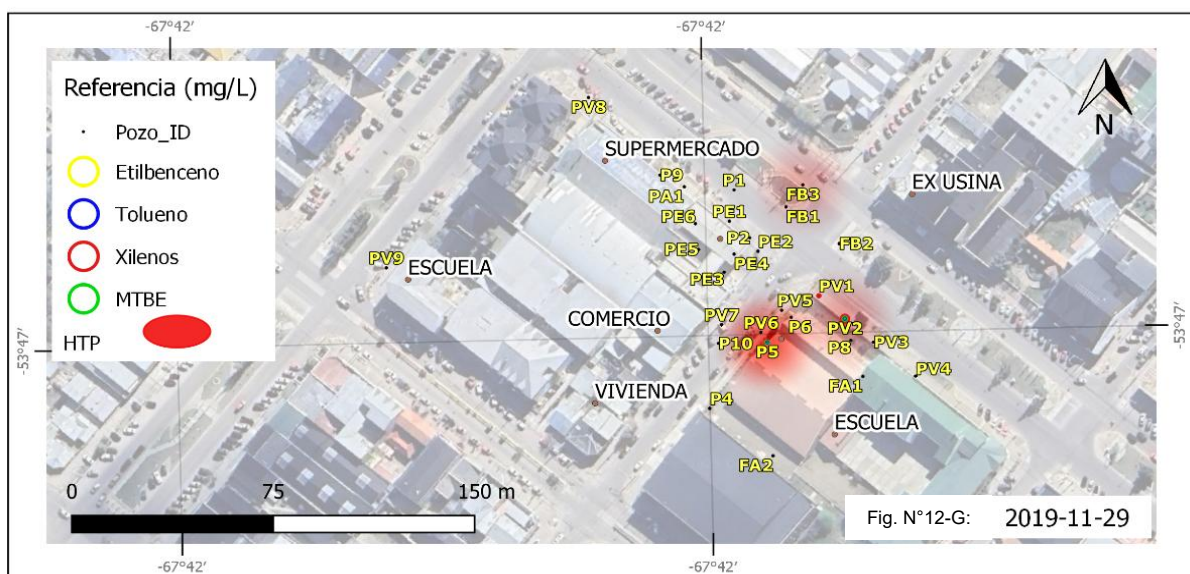
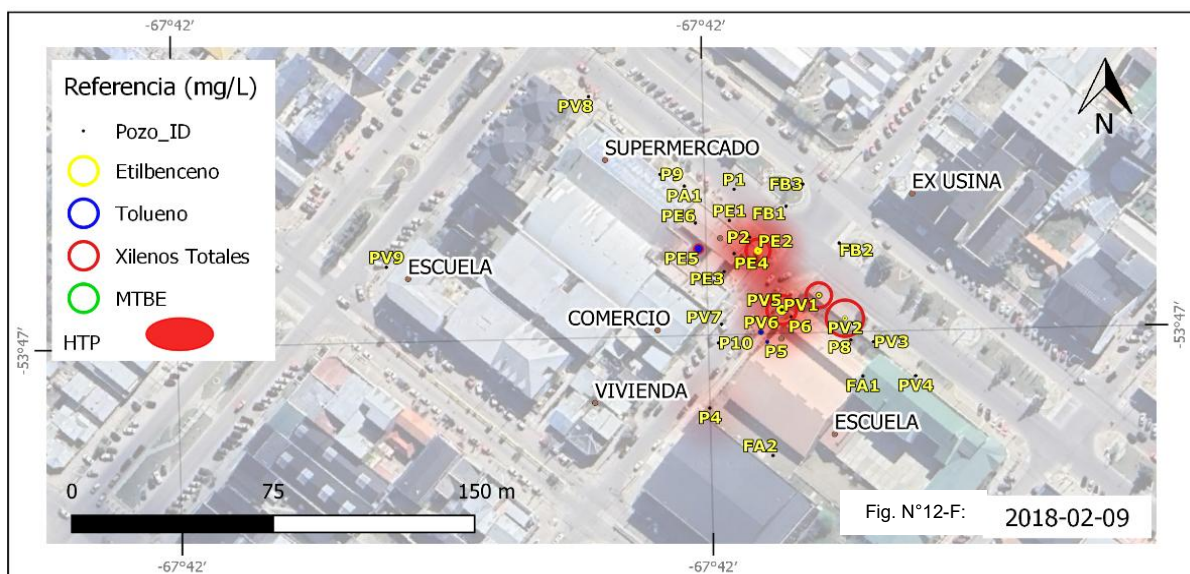
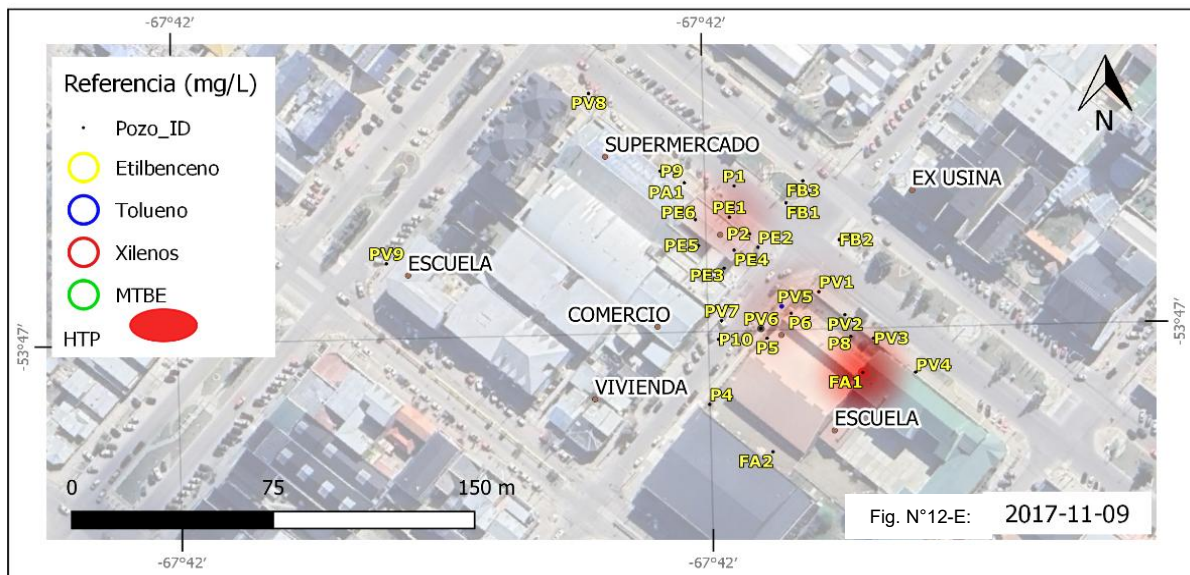


Figura N° 12: Mapa interpolación IDW de concentraciones de los CDI's. Periodo 2016 a 2023



Programa de Postgrado Interinstitucional en Ciencias Hídricas (con Mención Ambiental)



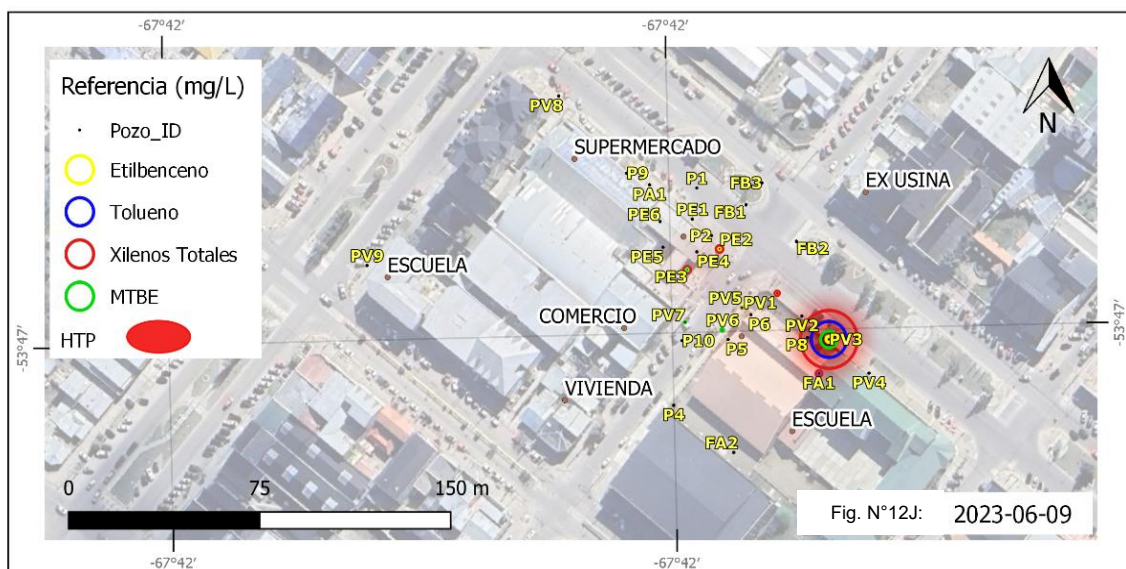
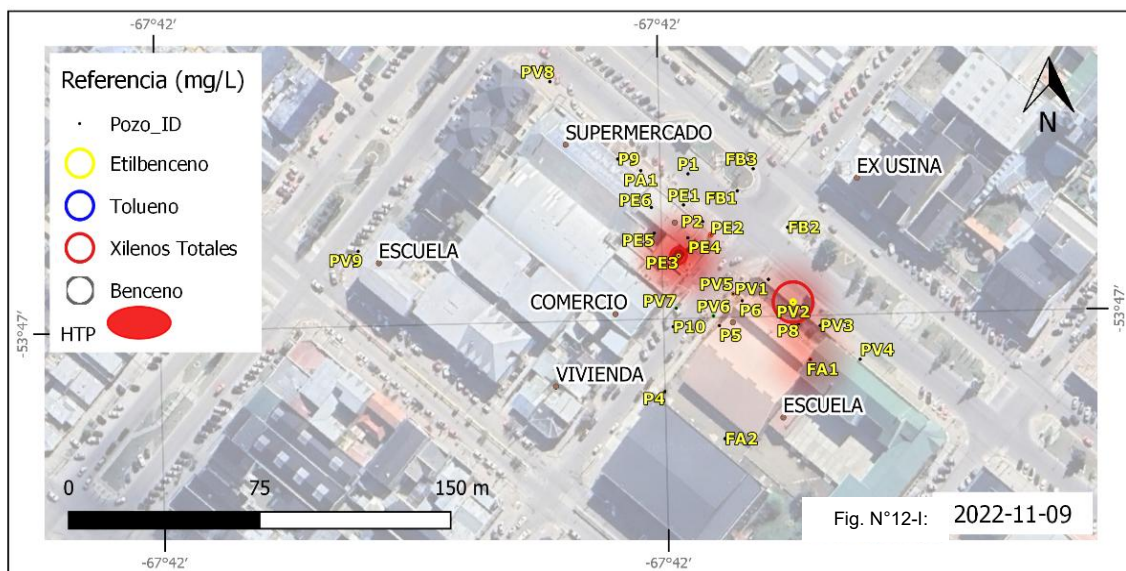
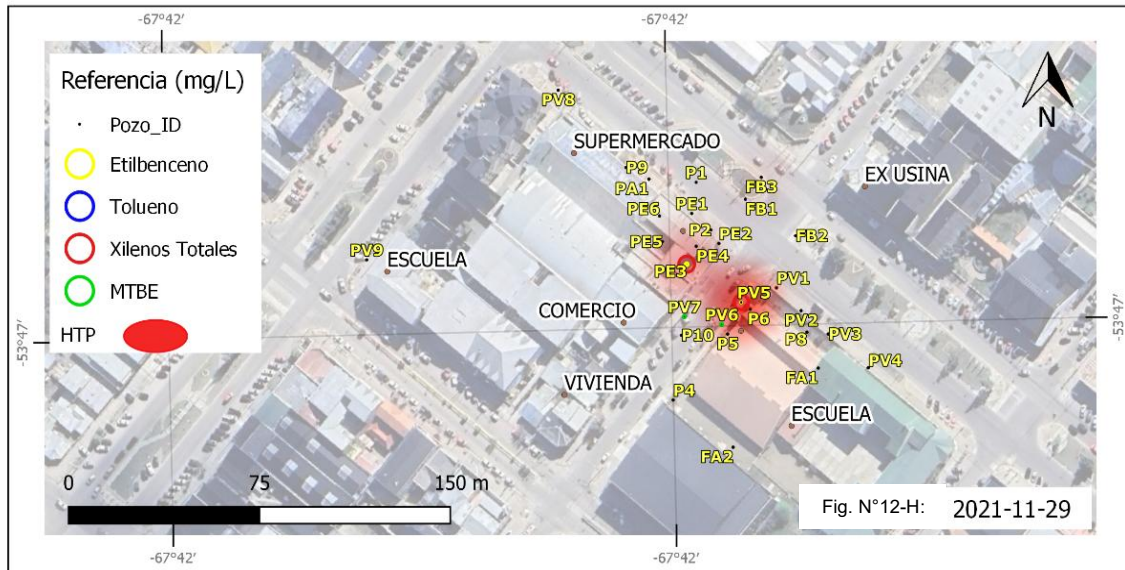


Figura N°13: Evolución temporal (2013–2023) de las concentraciones de CDI's en FB1-VP

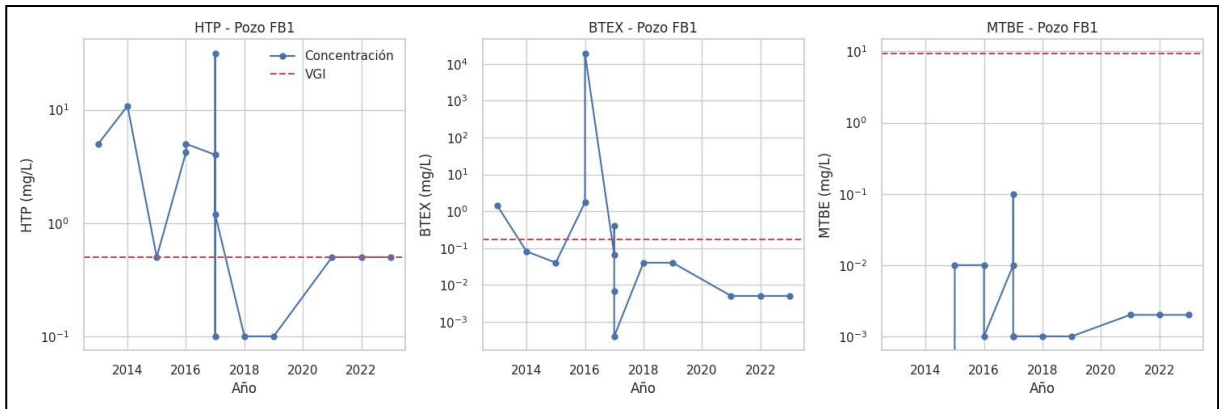


Figura N°14: Boxplot Compuestos de interés por período en la vía pública

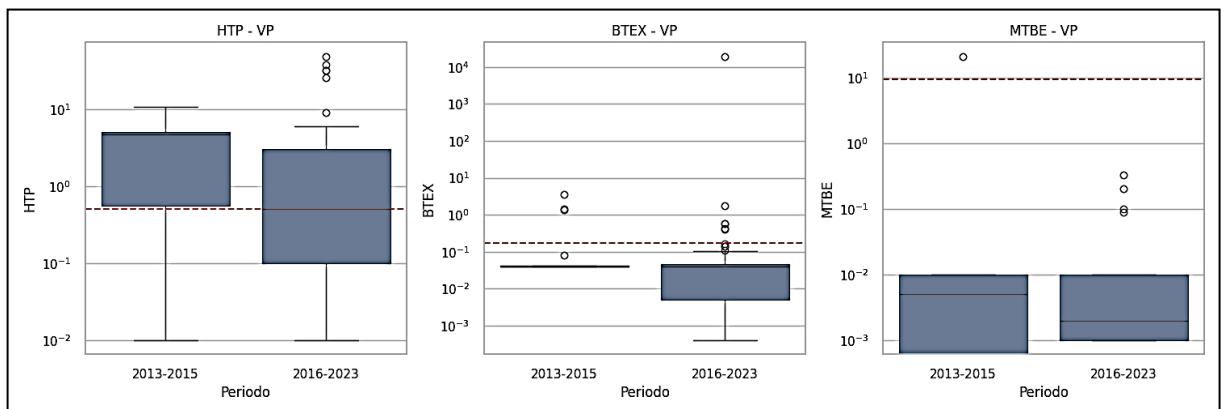


Figura N°15: Evolución temporal de las concentraciones de CDI's en PV1, PV2 y FB1

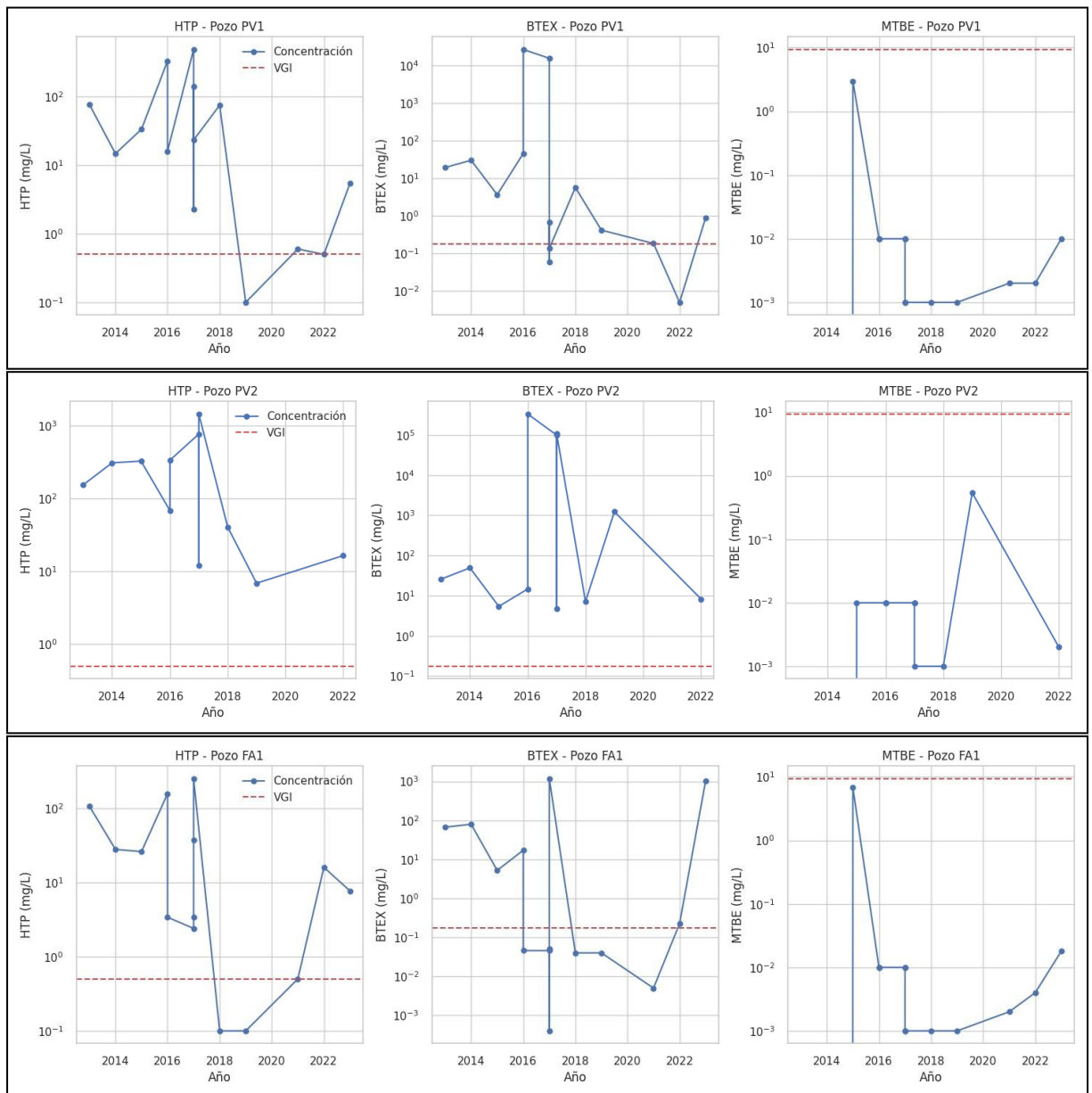


Figura N°16: Boxplot Compuestos de interés por período en la Escuela

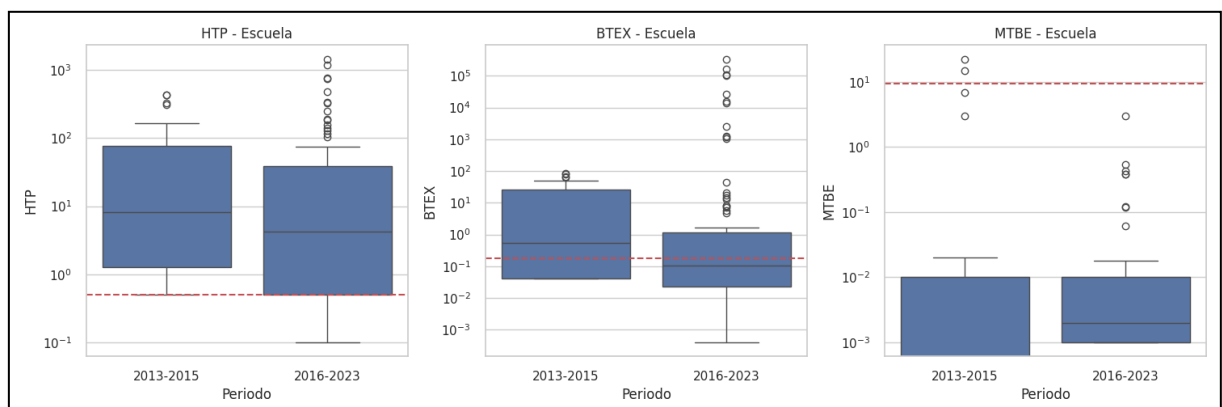


Figura N°17: Evolución temporal de las concentraciones de CDI's en el pozo PE1 y PE3.

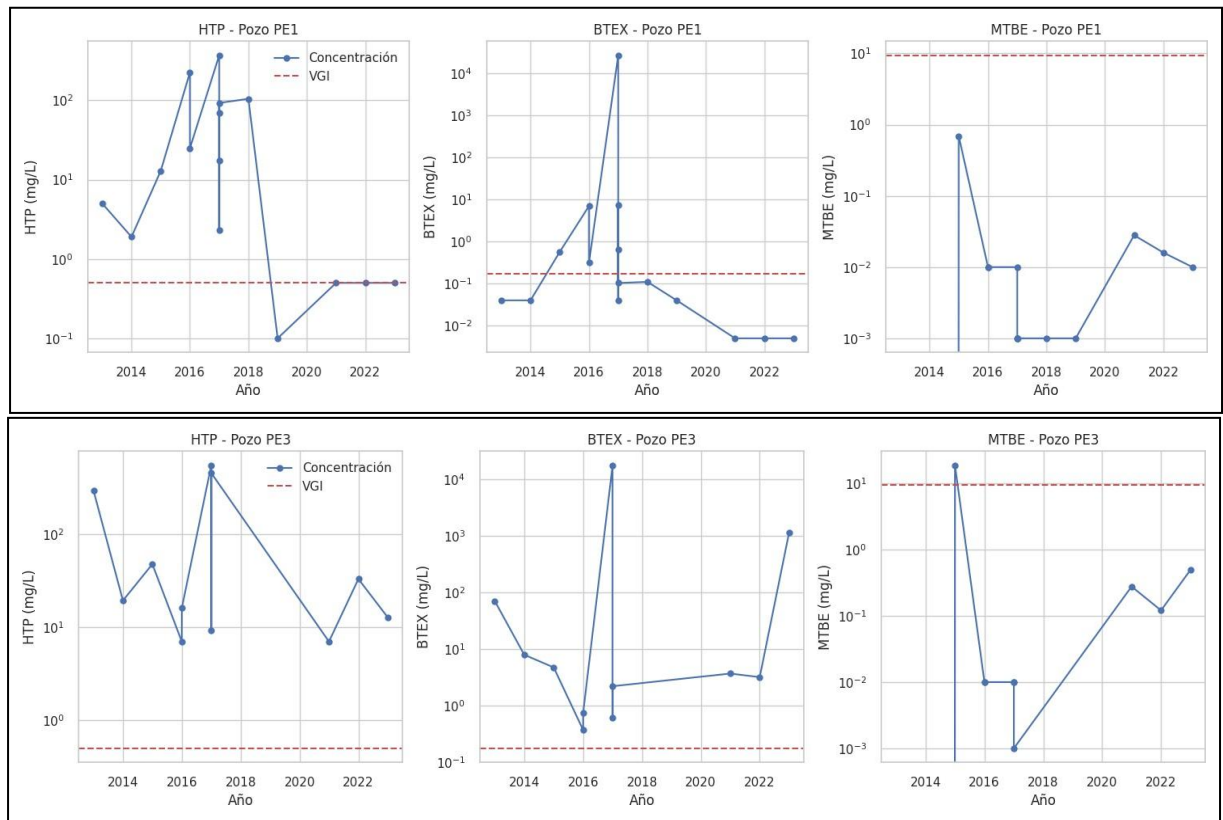


Figura N°18: Boxplot CDI's por período en la ES

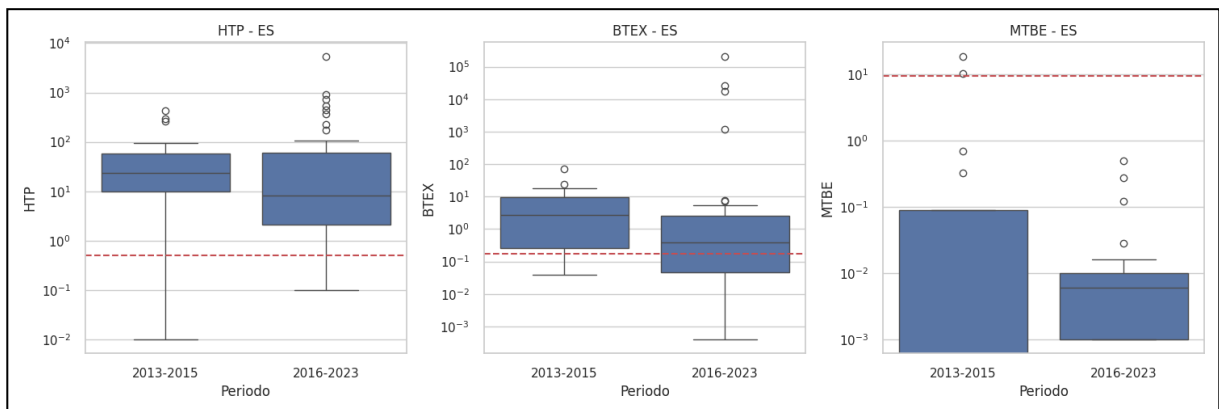


Figura N° 19: Porcentaje de muestras de agua subterránea que superan los Valores Guía de Intervención (VGI) establecidos en el Decreto Reglamentario N° 450/2021.

