



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DE DOCTOR EN GEOLOGIA

Contaminación de hidrocarburos livianos en el acuífero
freático de Bahía Blanca

Guillermo Pera Vallejos

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

2021

Prefacio

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Geología de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Geología durante el período comprendido entre el 14 de mayo de 2013 y el 2020, bajo la dirección del Dr. Jorge C. Carrica y la codirección del Dr. Claudio Lexow.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized letter 'D' with a smaller, more complex mark inside it, possibly representing the initials of the author.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi mamá, que siempre estuvo presente en todo momento de mi vida apoyándome en cada paso que he dado, siendo siempre un pilar de contención y ánimo.

A mis directores de tesis, los Dres. Jorge Carrica y Claudio Lexow, quienes me asistieron, aconsejaron y estuvieron presentes con una calidad humana que nunca voy a poder dejar de resaltar. En este párrafo también quiero agradecer a la Dra. Nora Cesaretti, quien me inicio en la investigación y me incito a continuarla cuando nuestros caminos se separaron.

A mi hermana Verónica, con quien compartimos el amor por la geología y siempre me brindo su ayuda incondicional; a mi hermana Daiana, por ser la hermana mayor que cualquier ser humano querría tener.

A Leticia Lescano, por ser esa compañera y amiga que siempre me incito a terminar esta tesis.

A mis compañeras y compañeros de docencia, principalmente a Diana y Nerea, que siempre me motivaron a realizar el proyecto.

A mis compañeros y amigos de la Municipalidad de Bahía Blanca, Alexis y Ezequiel que me ayudaron en la colecta de datos y al Ing. Sebastián Serra y la Prof. Adriana Chanampa que siempre confiaron en la idoneidad de mi persona para llevar a cabo las hermosas tareas que me encomendaron en la secretaria de Gestión Ambiental.

A mis sobrinos, Ema, Bautista y Valentino y a mis abuelos Mary y Pichón., a quienes dedico esta tesis.

Al jurado por el tiempo que dedicaran en leerla, sus comentarios y sugerencias.

A aquellos amigos, colegas y compañeros del municipio y la universidad que estuvieron siempre a lo largo de este proyecto.

Marzo de 2021

Departamento de Geología

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR.

RESUMEN

A principios de la década del 90 un censo demostró que más del noventa por ciento (90%) de las estaciones de servicio de la ciudad de Bahía Blanca, habían tenido algún problema relacionado con pérdidas de combustible; siendo ampliamente conocida a nivel mundial la relación existente entre las actividades comerciales asociadas al expendio de combustibles con la contaminación, tanto de suelos como de agua subterránea por productos derivados del petróleo. En Bahía Blanca, las estaciones de servicio constituyen una de las principales fuentes de contaminación por hidrocarburos en el acuífero freático de la ciudad.

En la actualidad, y a pesar de los acondicionamientos establecidos por el Ministerio de Energía de la Nación a las estaciones expendedoras, en el registro histórico de la Subsecretaría de Gestión Ambiental de la Municipalidad de Bahía Blanca son varios los casos reportados en los últimos años, de pérdidas de hermeticidad en los Sistemas de Almacenamiento Subterráneo de Hidrocarburos (SASH) en estaciones de servicio, y por ende, eventos de fuga de combustibles que requirieron acciones correctivas.

Las características propias de los combustibles (densidad, volatilidad, solubilidad, etc.) como las del subsuelo (humedad de la zona no saturada, profundidad del nivel freático, permeabilidad, etc.), serán los condicionantes de la distribución, migración y acumulación de los hidrocarburos. Los hidrocarburos derramados en superficie o que se pierden de los Sistemas de Almacenamiento Subterráneo de Hidrocarburos (SASH), son adsorbidos por el suelo y migran verticalmente a través de la matriz del terreno, dependiendo de los volúmenes derramados pueden alcanzar el acuífero freático y desplazarse por encima de la capa freática siguiendo en general el gradiente de la misma. Esta fracción se denomina fase libre no acuosa (FLNA). Existe evidencia que señala que la presencia de hidrocarburos en el subsuelo se relaciona a la aparición de enfermedades oncológicas y malformaciones por ejemplo a nivel del sistema nervioso central.

Para determinar el grado de afectación del entorno de las estaciones de servicio estudiadas, fue necesario conocer la tipología de la fase libre no acuosa, por lo que se realizaron numerosos muestreos de FLNA y agua subterránea, para lograr caracterizaciones a través de cromatografía y otros métodos analíticos de laboratorio. Fue necesario también, conocer la distribución de los hidrocarburos en el subsuelo, para lo que se emplearon pozos de monitoreo (donde existían) y en un emplazamiento se utilizaron métodos eléctricos, los cuales, no sólo sirvieron para prospectar hidrocarburos, sino también para reconstruir paleoambientes a partir de datos de resistividad.

También fue menester, conocer previamente las características del subsuelo y del acuífero en los que se produjeron los distintos hallazgos, por lo que se realizaron sondeos para describir

los detritos de perforación y asociar los sedimentos a la estratigrafía de detalle realizada por diversos investigadores para la ciudad de Bahía Blanca.

Además, para conocer la dinámica del acuífero libre (ya que el movimiento de los hidrocarburos está en relación directa con el mismo), se realizaron censos de mediciones, para establecer la profundidad del nivel freático en distintas zonas y su dirección de flujo (datos a partir de los cuales se realizó un mapa esquemático de flujo subterráneo para la zona de estudio).

Asimismo, se estudió la hidroquímica del acuífero, a través de análisis de laboratorio, para poder establecer el quimismo del agua subterránea y su aptitud como fuente de uso humano.

Por último, con la totalidad de los datos obtenidos se evaluó el potencial saneamiento de los sitios donde se registró contaminación del acuífero mediante el análisis de acciones correctivas basadas en el riesgo (*risk-based corrective actions* o RBCA), una metodología para la toma de decisiones en respuesta a derrames de hidrocarburos basadas en la salud humana y el medio ambiente, estos valores obtenidos de limpieza fueron contrastados con los establecidos en la Normativa Argentina y sus estándares internacionales sugeridos.-

ABSTRACT

The relationship between commercial activities associated with the sale of fuels and the contamination of soils and groundwater by Petroleum products is already widely known worldwide. In Bahia Blanca, petrol stations are one of the main sources of oil pollution in the city's water table, at the beginning of the 1990s a census showed that more than 90% of petrol stations in the city they had had some problem related to fuel losses.

At present, after the conditions established by the Ministry of Energy of the Nation to the vending petrol stations, in the historical register of the Undersecretary of Environmental Management of the municipality there are several cases reported, in recent years, of leakage losses in Underground Storage Tanks (USTs) at petrol stations, and therefore fuel leakage events that required corrective actions.

The characteristics of the fuels (density, volatility, solubility, etc.) such as those of the subsoil (humidity of the unsaturated area, depth of the water table, permeability, etc.) will be the determining factors for the distribution, migration and accumulation of hydrocarbons.

Hydrocarbons spilled on the surface or lost from USTs are adsorbed by the soil and migrate vertically through the soil matrix. Depending on the spilled volumes, they can reach the groundwater aquifer and move over the water table, generally following its gradient. This fraction is called the Non-Aqueous Phase Liquids (NAPL) and it has already been scientifically proven that the presence of hydrocarbons in the subsoil causes observable harmful effects on human health that may include sequel in the body in general, including the central nervous system and effects teratogenic, mutagenic and carcinogenic.

In order to determine the degree of affectation of the environment of the petrol stations studied, it was necessary to know the typology of the non-aqueous phase liquids, so that numerous samples of NAPL and groundwater were made, to achieve characterizations through chromatography and other analytical methods from laboratory. It was also necessary to know the distribution of hydrocarbons in the subsoil, for which electrical methods were used which were used not only to prospect hydrocarbons, but also to reconstruct palenvironments from resistivity data.

It was previously necessary to know the characteristics of the subsoil and the aquifer in which the different findings occurred, so that surveys were conducted to describe drilling debris and associate sediments to the detailed stratigraphy carried out by various researchers for the city of Bahia Blanca.

Also to know the dynamics of the free aquifer, (since the movement of hydrocarbons is directly related to it), measurement censuses were carried out, to establish the depth of the water table in different areas and its flow direction (data to from which a schematic map of underground

flow was made for the study area).

In addition, aquifer hydrochemistry was studied, through laboratory analysis, in order to establish the chemistry of groundwater and its ability as a source of human use.

With the data obtained, the potential sanitation of sites where aquifer pollution was recorded was analyzed through the analysis of risk-based corrective actions (RBCA), a methodology for decision-making in response to oil spills based on human health and the environment and the values obtained from cleaning the aquifer were contrasted with those established in the National Law 24.051 of Hazardous Waste and annexes.

INDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación del Estudio	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Caracterización General y Delimitación del Área de Estudio	3
1.3.1. Caracterización general del medio físico de la región.....	3
1.3.2. Delimitación del Área de Estudio.....	5
CAPITULO 2. METODOLOGÍA	6
2.1. Recopilación Bibliográfica.....	6
2.1.1. Antecedentes	6
2.1.1.1. Antecedentes hidrogeológicos del área de estudio.....	6
2.2. Tareas de Campo.....	8
2.2.1. Relevamiento Geomorfológico y Geológico del Área de Estudio	8
2.2.2. Ubicación de los Puntos de Muestreo	8
2.2.3. Ejecución de Pozos de Observación y Muestreo de Detritos de Perforación para su Descripción	8
2.2.4. Medición de los Niveles Estáticos en Pozos de Monitoreo	9
2.2.5. Muestreo de Aguas Subterráneas de los Pozos de Monitoreo	9
2.2.6. Muestreo de Fase Libre No Acuosa (FLNA)	9
2.2.7. Realización Tomografía Eléctrica Multielectrodo.....	9
2.3. Tareas de Laboratorio	10
2.3.1. Caracterización Sedimentos Muestreados.....	10
2.3.1.1. Análisis Granulométrico.....	10
2.3.1.2. Mineralogía	10
2.3.2. Análisis Químicos de Agua Subterránea	10
2.3.3. Caracterización de Fase Libre No Acuosa	10
2.4. Tareas de Gabinete.....	11
2.4.1. Caracterización del Medio Físico	11
2.4.2. Datos Meteorológicos	11
2.4.3. Caracterización Hidrológica.....	12
2.4.4. Procesamiento y Representación Gráficos de Análisis Químicos del Agua Superficial	

y Subterránea y de Lluvia	12
2.4.5. Modelo de Flujo Subterráneo	12
2.4.5.1. Recarga y Descarga del Acuífero Freático.....	13
2.4.5.2. Modelo Hidrológico Conceptual.....	13
2.5. Caracterización de la Fase Libre No Acuosa Sobrenadante en la Zona Saturada a partir de Cromatogramas	13
2.5.1. Evaluación de la Biodegradación de Hidrocarburos en la FLNA a través de Biomarcadores.....	14
2.6 Métodos Indirectos en la Detección de Fugas y Diseños del Transporte de Contaminantes en Fase libre No Acuosa	14
2.6.1. Aplicación de tomografía eléctrica multielectrodo en uno de los sitios contaminados como elemento de detección indirecta de hidrocarburos en fase libre y disueltos	14
2.7. Acciones Correctivas de Remediación basadas en el Riesgo a la Salud Humana.....	14
CAPITULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO	15
3.1. Geología	15
3.1.1. Marco Geológico.....	15
3.1.1.1. Basamento Cristalino	15
3.1.1.2. Rocas Paleozoicas	15
3.1.1.3. Cobertura Sedimentaria	16
3.1.2 Sedimentología y Mineralogía del subsuelo de la Zona de estudio	23
3.3. Suelos y Vegetación	28
3.3.1. Clasificación de los Suelos de la Zona	28
3.4. Hidrología Superficial del Área de Estudio	30
3.4.1. Hidrometeorología	32
3.4.1.1. Pluviometría.....	32
CAPITULO 4. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA	34
4.1. Hidrogeología.....	34
4.1.1.- Sección Basamento Hidrogeológico	34
4.1.2.- Sección Hipoparaniana	34
4.1.3.- Sección Paraniense	36
4.1.4. Sección Epiparaniana.....	36
4.2. Acuífero Freático	39

4.2.1. Antecedentes de Estudio	39
4.2.2- Dinámica del Acuífero Freático en la Zona de Estudio	39
4.3. Hidroquímica.....	42
4.4. Evolución Geoquímica del Agua en el Acuífero Libre	44
4.5. Balance Hidrológico Modular.....	45
4.6 Recarga y descargas del Sistema Acuífero Freático	46
CAPÍTULO 5. DETECCIÓN DE PLUMAS DE CONTAMINACIÓN DE HIDROCARBUROS A TRAVÉS DEL USO DE TOMOGRAFÍA DE ELECTRICA MULTIELECTRODO	49
5.1 Resistividad de los Distintos Materiales	52
5.2 Aplicación de tomografía eléctrica multielectrodo en uno de los sitios contaminados como elemento de detección indirecta de hidrocarburos en fase libre y disuelta	53
5.2.1 Línea L1	54
5.2.2. Línea 2.....	55
5.2.3. Línea 3.....	57
5.2.4 Línea 4	58
5.2.5 Línea 5.....	60
5.2.6 Línea 6.....	61
5.3. Diseño paleo ambiental del subsuelo a partir de datos de resistividad obtenidos	62
CAPITULO 6. CONTAMINACIÓN DE HIDROCARBUROS LIVIANOS EN EL SUBSUELO	66
6.1 Procesos que controlan el transporte de contaminantes en la zona saturada.....	69
6.1.1 Advección	69
6.1.2 Difusión (transporte difusivo o “Fickiano”).....	70
6.1.3 Dispersión.....	70
6.1.4. Adsorción	71
6.1.5. Factor de Retardo.....	72
6.1.6. Degradación	73
6.2. Tipos de Hidrocarburos de Petróleo	74
6.2.1 Fracciones de Hidrocarburos Totales del Petróleo.....	75
6.3. Zonas de Investigación	77
6.3.1 Puntos de Muestreo.....	77
6.4 Caracterización de los Hidrocarburos en Agua y en FLNA	79
6.4.1. Análisis y Caracterización de las Fase libre No acuosa Sobrenadante en la Zona	

Saturada a partir de Cromatogramas	80
6.4.1.1 Caso de estudio “ALEM 1”	81
6.4.1.2 Caso de estudio “BAHÍA 1”	84
6.4.1.3. Caso de estudio “CELINA”	87
6.4.1.4. Caso de estudio “ACÁ”	88
6.5 Transporte de Hidrocarburos Disueltos en el acuífero freático a partir de la degradación de Fases Libres No Acuosa en dos de los sitios estudiados	89
6.5.1 CASO 1-ALEM 1	90
6.5.2 CASO 2 BAHIA 1	92
6.6. Evaluación de la degradación de Hidrocarburos hallados en fase libre no acuosa a través del estudio de biomarcadores	95
CAPÍTULO 7. ACCIONES CORRECTIVAS DE REMEDIACIÓN BASADAS EN EL RIESGO A LA SALUD HUMANA	100
7.1. Modelo Conceptual del Sitio	104
7.1.2 Nivel de Riesgo.....	105
7.2. Escenarios de Exposición	106
7.2.1. Evaluación de las Rutas de Exposición	106
7.3. Escenarios Evaluados Numéricamente	111
7.3.1 Escenario 1: Inhalación de vapores orgánicos por un empleado del Teatro Municipal en un salón situado en la planta subsuelo (ALEM 1)	111
7.3.2 Escenario 2: Inhalación de vapores orgánicos por un empleado que trabaja en el shop de las estaciones de servicios (ALEM 1, BAHÍA 1 LINIERS) y un trabajador en las piletas del Club Liniers	111
7.3.3 Escenario 3: Inhalación de vapores orgánicos en ambiente cerrado de uso residencial (viviendas linderas a la estación de servicio ALEM 1)	112
7.3.4 Escenario 4: Inhalación de vapores orgánicos en aire exterior por un transeúnte de la plaza aledaña a ALEM 1 o jugador de fútbol del Club Liniers.....	113
7.3.5 Escenario 5: Contacto dérmico, ingesta accidental de suelo e inhalación de vapores orgánicos/particulado en aire exterior (provenientes de suelos/agua freática) por un jardinero que trabaje en el parqueado aledaño al Teatro Municipal y Jardinero del Club Liniers	113
7.4.1. Parámetros de Ingreso y Supuestos	115
7.4.1.1 Escenario 1: Inhalación de vapores orgánicos por un empleado del Teatro Municipal en un salón situado en la planta subsuelo (Caso: ALEM1).....	115

7.4.1.2. Escenario 2: Inhalación de vapores orgánicos por un empleado que trabaja en el shop de las estaciones de servicios (ALEM 1, BAHÍA 1 LINIERS) y un trabajador en las piletas del club Liniers	116
7.4.1.3 Escenario 3: Inhalación de vapores orgánicos en ambiente cerrado de uso residencial (viviendas linderas a la estación de servicio ALEM 1)	117
7.4.1.4 Escenario 4: Inhalación de vapores orgánicos en aire exterior por un transeúnte de la plaza aledaña a ALEM 1 o jugador de futbol del Club Liniers.....	119
7.4.1.5 Escenario 5: Contacto dérmico, ingesta accidental de suelo e inhalación de vapores orgánicos/particulado en aire exterior (provenientes de suelos/agua freática) por un jardinero que trabaje en el parqueado aledaño al Teatro Municipal y Jardinero del Club Liniers	120
CAPITULO 8 CONCLUSIONES	124
RECOMENDACIONES	128
BIBLIOGRAFÍA.....	129
ANEXOS	
I. Geología	
II. Mediciones de nivel freático en puntos de sondeo	
III. Análisis físico químicos de aguas subterráneas	
IV. Determinación de hidrocarburos libres en muestras de agua subterránea	
V. Analítica de laboratorio y medición de espesores en fase libre no acuosa	
VI. Anexo Planillas de modelaje con software RBCA TOOL KIT	

LISTADO DE FIGURAS INCLUIDAS EN EL TEXTO

CAPITULO I

Figura 1.a. Área de estudio

CAPITULO III

Figura 3.1.a Columna estratigráfica estudiada dentro del área de estudio. (Modificada de Fidalgo, 1983).

Figura 3.1.b Mapa esquemático formaciones geológicas aflorantes en el área de estudio

Figura 3.1. 2.a Puntos de descripciones litológicas en sondeos

Figura 3.4.1.1b. Distribución mensual de las precipitaciones

CAPITULO IV

Figura 4. 1.a. Cuadro Hidroestratigráfico del Área de Estudio (Modificado de Bonorino, 1998)

Figura 4.2. 2.a. Mapa esquemático de red de flujo subterráneo para el acuífero libre en el área de estudio

Fig. 4.2. 2.a. Mapa esquemático de red de flujo subterráneo para el acuífero libre en el área de estudio

Figura 4. 3.a. Diagrama de Piper de las Muestras Analizadas

CAPITULO V

Figura 5.a Principios de funcionamiento de un equipo de tomografía eléctrica (Martínez Pagan, 2006)

Figura 5.b Dispositivos Utilizados (Zhu *et.al.*, 2009)

Figura 5.c Secciones eléctricas de resistividad aparente resultado de la TE 2D con diferentes dispositivos en un bloque rectangular a) dispositivo dipolo-dipolo, b) dispositivo Wenner-Schlumberger. (de López *et.al.* 2004, en Aranda 2013)

Figura 5.1.a Resistividad de diferentes rocas, sedimentos y fluidos (Orellana, 1982)

Figura 5.2.a Líneas de Tomografía Eléctrica Multielectrodo Realizadas

Figura 5.2.1.a Línea L1. Perfil de Resistividad Aparente y Verdadera

Figura 5.2.1.b. Interpretación Litológica y Ambiental de Línea 1

Figura 5.2. 2.a. Línea L2 de Resistividad Aparente y Verdadera
Figura 5.2.2.b. Interpretación Litológica y Ambiental de Línea 2
Figura 5.2.3.a Línea L3 de resistividad aparente y verdadera.
Figura 5.2.3.b. Interpretación Litológica y Ambiental de Línea 3
Figura 5.2. 4.a. Línea L4 de Resistividad Aparente y Verdadera
Figura 5.4.2.b. Interpretación Litológica y Ambiental de Línea 4
Figura 5.2. 5.a. Línea L5 de Resistividad Aparente y Verdadera
Figura 5.2.5.b. Interpretación Litológica y Ambiental de Línea 5
Figura 5.2. 6.a. Línea L6 de Resistividad Aparente y Verdadera
Figura. 5.2.5.b Interpretación Litológica y Ambiental de Línea 6
Figura. 5.3.1. Modelado paleo ambiental 3D de Resistividad obtenido para el subsuelo estudiado
Figura 5.3.2 Modelado de Resistividad Vista en Planta 15 metros bajo el nivel del suelo
Figura 5.3.3 Modelado de Resistividad Vista en Planta 10 metros bajo el nivel del suelo
Figura 5.5.4 Modelado de Resistividad. Vista en Planta 5 metros bajo el nivel del suelo

CAPITULO VI

Figura 6.a Causas más comunes de fugas de Hidrocarburos debida a tanques subterráneos (IHOBE, 2006)
Figura 6.b Fases de hidrocarburos libres presentes en la zona no saturada (Newell *et.al.*, 1995)
Figura6. c. Dispersión de hidrocarburos a partir de una fuga. (Modificada de Celis,2009)
Figura 6.1.5.a Frente de avance de un soluto no adsorbido (conservativo) y otro adsorbido (no conservativo) a través de una columna de material poroso (Freeze y Cherry, 1979)
Figura 6.2. 1.a.Relación entre rango de cadena de carbono y productos derivados del petróleo (Weisman, 1998).
Figura. 6.3.1.a Mapa Estaciones de servicios relevadas
Figura 6.4.1.1.a Zona de estudio "Alem 1"
Figura 6.4.1.1.b Cromatograma Muestra 3007 Pad P15. Alem 1.
Figura6.4.1.1.c Cromatograma Muestra 3011 Versus nafta Premium y nafta súper
Figura 6.4.1.1.d muestras con FLNA pozos de monitoreo zona Teatro Municipal
Figura6.4.1. 2.a Zona de estudio Bahía 1
Figura 6.4.1.2.b Cromatograma PM2
Figura 6.4.1.2.c Cromatograma Muestra 28656 PM8

Figura 6.4.1.3.a Zona de estudio Celina

Figura 6.4.1.3.b. Cromatograma muestra 31529 versus perfil PM5.

Figura 6.4.1. 4.a. Comparación perfil 10207 con perfil patrón de nafta comercial.

Figura 6.5.1a Esquema de situación Caso 1

Figura 6.5.1.2. Situación inferida originalmente (a) y la estimada al aplicar el concepto de flujo dispersivo (b)

Figura 6.5.2.a Esquema de situación Caso 2

Figura 6.5.2.1. Situación inferida originalmente (a) y la estimada al aplicar el concepto de flujo dispersivo (b)

Figura 6.6.1a Mapa de Pozos en los cuales fueron estudiados biomarcadores "Alem 1"

Figura. 6.6.2 Relaciones de isoprenoides obtenidas para los pozos de observación

CAPITULO VII

Figura 7.3.3.a Diagramas de las rutas de exposición en el Software RBCA para el cálculo de los niveles objetivos de limpieza en los Escenarios 1 a 3

Figura 7.3.5.a. Diagramas de las rutas de exposición en el Software RBCA para el cálculo de los niveles objetivos de limpieza en los escenarios 1 a 3

ANEXO I

Figura. A1.1 Zona de descripción de los sondeos Ubicación

Figura A1.2 Clasificación Textural IUGS Sondeos Realizados

ANEXO IV

Figura A4.1 Zonas de muestreo hidrocarburos libres en agua subterránea

ANEXO VI

Figura A6.1 Rutas de exposición -Escenario 1

Figura A6.2. Diagrama de exposición Escenario 2

Figura A6. 3 Diagrama de exposición Escenario 3

Imagen A6. 4 Diagrama de exposición Escenario 4

Figura A6. 5 Diagrama de exposición Escenario 5

LISTADO DE TABLAS INCLUIDAS EN EL TEXTO

CAPITULO III

Tabla 3.1.2.a Ubicación de Zonas y Pozos Descriptos

Tabla 3.4.1.1.a Distribución estacional de las precipitaciones

CAPITULO VI

Tabla 6.3.1.a Muestreos analítico. Agosto 2012-marzo 2014

Tabla 6.4.a. Ensayos analíticos realizados

Tabla 6.4.1.a Hallazgos producidos luego de la caracterización cromatográfica de las FLNA analizadas

Tabla 6.5.1.a Características texturales y contenido de carbono orgánico

Tabla 6.6.1.a Pozos estudiados con biomarcadores

CAPITULO VII

Tabla 7.1 Características de los Sitios Analizado

Tabla 7.1.2 a Valores aceptables de riesgo individual

Tabla 7.2.1 a Medio fuente, rutas de exposición y receptores. Ingestión del agua subterránea.

Tabla 7.2.1.b Medio fuente, rutas de exposición y receptores. Agua superficial hábitat sensible.

Tabla 7.2.1.c Medio fuente, rutas de exposición y receptores. Inhalación en el aire interior.

Tabla 7.4.1.2.a Dimensiones utilizadas para los emplazamientos analizados

Tabla 7.4.1.5 a. Valores objetivos de limpieza (SSTLs) obtenidos Escenario 1

Tabla 7.4.1.5.b. Valores objetivos de limpieza (SSTLs) obtenidos Escenario 2

Tabla 7.4.1.5.c: Valores objetivos de limpieza (SSTLs) obtenidos Escenario 3

Tabla 7.4.15.d.: Valores objetivos de limpieza (SSTLs) obtenidos Escenario 4

Tabla 7.4.15.d.: Valores objetivos de limpieza (SSTLs) obtenidos Escenario 5

ANEXO I

Tabla A1.1 Sondeos realizados

Tabla A1. 2.a Descripción de detritos de perforación -PM 1- Sitio 1

Tabla A1. 2.b Descripción de detritos de perforación -PM 2- Sitio 1
Tabla A1. 2.c Descripción de detritos de perforación -PM 3- Sitio 1
Tabla A1. 2.d Descripción de detritos de perforación -PM 4- Sitio 1
Tabla A1. 2.e Descripción de detritos de perforación -PM 5- Sitio 1
Tabla A1. 3 Descripción de detritos de perforación -S 1- Sitio 2
Tabla A1. 4 Descripción de detritos de perforación -S 2- Sitio 3
Tabla A1. 5 Descripción de detritos de perforación -S3- Sitio 4
Tabla A1. 6 Descripción de detritos de perforación -S4- Sitio 5
Tabla A1. 7 Descripción de detritos de perforación -S5 – Sitio 6

ANEXO II

Tabla A2.1 Puntos de sondeo del nivel freático y valores obtenidos

ANEXO III

Tabla A3.1 Puntos y resultados analíticos análisis fisicoquímicos de agua subterránea

ANEXO IV

Tabla A4.1 Puntos de muestreo Hidrocarburos libres
Tabla A4.2 Resultados analíticos SITIO 1- Abril 2013
Tabla A4.3 Resultados analíticos SITIO 2- Abril 2013
Tabla A4.4 Resultados analíticos SITIO 3- Abril 2013
Tabla A4.5.d Resultados analíticos SITIO 3-Junio 2013
Tabla A4.5.g Resultados analíticos SITIO 3-Febrero 2014
Tabla A4.5.h Resultados analíticos SITIO 3-Marzo 2014
Tabla A4.5.i Resultados analíticos SITIO 3- Abril 2014
Tabla A4.5.i (cont) Resultados analíticos SITIO 3-Abril 2014
Tabla A4.5.j Resultados analíticos SITIO 3-Mayo 2014
Tabla A4.5.j (cont) Resultados analíticos SITIO 3- Mayo 2014
Tabla A4.5.k Resultados analíticos SITIO 3- Junio 2014
Tabla A4.5.k (cont) Resultados analíticos SITIO 3- Junio 2014
Tabla A4.5.i Resultados analíticos SITIO 3- Julio 2014
Tabla A4. 5.i (cont) Resultados analíticos SITIO 3- julio 2014
Tabla A4.5.j Resultados analíticos SITIO 3- Julio 2015
Tabla A4 5j (cont) Resultados analíticos SITIO 3 Julio 2015
Tabla A4.6 Resultados analíticos SITIO 3 -Abril 2013
Tabla A4.7 Resultados analíticos SITIO 4 -Abril 2013

Tabla A4.8. Resultados analíticos SITIO 18 -Abril 2013

Tabla A4.9. Resultados analíticos SITIO 18 -Febrero 2014

ANEXO IV

Tabla A5. 1 Resultados analíticos SITIO 3 -PADp4-PADp7

Tabla A5. 2. Resultados analíticos SITIO 3-PAD 16

Tabla A5. 3. Resultados analíticos SITIO 3-PAD 13

Tabla A5. 4. Resultados analíticos SITIO 3-PAD 7

Tabla A5.6. Resultados analíticos SITIO 3-PAD 8

Tabla A5. 7 Resultados analíticos SITIO 3-PAD 13

Tabla A5. 8.Resultados analíticos SITIO 3-PAD 16

Tabla A5. 9. Resultados analíticos SITIO 3-PADp 6

Tabla A5. 10 Resultados analíticos SITIO3-PM 2

Tabla A5. 11 a Resultados analíticos SITIO4-PM 2 y 4

Tabla A5. 11 b Resultados analíticos SITIO4-PM 2 y 4

Tabla A5. 12 Resultados analíticos SITIO4-PM 2 ;4 y 11

ANEXO VI

Tabla A6. 1 Resumen Parámetros ingresados

Tabla A6. 1 (cont)Resumen Parámetros ingresados

Tabla A6. 2 Resultados SSTLs Agua subterránea Escenario 1

Tabla A6. 3 Propiedades físicas de los contaminantes- Escenario 1

Tabla A6. 4 Parámetros misceláneos - Escenario 1

Tabla A6. 4 (cont.) Parámetros misceláneos – Escenario 1

Tabla A6. 4 (cont.) Parámetros misceláneos – Escenario 1

Tabla A6. 5 Estándares legales – Escenario 1

Tabla A6. 6 Resultados SSTL -Agua Subterránea-Escenario 2

Tabla A6. 6 (cont.) Resultados SSTL -Agua Subterránea-Escenario 2

Tabla A6. 7 Resumen parámetros ingresados-Escenario 2

Tabla A6.7 (cont.) Resumen Parameros ingresados- Escenario 2os

Tabla A6. 8 Propiedades físicas parámetros ingresados -Escenario 2

Tabla A6.9 Parámetros misceláneos-Escenario 2

Tabla A6.9 (cont.). Parámetros misceláneos Escenario 2

Tabla A6. 9 cont. Parámetros misceláneos Escenario 2

Tabla A6. 11 Estándares Legales Escenario 2

Tabla A6. 11 (cont.) Estándares Legales Escenario 2

Tabla A6.12 Parámetros sobre toxicidad Escenario 2

Tabla A6. 13 Resultados SSTL Agua Subterránea Escenario 3

Tabla A6. 14 Resumen parámetros ingresados-Escenario 3

Tabla A6. 15 Resultados SSTL Aguas Subterráneas Escenario 4

Tabla A6. 16 Resumen Parámetros ingresados Escenario 4

Tabla A6. 16(cont.) Resumen Parámetros ingresados Escenario 4

Tabla A6. 17 SSTL Suelo Superficial- Escenario 5

Tabla A6.18 Resumen de parámetros ingresados-- Escenario 5

Tabla A6. 18(cont.). Resumen de parámetros ingresados-- Escenario 5

Tabla A6.19 SSTL Agua subterránea- Escenario 5

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación del Estudio

Las diferentes actividades urbanas de la ciudad de Bahía Blanca, generan permanentes emisiones gaseosas y residuos sólidos, semisólidos y líquidos que pueden alcanzar, por diversas vías, el suelo e ingresar a la zona no saturada (ZNS). Parte de las sustancias son retenidas por los materiales que la componen y otra parte lixiviadas hacia el agua subterránea. Entre los contaminantes se encuentran los hidrocarburos livianos provenientes de fugas de los sistemas de almacenamiento subterráneos de estaciones de servicio y otras actividades relacionadas.

El acuífero freático, receptor de los potenciales contaminantes, se encuentra a escasa profundidad y está constituido por un conjunto de sedimentos, de muy variada permeabilidad primaria, debido a los distintos procesos genéticos intervinientes. Debido a lo llano del paisaje, el acuífero freático, posee bajo gradiente hidráulico, lo que da lugar a que predominen, de forma natural, los movimientos verticales de agua de evaporación, transpiración y recarga sobre el flujo subterráneo lateral.

La dinámica del sistema hidrológico natural ha sido sustancialmente modificada debido a las obras de urbanización, entre las que, por su influencia se destacan las impermeabilizaciones, los sistemas de distribución de agua potable, desagües pluviales y cloacales, la construcción de terraplenes, la canalización del Arroyo Maldonado y el entubado del Arroyo Napostá Grande y, en las zonas bajas, las zanjas de drenaje excavadas a cielo abierto que drenan las aguas del acuífero freático hacia el mar, destino final también de todos los potenciales contaminantes acarreados.

A los procesos antes mencionados se le agregan los frecuentes anegamientos del área costera, producto del afloramiento de la capa freática, debido a la recarga por agua de lluvia ocurridas en períodos húmedos. En síntesis, el funcionamiento del sistema hidrológico natural ha sido profundamente modificado dando lugar a marcadas heterogeneidades espaciales, que generan sectores con incremento de la velocidad de flujo subterráneo y drenaje, con la consecuente disminución del tiempo de llegada, de las potenciales sustancias contaminantes a las aguas del estuario de Bahía Blanca y otros sectores con muy baja circulación y con anegamientos superficiales.

Esta tesis doctoral, pretende contribuir al conocimiento y la comprensión de los diferentes procesos que ocurren en la interfaz sólido-solución (tanto en la ZNS, como en el sistema acuífero) y que afectan el comportamiento y la presencia de sustancias contaminantes en el medio.

La importancia del estudio radica en determinar y analizar, por primera vez y de forma integrada, el grado de contaminación por hidrocarburos que presenta el acuífero libre subyacente a la ciudad, lo que permitirá definir pautas para la mitigación del fenómeno ante potenciales contaminaciones de hidrocarburos. La información y el conocimiento que se pretende adquirir acerca de la temática, contribuirá al conocimiento de evolución de los fluidos orgánicos presentes en un medio poroso acuoso.

El trabajo se realiza en colaboración y cooperación con la Subsecretaría de Gestión Ambiental de la Municipalidad de Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires, lo que permitirá instrumentar mecanismos de comunicación y divulgación de apoyo logístico, que serán de utilidad para la comunidad en general y para los organismos de contralor en particular, puesto que la información generada será vital para planificar y diseñar planes de monitoreo, control y mitigación de los potenciales procesos de contaminación.-

1.2. Objetivos

La investigación propone llevar adelante estudios tendientes a profundizar los conocimientos vinculados a los procesos de contaminación de hidrocarburos livianos en el acuífero freático de Bahía Blanca. El interés específico está dirigido al estudio de los potenciales focos de contaminación que constituyen los establecimientos que poseen Sistemas de Almacenamiento Subterráneo de Hidrocarburos (SASH) en la ciudad y su interacción con el acuífero freático.

Específicamente se pretende:

- a) Identificar la presencia de sitios contaminados con hidrocarburos, establecer la magnitud y el alcance la misma;
- b) Determinar los tipos de hidrocarburos que han producido la contaminación y el grado de alcance de los procesos de dispersión hidromecánica y degradación, entre otros parámetros;
- c) Diagnosticar los movimientos hidrodinámicos a través del suelo y la zona saturada y la magnitud del transporte de contaminantes orgánicos en el acuífero freático;
- d) Realizar un modelo hidrodinámico conceptual de una porción del acuífero freático con el objeto de reproducir el movimiento del flujo subterráneo y permita estimar la dispersión de los contaminantes en el mismo;
- e) Desarrollar una prognosis de la problemática, en función del incremento de la actividad antrópica, y en base a ella proponer medidas y metodologías de monitoreo

y un plan de mitigación y saneamiento de las zonas afectadas. -

1.3. Caracterización General y Delimitación del Área de Estudio

1.3.1. Caracterización general del medio físico de la región

El paisaje general forma parte de la denominada Pampa pedemontana (Fidalgo *et al.*, 1975) y la geología local responde a las características impuestas por las dos regiones morfoestructurales en las que se inserta la zona; las Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires y la Cuenca del Colorado.

El clima de la región es de transición entre templado con inviernos secos y áridos de estepa que domina en la Patagonia. La vegetación natural, en concomitancia con el clima, es arbustiva xerófila en transición a la de pradera hacia el norte, mientras que en la zona litoral es arbustiva halófila. La vegetación autóctona ha sido notoriamente modificada como consecuencia de las actividades agropecuarias y la urbanización, quedando en la actualidad solo relictos de ella en sectores improductivos.

Desde las Sierras Australes hacia el sur, se extiende una amplia planicie suavemente ondulada sin accidentes notables, a excepción del valle del Arroyo Napostá Grande que presenta un régimen permanente con un módulo anual medio de $0,9\text{m}^3/\text{s}$ a la altura de la ciudad de Bahía Blanca (Carrica, 1998). Desde sus nacientes, en las mencionadas Sierras Australes, el arroyo ingresa a la llanura como un curso maduro de marcada aloctonía, con valles encajonados producto del rejuvenecimiento del paisaje.

La llanura culmina su dominio al sur en una escarpa que la separa de la zona litoral. Al superar este desnivel el arroyo pierde su carácter encajonado formando llanuras aluviales más amplias, que eran frecuentemente afectadas por las inundaciones producidas por los desbordes del arroyo y donde se enclava la ciudad de Bahía Blanca y el área de estudio. El Napostá Grande desagua en el estuario de Bahía Blanca sobre el canal principal de acceso al puerto de aguas profundas de Ingeniero White, a unos dos (2) kilómetros al este de la localidad homónima. En la desembocadura el curso ha labrado un pequeño estuario sobre sedimentos marinos cuaternarios de composición limo arcilloso.

El cauce natural del arroyo, en su paso a través de la ciudad de Bahía Blanca, ha sido modificado por distintas obras de ingeniería destinadas a mitigar el efecto de las crecidas que otrora, llegaron a anegar importantes sectores urbanos. En 1951 se inauguró en el Parque de Mayo, luego de tres años de tareas, un partidor regulador de crecidas que actúa por desborde, derivando el caudal excedente a través del Canal

Maldonado hacia el mar. Dicho canal de unos cinco (5) kilómetros de longitud, fue construido sobre el antiguo cauce del Arroyo Maldonado, efluente del Napostá Grande, pero de carácter intermitente, está revestido de placas de concreto (hormigón) y su capacidad es de unos 260 m³/s.

Aguas abajo del derivador, el cauce natural del arroyo ha sido objeto en numerosas oportunidades de tareas de limpieza y canalización y unos cuatro kilómetros de su trazado en el sector que atraviesa la ciudad, se encuentran entubados mediante una galería de concreto con una capacidad de unos 40 m³/s.

La mayor concentración poblacional de la región se ubica en los niveles litorales, destacándose como centro urbano la ciudad de Bahía Blanca, y las localidades adyacentes de General Daniel Cerri e Ingeniero White, totalizando alrededor de trescientos diez mil (310.000) habitantes.

Desde el punto de vista productivo, los principales recursos económicos de la región se centran en la explotación agropecuaria, la capacidad exportadora del Puerto de Ingeniero White, la producción del Polo Petroquímico y la actividad comercial desarrollada en la localidad de Bahía Blanca.

Desde su fundación, en el año 1828, Bahía Blanca utilizó para su desarrollo los recursos hídricos disponibles de la cuenca del Arroyo Napostá Grande en la cual está inserta. Los colonos de la entonces denominada Fortaleza Protectora Argentina, construida prácticamente a la vera del arroyo, utilizaban sus aguas para riego de legumbres y hortalizas mediante canales que funcionaban por gravedad, mientras que el agua de lluvia recolectada en aljibes se reservaba para la bebida humana.

El aprovechamiento de las aguas del arroyo a los fines de abastecimiento a núcleos urbanos, especialmente a la ciudad de Bahía Blanca, ha sido motivo de numerosos estudios a través del tiempo. Sin embargo, a excepción de dos tomas secundarias ubicadas en las cercanías de Bahía Blanca aguas arriba de la misma, no se han realizado obras de envergadura a tales fines.

El uso de las aguas subterráneas de la capa freática, de características salobres en el sector de Bahía Blanca y alrededores, se limita a la explotación de pequeños caudales mediante bombas, tanto accionadas por corriente eléctrica como por algunos molinos de viento, para riego de sectores parquizados con especies resistentes a las sales y para recreación (llenado de piletas de natación). -

1.3.2. Delimitación del Área de Estudio

Conforme la temática y los objetivos del presente trabajo, se ha definido un área de estudio de unos 50 Km² delimitada por medios físicos naturales, aunque todos ellos han sufrido notorias modificaciones por acciones antrópicas.

La superficie tiene una forma aproximadamente triangular, con un vértice al norte constituido por el derivador de caudales del Arroyo Napostá Grande situado en el Parque de Mayo ($38^{\circ} 41' 42.44''\text{S}$ y $62^{\circ} 15' 53.27''\text{O}$), el cual, por rebalse, vierte las crecidas al canal Maldonado; un vértice al sur que coincide con la desembocadura del cauce natural del propio Arroyo Napostá Grande en el estuario de Bahía Blanca ($38^{\circ} 44' 20.20''\text{S}$ y $62^{\circ} 14' 28.41''\text{O}$) y un tercer punto al Oeste que corresponde a la desembocadura del antiguo Arroyo Maldonado ($38^{\circ} 44' 06.41''\text{S}$ y $62^{\circ} 19' 07.83''\text{O}$), convertido en el ya mencionado canal Maldonado en la década de 1950.

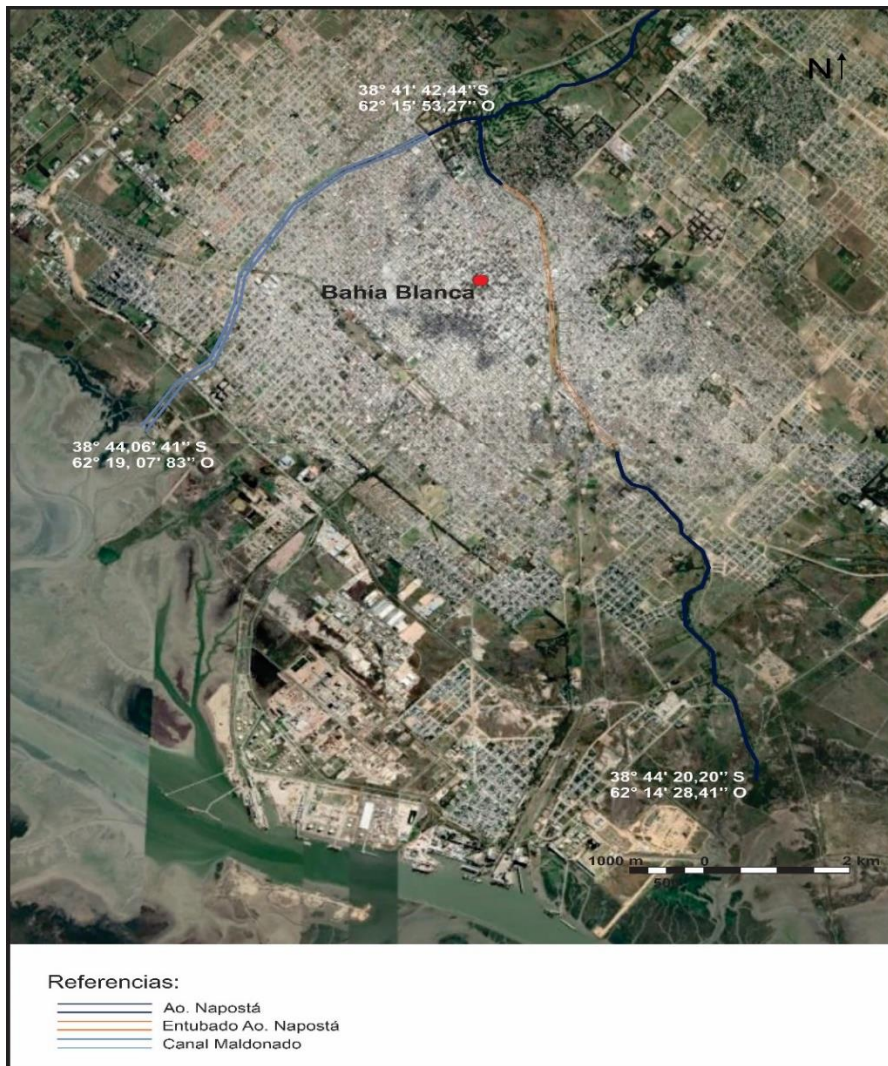


Figura 1. Área de estudio.

CAPITULO 2. METODOLOGÍA

2.1. Recopilación Bibliográfica

La investigación se inició con la búsqueda y recopilación de bibliografía, tanto información geológica, geomorfológica, edafológica, climatológica, hidrológica e hidrogeológica de la zona, como material específico de contaminantes orgánicos motivo del presente estudio. Los trabajos específicos consultados se encuentran debidamente referenciados a lo largo del texto de la tesis.

2.1.1. Antecedentes

2.1.1.1. Antecedentes hidrogeológicos del área de estudio

Hasta el presente no existen trabajos específicos sobre la hidrogeología del área de estudio. La existencia de trabajos de índole regional que abarcan aspectos de la temática investigada no resulta demasiado abundante, limitándose a una decena de ellos.

El primer trabajo relevante es el de Wichmann (1918), quien realizó un estudio de la geología e hidrogeología de la *hoja 35m Bahía Blanca*. El autor describe algunas características hidrológicas superficiales y subterráneas y las propiedades físicas y químicas de las principales capas portadoras de agua en base a la información existente de las perforaciones realizadas hasta ese entonces en la zona.

En 1964, J. García y O. García publican un completo estudio sobre los recursos hídricos de la región de Bahía Blanca a escala de reconocimiento. El trabajo contiene una completa recopilación y análisis de la documentación climatológica, geológica, hidrológica superficial y subterránea existente, fundamentalmente de las perforaciones profundas efectuadas por la ex-Dirección Nacional de Geología y Minería en el área de Bahía Blanca.

A principios de la década de 1970, el Comité de Investigaciones de Aguas Subterráneas (C.I.A.S.) efectúa un relevamiento hidrológico regional del área sur de la Provincia de Buenos Aires, basado en un censo de perforaciones a escala 1:50.000 con medición de niveles y determinación de las características hidroquímicas fundamentalmente de la capa freática. La información fue utilizada e impresa como informe inédito por la Dirección y Manejo de Aguas Subterráneas, DYMAS, (1974) con el título "Contribución al Mapa Geohidrológico de la Provincia de Buenos Aires, escala 1:500.000. Zona de Bahía Blanca y Nordpatagónica" en donde se sintetizan los conocimientos

hidrogeológicos de la región con el fin de delimitar la problemática del ambiente geohidrológico y fijar las hipótesis de trabajo para futuras investigaciones. Las conclusiones del trabajo relacionadas al desarrollo regional, contemplan la idea de que el recurso hídrico subterráneo debe ser tenido en cuenta para la planificación de todo desarrollo; que el abasto de agua a Bahía Blanca es un punto crítico ya que el recurso no se conoce en forma adecuada.

Bonorino y Sala, (1983) y Sala *et al.* (1985) caracterizan la hidrodinámica e hidroquímica del acuífero freático costero de Bahía Blanca y Bonorino, en 1988, realiza un pormenorizado estudio de la geohidrología del Sistema Hidrotermal Profundo de Bahía Blanca, pero sin detallar aspectos de la capa freática del sector.

Carrica, 1998, realiza su tesis doctoral sobre la Hidrogeología de la Cuenca del Arroyo Napostá Grande, curso que atraviesa la ciudad de Bahía Blanca y describe, dentro de un marco regional y general, las principales características del acuífero freático de la zona en la cual está inserta el área de estudio.

Lexow y Bonorino (1991) introducen por primera vez en la literatura científica local la temática de "Contaminación del Agua Subterránea por Derrames de Hidrocarburos en la ciudad de Bahía Blanca" en las Primeras Jornadas Municipales sobre Medio Ambiente - Bahía Blanca, y en Lexow y Bonorino (1993) publican un trabajo sobre la contaminación de las aguas subterráneas por filtraciones de combustibles de los tanques de almacenamiento subterráneo en la ciudad.

Lafont (2009) desarrolla su tesis doctoral sobre la identificación y caracterización de contaminantes metálicos en del acuífero costero de Bahía Blanca, que comprende el sector sur del área de estudio de este trabajo.

Pera Vallejos y Lexow (2016) realizan estudios de criterios de remediación en función de los riesgos en base a la salud humana y toxicológicos en tres puntos dentro de la zona de estudio.

Por último, Lucía Carrica *et al* (2020) actualizan el estado de explotación de los acuíferos del Partido de Bahía Blanca y brindan pautas para una explotación racional y conjunta con el agua superficial para los distintos usos, teniendo en cuenta su disponibilidad, sus características químicas y los costos de explotación asociados.

No se cuenta en la literatura científica estudios que caractericen los hidrocarburos libres en el acuífero freático de Bahía Blanca, aunque existen en el archivo del Departamento de Saneamiento Ambiental de la Municipalidad de Bahía Blanca antecedentes de reportes de contaminación y remediaciones en distintos sitios de la ciudad que se han

desarrollado desde 1999 hasta el presente y que fueron contemplados para la realización de la presente tesis. -

2.2. Tareas de Campo

Las tareas de campo realizadas se pueden dividir en: 1) reconocimiento geomorfológico y geológico del área de estudio; 2) ubicación de los puntos de muestreo; 3) ejecución de pozos de observación y muestreo de detritos de perforación para su descripción; 4) medición de los niveles estáticos en pozos de monitoreo; 5) muestreo de aguas subterráneas de los pozos de monitoreo; 6) muestreo de Fase Libre No Acuosa de pozos de monitoreo; 7) realización de Tomografías eléctricas; 8) realización de estudios de remediación basados en la utilización de software RBCA (ASTE 1783-E).

2.2.1. Relevamiento Geomorfológico y Geológico del Área de Estudio

El relevamiento geológico y geomorfológico se realizó tomando como base la Carta Geológica 3963-II Bahía Blanca (Folguera *et al.*, 2017), y a mayor detalle, los trabajos de Fidalgo (1983) y Gonzalez Uriarte (1984). Sobre esta base se efectuaron algunas redefiniciones propias producto de las observaciones de campo actuales. En los puntos definidos como de interés, se tomaron muestras de sedimentos de perforaciones, para luego en laboratorio, analizar y comparar los datos de subsuelo con los definidos por otros autores en afloramientos. -

2.2.2. Ubicación de los Puntos de Muestreo

Se procedió a marcar en un mapa de la Ciudad de Bahía Blanca todos los sitios de Sistemas de Almacenamiento Subterráneo de Hidrocarburos (SASH). Se determinaron un total de veintiún (21) sitios de interés de los cuales se obtuvieron muestras de ciento cuarenta y ocho (148) pozos. -

2.2.3. Ejecución de Pozos de Observación y Muestreo de Detritos de Perforación para su Descripción

Con la finalidad de caracterizar el material de subsuelo, se realizaron veinte (20) perforaciones en tres (3) estaciones de servicio del área urbana de Bahía Blanca. Las perforaciones que se realizaron llegaron en su mayoría a los cinco (5) metros bajo boca de pozo (m.b.b.p.), a excepción de cuatro (4) que lo hicieron hasta los doce (12) mbbp. Los muestreos se realizaron con barreno manual y muestreando con cucharas de 5" de diámetro cada 50 cm.

In situ se procedió a la descripción macroscópica de los detritos de perforación, en laboratorio se determinó la textura de los sedimentos colectados y su mineralogía.

2.2.4. Medición de los Niveles Estáticos en Pozos de Monitoreo

Las prácticas de medición de niveles se ejecutaron, mediante sonda electrónica detectora de interfase, con resolución de 0,001m, en los pozos de monitoreo (Freatímetros), cuyas identificaciones y ubicaciones se encuentran en los planos de ubicaciones en los Capítulos 3.1.2 y 5.3.1. Los valores obtenidos se presentan en el anexo II -

2.2.5. Muestreo de Aguas Subterráneas de los Pozos de Monitoreo

Todos los puntos de interés fueron muestreados al menos una vez, aquellos lugares en los que se reportaron valores anómalos de hidrocarburos totales (HTP) o Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos (B.T.E.X), fueron muestreados al menos dos veces.

En todos los casos el muestreo se realizó a través de muestreador descartable tipo *bailer* y las muestras fueron colectadas en frasco de vidrio color caramelo de 1 litro y conservadas por debajo de los 4°C para garantizar la composición de las mismas.

2.2.6. Muestreo de Fase Libre No Acuosa (FLNA)

La Fase Libre No Acuosa (FLNA) fue muestreada en cuatro (4) de los veintiún (21) puntos de interés. Los muestreos de la fase se realizaron mensualmente (según el caso de estudio), aumentando holgadamente la frecuencia de muestreo sugerida por EPA. El muestreo se realizó con muestreadores descartables tipo *bailer* y las muestras fueron almacenadas en frasco de vidrio color caramelo de 50 ml y conservadas por debajo de los 4°C.

2.2.7. Realización Tomografía Eléctrica Multielectrodo

Se realizaron seis (6) tomografías eléctricas en una de las zonas de interés (denominada "Alem 1"), dos (2) longitudinales con orientación NO-SE y las cuatro (4) restantes perpendiculares a las primeras. Se utilizó para ello un tomógrafo ARES GF Instrument, de 2000 V, 50 A y 850 W, con cable de 660 metros y 120 electrodos de acero inoxidable. El espaciamiento entre electrodos fue de 1 metro. La superficie de la cuadrícula cubierta por transectas fue de 890 m² y el método utilizado para la realización de las mismas fue el Schlumberger.

2.3. Tareas de Laboratorio

2.3.1. Caracterización Sedimentos Muestreados

2.3.1.1. Análisis Granulométrico

Las muestras colectadas fueron procesadas por el método de tamizado (fracción arena) y el de pipeteado (Robinson, 1922) para las fracciones limo y arcilla. Todas las muestras antes de ser pipeteadas se trataron con hexametafosfato de sodio para lograr su dispersión, en el Laboratorio del Departamento de Saneamiento Ambiental de la Municipalidad de Bahía Blanca.

2.3.1.2. Mineralogía

Los sedimentos colectados fueron estudiados mediante lupa estereoscópica binocular con cámara fotográfica acoplada y microscopía de transmisión (grano suelto). La fracción limo y arcilla fue estudiada mediante difracción de Rayos X, utilizando para ello un difractómetro Rigaku Geiger Flex, Dmax III-C computarizado.

2.3.2. Análisis Químicos de Agua Subterránea

Los análisis químicos de Hidrocarburos totales de Petróleo (HTP), Hidrocarburos Poli-aromáticos (PAH's) de las muestras de agua subterránea fueron realizados en los laboratorios de IACA INDUSTRIAL S.A. de la Ciudad de Bahía Blanca. Se utilizó como método analítico de referencia la norma EPA 410.1 y TNRCC 1005-1006 para HTP y EPA 8015 para PAH's.

Los análisis químicos de B.T.E.X en agua fueron realizados siguiendo la metodología analítica EPA 8015 en el Laboratorio del Comité Técnico Ejecutivo de la Municipalidad de Bahía Blanca.

Los análisis fisicoquímicos y microbiológicos realizados a las muestras fueron realizados en el Laboratorio de Bromatología de la Municipalidad de Bahía Blanca, con las técnicas analíticas que lo habilitan.

2.3.3. Caracterización de Fase Libre No Acuosa

La caracterización de la fase libre no acuosa se realizó en el laboratorio del Comité Técnico Ejecutivo de la Municipalidad de Bahía Blanca, siguiendo la metodología analítica propuesta en la norma EPA 8015.

Las proporciones GRO (Rango Orgánico Gasolina) y DRO (Rango Orgánico Diesel)

fueron realizadas en el Laboratorio IACA INDUSTRIAL S.A. de la Ciudad de Bahía Blanca siguiendo los criterios analíticos de la norma EPA 8015.

Las relaciones Pristano/ n-C17, Fitano / n-C18 fueron obtenidas siguiendo la norma EPA 8015 en el Laboratorio Fix Sudamericana de la localidad de Quilmes, Provincia de Buenos Aires.

Todos los laboratorios mencionados se encuentran acreditados a nivel nacional y utilizan las técnicas analíticas que ameritan su condición.

2.4. Tareas de Gabinete

2.4.1. Caracterización del Medio Físico

La geología de la región ha sido tratada en numerosos trabajos los que, en su mayoría, consideran aspectos generales o parciales de las dos principales regiones morfoestructurales en la que está inserta el área de estudio: las Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires y la Cuenca del Colorado. Los trabajos de tesis de Bonorino (1988); Carrica (1998), y Lafont (2009), han analizado y sintetizado los trabajos geológicos anteriores de Frenguelli (1956), Kaaschieter (1965), Borrello *et al.* (1969, en Llambías y Prozzi, 1975), Zambrano (1971, 1972, 1974 en Zambrano, 1980), Rolleri (1975), Yrigoyen (1975), Fidalgo *et al.* (1975), Fidalgo 1983; Schillizzi y Kostadinoff (1985), Bonorino *et al.* (1986) Quatrocchio *et al.* (1992), entre otros. La información se completó con perfiles litológicos de perforaciones realizadas en la zona por diversos organismos.

Los trabajos geomorfológicos del área incluyen los generales de Tricart (1973), Fidalgo *et al.* (1975) González Uriarte (1984), y Folguera *et al.* (2017) y los más específicos del área de Fidalgo (1983) y González Uriarte y Navarro (1992).

Del mismo carácter existen estudios de suelos generales los mapas de suelos del INTA (1989), mientras que las muestras de suelo obtenidas fueron clasificadas de acuerdo a la Soil Taxonomy (USDA, 2003).

La base topográfica, la constituyen cartas del IGM escala 1:50.000 y 1:100.000, imágenes y fotos satelitales (Google Earth Pro) y algunos relevamientos parciales realizados por el autor de esta tesis mediante nivel óptico y GPS. -

2.4.2. Datos Meteorológicos

Los datos meteorológicos fueron provistos por la estación de registro continuo, operada

por el Comité Técnico Ejecutivo de la Municipalidad de Bahía Blanca, y confrontados con los datos de la Aerostación Civil Comandante Espora. -

2.4.3. Caracterización Hidrológica

A partir de los trabajos de tesis doctorales de Bonorino (1988), Carrica (1998) y Lafont (2009), se realizó una caracterización hidrológica superficial y subterránea del área de interés.

Se siguió el esquema hidroestratigráfico propuesto por DYMAS (1974), modificado por Bonorino 1988 y 2005, el cual define diferentes secciones hidrogeológicas las cuales se caracterizaron en base a la bibliografía disponible y al análisis de información hidrogeológica recabada de perforaciones de la zona.

La información hidrométrica obtenida de los censos hidrológicos se confeccionó un mapa de escurrimiento subterráneo de la capa freática; cuyo análisis permitió definir las características del flujo subterráneo de la capa freática y su relación con las aguas superficiales del área.

Algunos datos acerca de la geometría del acuífero freático, se establecieron merced al análisis de la información litológica perforaciones documentadas y de la interpretación de los métodos geofísicos empleados (tomografías).-

2.4.4. Procesamiento y Representación Gráficos de Análisis Químicos del Agua Superficial y Subterránea y de Lluvia

Como se mencionó, la caracterización química del agua superficial y subterránea, se efectuó a partir de los análisis realizados en el Laboratorio de Bromatología de la Municipalidad de Bahía Blanca. Para el procesamiento de los datos se utilizó el programa libre Diagrammes (software libre de la Universidad de Avignon, Francia); con la presentación de un diagrama de Piper, para mostrar las características químicas de las aguas analizadas.

2.4.5. Modelo de Flujo Subterráneo

El modelo conceptual del flujo subterráneo, surgió de los datos de los distintos censos realizados a pozos de monitoreo (profundidad del agua subterránea y medición de cota con GPS) y se contrastaron con los mapas elaborados por la DYMAS (1974), Carrica (1998), y Lafont (2009), aunque ninguno de ellos abarca la totalidad del área de estudio de la presente tesis en forma detallada.

2.4.5.1. Recarga y Descarga del Acuífero Freático

La cuantificación de los volúmenes de agua que recargan el acuífero freático es uno de los parámetros de más difícil estimación. A las dificultades intrínsecas de los propios métodos de cuantificación, se suma que el área de estudio se encuentra casi totalmente poblada con una alta densidad de construcciones, que producen impermeabilizaciones urbanas, drenajes pluviales, recargas inducidas por pérdidas en las redes de conducción de agua potable y cloacas, etc.

De acuerdo a lo antedicho y a la metodología general de trabajo adoptada, se planteó un balance hidrológico general del área tratando de individualizar las entradas de agua que alimentan al sistema y los que salen del mismo.

Conceptualmente se consideraron como descargas la evaporación y evapotranspiración directa desde la capa freática, la descarga subterránea al Arroyo Napostá Grande (caudal básico) y el escurrimiento subterráneo efluente hacia el mar.

2.4.5.2. Modelo Hidrológico Conceptual

Las dificultades ya señaladas referidas a la complejidad del área urbana, y a la escasez de datos hidrológicos no permiten definir un modelo hidrológico acabado del sector, por lo que en esta etapa del conocimiento es conveniente y necesario trabajar con modelos conceptuales de índole general.

Debido a ello se ha elaborado, en una primera instancia, un modelo conceptual integrado del sistema hidrológico en el cual se identifican las variables intervinientes y su interrelación con el medio físico; para luego entender el funcionamiento hidrológico de las mismas como respuesta o reacción a distintas acciones y bajo distintas circunstancias, como ser: estaciones, años y ciclos de años húmedos y secos

2.5. Caracterización de la Fase Libre No Acuosa Sobrenadante en la Zona Saturada a partir de Cromatogramas

Con los resultados de la caracterización de las fases libres no acuosas, se estudió la relación de las mismas en cuanto a sus cadenas de carbono versus tiempo de entrapamiento en el cromatógrafo. De esta manera se pudo identificar los productos sobrenadantes en fase libre no acuosa y poder caracterizar los diferentes orígenes de las fugas de hidrocarburos registradas, estableciendo si las mismas pertenecían a naftas premium, súper o diésel. Para mayor precisión del método se compararon las muestras analizadas con patrones estandarizados de los productos hallados. -

2.5.1. Evaluación de la Biodegradación de Hidrocarburos en la FLNA a través de Biomarcadores

Dadas las dos tipologías de fase libre no acuosa hallada y su posterior mezcla, se hizo énfasis en el estudio con biomarcadores en el sitio denominado “Alem 1”, para observar el comportamiento de los isoprenoides. Se consideraron diez (10) pozos, durante un lapso de diez (10) meses. -

2.6 Métodos Indirectos en la Detección de Fugas y Diseños del Transporte de Contaminantes en Fase libre No Acuosa

Se realizó la interpretación de la Tomografía Eléctrica Multielectrodo (TEM) de seis (6) perfiles, localizados en las inmediaciones del Teatro Municipal de la Ciudad de Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires, donde se detectó el mayor espesor de FLNA durante el desarrollo de esta tesis.

Se utilizó el método de Distancia Inversa a la Segunda Potencia para el cálculo del modelo. El radio de búsqueda mayor se estableció en 35 m, con una orientación de 315°. Para el procesamiento de las líneas 2D se trabajó utilizando el software Res2dinvx64.-

2.6.1. Aplicación de tomografía eléctrica multielectrodo en uno de los sitios contaminados como elemento de detección indirecta de hidrocarburos en fase libre y disueltos

Se analizaron las poblaciones de datos de resistividad y determinación de las lecturas atípicas, para poder discriminar: litologías, fluidos y posibles interferencias (caños, cables, etc.). Para la construcción del modelo se utilizó el método de “Distancia Inversa a la Segunda Potencia” y se utilizó el software EncomDiscover 3D Viewer.

2.7. Acciones Correctivas de Remediación basadas en el Riesgo a la Salud Humana

Para realizar el análisis de riesgos se ha utilizado el software RBCA Toolkitfor Chemical Releases Versión 2.5e. Este software es un paquete integral para la aplicación de modelos y caracterización de riesgos, diseñado para respaldar la aplicación de Acciones Correctivas Basadas en Riesgo (conocidas en inglés como Risk-BasedCorrectiveAction o RBCA), a sitios de descargas de compuestos químicos.

CAPITULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO FÍSICO

3.1. Geología

3.1.1. Marco Geológico

El área de estudio se inserta en la cuenca del Arroyo Napostá Grande, la cual en su mayor parte, pertenece a la porción noroccidental de la cuenca cretácica del Colorado, cuyo límite norte lo constituye la región morfoestructural de las Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires (Rolleri, 1975), (Folgueras et al, 2017).

La cuenca del Colorado se caracteriza por presentar un basamento fallado en bloques, que en parte, ha afectado a la cobertura paleozoica (Zambrano, 1980). Desde el Terciario la región se caracteriza por la falta de fallamiento y una inclinación suave de las capas, hacia el centro de la cuenca (Rolleri, 1975).

El área se encuentra cubierta por una potente pila de sedimentos del Terciario superior y Cuaternario, los que enmascaran la geología del subsuelo. Su reconstrucción e interpretación sólo es posible en base a información geofísica, y a las escasas perforaciones profundas existentes (Carrica, 1998). –

3.1.1.1. Basamento Cristalino

Corresponde a las rocas correspondientes al complejo ígneo-metamórfico de edad Precámbrica-Paleozoica inferior (Zambrano, 1972, en Zambrano 1980) a profundidades, según sondeos sísmicos, entre 1.430 y 1.920 m en el subsuelo de los alrededores de Bahía Blanca (Bonorino *et al.*, 1986). -

3.1.1.2. Rocas Paleozoicas

Las rocas paleozoicas corresponden principalmente a las cuarcitas de las Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires, se encuentran en todo el subsuelo del área de estudio. Su presencia ha sido confirmada por medio de información geofísica, y perforaciones a profundidades muy variables producto de la tectónica y de las acciones erosivas a las que han sido sometidas. Una perforación situada 8 kilómetros al norte de Bahía Blanca alcanzó los 1.730 m.b.b.p. (metros bajo boca de pozo) sin detectar su presencia (Carrica, 1998). Sin embargo, una perforación ubicada unos 5 kilómetros al oeste del centro de Bahía Blanca alcanzó las rocas paleozoicas a 724 m.b.b.p en posición correspondiente a un alto estructural (Bonorino, 1988). -

3.1.1.3. Cobertura Sedimentaria

Se encuentra constituida por sedimentos cenozoicos cuyo espesor máximo atravesado llegó a los 1.836 metros. Teniendo en cuenta el alcance y objetivos de la presente tesis, se hace hincapié en las formaciones del Terciario Superior y Cuaternario, ya que constituyen el acuífero libre de la región, mientras que de las restantes, sólo se hace una breve mención a modo ilustrativo en base a la información elaborada por Bonorino (1988) y Carrica (1998).

La columna estratigráfica comienza con la Formación Fortín del Jurásico Superior (Yrigoyen, 1975), reconocida como los sedimentos más antiguos. Está compuesta por areniscas cuarzosas y lutitas depositadas en un ambiente de llanura aluvial madura. En el área de Bahía Blanca, su profundidad de yacencia se situaría por debajo de los 1.500 m.b.n.m (metros bajo el nivel del mar) en zonas en que el basamento se profundiza más allá de esa cota.

Sobre una superficie de erosión se depositaron las areniscas gruesas y tobáceas, a veces conglomerádicas, correspondientes a la Formación Colorado. Estos sedimentos son de edad Cretácico Superior (Zambrano, 1980), y se acumularon en un ambiente de llanura aluvial en condiciones oxidantes. Niveles muy compactos alcanzados en Bahía Blanca a partir de los 800 m.b.n.m. podrían corresponder a esta formación.

Limitada al área costera actual y en discordancia erosiva sobre la unidad anterior, se encuentra la Formación Pedro Luro de edad Cretácico Superior. Se trata de los depósitos marinos más antiguos de la cuenca del Colorado y está representada por lutitas y arcillitas grises calcáreas y calizas arcillosas y arenosas acumuladas en un ambiente de aguas tranquilas y condiciones reductoras. Algunas perforaciones profundas del área de Bahía Blanca han detectado a esta formación entre los 642 y 764 m.b.n.m.

Supra yacen a los sedimentos anteriores depósitos de areniscas rojizas y arcillas yesíferas y tobas intercaladas depositadas principalmente en un ambiente de llanura aluvial, cuyo aporte detrítico proviene principalmente de las formaciones paleozoicas de las Sierras Australes y que corresponden a la Formación Ombucta del Eoceno-Oligoceno (Yrigoyen, 1969; en Bonorino, 1988). Varias perforaciones profundas realizadas en la zona de Bahía Blanca, donde principalmente se apoya sobre la Formación Colorado, la han atravesado total o parcialmente, ubicándose su techo entre los 406 y 500 m.b.n.m. y potencias de alrededor de 500 metros.

Sobre los sedimentos anteriores se encuentran, en concordancia, las arcillas y arcillitas

arenosas de color verde, yesíferas, que corresponden a la Formación Barranca Final. Fueron depositadas en un ambiente de plataforma que se conocen como "Mioceno Verde" o "Paranaense". Registros de perforaciones de la zona detectan su techo a profundidades superiores a los 200 m.b.n.m. y su piso se ubica alrededor de los 500 m.b.n.m con potencias medias de 300 metros, observándose una clara inclinación y aumento de espesor hacia el sudoeste (Carrica, 1998).

Estas arcillas verdosas pasan transicionalmente hacia arriba a los limos areno-arcillosos pardos rojizos calcáreos y yesíferos, con intercalaciones de arenas y gravas amarillentas correspondientes a la Formación Chasicó, ahora incluida en la Fm. Cerro Azul (Mioceno Superior -Plioceno) (Folgueras *et al.*, 2017). Perforaciones realizadas en la zona, indican potencias no superiores a 30 a 40 metros, aunque hacia el noroeste de la región alcanza los 200 metros.

El pasaje de esta formación a los denominados genéricamente "sedimentos Pampeanos" (Fidalgo *et al.*, 1975) o Formación Cerro Azul (op. cit) es transicional, encontrándose ésta, ampliamente distribuida en toda la zona aflorando o en posiciones muy cercanas a la superficie. Su importancia hidrogeológica radica en que conforma al acuífero libre de la región.

Estos sedimentos reciben distinta denominación formacional según su área de afloramiento y los autores consultados. En piedemonte serrano están definidos como Formación La Norma (De Francesco, 1992) mientras que en el ámbito de la cuenca inferior han sido denominados como Formación Pampiano (Tricart, 1973; Fidalgo, 1983) o Fm Cerro Azul (Fig. 3.1.a y Fig. 3.1.b) y su edad abarca desde el Mioceno Superior al Pleistoceno Superior. En Bahía Blanca se han detectado espesores de hasta 180 metros, aunque de acuerdo a la información geofísica generada (SEV), podría alcanzar los 200 metros (Carrica, 1998).

Se trata de sedimentos loésicos compuestos principalmente por limolitas castaño rojizas, de origen eólico macizas cementadas por carbonato de calcio, y es característico que la secuencia esté rematada por un manto de tosca de espesor variable, entre 0,20 metros y más de 3 metros (Calcrete I, según Folgueras *et al.*, 2017). Regionalmente los niveles de tosca presentan una amplia extensión areal, pero localmente existen discontinuidades debido a la acción de los agentes erosivos.

En el área específica de estudio no existen afloramientos netos de esta formación, debido a que se encuentra erosionada y cubierta formaciones modernas de escaso espesor. Sin embargo, existen claros perfiles expuestos en forma natural o por

excavaciones en las proximidades de la misma, destacándose las descripciones realizadas por Fidalgo (1983), en un sector de Grumbein (cota 19 msnm.) ubicado a unos 7 kilómetros al SE del Centro de Bahía Blanca (Plaza Rivadavia) y sobre las barrancas excavadas de la Avenida Cabrera (cota 60 msnm.) a 2,3 kilómetros al NE del centro de la ciudad, ambas sobre la margen izquierda del Arroyo Napostá Grande. También hay buenas descripciones de perfiles, en las salidas de la ciudad hacia el norte por la Ruta 33, y hacia el oeste por la Ruta 35.

Los análisis granulométricos efectuados por Fidalgo (1983), sobre dieciocho (18) muestras de loess del sector de Bahía Blanca, denotan una predominancia de la fracción arenosa (63%), seguida por el limo (30,5%) y la arcilla (6,5%).

Mineralógicamente están compuestos por trizas de vidrio volcánico, plagioclasas de composición oligoclasa-andesina, feldespatos potásicos, cuarzo, calcita y minerales ferromagnéticos alterados; en menor cantidad aparecen hornblenda, turmalina, muscovita, biotita, sericita, epidoto y circón. La composición de las fracciones arena y limo es similar mientras que dentro de los minerales de arcilla predominan montmorillonita e illita (Teruggi, 1957; Rossi, 1996; Limbozzi *et al.*, 2005).

En el subsuelo de la ciudad de Bahía Blanca sobre la margen derecha del Arroyo Napostá y hasta aproximadamente la cota de 10 msnm., por debajo de un suelo somero, existe un conjunto de sedimentos arenosos calcáreos, cuya potencia puede alcanzar hasta los 10 metros que inicialmente fueron asignados al Pampiano, (Fidalgo, 1983), pero que por su descripción podrían corresponder a la Formación Bahía Blanca (Fig. 3.1.a y Fig. 3.1.b), del mismo Fidalgo 1983 (Holoceno), que fuera descrita con escasa información. En cualquier caso, estos sedimentos arenosos presentan características distintivas de los típicos sedimentos pampeanos anteriormente descritos. Numerosas calicatas y pozos someros realizados en la ciudad certifican sus características distintivas y extensión.

Se trata de una alternancia de capas de arenas medianas a finas calcáreas gris blanquecino, con arenas oscuras y castañas muchas veces sueltas y sin estratificación que alternan con capas finas de arenas gruesas y gravas castaño claras con rodados angulosos de cuarcitas restos de conchillas de moluscos (gastrópodos) continentales. Cada capa rara vez llega al metro de espesor y se encuentran rematadas por una fina capa (no más de 0,3 m) de material calcáreo (Calcrete II) resistente, aunque también suelen encontrarse finos niveles arenas cementadas en profundidad. Las arenas fluviales con rodados de cuartitas, se adjudican a antiguas llanuras de inundación de los Arroyos Napostá Grande y Maldonado.

Fidalgo (1983) describe un perfil de estas características en una antigua excavación de 4 metros, sin base expuesta, en la calle O´Higgins 220 (38° 43´13.81” S y 62° 16´ 05.31” O). En un pozo situado en la calle Chancay al 600 (38° 42´ 57.51S y 62° 17´07.82” O) se perforaron 9 metros de arenas y gravas de diversa granulometría, la mayoría sueltas, sin alcanzar los clásicos sedimentos pampeanos de la zona (limolitas pardo rojizas compactas). Otros ejemplos, son un pozo de 12,3 metros en Calle Don Bosco 1500 (38° 43´44.44 S y 62° 17´12.28” O) cuyos primeros 5,40 metros son de arenas medianas a finas castañas poco cementadas. Otro pozo en Spurr (38° 45´04.79” S y 62° 14´36.85” O) de 9,40 metros de profundidad con 3,70 m superiores de sedimentos arenosos. En éstos dos últimos casos, después de la profundidad citada, aparecen los clásicos sedimentos pampeanos.

Por encima de los sedientos pampeanos se apoyan, en discordancia erosiva, las formaciones modernas descritas por Fidalgo (1983).

Cuaternario	Holoceno	Dominio Continental	Dominio Marino
		Formación La Viticola	Formación Las Escobas
		Formación Bahía Blanca	
	Pleistoceno Superior	Formación Luján	Formación Maldonado
Terciario	Plioceno medio	Pampeano	Marino Innominado
		Pampeano	Pampeano

Figura 3.1.a. Columna estratigráfica estudiada dentro del área de estudio.
(Modificada de Fidalgo, 1983)

La Formación Luján es equivalente a el Agua Blanca, de edad Pleistoceno Superior – Holoceno (De Francesco, 1992) se encuentra estrictamente representada dentro de los valles más antiguos de la zona, en este caso, en las barrancas del Arroyo Napostá Grande al norte de Bahía Blanca. El miembro inferior se apoya en discordancia erosiva sobre los sedimentos pampeanos y está compuesto por pefitas, gravas cuarcíticas con intercalaciones de lentes sabulíticos y arenosos de origen fluvial. En el tramo inferior del

arroyo, que corresponde al área de estudio y donde el mismo pierde su carácter de encajonado, solo se distinguen relictos del miembro superior de esta formación, que Fidalgo (1983) identifica como Formación Luján (Fig. 3.1.a y Fig. 3.1.b), de extensión muy limitada a las márgenes del cauce. Está compuesto en sedimentos areno-limosos a limosos de color castaño con tonalidades amarillentas y gris verdosas friables, con presencia de carbonato de calcio como finas capas, depositados en un ambiente fluvial de baja energía o de laguna.

En la zona costera, por debajo de la cota de 10 m.s.n.m, los depósitos sedimentarios marinos de la Formación Maldonado, del Pleistoceno Superior a Holoceno (Fidalgo, 1983) (Fig. 3.1.a y Fig. 3.1.b), yacen en discordancia erosiva sobre un nivel arenoso marino, innominado, de edad pleistocena (Chaar *et al.*, 1992) (Fig. 3.1.a). Este nivel está constituido por arenas de playa y limos arenosos subordinados, cementados por carbonato de calcio y se caracteriza por presentar abundantes restos de conchillas. En un pozo realizado al norte de Ingeniero White, en la zona del Parque Industrial, se detectó un espesor máximo para este nivel de 10 metros. Hacia el norte, se acuña sobre los sedimentos pampeanos y hacia el sur continúa por debajo de la Formación Maldonado.

La Formación Maldonado, también de origen marino sobreyace al nivel anterior con espesores de hasta 15 metros en la costa. Constituye una típica facies granodecreciente, con arenas oscuras en la base (con un contenido menor al 35 % de las fracciones limo o limo arcilla), que pasan gradualmente a limos arenosos, limos arcillosos y arcillas limosas (carentes o con contenidos menores al 10% de arena). Corresponden a depósitos de albuferas y marismas costeros conocidos vulgarmente como “cangrejales” (Fidalgo, 1983).

La mineralogía de las arenas basales, es comparable a la identificada en los Sedimentos Pampeanos, en tanto que la de las arcillas superiores, está compuesta principalmente por una asociación montmorillonita (comúnmente sódica) – illita (Lafont, 2009). En las arenas basales predominan minerales alterados, feldespatos, cuarzo, litoclastos volcánicos y magnetita y aparecen en escasa cantidad augita, hipersteno, apatito, vidrio volcánico y fitolitos. Además, se determinó la presencia de restos orgánicos, como espículas de esponjas y diatomeas. En las arcillas superiores: están compuestas por una asociación del grupo de las esmectitas donde predominan interestratificados de montmorillonita-illita y aparecen illita y clorita subordinadas; como minerales no arcillosos se observan cuarzo, feldespato y calcita.

La presencia de estos minerales arcillosos (con predominio del grupo de las esmectitas)

los suelos se caracterizan por expandirse en períodos húmedos y contraerse en épocas secas. Los movimientos verticales de agua de evaporación directa de la capa freática y recarga por agua de lluvia producen bruscas oscilaciones del nivel freático, el cual se encuentra a escasa profundidad o aflorante produciendo anegamientos. Como consecuencia los sedimentos polícticos pasan de condiciones saturadas a no saturadas periódicamente, lo que trae aparejado, importantes cambios volumétricos por la expansión-contracción del suelo, afectando la estabilidad de las construcciones que carecen de un adecuado diseño para este tipo de suelos (Trevisán, 1983; Carrica y Lexow, 2005).

La Formación Las Escobas (Fidalgo, 1983) (Fig. 3.1.a y Fig. 3.1.b), corresponde a la última ingresión del Holoceno y se encuentra extendida en el área próxima a la costa actual hasta aproximadamente la cota de 10 m.s.n.m. y representada por cordones y lomadas de sedimentos arenosos con abundantes cantidades de valvas de moluscos (conchillas), en diferente estado de conservación conforme la dinámica de la playa. Su potencia no supera los 2 metros, pero fuera del área de estudio. Dentro de ella, se extienden manchones de arena en forma de manto de poco espesor, comúnmente menores al metro, que constituyen remanentes de playa que localmente pueden estar conformados, por lentes de arenas limosas hasta limos arenosos, con presencia de conchillas. La Formación Las Escobas se apoya sobre los sedimentos de la Formación Maldonado, y los niveles arenosos marinos más antiguos.

La Formación La Vitícola (Holoceno) (Fig. 3.1.a y Fig. 3.1.b), se encuentra ampliamente diseminada en la región, cubre prácticamente todas las unidades estratigráficas descritas anteriormente y forma el material parental de algunos suelos en la zona de estudio. Se trata de limos arenosos a arenas finas limosas, con cantidades subordinadas de arcilla de color castaño o gris amarillento a veces con variada cantidad de materia orgánica, y de origen eólico. Su espesor es generalmente menor al metro y en áreas de pendiente suele estar ausente o como remanentes en manchones aislados de pocos decímetros de espesor. Según Fidalgo (1983) serían depósitos equivalentes al Médano Invasor de Tapia (1936), el Platense y el Cordobense de Frenguelli, el E1 y E3 de Tricart, la Formación La Postrera de Fidalgo *et al.* (1973) etc.

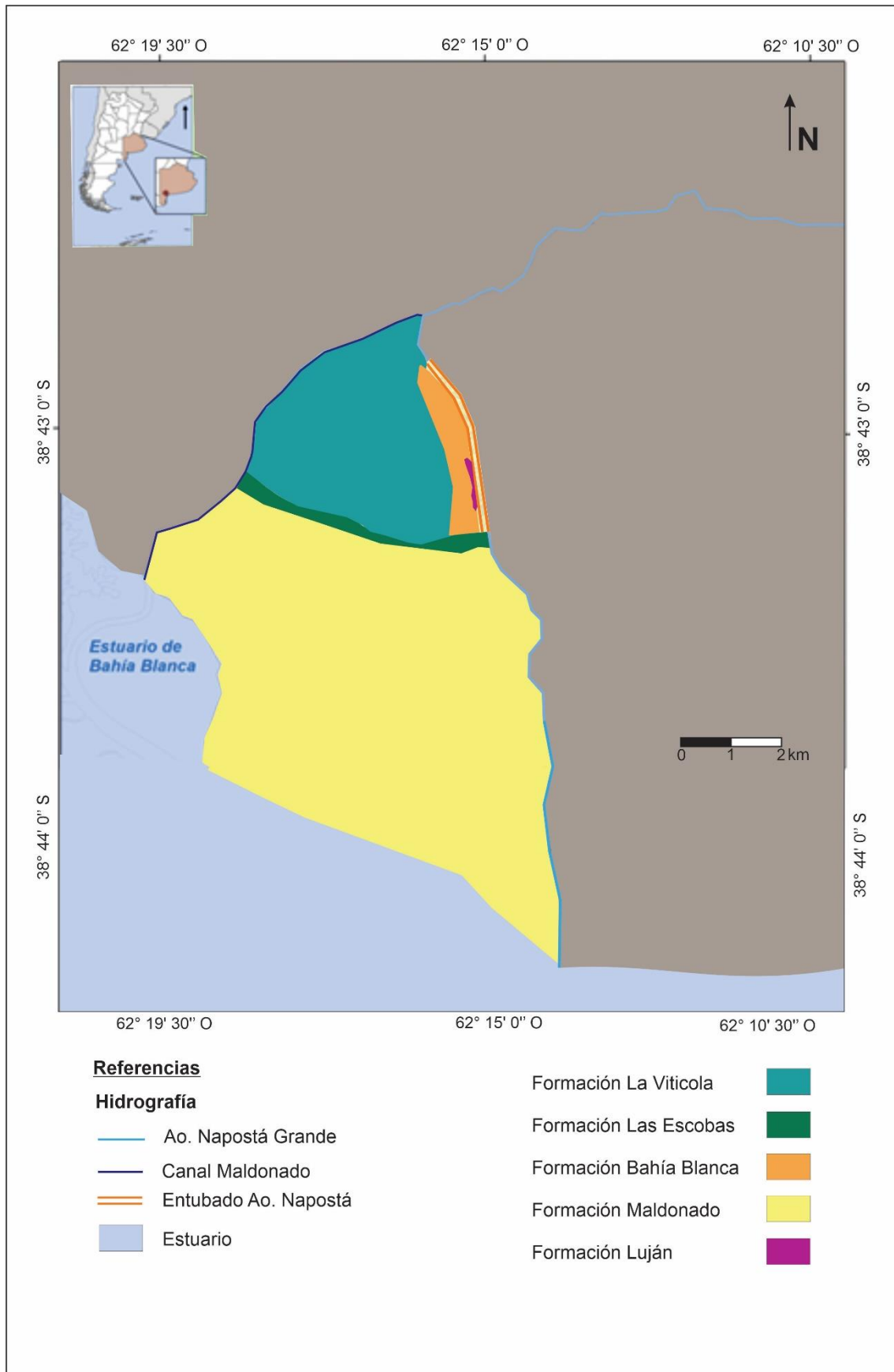


Figura. 3.1.b Mapa esquemático de las formaciones geológicas aflorantes en el área de estudio

3.1.2 Sedimentología y Mineralogía del subsuelo de la Zona de estudio

Se realizaron sondeos en algunos de los establecimientos estudiados para contrastar las litologías halladas con las propuestas por la bibliografía citada en el apartado de geología. Se realizaron diez (10) perforaciones en siete (7) sitios diferentes (mapa 3.1.2.a) con la finalidad de alcanzar el nivel freático

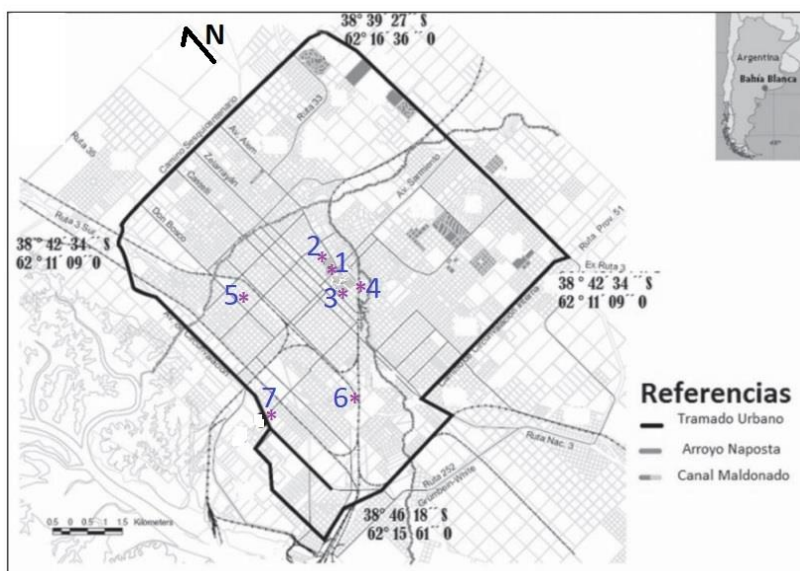


Figura 3.1.2. Puntos de descripciones litológicas en sondeos

Tabla 3.1.2. Ubicación de Zonas y Pozos Descriptos

Zona	Sondeo	Coordenadas Geográficas (decimales)	
1	PM 1	-38.71374	-62.25999
	PM 2	-38.71454	-62.26012
	PM 3	-38.71419	-62.25977
	PM 4	-38.71399	-62.25981
	PM 5	-38.71404	-62.26038
2	S1	-38.7119	-62.26768
3	S2	-38.72303	-62.27091
4	S3	-38.71654	-62.25243
5	S4	-38.72351	-62.29119
6	S5	-38.73626	-62.23998
7	PM6	-38.75206	-62.2829

En la Zona 1 (figura 3.1.2., Tabla 3.1.2. y anexo I) se realizaron cinco (5) pozos para la instalación de freatómetros, durante la construcción de los mismos se describieron los detritos de perforación,

En el pozo PM 1 (figura 3.1.2., Tabla 3.1.2 y anexo I), ubicado dentro del predio de una estación de servicio se perforaron 1 metro de arenas redondeadas a subredondeadas, aunque las mismas, podrían haber sido utilizadas como material de relleno, por lo que el horizonte descrito respondería a una distribución antrópica.

Este material de relleno pasa de forma neta a una arena arcillosa color castaño friable sin estratificación de un metro de espesor. Se identificaron en la fracción arenosa granos de cuarzo y líticos.

Subyaciendo forma granodecreciente, desde los 2 m.b.b.p. a los 3 m.b.b.p. se describió una capa sin estratificación, constituida por arcillas con alternancia de niveles de escasos centímetros de arenas muy finas.

En el paquete arcilloso, fueron descritos algunos rodados de cuarcitas, los cuales aumentan en cantidad en profundidad. Desde los 3 metros y hasta los 4.5 metros subyace un paquete de arenas finas a medias, cuarzosas que contienen algunos rodados de cuarcitas.

El PM 2 1 (figura 3.1.2., Tabla 3.1.2. y anexo I) alcanzó los 4 metros de profundidad se caracterizó por poseer una columna homogénea en sus tres primeros metros desde la boca de pozo. Fueron descritos limos arcillosos color castaño oscuro con concreciones calcáreas en los primeros metros, las cuales desaparecían de manera neta con un paquete de dos metros grano creciente de limos a arenas final color castañas claro con alto contenido de carbonato de calcio en toda la secuencia. La muestra se extrajo saturada en agua a 2.30 m.b.b.p.

El PM 3 1 (figura 3.1.2., Tabla 3.1.2. y anexo I) ubicado a 100 metros del PM 2 en línea recta se describió como una secuencia grano creciente conformada por un paquete de tres metros de espesor con limos castaños y presencia de carbonato de calcio. Por debajo del mismo se reconoció un paquete arena limosa sin estratificar con rodados cuarcíticos. La muestra se extrajo saturada en agua a 2.25 m.b.b.p.

El PM 4 1 (figura 3.1.2., Tabla 3.1.2. y anexo I) se caracterizó por poseer un paquete de carbonato de calcio en sus primeros 50 centímetros de espesor, que gradaba a un limo con altos tenores de carbonato, de dos metros de espesor. Alternando con este limo, se describieron pequeños paquetes de arenas finas a medias con 10 centímetros de espesor. Subyaciendo la secuencia antes mencionada, un paquete de arena gruesa límpida con clastos redondeados a subredondeados de cuarzo, feldspatos y escasas micas fue descrito. Se pudieron observar concreciones calcáreas y rodadas de cuarcita. La muestra saturada en agua fue extraída en el paquete comprendido entre 2

y 2.5 m.b.b.p.

El PM 5 1 (figura 3.1.2., Tabla 3.1.2. y anexo I) se caracterizó por poseer una sucesión continua de limos con concreciones calcáreas en su primer horizonte, para perder las mismas en profundidad, convirtiéndose las concreciones en rejillas de carbonato de calcio. la muestra totalmente saturada fue extraída a 2,20 metros bajo boca de pozo.

Las descripciones litoestratigráficas de la zona 1 son compatibles con la Formación Bahía Blanca de Fidalgo (1983) y el calcrete II de Folgueras et al (2017).

La Zona 2 1 (figura 3.1.2., Tabla 3.1.2. y anexo I), cercana a donde Fidalgo describe una excavación en su trabajo de 1983, se realizó un sondeo de 3 metros de profundidad donde se presentaron arenas y gravas sueltas sin estratificación con limos subordinados y reacción al carbonato de calcio en el primer metro, el cual disminuyo sustancialmente en profundidad quedando solo la mezcla de arenas de finas a gruesas y gravas en toda la columna. La descripción es compatible con la de Fidalgo y correspondería a la Formación Bahía Blanca.

En la Zona 3 1 (figura 3.1. 2., Tabla 3.1.2. y anexo I) en una perforación a 3 metros de profundidad fue descripta una columna homogénea de sedimentos arenosos con alto contenido de limo en su primer metro y medio bajo boca del pozo para luego gradar a arenas con arcillas castañas con algunas concreciones calcáreas.

En la Zona 4 1 (figura 3.1. 2., Tabla 3.1.2. y anexo I) se realizó un sondeo de 3 metros de profundidad, donde se detectaron en los primeros 50 centímetros, eflorescencias salinas sobre yaciendo a un paquete de arcilla castaña de 1 metro de espesor que gradaba a una arena media a gruesa, con abundantes líticos sin estructura definida con abundante carbonato de calcio y concreciones de hasta 2 cm de diámetros del mismo material.

En la Zona 5 1 (figura 3.1.2., Tabla 3.1.2. y anexo I) un sondeo de 4 metros de profundidad, expuso limo arenoso con abundante carbonato de calcio en los primeros 40 centímetros de espesor, que gradaba a un paquete de tosca friable de 30 cm. Subyaciendo a esta litología, 1,5 metros de arenas y grava con intercalaciones calcáreas sin estratificar fue identificada. Culminando el perfil en profundidad se observó una secuencia grano creciente de arenas gruesas que gradan a gravas y rematan el perfil con un nivel conglomerádico de 40 centímetros de espesor.

En la Zona 6 1 (figura 3.1.2., Tabla 3.1.2. y anexo I) se realizó un sondeo de 2,5 metros de espesor, constituido por un limo arenoso con carbonato de calcio de 50 centímetros de espesor que netamente pasaba a una secuencia de dos metros de una mezcla de

arenas, gravas y arcilla inconsolidadas.

En la Zona 7 1 (figura 3.1.2., Tabla 3.1.2. y anexo IV) se describió un pozo de tres metros de espesor, donde se registró un nivel de limos arcillosos color gris claro de 70 cm de espesor, que gradaban a unas arcillas grisáceas de 1 metro de espesor, con una leve laminación paralela. Hacia abajo continuaban 50 cm de arcillas de las mismas características, pero con concreciones calcáreas de la misma coloración. El sondaje culminaba con arenas con cuarzo, feldespatos, abundantes líticos volcánicos y una matriz constituida por trizas de vidrio. Estas características se corresponden con la Formación Maldonado, mientras que la litoestratigrafía de los sondeos realizados en las zonas anteriores corresponderían todas a la Formación Bahía Blanca.

3.2. Caracterización Geomorfológica de la Zona de Estudio

Las unidades geomorfológicas del área de estudio se encuentran en gran medida enmascaradas por la urbanización.

A nivel regional, el sistema serrano de las Sierras Australes engrana hacia el sur con una amplia planicie o Nivel de Planación General (González Uriarte, 1984) que se extiende hasta unos pocos kilómetros al noreste, del área de estudio. Este dominio geomorfológico, se encuentra por encima de la curva de nivel de 60 metros sobre el nivel del mar y su núcleo está conformado por sedimentos de tipo loessico (Fm Cerro Azul), con presencia de carbonato de calcio que forma depósitos de tosca. Hacia el sur, esta planicie presenta una fuerte línea de ruptura de pendiente con una zona de faldeo entre las cotas de 60 y 30 metros, denominada también escarpa frontal (González Uriarte, 1984), que conecta el nivel anterior con la zona costera. La escarpa frontal o áreas en pendiente bordean como una franja el sector NE del área de estudio; con un alineamiento NO-SE provocando desniveles de hasta 50 metros respecto a la planicie costera. Estas unidades se encuentran fuera del área de estudio.

En el sector norte del área de estudio, desde la bifurcación del A° Napostá Grande y el ex A° Maldonado (cota 30 m.s.n.m.) hasta la cota de los 10 m.s.n.m. aproximadamente, se extiende una planicie aluvial de suave pendiente (0.0033) que corresponde a las antiguas llanuras de inundación de los mencionados cursos (Formación Bahía Blanca) y que fueron cubiertas por última vez en la crecida de 1944 que azotó a la ciudad. La llanura aluvial del Arroyo Napostá, especialmente sobre su margen derecha, que se extiende hacia el sur y suroeste y se continúa con la Llanura Litoral a partir de la cota de 10 m.s.n.m. sin desniveles notables.

En general, el A° Napostá Grande en su cuenca inferior, no presenta un tramo senil, observándose la profundización de su cauce actual dentro de la planicie del valle, que señala un claro síntoma de rejuvenecimiento del paisaje, el que está asociado posiblemente al comportamiento reciente de la estructura profunda de la cuenca del Colorado. (González Uriarte, 1984).

La llanura litoral constituye una faja que acompaña a la línea de ribera actual. Está conformada por planicies restringidas vinculadas a la acción marina y acumulaciones de tipo coluvial y aluvial en relación con paleocauces, pero peneplanizadas por las últimas ingresiones marinas del Holoceno, conformando una llanura de abrasión marina labrada sobre las formaciones preexistentes.

Se reconocen dos tipos de unidades geomórficas: las antiguas o paleo niveles marinos, y las actuales o de funcionamiento actual. Las antiguas son formas elaboradas principalmente por la acción del mar, y están representadas por planicies cubiertas por sedimentos modernos y la plataforma de abrasión mencionada se encuentra parcialmente cubierta por cordones litorales y antiguas playas (Fidalgo, 1983). Conforman una zona costera llana de escasa pendiente, 2 a 3 por mil, elevada topográficamente unos 5 metros sobre el nivel del mar. La llanura litoral tiene su desarrollo al sur de Bahía Blanca y abarca todo el subsuelo de la localidad de Ingeniero White, Polo Petroquímico y el Parque Industrial y terrenos alrededores.

Su escasa pendiente topográfica y el limitado espesor de la zona de aireación (zona no saturada) influyen en la dinámica de las aguas subterráneas de la capa freática, haciendo prevalecer los movimientos verticales de agua de evaporación, evapotranspiración, encharcamiento, infiltración y recarga por sobre el escurrimiento superficial y subterráneo lateral.

Las unidades geomórficas de funcionamiento actual o llanura de marea se encuentran en gran medida enmascaradas por las acciones antrópicas desarrolladas en la zona costera, entre ellas se pueden distinguir las llanuras aluviales y los rellenos de marea. Las primeras están formadas por coalescencia de conos aluviales que dan como resultado un área con escasa pendiente que era cubierta durante los desbordes del arroyo generándose inundaciones de carácter mantiforme, hoy ya inexistentes por las obras realizadas aguas arriba en el arroyo (derivador, entubado, profundización del cauce etc). Su extensión es limitada a las márgenes del Arroyo Napostá.

El relleno de mareas es equivalente al slikke o zona de inundación diaria de las mareas, a la planicie de inundación esporádica (schorre) y a los canales de marea. El relleno de

mareas consiste en sedimentos limo arcillosos correspondientes a la Formación Maldonado, los que se hallan cubiertos en la zona del schorre por una débil capa eólica la que ayuda a la implantación del monte halófilo bajo, pero en algunos lugares denso. El slikke está surcado por canales de mareas funcionales, sin vegetación y rellenos por sedimentos fangosos actuales.

3.3. Suelos y Vegetación

Las características físico químicas de los suelos de una comarca, y su uso y manejo, controlan los fenómenos de evapotranspiración, escurrimiento superficial e infiltración, como así también, la composición química de las aguas de infiltración y recarga. Estas características físico-químicas dependen fundamentalmente del clima, de las condiciones y evolución de los materiales originarios de los suelos, de la configuración geomorfológica del área, y del laboreo a que se encuentran sometidos.

El uso del suelo a escala regional, es en su mayor parte agropecuario. En sectores en pendiente y litorales tiende a ser exclusivamente pecuario, mientras que, en la llanura, existe una alternancia entre agricultura y ganadería. Sin embargo, a escala del área de estudio, las características intrínsecas de los suelos han sido notoriamente modificadas por las acciones antrópicas derivadas del urbanismo, quedando solo relictos aislados de los suelos originarios.

3.3.1. Clasificación de los Suelos de la Zona

La identificación, distribución y las principales características de los suelos dominantes en el área de la cuenca, se reseñaron en base a la clasificación propuesta por el INTA (1989). Esta clasificación, basada en la Soil Taxonomy de los EEUU permite, además, en base a los grupos predominantes de suelos, delimitar Dominios Edáficos y Unidades Cartográficas.

Los suelos naturales dominantes en la zona se han desarrollado sobre sedimentos recientes (Formación Bahía Blanca, La Vitícola y Maldonado) por acción primordialmente eólica, y la geomorfología preexistente ha controlado la evolución y desarrollo de los mismos, observándose una marcada correspondencia entre las unidades geomorfológicas descriptas (planicies) y los órdenes de suelos identificados.

La mayoría de los suelos descriptos en los alrededores de Bahía Blanca, especialmente hacia el norte, sobre el denominado Nivel de Planación General pertenecen al orden de los Molisoles del suborden Ustoles, mientras que el resto corresponde al orden de los Aridisoles suborden Ortides, ubicados en el dominio geomorfológico litoral, o sea dentro

del ámbito del área de estudio.

Los suelos que subyacen a la propia ciudad de Bahía Blanca son categorizados como Miscelaneos (INTA, 1989), y han sufrido una notoria disturbación producto del urbanismo. Estos suelos están conformados por una mezcla de sedimentos de origen eólico y fluvial, producto de los antiguos desbordes del Arroyo Napostá Grande, y de remoción en masa (rodados de tosca), que en algunos lugares tienen como piso niveles de tosca de reciente formación, pertenecientes a la Formación Bahía Blanca, y en otros pareciera que forman parte de la misma formación (Calcrete II)

En algunos sectores del valle del Arroyo Napostá Grande, como es el caso de la margen derecha del mencionado arroyo en su paso por la ciudad de Bahía Blanca, se desarrollan Haplustoles típicos finos con espesores cercanos al metro, con buena provisión de materia orgánica y textura arenosa que dieron valores de infiltración básica de 180 mm/hora (Carrica, 1998). Estos altos valores condicen con la ausencia de vías de escurrimiento superficial y con la caracterización de los valles, como zonas de recarga local del acuífero freático. En menor proporción se identifican Haplustolesénticos en las áreas en pendiente que delimitan el valle.

Bordeando el límite sudoeste de la ciudad, en posición de llanura, existe una fina franja que cubre hasta aproximadamente la Ruta de Circunvalación Sur (Ruta N° 3) en donde se encuentra una asociación de Haplustoles típicos con Argiustoles Típicos y francos arcillosos, bien drenado no sódico, de considerable profundidad (MN tc-17, según la nomenclatura del INTA).

Más al sur y hasta la costa, sobre la llanura de abrasión marina y superponiendo a la Formación Maldonado y a la Formación Las Escobas, se encuentra una asociación de Aridisoles subgrupo Salortidesacuólico (60%) con Natrusoles típicos (40%), nombrados como DK ah – 1. Son suelos someros de textura franco arenosa en superficie, pasando a arcillosa en la segunda capa de alcalinidad muy fuerte y drenaje deficiente. En la superficie de éstos suelos de la zona costera, es común observar, efluorescencias salinas habiéndose identificado por difracción de rayos X: halita (NaCl), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), kutnahorita ($\text{Ca}(\text{Mn,Mg})(\text{CO}_3)_2$) y silvita (KCl) (Lafont, 2010).

Las zonas bajas donde existen construcciones importantes o vías de comunicación han sido rellenadas conformando terraplenes. El relleno artificial de los suelos está compuesto, en general, por una capa de 1 a 4,0 metros de sedimentos pampeanos triturados y luego compactados artificialmente. La pérdida de la textura y estructura

original ha aumentado la porosidad y permeabilidad de los mismos.

En la zona de cangrejales, el relleno artificial se complementa con material arenoso mediano a fino, proveniente de tareas de “refulado” (depósitos de dragado) de sectores del estuario contiguo.

La vegetación autóctona, ha sufrido una notoria depredación como consecuencia de la urbanización, conservándose sólo en islotes dispersos, formando asociaciones que alternan según las condiciones ecológicas del lugar. Naturalmente, en la llanura adyacente predomina la arbustiva xerófila, mientras que en la zona litoral es arbustiva halófila.

En los pocos sectores remanentes con suelo natural, quedan relictos de vegetación natural compuesta por bosquecillos de algarrobos (*Prosopisfrutescens*), chañares (*Gourlieaariposa*), piquillín (*Cordaliamicrophylla*), caldén (*Proaopiscaldenia*), brusquilla (*Discaristlongispina*), barba de chivo (*ProsopisStriata*) y jarilla (*Carreadivaricata*), asociada con malezas naturales como alfalfa criolla (*Kochiascoparia*), cardo (*Carduusaccuithoides*), cardo ruso (*Salsola Kali v. tragus*), paja colorada (*Paspalumquedrifolium*), paja vizcachera (*Stipa meesiana*).

3.4. Hidrología Superficial del Área de Estudio

Desde el punto de vista hidrológico, el área de estudio se inserta en la cuenca inferior del A° Napostá Grande, por lo que en este apartado se realiza una descripción muy general de la hidrología superficial de la misma en base a la recopilación bibliográfica y a nuevas observaciones realizadas particularmente en la cuenca inferior. En cuanto a los trabajos antecedentes merecen citarse los de Carrica (1998) y Carrica y Robledo, (2002), en los cuales se describe el régimen fluviométrico del A°. Napostá Grande.

La morfología y funcionalidad de la red de drenaje de la cuenca del Arroyo Napostá Grande, está en relación directa con su medio físico, que ejerce una notable influencia sobre el escurrimiento superficial y la infiltración (Carrica, 1998).

Las características del medio físico, y el diseño y funcionalidad de la red de drenaje superficial, permiten subdividir a la superficie de la cuenca del Napostá Grande para su estudio, en tres sectores denominados cuenca superior, media e inferior. La zona de estudio se inserta dentro de la cuenca inferior del Arroyo Napostá. En este tramo, el arroyo actúa fundamentalmente como conductor de caudales alóctonos, ya que no recibe adiciones significativas.

Las avenidas generadas en la cuenca superior se transmiten rápidamente aguas abajo,

provocando frecuentes desbordes y anegamientos, en las llanuras de inundación más amplias y extendidas, que bordean por el norte a Bahía Blanca. En estos lugares, se desarrollan y practican actividades recreativas, las cuales son frecuentemente afectadas por el fenómeno de anegamiento, ya que se encuentran aguas arriba de las obras de mitigación de las inundaciones oportunamente mencionadas. Dichas obras consisten en un derivador de caudales ubicado en el Parque de Mayo, que actúa por rebalse volcando los excesos de caudal del arroyo al canal Maldonado, que desagua en el mar. Esta obra, diseñada y realizada a fines de la década del 40 e inicios de los 50 divide al curso del arroyo Napostá Grande en dos: por un lado continúa su cauce natural (en parte entubado), y por otro se deriva hacia el canal Maldonado, que sirve como aliviadero frente a crecidas. Ambos, cursos, junto a la línea de costa marina actual, delimitan el área de estudio del presente estudio.

Antes de la construcción de esta obra, las crecidas del Napostá Grande inundaban importantes sectores de la propia ciudad de Bahía Blanca. Dos crecidas, una en marzo de 1933 y otra mayor en abril de 1944, fueron las más trágicas y motivo de la realización de las obras de mitigación. Sin embargo, las evidencias geológicas e hidrogeológicas del subsuelo de la ciudad de Bahía Blanca, denotan que dichas inundaciones han sido frecuentes en la historia geológica reciente del sector.

Es importante tener en cuenta que el curso natural del Napostá Grande, una vez superada la línea de ruptura de pendiente de los sedimentos pampeanos en su camino hacia el mar, a la altura del Parque de Mayo se bifurcaba naturalmente, y derivaba parte de los excesos de caudal al denominado Arroyo Maldonado o zanjón Maldonado. La traza natural de este curso, de régimen intermitente, ha sido totalmente enmascarada por los efectos de la urbanización, pero seguía aproximadamente la traza del actual canal Maldonado.

En condiciones naturales, el área tenía características arreicas, a excepción de los mencionados cursos que la delimitan y que reciben caudales alóctonos a los que se suman los desagües pluviales de gran parte de la ciudad. Las escasas superficies con terrenos naturales y las bajas pendientes de las llanuras o planicies que conforman el área de estudio provocan en superficie, un neto predominio de los encharcamientos e infiltración y evaporación sobre el escurrimiento mantiforme o integrado.

3.4.1. Hidrometeorología

La zona de estudio se caracteriza por ubicarse en un área de transición entre el clima templado subhúmedo de la llanura pampeana, y el semiárido de la Patagonia (Burgos y Vidal, 1951).

Sin embargo, como se mencionó, el área específica de estudio comprende un área urbana. El hombre, a través de la construcción de ciudades, ha contribuido a la generación de un tipo particular de clima local: el clima urbano, que presenta diferencias importantes con el imperante en el área rural subyacente (Steffens *et al.*, 2006). La modificación más importante del clima por efecto de la urbanización, es la aparición de temperaturas más elevadas en la parte central de las ciudades, dando lugar a un núcleo más cálido o isla de calor que decrece hacia la periferia. Esta isla de calor, podría definirse como exceso de calor generado en un ambiente urbano (Steffens *et al.*, 2006), podría repercutir en los procesos de evaporación y evapotranspiración en la urbe.

En cuanto a los vientos, las frecuencias mayores corresponden a los vientos del Noroeste y Oeste, siendo las menores las del Sureste, Sur y Suroeste. Bahía Blanca se caracteriza por ser ventosa, con flujo predominante de los sectores Norte y Noroeste y velocidades medias de 24 km/h (Steffens *et al.*, 2006).

3.4.1.1. Pluviometría

De acuerdo a estadísticas del Servicio Meteorológico Nacional, la ciudad arroja un módulo pluviométrico anual de 593 mm para el periodo 1901-2006 (Lafont, 2009).

El promedio anual de precipitaciones para la serie 1964-2015 del Partido de Bahía Blanca es de 648 mm. De ese total, en verano precipita el 33,9% (214,7 mm.), siendo la estación más lluviosa del año. En el otoño (marzo a mayo inclusive), la serie muestra un aporte histórico del 27,4% equivalente a 177,5 mm. En el invierno es donde se dan los mínimos pluviométricos, ya que la serie registra 13,6% del total del histórico (86,9 mm). Mientras que en primavera se darían un 33,1 % de precipitaciones (207,5 mm).

En este trabajo, a fin de caracterizar la pluviometría de los últimos años, se analizaron los datos obtenidos durante el periodo 2004-2014, registrándose en promedio 581 mm (12 mm menos que el promedio histórico de la serie 1901-2006). El año más seco fue el 2008 donde se registraron 294 mm, mientras que el año más lluvioso fue el 2014 con 1093 mm de lluvia. Entre los años 2005 y 2012 se produjo un ciclo pluviométricamente seco, definido así a una sucesión de años con un promedio de lluvias inferior al promedio de toda la serie (593 mm) (Fig. 3.4.1.1a).

Tabla 3.4.1.1.a Distribución estacional de las precipitaciones

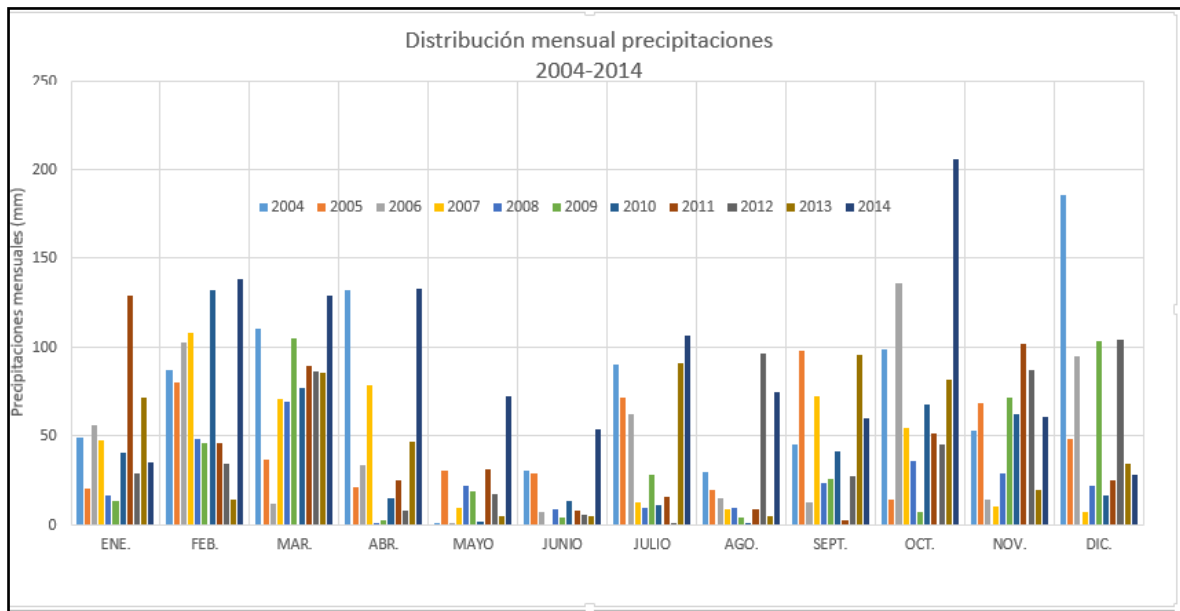
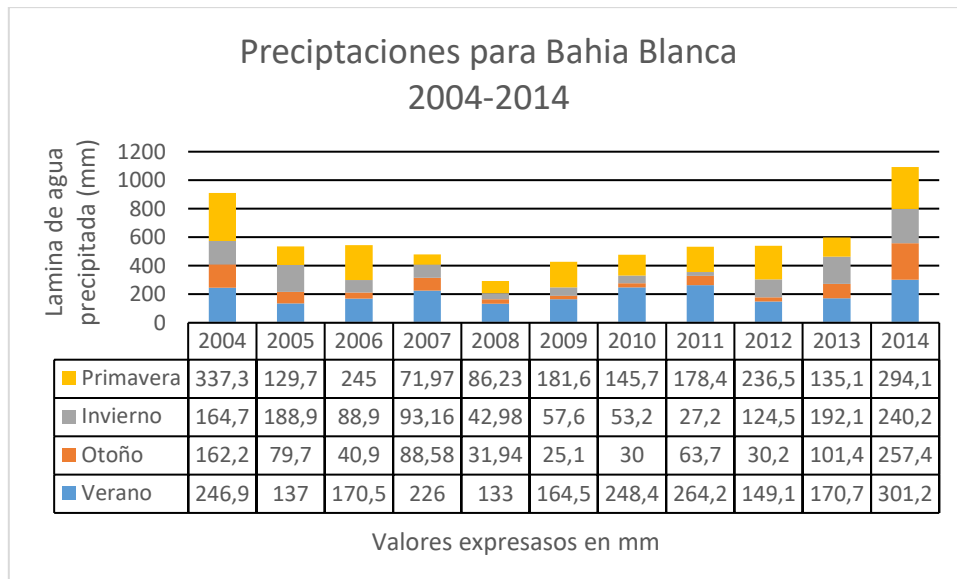


Figura. 3.4.1.1 b. Distribución mensual de las precipitaciones

Realizado un análisis estacional (Fig. 3.4.1.1b) se observa en general que los periodos más lluviosos son de primavera (septiembre – diciembre) y fines de verano (febrero marzo). Las estaciones secas en nuestra ciudad, que son el invierno y otoño respectivamente). El invierno a excepción del 2007, fue la estación más seca del año en todos los años relevados.

CAPITULO 4. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

4.1. Hidrogeología

Las unidades geológicas descritas anteriormente pueden agruparse en secciones hidrogeológicas; centrando el interés en las formaciones portadoras del acuífero freático en la zona de estudio.

Para la descripción se ha adoptado el esquema hidroestratigráfico, basado en secciones hidrogeológicas propuesto por DYMAS (1974), modificado por Carrica (1998 y Bonorino 1988 y 2005), Figura 4.1., con el agregado de algunas características particulares de las unidades identificadas en el subsuelo del área de estudio. -

4.1.1.- Sección Basamento Hidrogeológico

Compuesto por el basamento cristalino (Fig. 4.1), solamente identificado por geofísica en el subsuelo de la cuenca y la cubierta sedimentaria paleozoica que conforma el núcleo de las Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires. Los afloramientos paleozoicos se restringen a la cuenca superior y media del Arroyo Napostá Grande, y están representados por las cuarcitas y areniscas cuarzosas de grano fino compactas pertenecientes al grupo Curamalal y Ventana. La información disponible permite determinar que las rocas paleozoicas, se extenderían en el subsuelo de toda la cuenca. En los alrededores de Bahía Blanca se detecta a profundidades muy dispares (entre 722 y 1700 metros bajo boca de pozo) (Bonorino, 1988).-

4.1.2.- Sección Hipoparaniana

Esta sección, que incluye las formaciones que van desde el Cretácico Superior al Oligoceno (Fig. 4.1.), está solamente presente en el subsuelo de la cuenca inferior a partir de los 450 metros de profundidad. La integran la Formación Fortín (Poscenoniana) de origen marino con sedimentitas acuífugas, la Formación Colorado (Cretácica) con psefitas y psamitas de origen continental y carácter acuífero en su sección superior, la Formación Pedro Luro correspondiente a la ingresión del Cretácico Superior con sedimentos arcillosos-margosos acuíferos-acuitardos y la Formación Ombucta (eoceno-oligoceno) con psamitas y sefitas continentales con características acuíferas-acuitardas. La sección superior de la Fm Colorado y gran parte de la Fm Ombucta conforman dos niveles acuíferos del denominado Sistema Hidrotermal Profundo (SHP) de Bahía Blanca, acuífero hipertermal (55 a 62°C), surgente y con aguas de baja salinidad, aptas para todo tipo de uso.

EDAD	FORMACION	HIDROEST...	COLUMNA TIPO	LITOLOGIA	HIDROG.	N.P.	Q INICIAL	CALIDAD	
MIOCENO INFERIOR A CUATERNARIO	BAHÍA BLANCA		[Dotted]	arena media a fina calcárea, arena gruesa y grava. Tosca	acuifero	libre	50 a 11000 m ³ /s	B	
	MALDONADO		[Dotted]	arena media a fina, limos arenosos y arcilla limosa.	acuifero	libre		B-R	
	PAMPEANO	SECCION EPIPARANIANA	[Dotted]	limos loessoides con niveles de tosca		libre		B-R-M	
	?		[Dotted]	arenisca fina	acuifero				
	CHASICO		[Diagonal]	arcilla parda yesifera areniscas	acuitardo				
			[Dotted]	arena fina	acuifero				
	BARRANCA FINAL		SECCION PARANIANA	[Dotted]	arcilla verde	acuícludo		surg.	R
				[Dotted]	arena fina	acuifero			S
				[Dotted]	arcilla verde	acuícludo			S
				[Dotted]	grava y arena gruesa	acuifero			S
				[Dotted]	arcilla verde	acuícludo			S
				[Dotted]	arcilla roja arenosa	acuitardo			S
				[Dotted]	arena	acuifero			S
				[Dotted]	arcilla rojiza con intercalaciones arenosas	acuitardo			S
OMBUCTA		SUPERIOR	[Dotted]	arena gruesa	acuifero	surg.	B		
			[Dotted]	arenisca fina arcillosa	acuitardo				
			[Dotted]	lutitas y arcillas oscuras calcáreas y arenosas					
			[Dotted]	areniscas gruesas conglomerados rojizos					
CRETACICO SUPERIOR A PALEOCENO	?	SECCION HIPOPARANIANA INFERIOR	[Dotted]	areniscas grises verdosas y rosadas		no se ensayaron acuíferos			
			[Dotted]						
CRETACICO INFERIOR A MEDIO	?								
PRE - CRETACICO	BASAMENTO PRE - CRETACICO	BASAMENTO IMPERMEABLE	[Dotted]	metamorficas intrusivas acidas sedimentitas paleozoicas	acuífugo				

Figura 4.1. Cuadro Hidroestratigráfico del Área de Estudio (Modificado de Bonorino, 2005)

4.1.3.- Sección Paraniana

Está representada por la Formación Barranca Final (Mioceno), correspondiente a la ingresión paranaense y compuesta por pelitas verdosas con intercalaciones arenosas de origen marino dispuestas en discordancia sobre la sección anterior (Fig. 4.1.). El conjunto conforma un medio acuicludo, con algunas intercalaciones acuíferas portadoras de aguas de elevada salinidad. Su potencia en el área de Bahía Blanca, de acuerdo a datos de perforaciones, varía entre 250 y 350 metros acuñándose hacia el positivo de la Sierras Australes (Carrica, 1998). -

4.1.4. Sección Epiparaniana

El piso de la sección en el ámbito de la zona de estudio, está compuesto por limos arenosos y arcillosos de la Formación Chasicó o Cerro Azul (Mioceno Superior?)

En la parte inferior de esta formación, existe un nivel de no más de 10 metros de espesor, compuesto por arenas medias a finas de origen fluvial (Fig. 4.1.), que es portador de un nivel acuífero con características surgentes o semisurgentes, y aguas de regular calidad (2 a 5 g/l de total de sales disueltas), cuya recarga se produciría en el ámbito de la llanura pedemontana de las Sierras Australes.

En el área de Bahía Blanca, este nivel acuífero se ubica a profundidades entre 180 y 250 m.b.b.p. según la topografía, los pozos tienen una surgencia natural inicial de hasta 20 m³/h de aguas termales (entre 25 y 34°C en boca de pozo), del tipo cloruradas sódicas. La transmisividad del acuífero, según datos de ensayos de bombeo, rondaría los 50 m²/d con una permeabilidad media de 2,5 m/d (Carrica, 1998) con espesores de entre 10 y 15 metros.

El pasaje de la Fm Chasicó a los "sedimentos pampeanos" (Fidalgo *et al.* 1975) conocidos genéricamente como "Pampeano" o según Folgueras *et. al.*, la parte superior de la misma Fm Cerro Azul es transicional (Fig. 4.1.). Esta formación, ya descrita en el apartado de geología, se encuentra ampliamente distribuidas en toda la cuenca en posición aflorante o subaflorante, y es portadora del acuífero libre de la región.

Litológicamente está conformada por sedimentos loésicos, compuestos principalmente por arenas finas y arenas limo arcillosas cementadas por carbonato de calcio, presentando comunes zonas de entoscamiento que la tipifican. Dada la complejidad de los procesos sedimentarios que le dieron origen, son frecuentes las anisotropías hidrolíticas locales, dando lugar a una alternancia de niveles acuíferos-acuitardos (sistema multicapa), que desde el punto de vista hidrogeológico regional, se comportan

como un solo sistema de transmisión de agua más o menos homogéneo. De acuerdo a la información disponible, los espesores máximos de los sedimentos pampeanos en el ámbito del área de estudio alcanzarían los 200 metros (Carrica, 1998).

A los efectos del presente estudio, se denominará acuífero loésico al acuífero constituido por los sedimentos pampeanos, para diferenciarlo de otros niveles freáticos, alojados en sedimentos más modernos.

Las variaciones litológicas y geométricas locales del medio acuífero, y la insuficiente y dispersa información sobre ensayos hidráulicos en pozos de la zona (en todos los casos pozos incompletos), no permite establecer valores representativos de los parámetros hidráulicos del medio acuífero, siendo más adecuado considerar un rango de valores posibles.

Sala (1975), califica a los sedimentos pampeanos como un complejo "pobrementemente acuífero" o acuitardo, a estos limos extendidos en gran parte de la llanura bonaerense y según su caracterización, la permeabilidad no sobrepasaría los 0,5 m/d pero localmente, podrían alcanzar máximos del orden de 5 a 10 m/d (Carrica, 1998).

Como ya se mencionará en el apartado de Geología, en el subsuelo de la ciudad de Bahía Blanca sobre la margen derecha del Arroyo Napostá y hasta aproximadamente la cota de 10 m.s.n.m, por debajo de un suelo somero, existe un conjunto de sedimentos arenosos calcáreos cuya potencia puede alcanzar hasta los 10 metros y que corresponderían a la Formación Bahía Blanca (Holoceno), del mismo Fidalgo, 1983. En cualquier caso, estos sedimentos arenosos presentan características distintivas de los típicos sedimentos pampeanos anteriormente descriptos. Se trata de una alternancia de capas de arenas medianas a finas calcáreas, muchas veces sueltas y sin estratificación que alternan con capas finas de arenas gruesas y gravas con rodados angulosos de cuarcitas y restos de conchillas de moluscos (gastrópodos) continentales. El conjunto suele presentar buena permeabilidad, aunque localmente suele ser muy variable.

Muchas veces esta formación está rematada por una fina capa (no más de 0,3 m) de material calcáreo (tosca) o Calcrete II (según Folgueras et al, 2017) muy resistente, aunque también suelen encontrarse finos niveles arenas cementadas en profundidad. Las arenas fluviales con rodados de cuarcitas se adjudican a antiguas llanuras de inundación de los Arroyos Napostá Grande y Maldonado y poseen muy buena permeabilidad.

A pesar de la heterogeneidad litológica de la unidad, desde el punto de vista hidrogeológico, todo el conjunto se comporta como un acuífero somero de buena

permeabilidad, con caudales específicos variables entre 0,3 y 1 m³/h por metro de depresión. La profundidad del nivel freático en el área de estudio, es decir, en el subsuelo de Bahía Blanca, se ubica entre los 2 y 5 metros dependiendo de la estación del año y de la alternancia anual de los ciclos pluviométricos.

La Formación Agua Blanca de edad Pleistoceno Superior – Holoceno (De Francesco, 1992, equivalente a la Formación Luján de Fidalgo (1983), se encuentra estrictamente representada dentro de los valles más antiguos de la zona, en este caso, en las barrancas del Arroyo Napostá Grande al norte de Bahía Blanca. El miembro inferior se apoya en discordancia erosiva sobre los sedimentos pampeanos y lateralmente con los sedimentos de la Formación Bahía Blanca (Fig. 4.1.). En el tramo inferior del arroyo, que corresponde al área de estudio y donde el mismo pierde su carácter de encajonado, solo se distinguen relictos del miembro superior de esta formación de extensión muy limitada a las márgenes del cauce. Está compuesto en sedimentos areno-limosos a limosos de color castaño friables con tonalidades amarillentas y gris verdosas friables, con presencia de carbonato de calcio como finas capas, depositados en un ambiente fluvial de baja energía o de laguna. Las características hidrológicas intrínsecas de estos sedimentos, sumado a la casi ausencia de escurrimiento superficial dentro del valle, denotan una buena permeabilidad de los mismos, lo que permite definir a los valles como importantes áreas de recarga local del acuífero freático infrayacente (Carrica, 1998).

Hacia la costa y por debajo de la cota de 10 msnm aproximadamente, sobre los sedimentos pampeanos yace, en discordancia erosiva, un nivel arenoso marino, innominado, de edad pleistocena (Chaar *et al.*, 1992; Lafont, 2009). Este nivel está constituido por arenas de playa, a veces sueltas y limos arenosos subordinados, cementados por carbonato de calcio y se caracteriza por presentar abundantes restos de conchillas y un espesor máximo detectado de unos 10 metros. Hacia el norte, se acuña sobre los sedimentos pampeanos y hacia el sur continúa por debajo de la Formación Maldonado. Estos sedimentos poseen, en su conjunto, buena permeabilidad y alojan al acuífero freático del sector, el cual se encuentra a escasa profundidad (1 a 3 metros) con aguas de elevada salinidad del tipo cloruradas sódicas.

En el área costera, este nivel se halla cubierto por una secuencia, de hasta 15-20 metros de espesor, de arena mediana a fino gris oscura, a veces suelta, que pasa transicionalmente en los términos superiores, a limos arenosos y a arcillas limosas de origen marino. Estos corresponden a la ya descrita Formación Maldonado de edad Pleistoceno Superior-Holoceno, (Fidalgo, 1983), la que conjuntamente al nivel marino

antes descrito y a la porción superior de los sedimentos pampeanos contienen al acuífero libre costero.

La parte basal arenosa de la Formación Maldonado presenta buena permeabilidad, la cual tiende a decrecer hacia la superficie donde predominan los sedimentos más arcillosos. No obstante, todo el conjunto se comporta como un acuífero más o menos homogéneo con respuestas rápidas a los movimientos de agua verticales de infiltración, recarga y evapotranspiración por sobre el escurrimiento superficial y subterráneo. Los parámetros hidráulicos del acuífero costero alojado en la Formación Maldonado, obtenidos mediante ensayos de bombeo arrojaron transmisividades entre 51 y 62 m²/d y rendimientos específicos de 0,1 a 0,15. (Bonorino y Sala, 1983) para los primeros 15 metros saturados. Carrica y Lexow (2006) citan valores de permeabilidad entre 1,5 m/d y 0,1 m/d y Sy de entre 0,1 a 0,04, para los términos inferiores y superiores de textura más fina de la formación respectivamente.

Las restantes formaciones que completan el esquema hidroestratigráfico, son de distribución escasa y saltuaria en el ámbito de la cuenca inferior, y, por lo tanto, hidrogeológicamente poco significativas. -

4.2. Acuífero Freático

4.2.1. Antecedentes de Estudio

No existen antecedentes que describan detalladamente la geometría del acuífero freático en la zona de estudios. En un marco global Carrica (1998), estudió la hidrogeología de la cuenca del Arroyo Napostá Grande y sirviendo como base para la realización de la presente tesis.

Cabe mencionarse que otros autores, ya mencionados en el apartado de antecedentes estudiaron el acuífero freático de la zona, particularmente sobre la costa y existen en el Departamento de Saneamiento Ambiental Municipal antecedentes de informes realizados en el marco de remediaciones por contaminación de hidrocarburos en el acuífero freática de Bahía Blanca en varios sitios, donde se analiza parte del acuífero afectado, informes que permitieron de algún modo plantear la situación de la historia previa al desarrollo de este trabajo.-

4.2.2- Dinámica del Acuífero Freático en la Zona de Estudio

Dentro del ejido de la ciudad de Bahía Blanca, el nivel freático se encuentra a escasa profundidad o aflorando, como suele pasar en la zona costera, y a no más de 4 a 5

metros de profundidad en la zona céntrica. La red de flujo subterránea ha sido notoriamente modificada por las distintas obras de ingeniería realizadas, entre ellas, el entubamiento del arroyo y la canalización del Maldonado. Los censos hidrogeológicos realizados para el presente estudio (Fig. 4.2.2.a), se puede observar un manto freático de tendencia radial divergente, que presenta mayores gradientes hacia el arroyo en aquellas porciones que este se presenta sin entubar. La orientación general del flujo es en dirección al estuario, punto natural de descarga, exceptuando en las márgenes del Arroyo Napostá, donde el acuífero descarga aportando al caudal básico del arroyo.

En el área de estudio se identifica un primer sector, que lo constituye el acuífero relacionado hidráulicamente con el Arroyo Napostá (Fig. 4.2.2.a), con una relación hidráulica netamente efluente sobre su margen izquierda (fuera del área de estudio) e influente o neutro de la margen derecha, en el tramo superior que abarca desde el Parque de Mayo, hasta el entubado del mismo.

Un segundo sector es la zona central donde el manto marca una tendencia radial divergente con isopiezas moderadamente equidistantes siguen en general la superficie del terreno. En la zona céntrica existen algunas variaciones menores en la configuración de la superficie freática debido al uso bombeos domésticos o bombas de achique, en sitios que poseen sótanos profundos y requieren deprimir el nivel freático, generándose de esta manera, sitios localizados con depresiones producto de conos de bombeo. Por otro lado, existe recarga inducida por pérdidas en las redes de agua potable, cloacas y hasta desagües pluviales, difíciles de cuantificar. Hacia el oeste, el sentido del flujo de la parte superior del acuífero freático, a lo largo de todo el Canal Maldonado es paralelo al mismo, ya que el canal se encuentra impermeabilizado y la profundidad de su piso es superior a la posición del nivel freático del sector. Los gradientes hidráulicos de este sector son extremadamente bajos, del uno por mil y aún menores (nótese la separación de las isopiezas 10 y 5 metros en el mapa de la Fig. 4.2.2.a).

El área próxima a la descarga del acuífero, en las inmediaciones de Ingeniero White, la superficie freática se encuentra muy cercana a la superficie y en algunas épocas del año aflorante. La morfología de la misma ha sido notablemente modificada por acciones antrópicas (obras de relleno, refulados, desagües, etc.), observándose una serie de formas radiales divergentes (sectores de recarga local) y convergentes coincidentes con bajos topográficos que actúan como sectores de descarga local o bombeos localizados. En las zonas de descarga naturales, es común el afloramiento de la freática durante gran parte de los meses de otoño e invierno.

Durante el verano el poder de la evaporación y evapotranspiración deprime la superficie

freática, dejando en la superficie una costra de sales en la superficie del suelo claramente visible en el campo y en imágenes satelitales. Este fenómeno fue el que le dio origen al nombre de Bahía Blanca.

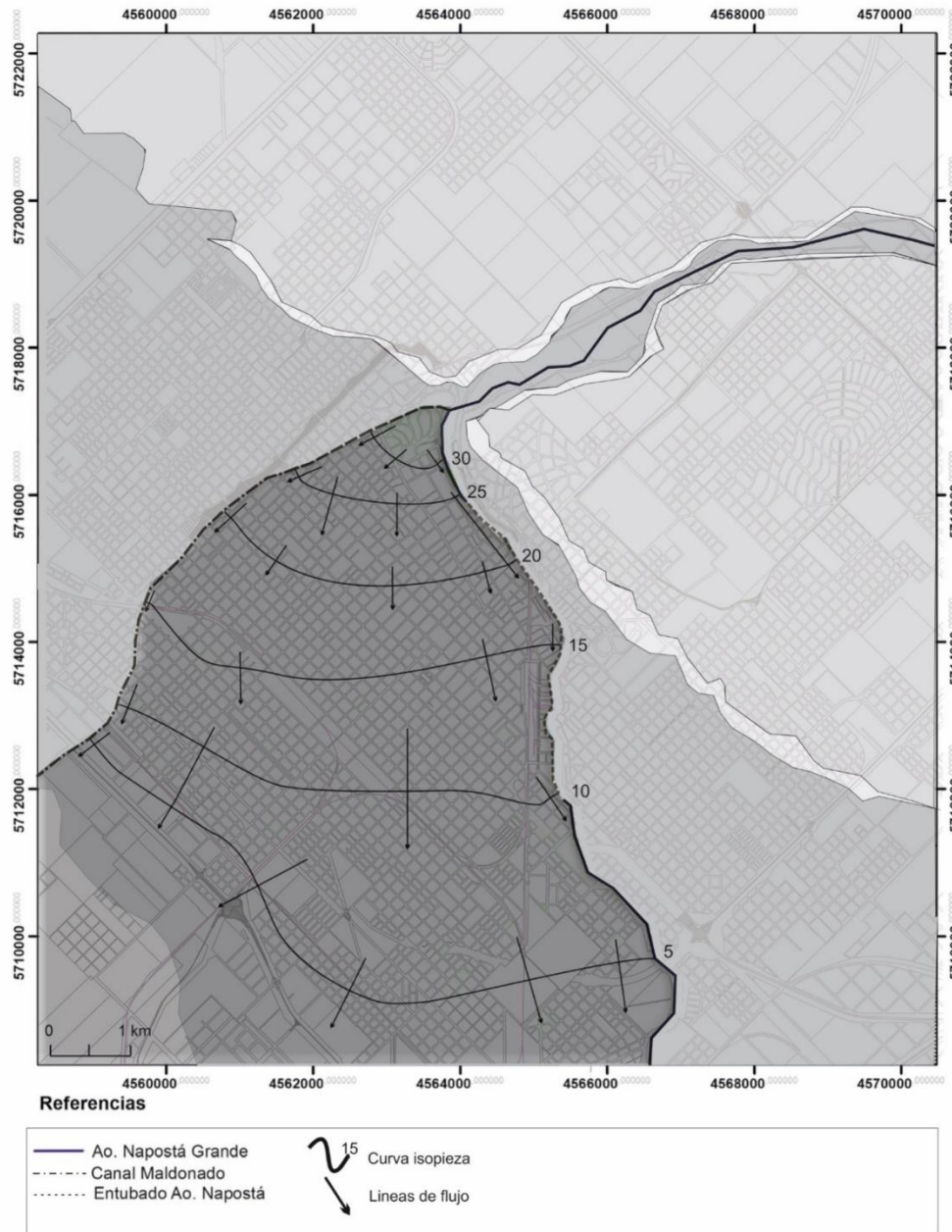


Figura. 4.2.2.a. Mapa esquemático de red de flujo subterráneo para el acuífero libre en el área de estudio

Este sector, que por escala no puede visualizarse en la figura 4.2.2.a. abarca la zona del polo industrial, ubicado al SE de la zona de estudio (Fig. 4.2.2.b) donde Carrica et. al (2003) destaca la presencia de formas radiales positivas (domos), en las zonas correspondientes a los predios de las plantas PBB Polisor, Indupa, Mega y Profertil, por ascenso del nivel freático. Estos domos indicarían un incremento de la recarga en los

sectores con relleno artificial debido a la mayor permeabilidad de estos materiales, a las tareas de riego y como puede observarse en la planta de CVM Indupa, una depresión de la capa freática como consecuencia de las tareas de bombeo que se realizan para la remediación del acuífero contaminado. Carrica et. al (2003) destaca también la presencia de un sistema de drenaje artificial, en el cual las zanjas presentan un comportamiento efluente, drenando consecuentemente las aguas subterráneas hacia el estuario.

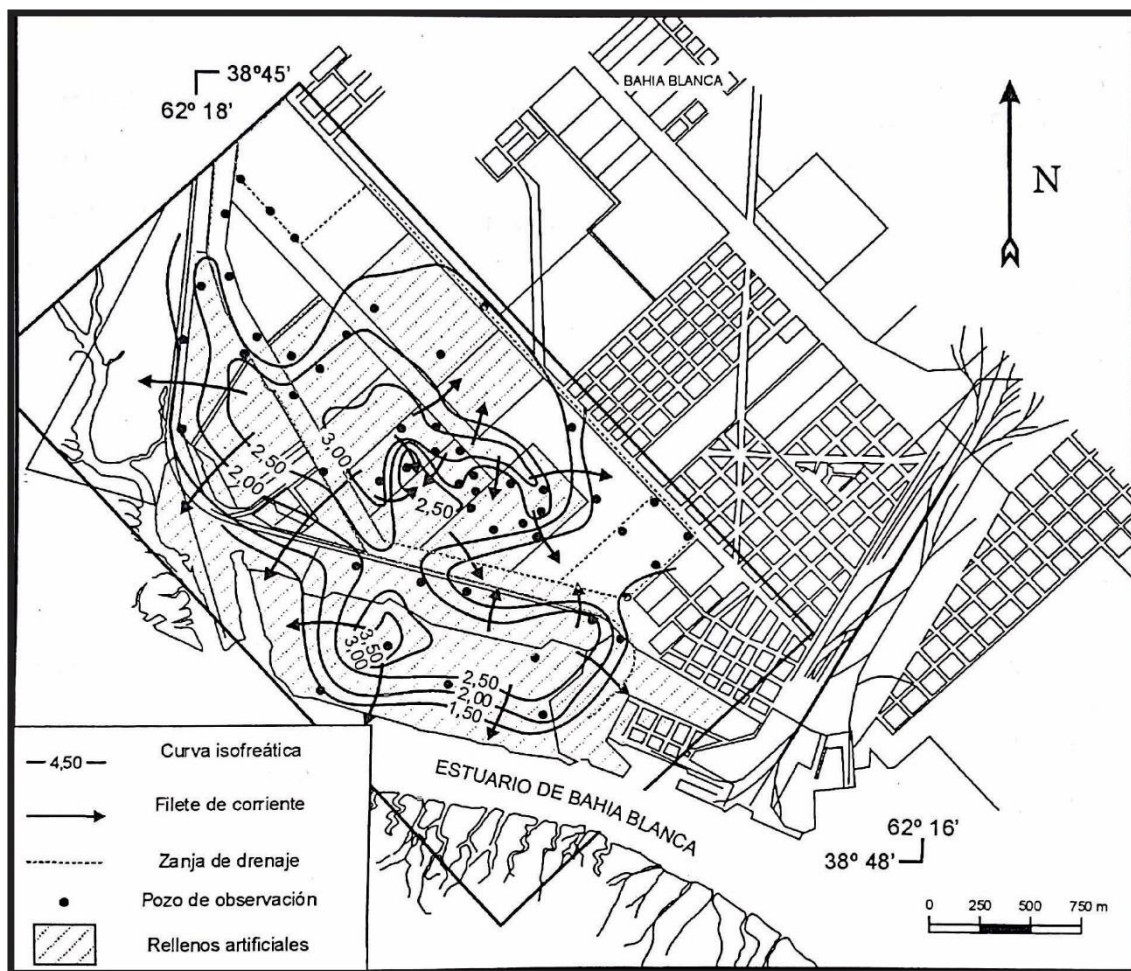


Figura. 4.2.2.b. Mapa esquemático de red de flujo subterráneo para el área industrial modificado de Carrica et. al (2003)

4.3. Hidroquímica

Durante los muestreos, se recolectaron muestras de agua en cada uno de los puntos censados, determinándose *in situ*: la conductividad eléctrica, pH y la temperatura. Esta información hidroquímica preliminar de las aguas muestreadas, permitió elaborar las primeras hipótesis de trabajo y así conjeturar los primeros análisis e interpretaciones,

en cuanto a la calidad del acuífero, previo a cualquier evento de contaminación que requiera calcular niveles de limpieza.

La información hidroquímica del agua contenida en el acuífero freática se obtuvo a partir del muestreo de 14 pozos de monitoreo ubicados en distintas estaciones de servicio. Se utilizaron también datos de pozos someros obtenidos en al área industrial de Bahía Blanca, datos de monitoreo de aguas subterránea en la cuenca media, análisis fisicoquímicos del arroyo en la cuenca media e inferior y análisis de agua de lluvia realizados por Carrica (1998).

El análisis del gráfico evidencia una evolución en la composición química de las aguas desde bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas calco-sódicas a cloruradas y cloruradas-sulfatadas sódicas conforme aumenta la salinidad.

El área cercana a la desembocadura del arroyo presenta una zona con aguas de muy elevada salinidad (Muestra 11, White Industrial, Anexo 3) correspondientes al área de descarga del acuífero costero. Estas aguas son salmueras del tipo cloruradas sódicas y presentan muy altas conductividades eléctricas, de hasta 100.000 uS/cm, valores que duplican a los del agua del estuario. Su quimismo está relacionado con la escasa profundidad de la freática, bajos gradientes hidráulicos y a una menor permeabilidad de los sedimentos, lo cual conforma un sistema donde los movimientos verticales de evapotranspiración e infiltración dominan sobre el escurrimiento superficial y subterráneo (Sala *et al.*, 1985).

En la Figura 4.3. se han representado en el diagrama de Piper, los análisis químicos de todos los muestreos analizados.

composición bicarbonatadas sódicas (Fig.4.3).

El incremento de salinidad en el acuífero, continúa en el sentido de la circulación del flujo subterráneo, donde la lenta dinámica subterránea en el sentido de la circulación, sumado a la evaporación directa de la capa freática debido al escaso espesor no saturado, produce un fuerte incremento de la salinidad con aguas cloruradas sódicas. Esta es la razón por la que las restantes muestras analizadas del acuífero, y cercanas al estuario, cambian su composición a salmueras cloruradas sódicas (Fig. 4.3).

El Arroyo Napostá no muestra cambios hidroquímicos de consideración a lo largo del curso. Dado su carácter efluente, se presume su recarga en sales a medida que se acerca a su desembocadura en el estuario de Bahía Blanca, ya que en su último tramo atraviesa sedimentos marinos depositados por la ingesión marina del Holoceno con altos tenores de cloruro de sodio en su composición lo que le confiere las características salobres al agua.

4.5. Balance Hidrológico Modular

El balance hidrológico de un área o región, constituye un medio simple e idóneo para la comprensión de su funcionamiento hidrológico global. La implementación del balance de manera modular para un largo período de tiempo, permite suponer que los ingresos de agua al sistema equilibrarán aproximadamente a los egresos, por lo que la variación de almacenamiento de agua tenderá a cero. Aunque la aplicación de este precepto se dificulta de manera significativa en las zonas urbanas, ya que la permanente modificación humana del medio físico torna compleja la comprensión del funcionamiento hidrológico.

Para cortos períodos de tiempo, los ingresos y las salidas no son necesariamente iguales, ya que son muchas las variables intervinientes, cambian temporalmente de un sector a otro de la urbe producto de acciones antrópicas que provocan alteraciones en los ingresos y egresos de agua al sistema.

La impermeabilización del suelo a través de la pavimentación y de las construcciones, lleva a una reducción de la infiltración y aceleración de la escorrentía. Por otra parte, si bien las curvas de nivel reflejan la topografía y por lo tanto la dirección del flujo; las pendientes de los pavimentos, los conductos subterráneos, los espacios verdes y las nuevas urbanizaciones influyen sobre la dirección del escurrimiento. De esta manera, es necesario considerar tanto los aspectos naturales como artificiales, en la realización de un balance hidrológico, para cada sector en particular que se quiera investigar.

A los elementos principales de ingreso para la zona saturada, como lo son la recarga por precipitaciones, deben añadirse las pérdidas del sistema de abastecimiento del agua potable, y de la red cloacal y pozos sépticos.

Como egresos, debería considerarse la intercepción vegetal (modificada por los cambios en el arbolado urbano), evaporación directa desde suelos encharcados y desde la capa freática, particularmente en la zona costera, evapotranspiración real desde suelos vegetales. La impermeabilización de los suelos comprende la mayor parte de la zona de estudio, modifica los procesos de transferencia de vapor a la atmósfera y los ingresos de la precipitación a través de la infiltración. La mayor parte de la precipitación se convierte en escurrimiento directo, que es derivado por los desagües pluviales al Arroyo Napostá en la sección noreste de la zona de estudio, y en la zona sur oeste al Canal Maldonado. Hay sitios dentro del área, especialmente, sectores no pavimentados que se comportan como zonas anegables, produciendo encharcamientos y su salida al sistema es solo por evaporación.

El escurrimiento pluvial contribuiría al escurrimiento fluvial del Arroyo Napostá y del Canal Maldonado, aunque los sistemas pluviales registran serias pérdidas en sus ductos y pueden recargar al acuífero freático, lo que genera una complejidad adicional al modelo conceptual cualitativo.

Como un elemento de salida menor, pero que corresponde nombrar a los fines del presente estudio, están las bombas depresoras del nivel freático en las cocheras subterráneas de la zona céntrica, las perforaciones domiciliarias someras no declaradas, perforaciones municipales para riego de parques y plazas, y aún en menor escala, los equipos de remediación del acuífero freático.

Por lo expuesto, el balance hidrológico para la zona de estudio solo puede establecerse de manera conceptual, identificándose a grandes rasgos las entradas y salidas de agua al sistema acuífero, debiéndose plantear el mismo para cada en particular que se quiera estudiar de acuerdo al sector de la ciudad involucrado.

4.6 Recarga y descargas del Sistema Acuífero Freático

La información hidrológica hasta aquí analizada, si bien podría considerársela escasa, permite definir conceptualmente y cualitativamente la recarga y las descargas del sistema acuífero freático de la cuenca inferior.

La recarga del acuífero, comprende principalmente la recarga natural por los excesos de agua en el suelo a partir de la precipitación en zonas con suelos, aportes del arroyo

Napostá influente sobre su margen derecha desde el Parque de Mayo hasta la entrada al entubado (unos 1000 metros), recarga artificial por las pérdidas del sistema de saneamiento (cloacales y pluviales) y las de la red de agua potable (importada). Las salidas de agua del acuífero están dadas por: la evaporación directa (Ev) desde la capa freática cuando ésta se encuentra a escasa profundidad, la evapotranspiración (ETR); la descarga subterránea al curso del A° Napostá Grande cuantificada como caudal básico (Qb) en los sectores en donde el arroyo se comporta como efluente, particularmente desde la salida del entubado hasta su desembocadura, la alimentación al flujo subterráneo regional intermedio y profundo expresado como Es(r); el escurrimiento subterráneo local del acuífero freático costero que descarga en el estuario de Bahía Blanca Es(l). Se añade las variaciones de almacenamiento subterráneo (ΔS_s) a través del tiempo que se manifiestan por las oscilaciones, a veces notables, del nivel freático.

En términos del balance hidrológico global del acuífero freático también puede expresarse a la recarga como la sumatoria de las descargas del acuífero de la siguiente manera:

$$R = Ev + ETR + Qb + Es(r) + Es(l) \pm \Delta S_s$$

De los términos considerados, la principal salida del sistema es, sin duda, la descarga Evaporación directa desde la capa freática en la zona costera y la ETR dentro de toda el área, siendo mucho menor el escurrimiento subterráneo al estuario de Bahía Blanca (menos del 3% del total del flujo subterráneo) y la descarga subterránea al Arroyo Napostá, la cual se manifiesta como caudal básico (Qb) del arroyo. Conceptualmente, la descarga de agua subterránea al arroyo queda expuesta, en el mapa de flujo subterráneo de la capa freática analizado en el apartado 4.2. A este caudal (Qb) debe sumársele el agua importada procedente del rechazo del lavado de filtros de la Planta Potabilizadora Patagonia de ABSA, que actúa como un afluente permanente al entubado del Arroyo Napostá.

Como se mencionó, la evaporación y evapotranspiración directa desde la capa freática, adquieren importancia cuando el nivel freático se ubica a escasa profundidad. Esta situación es frecuente en general, a sectores localizados dentro de los valles y al sector costero, próximo a la desembocadura del arroyo.

El denominado acuífero costero del área de Ingeniero White, se caracteriza por tener su nivel freático en posición aflorante o subaflorante, según la estación del año, baja permeabilidad de los sedimentos y muy escaso gradiente hidráulico. Bonorino y Sala

(1983) han cuantificado el régimen subterráneo de este sector costero, concluyendo que las pérdidas netas por evaporación directa desde la capa y evapotranspiración alcanzarían al 97% del caudal total agotado, mientras que el escurrimiento subterráneo local (flujo lateral) hacia la ría conformaría el 3% restante.

El régimen pluviométrico regula el sistema hidráulico antes descrito. Durante las estaciones lluviosas son frecuentes los anegamientos en el sector costero por ascenso y afloramiento del nivel freático y también por el anegamiento superficial de las zonas bajas. Claramente el peor escenario se genera cuando se producen copiosas lluvias dentro de una estación húmeda o lluviosa en un año particularmente lluvioso que conforma una serie de años lluviosos o ciclo húmedo (Carrica, 1998). En ese caso no solo se producen grandes anegamientos en la zona costera, sino que hay ascensos importantes del nivel freático e inundaciones en sótanos y cocheras subterráneas céntricas, como ha ocurrido en la década de 1980.

En el otro extremo, cuando se suceden estaciones secas en años pluviométricamente secos que ocurre en un ciclo de años secos como entre 2005-2010, los niveles freáticos descienden en toda la zona céntrica, el Napostá Grande baja su Q_b hasta 0,1 m/s y la zona costera con terreno natural se convierte en un salitral con una costra salina en superficie claramente visible.

Estos dos ejemplos extremos, constituyen los límites de un modelo conceptual de funcionamiento hidrológico del sistema, en donde prevalecen las situaciones intermedias.

CAPÍTULO 5. DETECCIÓN DE PLUMAS DE CONTAMINACIÓN DE HIDROCARBUROS A TRAVÉS DEL USO DE TOMOGRAFÍA DE ELECTRICA MULTIELECTRODO

La investigación geofísica se ha convertido en un instrumento de monitoreo ambiental para identificar posibles fugas en sistemas SASH, fundamentalmente porque es un método que prevé una rápida adquisición de datos y es una técnica no destructiva.

Las investigaciones realizadas para la aplicación de tomografía eléctrica con el fin de localizar plumas de contaminación han sido abordadas por muchos autores, entre los que se pueden citar Sauck et al. (1998); Atekwana et al. (2000); Sainato et al. (2009); Rosales Aranda (2013), entre otros.

La tomografía eléctrica multielectrodo (TEM) consiste en un perfilado de resistividad multihorizontal del medio subsuperficial (Barker y Moore, 1998) y es un método por el cual se introduce corriente al suelo a partir de dos electrodos en el terreno conectados a un amperímetro generando un campo eléctrico de corriente continua y se mide la diferencia de potencial en otros dos electrodos conectados a un voltímetro.

Se puede expresar a la resistividad eléctrica como:

$$K. (\Delta v/I) \quad (5.1)$$

Donde Δv el voltaje medido con los electrodos de potencial, I la intensidad de corriente que se inyecta en el terreno a través de los electrodos de corriente y K un factor geométrico que depende de la geometría del dispositivo empleado.

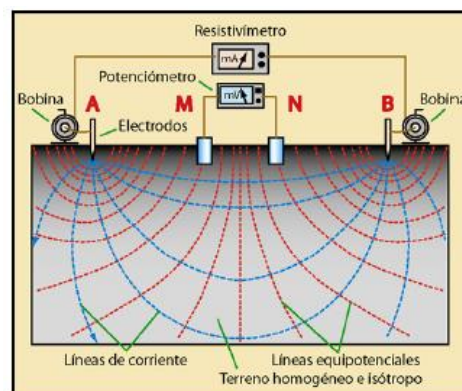


Figura 5.a Principios de funcionamiento de un equipo de tomografía eléctrica (Martínez Pagan, 2006)

Existen varias configuraciones eléctricas o dispositivos empleados para la realización de tomografías, aunque para estudios relacionados con la hidrogeología ambiental y

contaminación de suelos, las configuraciones Wenner, Schlumberger (y combinación de ambas) son las más utilizadas, presentando cada una de ellas ventajas y desventajas en términos de resolución y logística, si bien todas las configuraciones llevan el mismo objeto: una media ponderada del valor de la resistividad del subsuelo hasta una profundidad máxima relacionada con la longitud del dispositivo (Martínez Pagán, 2006).

Según Aranda (2013) para la correcta elección de la configuración debe considerarse la sensibilidad de esta ante variaciones verticales y horizontales, la profundidad de investigación, la cobertura horizontal y la fuerza de la señal. La configuración Wenner es la más sensible a los cambios verticales que a los horizontales de la resistividad eléctrica. Esto implica que tenga buena resolución vertical. La configuración Wenner tienen la profundidad media de investigación más baja que el resto de las configuraciones y la señal es inversamente proporcional al factor geométrico K, siendo este el más pequeño en comparación con otras configuraciones convencionales, y por lo tanto, el dispositivo posee la señal más fuerte. Dicha característica es útil en terrenos con fuerte ruido de fondo (Aranda, 2013).

La configuración Wenner-Schlumberger es un híbrido entre la configuración precedentemente mencionado y la Schlumberger (Pazdirek y Blaja, 1996) y es utilizada para la tomografía eléctrica superficial. Esta configuración, es en una menor medida, sensible a variaciones verticales y horizontales, con una profundidad de investigación un 10 % superior a la del dispositivo Wenner y una fuerza de la señal, inferior a este. La distribución de los electrodos en la configuración Wenner-Schlumberger permite, con igual número de electrodos, efectuar un número superior de medidas (Martínez Pagan 2006).

Otra configuración muy utilizada, es el dipolo-dipolo. Dicha configuración presenta una resolución vertical pobre y el dispositivo es especialmente sensible a variaciones laterales profundas de resistividad eléctrica, lo cual es ideal para detección de estructuras verticales tales como muros, cavidades, etc. Aunque este dispositivo es relativamente pobre en estructuras horizontales tales como capas sedimentarias. La densidad de puntos de medida es superior a la del dispositivo Wenner. Aunque la fuerza de la señal suele ser débil, por lo que se necesita poco ruido de fondo para tener poco margen de error en la utilización de este método.

Los hidrocarburos poseen una resistividad mayor a la del agua, por lo tanto una pluma de hidrocarburos puede ser detectada como una anomalía resistiva a través de uno de estos dispositivos, es por ello que se eligió la configuración Wenner-Schlumberger, dado que el método era el que más se ajustaba a la prospección que pretendía hacerse.

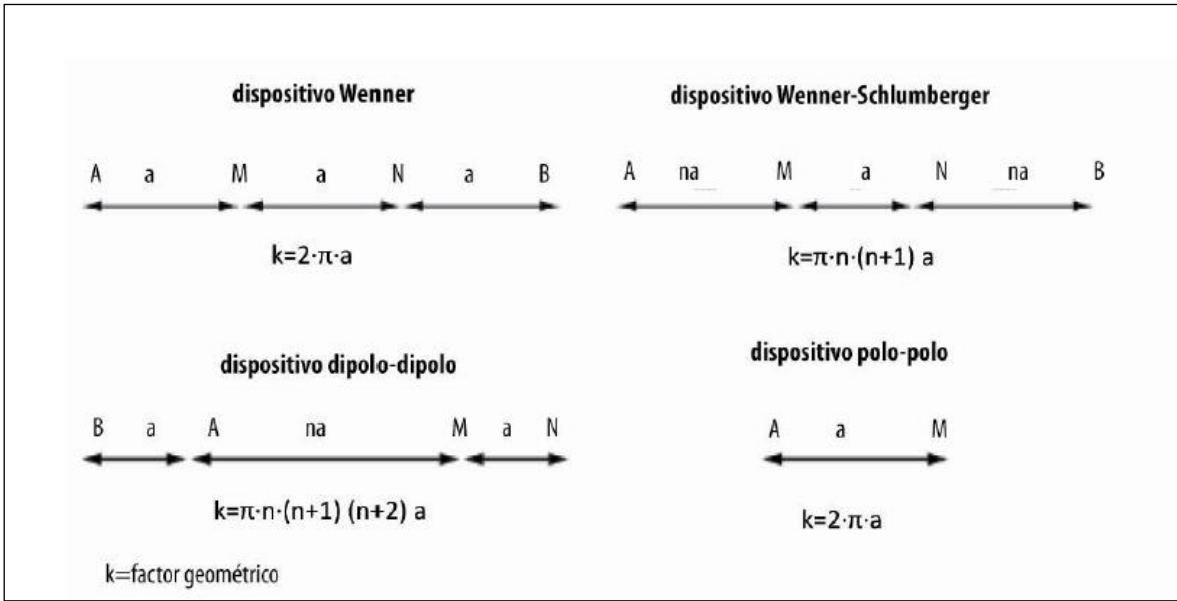


Figura 5.b Dispositivos Utilizados (Zhu *et.al.*, 2009)

Para representar las medidas tomadas mediante tomografía eléctrica 2D, se usa una pseudosección eléctrica de resistividades aparentes. La pseudosección da una idea aproximada de la distribución de la resistividad en el suelo (Aranda, 2013).

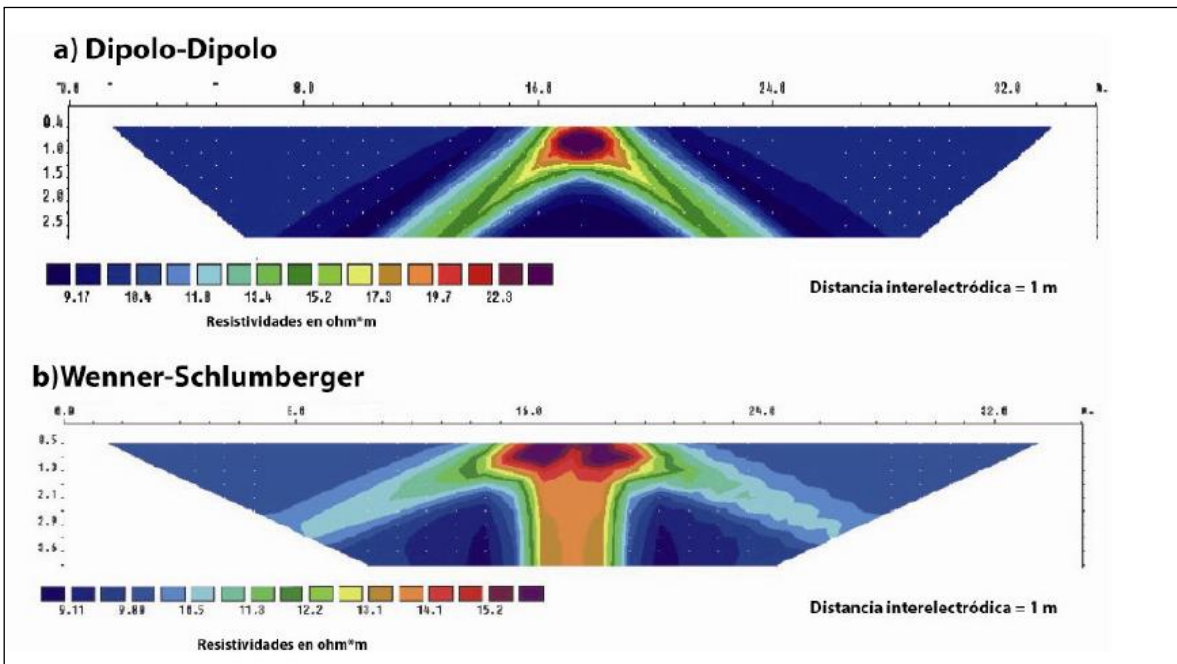


Figura 5.c Secciones eléctricas de resistividad aparente resultado de la TE 2D con diferentes dispositivos en un bloque rectangular a) dispositivo dipolo-dipolo, b) dispositivo Wenner-Schlumberger. (de López *et.al.* 2004, en Aranda 2013)

5.1 Resistividad de los Distintos Materiales

La resistividad eléctrica es un parámetro que varía en función de las características del terreno, por lo tanto, la diferencia de potencial medida por la tomografía dependerá de la resistividad del material presente en el subsuelo, entre otros factores. Según Ward (1990) los principales factores que influyen en la resistividad eléctrica medida en el subsuelo son: el tipo de roca, porosidad el grado de saturación de fluidos, salinidad del fluido, procesos geológicos y geoquímicos que afectan a los materiales, presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico.

La relación entre tipo de material, procesos químicos que interactúan con él y las características del fluido hospedado en el subsuelo hace posible la utilización de la tomografía eléctrica en focos de contaminación por hidrocarburos.

La Figura 5.1.a. muestra los rangos típicos de valores de resistividad para varios materiales y fluidos.

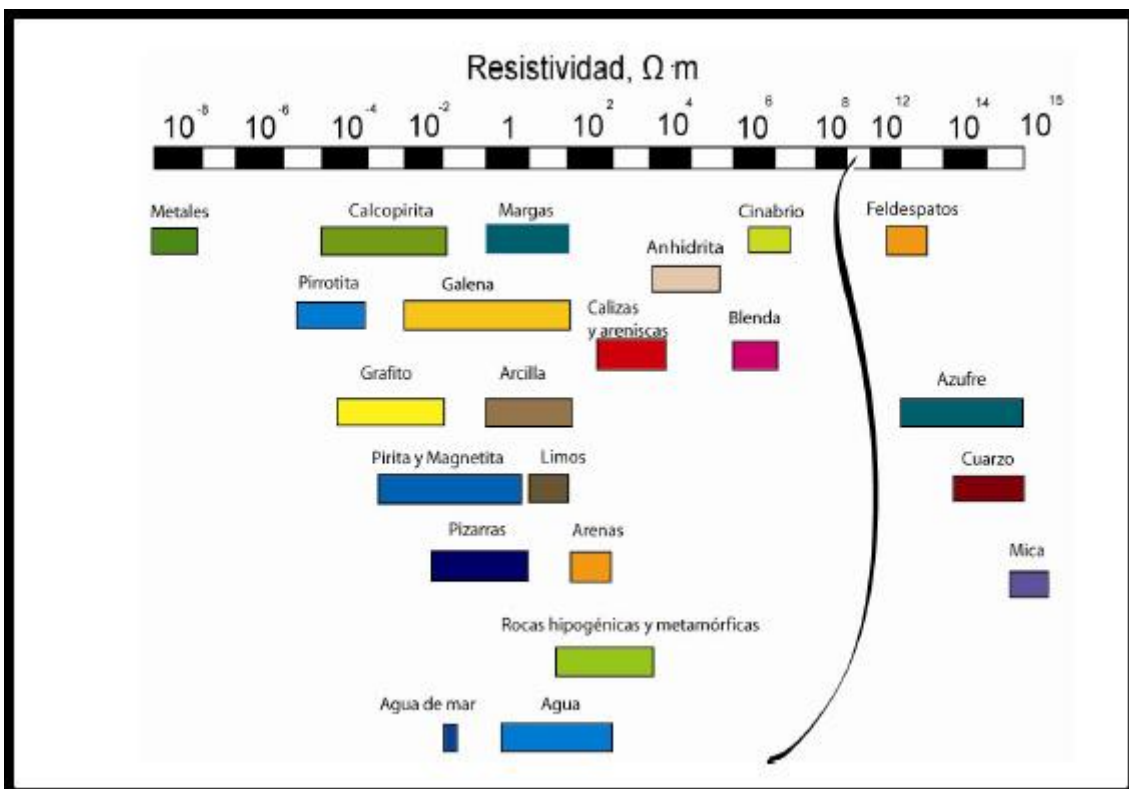


Figura 5.1.a Resistividad de diferentes rocas, sedimentos y fluidos (Orellana, 1982)

Las rocas sedimentarias al ser porosas, son potencialmente portadoras de agua, lo que hace disminuir los valores de resistividad. En suelos arcillosos las resistividades obtenidas son menores que en suelos arenosos. La resistividad aumenta si los suelos

arenosos están saturados en agua dulce. Los hidrocarburos sin degradar son altamente resistivos al paso de la corriente eléctrica (valores superiores a $5000 \Omega \text{ m}$), tendencia que va decreciendo a medida que el hidrocarburo se va degradando.

5.2 Aplicación de tomografía eléctrica multielectrodo en uno de los sitios contaminados como elemento de detección indirecta de hidrocarburos en fase libre y disuelta

Se utilizó el método de tomografía eléctrica en el emplazamiento denominado **Alem 1** (Punto 4; mapa 5.4.2., Anexo IV).

Con la finalidad de tener mayor certidumbre en los resultados obtenidos a partir de las tomografías y tener elementos de contraste y comparación, previo a la realización de las mismas, se realizó el estudio textural de los detritos de perforación colectados durante las perforaciones realizadas en el sector y descritos en capítulo 4.2.3. También se realizaron medidas piezométricas en todos los pozos para tener un mapa de detallado de la red de flujo subterráneo del acuífero libre en el sector.

Los perfiles TEM fueron dispuestos en una cuadrícula irregular, con cuatro perfiles paralelos a la calle Alsina (perfiles 3 a 6), y dos paralelos a la calle Dorrego (perfiles 1 y 2) (Figura 5.2.a). El espaciamiento en los perfiles 3 a 4 fue de 21 m y, en los perfiles 5 a 6 de 33 m, mientras que entre los perfiles 1 y 2 fue de 58 m. Las longitudes de los perfiles fueron diferentes: 80 m (perfil 6), y 135 m (perfil 2), 80 m (perfil 6) y 135 m (perfil 2). La figura 5.2.1 muestra la localización de los mismos.

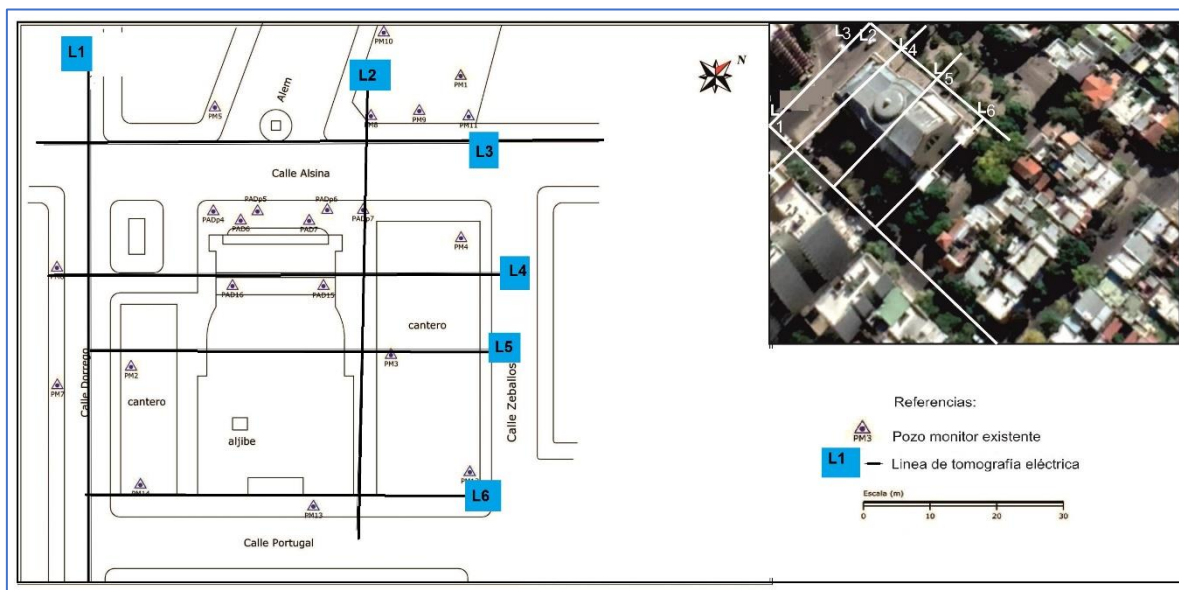


Figura 5.2.a Líneas de Tomografía Eléctrica Multielectrodo Realizadas

Las secciones eléctricas obtenidas durante el procesado de datos de tomografía eléctrica correspondiente a los perfiles 1 a 6 se presentan a continuación. Cabe destacar que en ningún caso el error absoluto en las mediciones supero el 7 %.

5.2.1 Línea L1

En esta línea (Fig. 5.2.1.a) los datos obtenidos podrían ser asociados con sedimentos finos con tenores subordinados arenas y arenas gruesas. Junto con L3 fueron los únicos sondeos que detectaron valores anómalos concordantes con hidrocarburos en fase libre no acuosa (mayores a 5000 Ωm). Los sedimentos presentes pueden ser correlacionados con los detritos de perforación descritos PM3 (descrito en capítulo 4.2.3), ubicado a los 47 metros del inicio de la transecta L1 y que está constituido por una columna que posee horizontes de sedimentos arcillosos a arenosos finos que gradan hacia el techo del perfil a arenosos. El pozo PM3 contendría gran parte de las litologías atravesadas por la sección L.

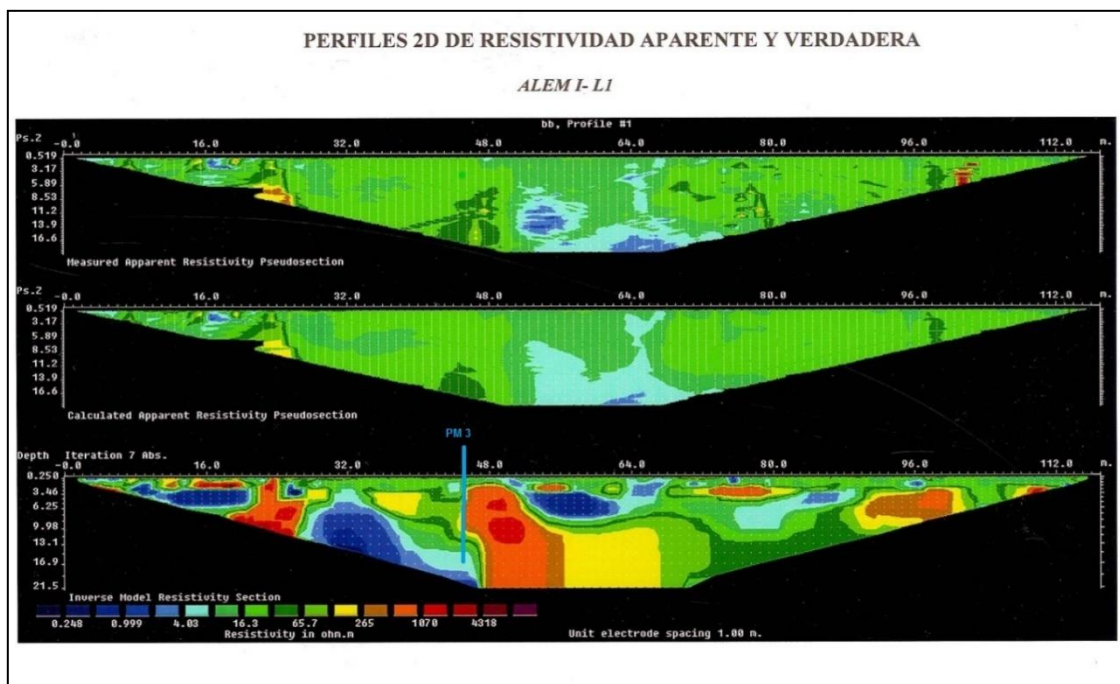


Figura 5.2.1.a Línea L1. Perfil de Resistividad Aparente y Verdadera

Por los valores obtenidos y la disposición de los sedimentos en la transecta L1, podrían interpretarse tres secciones con granulometrías gruesas bien diferenciadas con el entorno (20, 48 y 96 metros de la sección) donde sedimentos gruesos tendrían una configuración geométrica acorde a un paleocauce (Figura 5.2.1.b), gradando rápidamente en sentido horizontal a sedimentos más finos. La dirección de estos paleocauces sería perpendicular al corte realizado, teniendo una orientación NNE-SSW.

Valores asociados a hidrocarburos en fase libre fueron detectados en las zonas donde se presentarían los sedimentos más gruesos, aunque principalmente en el primer paleocauce descrito y en menor medida en el segundo. No se registraron valores asociados a hidrocarburos en el tercer cuerpo de arena interpretado. El nivel freático se registró a 2 metros de profundidad, sin grandes desniveles, tendiendo a ser planar.

Teniendo en cuenta los valores de densidad aparente obtenidos, se confeccionó el corte esquemático interpretado (Figura 5.2.1.2.).

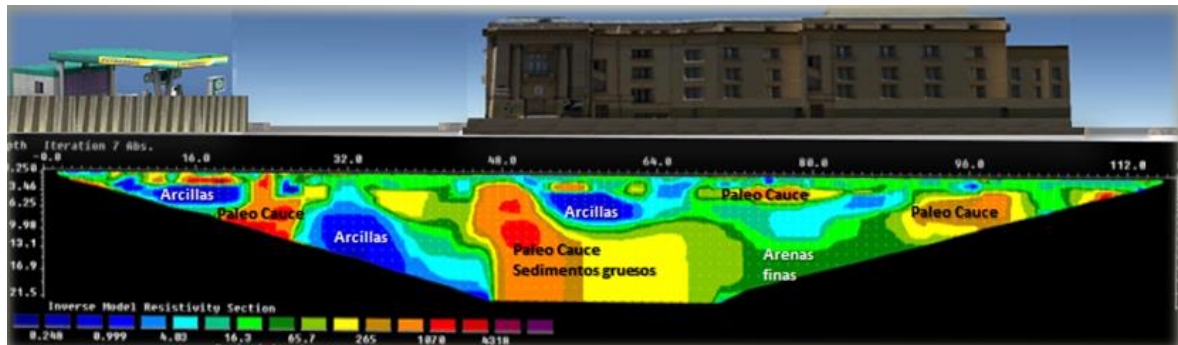


Figura 5.2.1.b. Interpretación Litológica y Ambiental de Línea 1

5.2.2. Línea 2

Este perfil realizado en dirección paralela a la línea L1, (Figura 5.2.2.a) manifiesta resistividades propias de sedimentos limos arcillosos con arenas finas y medias subordinadas. No hay valores de resistividad que indiquen presencia de hidrocarburos en fase libre no acuosa o de manera disuelta en la freática. Los sedimentos inferidos a partir de la TE podrían correlacionarse con el PM4 (Figura 5.2.a y descrito en capítulo 4.2.3) el cual en su columna posee arenas en su parte inferior que gradan a limos en su parte superior

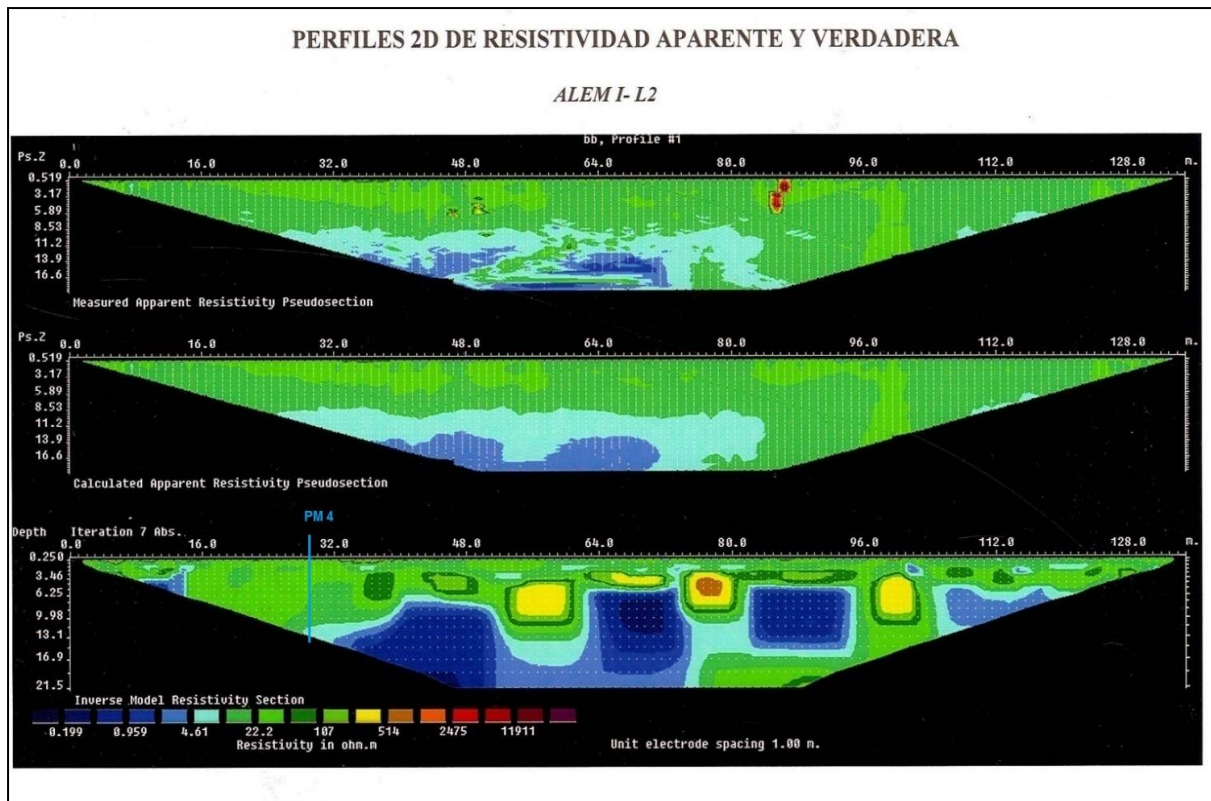


Figura 5.2.2.a. Línea L2 de Resistividad Aparente y Verdadera

Se presentan aquí también, tres cuerpos cóncavos arenosos a 50, 60 y 100 metros que se interdigitan en sus bordes con sedimentos de granulometría menor (limos y arenas finas). Estos cuerpos podrían ser la continuidad de los paleocauces descritos en el L1, ya que su posición relativa coincide. En profundidad se observa presencia de arcillas. El nivel freático fue detectado a aproximadamente 2 metros bajo línea de sondeo en toda la transecta.

Teniendo en cuenta los valores de densidad aparente obtenidos, se confeccionó el corte esquemático interpretado (Figura 5.2.2.b.).

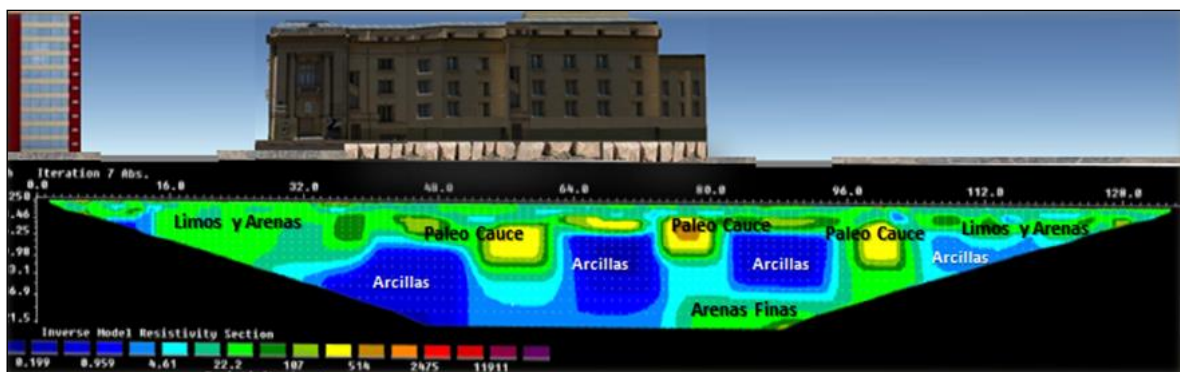


Figura 5.2.2.b. Interpretación Litológica y Ambiental de Línea 2

5.2.3. Línea 3

En esta línea perpendicular a L1 y L2 (Figura 5.2.3.a), se puede observar la presencia de niveles limosos a arenosos finos en gran parte de la transecta. En la zona central se observan resistividades que se corresponderían con arenas medias (300-700 Ωm), las cuales gradan lateralmente a arenas finas y limos. Por la disposición de los sedimentos, su ubicación y morfología se podría inferir un paleocauce que se correlaciona con el descrito para las líneas L1 y L2.

En el extremo izquierdo del perfil y en el sector central, se detectaron dos zonas con muy altos valores de resistividad eléctrica (mayores a 4000 Ωm y hasta 10000 Ωm), que podría corresponderse con acumulación de Fase libre no acuosa. Ello estaría relacionado, con el contenido de FLNA de los pozos PAD 13 y PAD 8 analizados en los apartados 5.5.1.1., en relación a la caracterización cromatográfica de la FLNA, y en el apartado 5.6., a su contenido de isoprenoides como biomarcadores. Ambos pozos se encuentran próximos a la línea de la tomografía y para el día de la ejecución de las tomografías registraban un espesor aparente de FLNA de 15 cm. El segundo valor anómalo coincide con la ubicación relativa del Padp6 (analizado también en los apartados previos de caracterización cromatográfica de la FLNA y biomarcadores) que presentaba dos centímetros de fase degradada.

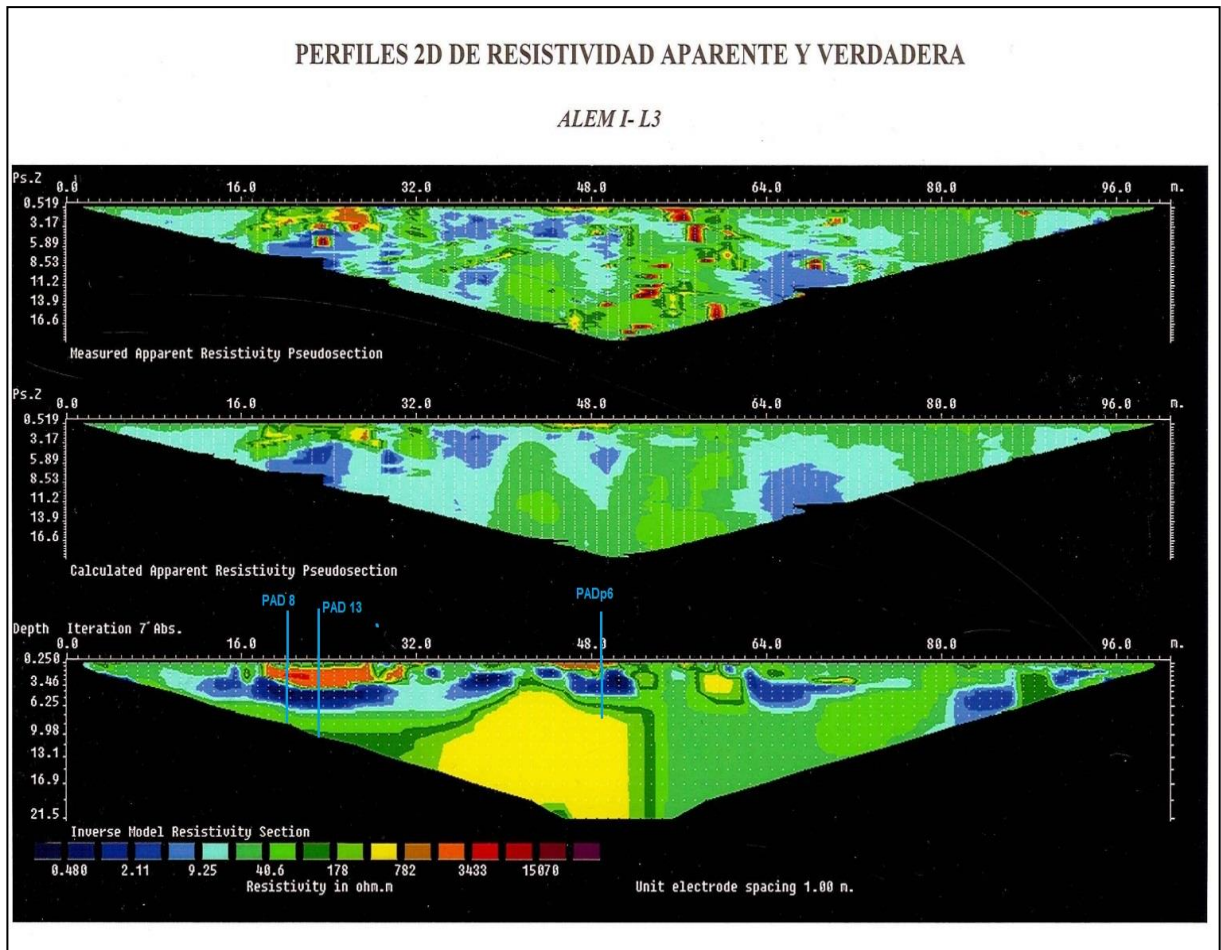


Figura 5.2.3.a Línea L3 de resistividad aparente y verdadera.

Teniendo en cuenta los valores de densidad aparente obtenidos, se confeccionó el corte esquemático interpretado (Figura 5.2.3.b.).

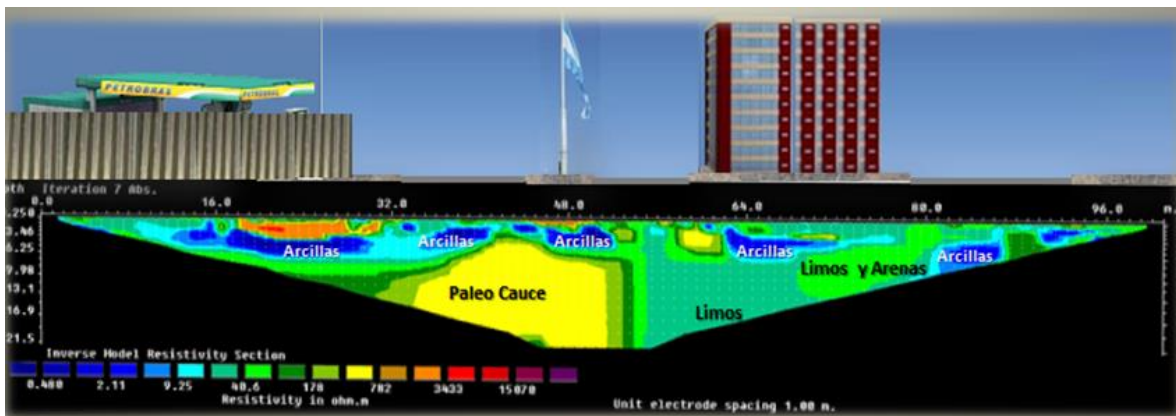


Figura 5.2.3.b. Interpretación Litológica y Ambiental de Línea 3

5.2.4 Línea 4

Este perfil se ejecutó en forma perpendicular al teatro (Figura 5.2.a). Del análisis de los datos obtenidos, se pueden apreciar, en general, las mismas litologías interpretadas en

las transectas anteriores, aunque en este caso se observan, en mayor proporción, valores de resistividad que se corresponderían con arenas finas que gradan a limos (5-129 Ω m). En la parte central de la transecta (35 y 48 metros) se observan resistividades aparentes (de hasta 2000 Ω m) que pueden ser asociadas a arenas medias que podrían contener hidrocarburos disueltos,

Por esta transecta y a las alturas mencionadas, de 35 y 48 metros, se encuentran los PAD 15 y 16 (analizados también en los apartados 5.5.1. en relación a la caracterización cromatográfica de la FLNA y en el apartado 5.6, estudiando su contenido de isoprenoides como biomarcadores) que al momento de la elaboración de la TE presentaban 20 cm y 31 cm de FLNA respectivamente. Valores de resistividad cercanos a los 2800 Ω m y próximos a la zona donde se emplaza el PAD 15, estarían indicando la presencia de hidrocarburos disueltos.

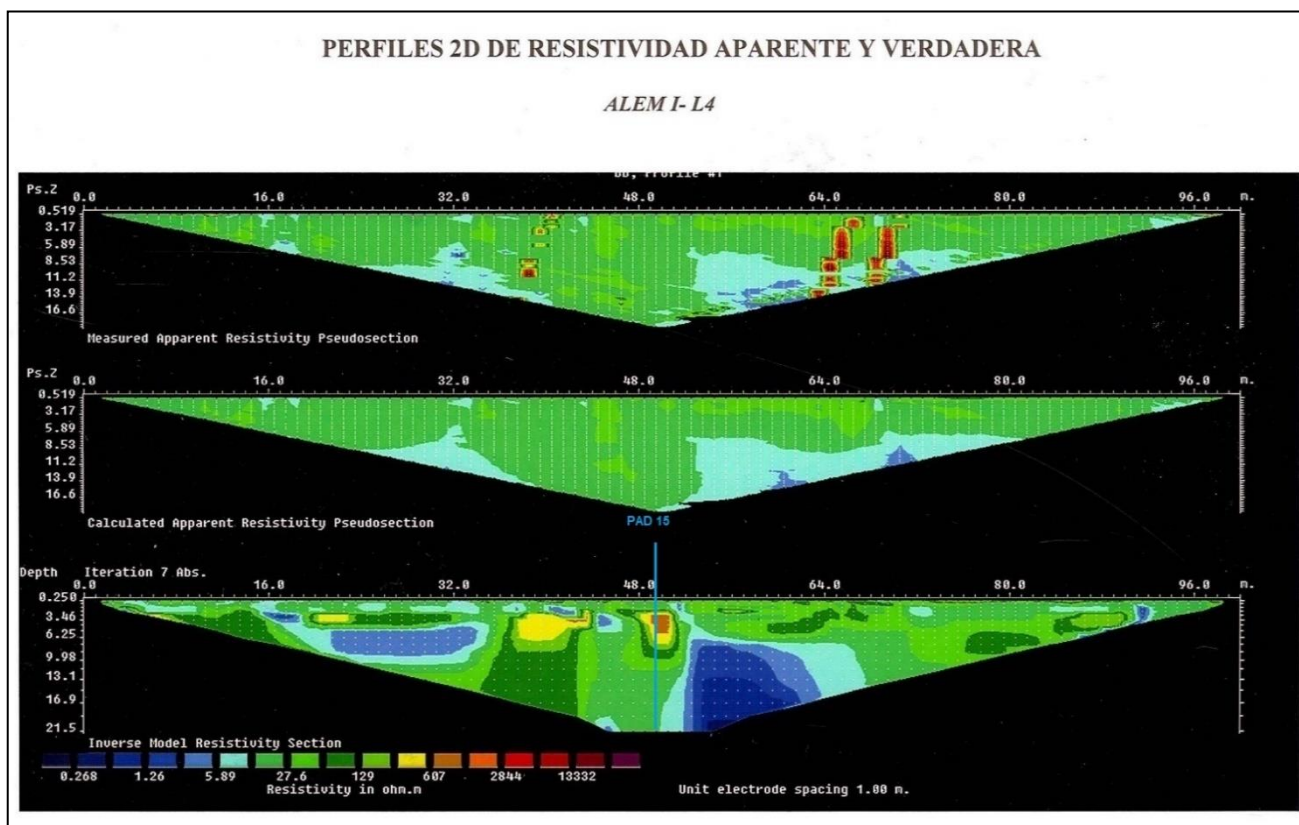


Figura 5.2.4.a. Línea L4 de Resistividad Aparente y Verdadera

Teniendo en cuenta los valores de densidad aparente obtenidos, se confeccionó el corte esquemático interpretado (Figura 5.2.4.b.).

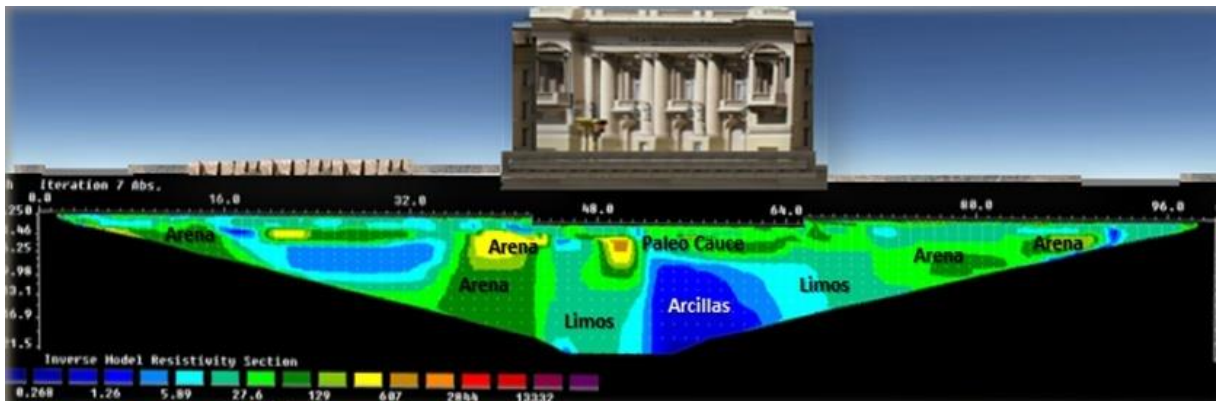


Figura 5.4.2.b. Interpretación Litológica y Ambiental de Línea 4

5.2.5 Línea 5

Este perfil atraviesa el teatro municipal paralelamente a L4 a 20 metros hacia el SE (Figura 5.2. 5.a.) y en él se observan resistividades aparentes que se corresponderían con arenas finas que gradan a limos. En la parte central de la transecta pueden observarse dos estructuras geométricas en las que los valores de resistividad obtenidos podrían asociarse con arenas medias a gruesas (500- 1000 Ω m) y serían parte de los paleocauces que se cortaron en todas las tomografías realizadas anteriormente. Estos paleocauces son de mayores dimensiones que los descritos en L4, pero su dirección es similar. No se observaron gran cantidad de puntos con valores de resistividad anómalos, que pudiesen inferir la presencia de fase libre no acuosa.

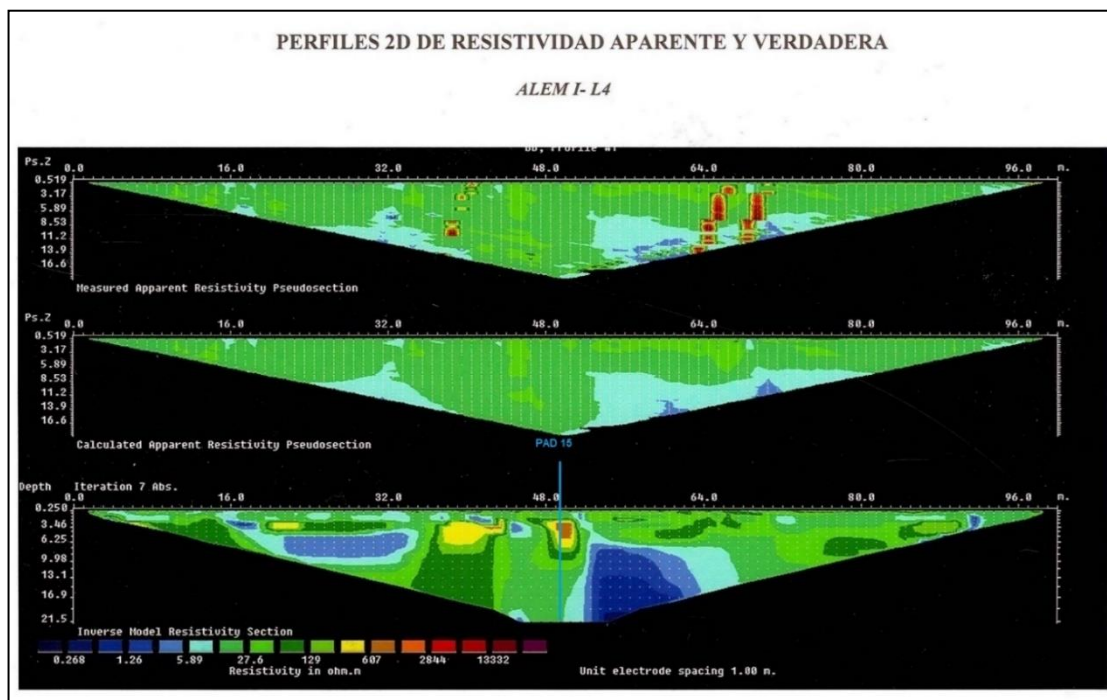


Figura 5.2.5.a. Línea L5 de Resistividad Aparente y Verdadera

Teniendo en cuenta los valores de densidad aparente obtenidos, se confeccionó el corte esquemático interpretado (Figura 5.2.5.b.).

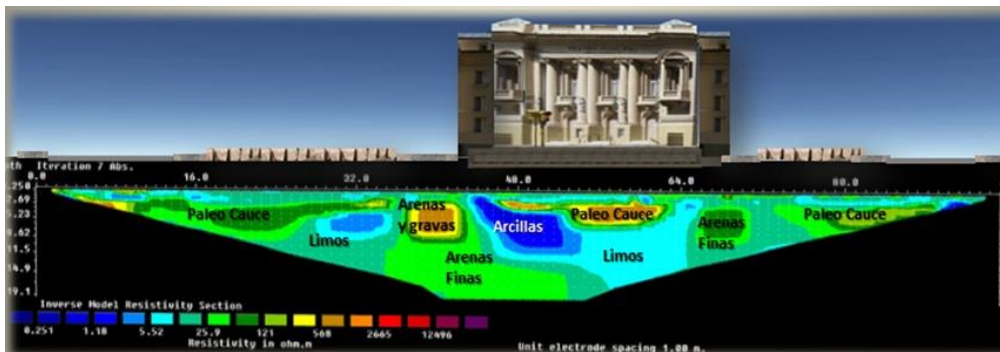


Figura 5.2.5.b. Interpretación Litológica y Ambiental de Línea 5

5.2.6 Línea 6

Esta línea, paralela a L5 y ubicada 30 metros al SE de la misma (Fig 5.2.6.a), presentó resistividades que, según los valores (5-125 Ω m) y disposición, estaría conteniendo a tres paleocauces cortados longitudinalmente. Estos podrían ser correlacionados con todas aquellas geometrías cóncavas de arena que tienen una marcada continuidad. En la parte central del perfil se detecta gran cantidad de arcilla que lateralmente gradúa a limos. No se observaron valores de resistividad que puedan asociarse a presencia de fase libre no acuosa a lo largo de todo el perfil.

PERFILES 2D DE RESISTIVIDAD APARENTE Y VERDADERA

ALEM I- L6

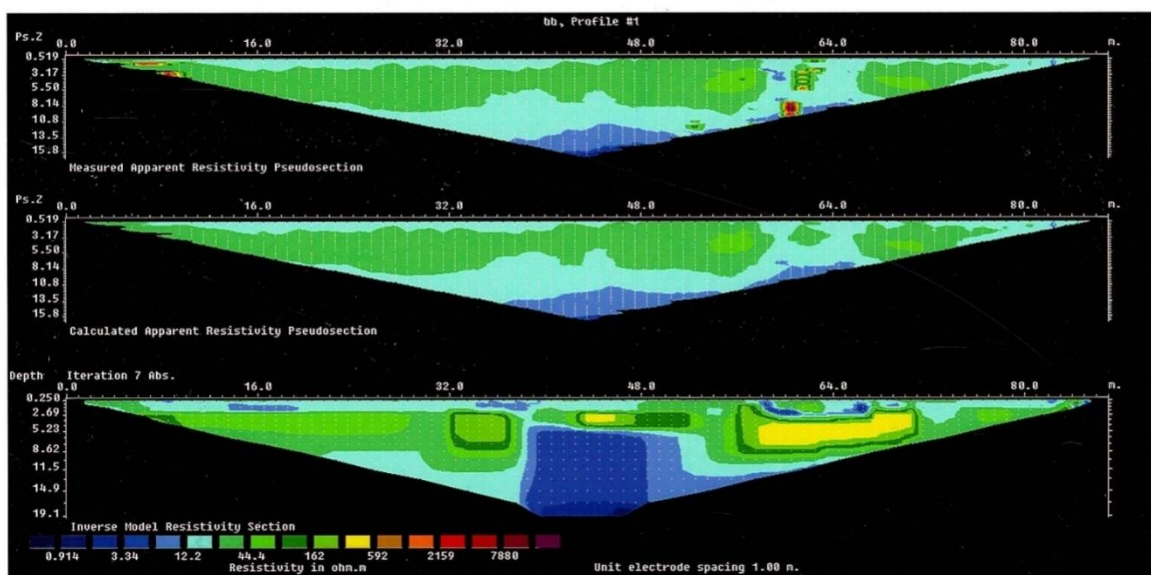


Figura 5.2.6.a. Línea L6 de Resistividad Aparente y Verdadera

Teniendo en cuenta los valores de densidad aparente obtenidos se confecciono el corte esquemático con las litologías y excepción fluidos atravesados (Figura 5.2.5.b.).

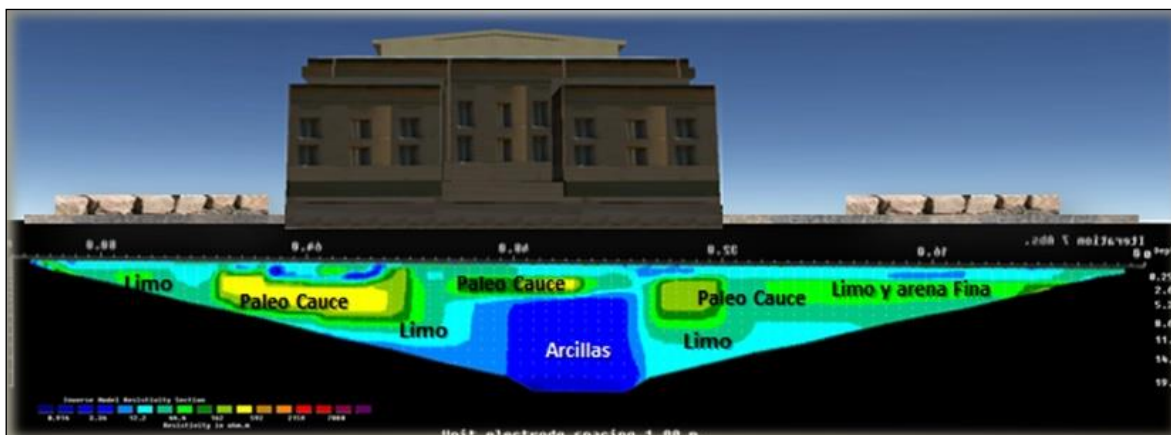


Figura. 5.2.5.b Interpretación Litológica y Ambiental de Línea 6

5.3. Diseño paleo ambiental del subsuelo a partir de datos de resistividad obtenidos

Como se mencionó anteriormente, las tomografías fueron dispuestas en una cuadrícula irregular, con 4 perfiles paralelos a la estación de servicio (L3, L4, L5 y L6) y dos perpendiculares a estos (L1y L2) (Figura 5.2.1). Esta disposición se realizó de manera tal que pueda generarse una correlación entre las transectas realizadas parametrizadas partir de la descripción de los detritos de perforación.

Luego de la integración de los parámetros estadísticos, se realizaron 4 modelos paleo ambientales para las profundidades de 15, 10 y 5 metros bajo el nivel del suelo, uno de ellos 3D producto de la correlación de los cortes L1 a L6 y 3 modelos vistos en planta.

La figura 5.3.1. muestra la integración de las 6 tomografías realizadas. Puede notarse que la correlación de los paleocanales atravesados en cada perfil, permitió determinar 3 paleocanales paralelos entre sí con direcciones NE-SW. El principal de ellos atravesaría la estación de servicio con una dirección SW, uniendo los PAD 15 y PAD 16 del teatro Municipal. Este modelo explicaría la rápida aparición de nafta pódium en los mencionados pozos monitores y de la ausencia de FLNA en los PadP6 y PadP4 (más cercanos al foco contaminante) donde el combustible fue detectado dos meses después. Como puede notarse los pozos monitores Pad P6 y Pad P4 no son atravesados por el paleo cauce, por lo que siempre habrían recibido remanentes de fase degradada. El segundo paleocauce tiene una conexión directa con el aljibe, por lo que es probable que a su vez esté conectado con el primer paleocauce mencionado y haya sido el medio poroso por el cual la fase libre no acuosa premium (segundo hallazgo) fluyó hacia el

aljibe, sin mezclarse con la primera fase no acuosa encontrada caracterizada como nafta súper por los cromatogramas.

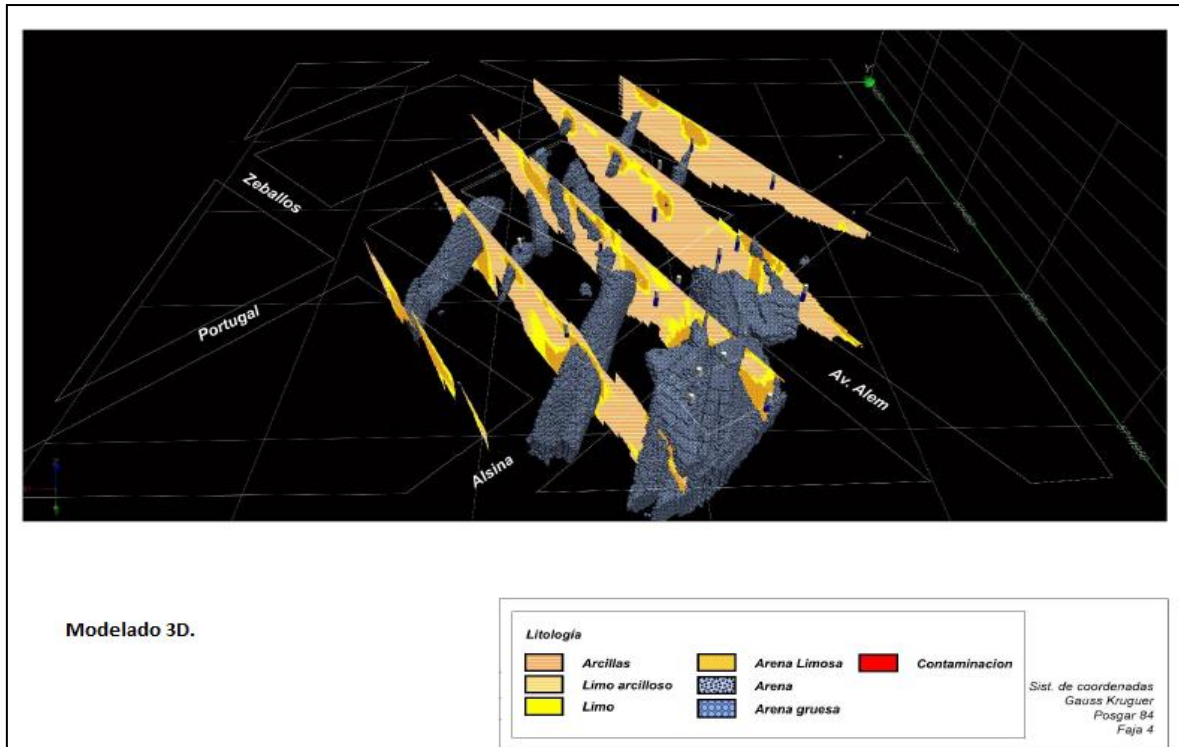


Figura. 5.3.1. Modelado paleo ambiental 3D de Resistividad obtenido para el subsuelo estudiado

Estos datos llevados a nivel de planta corte a 15 metros bajo el nivel del suelo (Figura 5.3.2), se podría observar que se presentan psamitas que se correlacionan con paleocauces de sentido NE-SE, constituidos por arenas gruesas, que en el centro del mismo gradan a sedimentos más finos de textura limoarcillosa. Estos últimos podrían corresponderse con ambientes de llanuras de inundación.

Analizando los datos en un plano a 10 metros bajo el nivel del suelo (Figura 5.3.3) se podría inferir la presencia extendida de los paleocauces detectados incipientemente en profundidad, lo que marcaría una mayor energía del curso fluvial que los estaba originando. Se observan también, un conjunto de canales menores constituidos por arenas y limos que conectarían a los tres grandes paleocauces detectados. Los valores anómalos de resistividad, que forman parte de esta vista en planta, constituirían los sedimentos gruesos que componen los centros de los canales (facies de canal). Se denota una red fluvial entrelazada con sentido NE-SW.

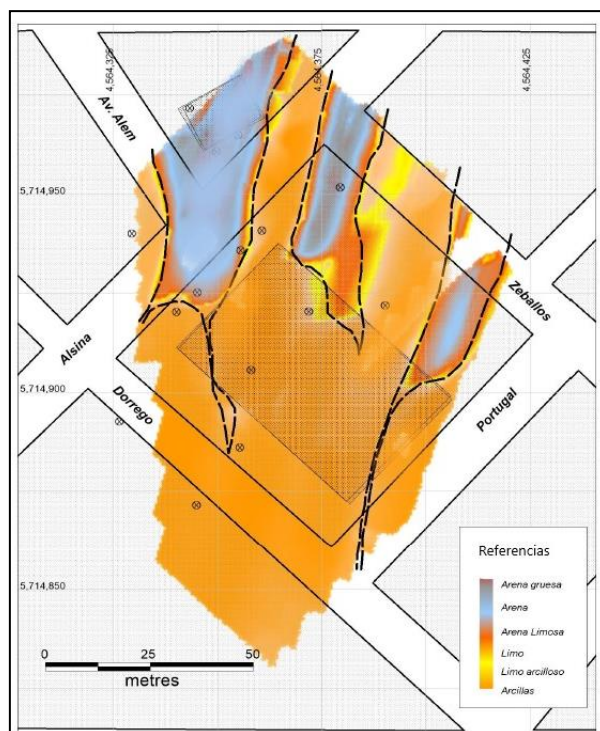


Figura 5.3.2 Modelado de Resistividad
Vista en Planta 15 metros bajo el nivel del suelo

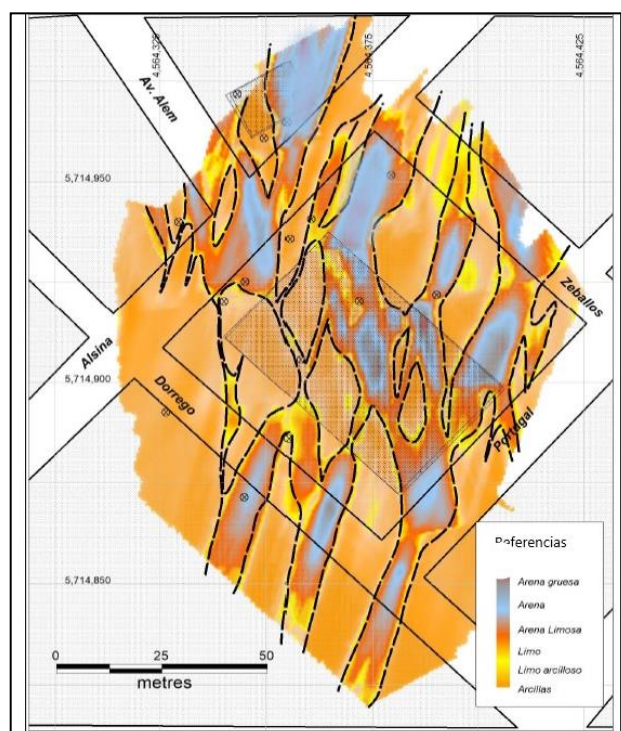


Figura 5.3.3 Modelado de Resistividad
Vista en Planta 10 metros bajo el nivel del suelo

Por último y a nivel más próximo a la superficie (5 metros de profundidad, Figura 5.5.4) se continúa observando el desarrollo de una red anastomosada de canales de alta energía, conectados entre sí, siguiendo el mismo sentido de escurrimiento NE-SW. Estos canales surcarían el subsuelo de la estación de servicio y del teatro municipal. Por los datos de resistividad estarían constituidos por arenas medias a gruesas y alojarían en su interior (centro de canal) los valores de resistividad más altos detectados. Estas características los señalan como vías preferenciales de migración y reservorios de la fase libre no acuosa.

Por encima de los 5 metros bajo nivel de superficie, gradualmente los cursos habrían ido desapareciendo, quizás por un cambio en el nivel de base del cauce, que podría haberse dado luego de la regresión marina del Holoceno.

Las litologías y estructuras del subsuelo son compatibles con las descripciones existentes de la Formación Bahía Blanca (Holoceno)

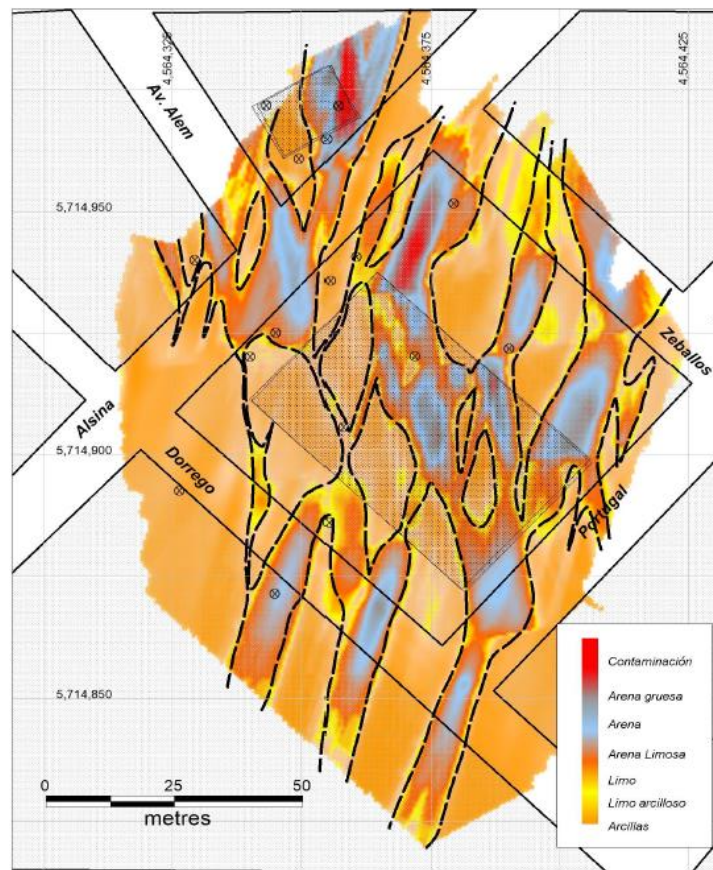


Figura 5.5.4 Modelado de Resistividad.
Vista en Planta 5 metros bajo el nivel del suelo

CAPITULO 6. CONTAMINACIÓN DE HIDROCARBUROS LIVIANOS EN EL SUBSUELO

Una de las principales fuentes de contaminación de las aguas subterráneas en las áreas urbanas, son las producidas por las pérdidas de hidrocarburos, a partir de los Sistemas de Almacenamiento Subterráneo de Hidrocarburos (SASH) en las estaciones de servicio (fig.6.a).

A principios de la década del 90 un censo demostró que más del 90% de las estaciones de servicio de Bahía Blanca, habían tenido algún problema relacionado con pérdidas de combustible (Lexow y Bonorino, 1991 y 1993)

En la actualidad, y a pesar de los acondicionamientos establecidos por el Ministerio de Energía de la Nación a las estaciones expendedoras, en el registro histórico de la Subsecretaría de Gestión Ambiental de la Municipalidad de Bahía Blanca, son varios los casos reportados en los últimos años, de pérdidas de hermeticidad en los Sistemas de Almacenamiento Subterráneo de Hidrocarburos (SASH).

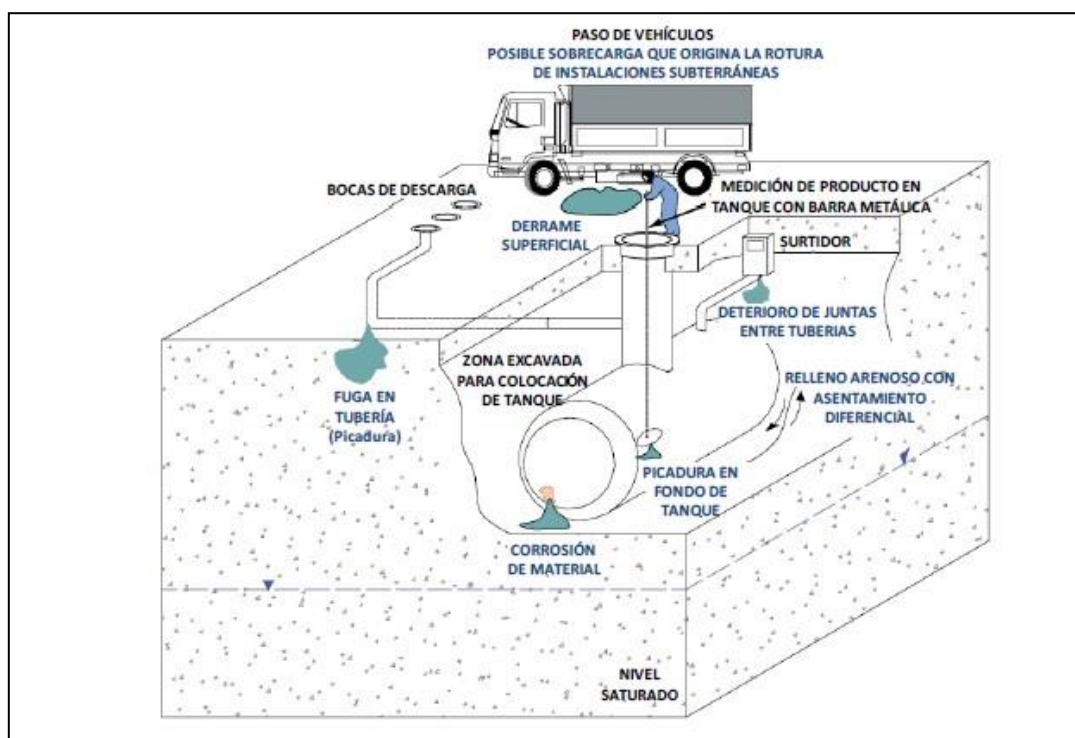


Figura 6.a Causas más comunes de fugas de Hidrocarburos debida a tanques subterráneos (IHOBE, 2006)

Las características propias de los combustibles como las del subsuelo, serán los condicionantes de la distribución, migración y acumulación de los hidrocarburos.

Entre las principales características fisicoquímicas de los hidrocarburos se encuentran: tensión de vapor, que mide la tendencia de las moléculas a distanciarse de una fase líquida para generar una fase vapor en el equilibrio termodinámico; densidad, referida a la magnitud escalar de la cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia; viscosidad, oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales (característica que está asociada con la mencionada anteriormente, hidrocarburos más densos, son más viscosos); solubilidad en agua, parámetro que permite conocer cómo se va a solubilizar el contaminante en un medio acuoso, su movilidad química, estabilidad, y sorción en el suelo; coeficiente de partición agua-octanol, expresa la relación de concentración en equilibrio de un químico en fases de octanol y de agua, sirviendo para indicar la bioacumulación o potencial de concentración de un compuesto químico en el tejido graso de los organismos y la polaridad, propiedad de las moléculas que representa la separación en ella de las cargas eléctricas.

Dentro de las propiedades fisicoquímicas del suelo se pueden dividir en aquellas que son propias de la zona no saturada (donde coexisten tres fases, aire, agua y sedimento), y las de la zona saturada (donde desaparece la fase gaseosa, quedando el medio con dos fases, sólido y agua). En la zona no saturada estas propiedades son: a) el contenido de materia orgánica, adición de residuos orgánicos al suelo, provenientes de plantas y animales y su posterior descomposición por microorganismos; b) el contenido de humedad; c) textura, contenido relativo de partículas minerales de diferente tamaño, en el suelo; d) estructura, forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla en el suelo.-Estos dos últimos parámetros mencionados condicionan a la porosidad, correspondiente a una fracción del volumen de huecos sobre el volumen total, a la permeabilidad, capacidad que tiene un material de permitirle a un fluido que lo atraviese sin alterar su composición, y al tipo y contenido de agua en el suelo (higroscópica, capilar gratifica).

Al producirse una pérdida o un derrame, los hidrocarburos comienzan a migrar, a través de la zona no saturada (ZNS), principalmente debido a las fuerzas de gravedad, interactuando en este transporte los parámetros fisicoquímicos descriptos para el medio receptor y los del contaminante.

Newell *et al.* (1995) (fig. 6.b) definieron cuatro fases en los que los constituyentes de hidrocarburos livianos pueden encontrarse en el subsuelo: 1) Fase aire-vapor en el espacio poral; 2) Fase acuosa, disuelta en agua; 3) Fase líquida, hidrocarburos en fase libre o móvil; 4) Fase adsorbida en el subsuelo o saturación residual.

Al llegar a la zona saturada y encontrarse dos fases fluidas no miscibles entre sí, agua y combustible, esta última por presentar una densidad menor, se desplaza por sobre el agua constituyendo la fase libre no acuosa (FLNA).

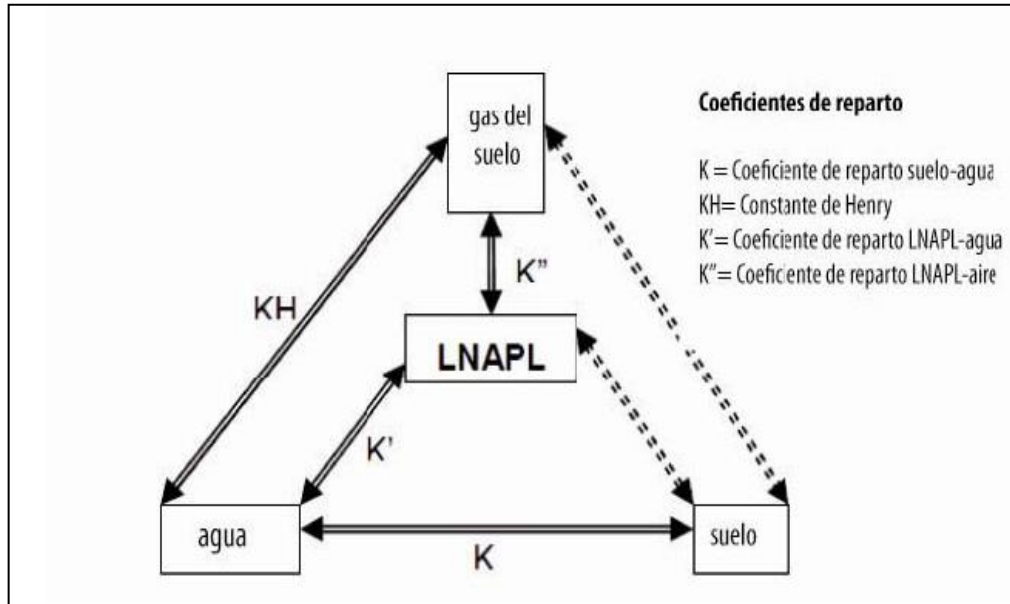


Figura 6.b Fases de hidrocarburos libres presentes en la zona no saturada (Newell *et al.*, 1995)

El desplazamiento de la FLNA a través de la franja capilar es complejo, debido a la competencia entre las fases (aire-agua-combustible) y genera condiciones propicias para incrementar la disolución de los hidrocarburos (Dobson *et al.*, 2007). El modo de transporte y destino de los hidrocarburos, además de los parámetros (del subsuelo e hidrocarburo) antes mencionados, está dado por parámetros fisicoquímicos como: coeficiente de distribución K_d , también llamado coeficiente de partición (P), que es el cociente entre las concentraciones de una sustancia en las dos fases de la mezcla formada por dos disolventes inmiscibles en equilibrio. Coeficiente de distribución aire-agua K_{aw} , describe la relación entre las concentraciones al equilibrio del contaminante en la interfase agua-aire y que depende de la constante de Henry y la presión de vapor que a su vez están relacionadas con el peso molecular (Lovanh *et al.*, 2000).

En síntesis cuando ocurre un derrame de hidrocarburos livianos (Figura 6.c) este producto lixiviará hacia el acuífero por acción de la gravedad; a medida que el contaminante avanza en la zona no saturada, una parte del mismo quedará retenido dentro de los poros debido a la acción de las fuerzas capilares constituyendo una fracción residual; la masa de hidrocarburos no retenida continuará migrando en el subsuelo, generándose en este proceso una pluma gaseosa que contendrá los compuestos volátiles del hidrocarburo residual y de la fase de hidrocarburo que se

encuentra avanzando hacia la zona saturada. El flujo vertical del contaminante será detenido al llegar a la zona saturada y comenzará, dado el obstáculo que le ofrece el acuífero, a dispersarse lateralmente en la dirección del flujo del agua subterránea. Junto con ello, comenzará a formarse dentro del acuífero una pluma de compuestos disueltos a partir de un mecanismo de disolución de los contaminantes que se encuentran en fase libre no acuosa (inmiscible) a la fase acuosa. La extensión de la pluma de contaminantes disueltos estará limitada por la solubilidad de cada compuesto (Kim y Corapcioglu, 2003).

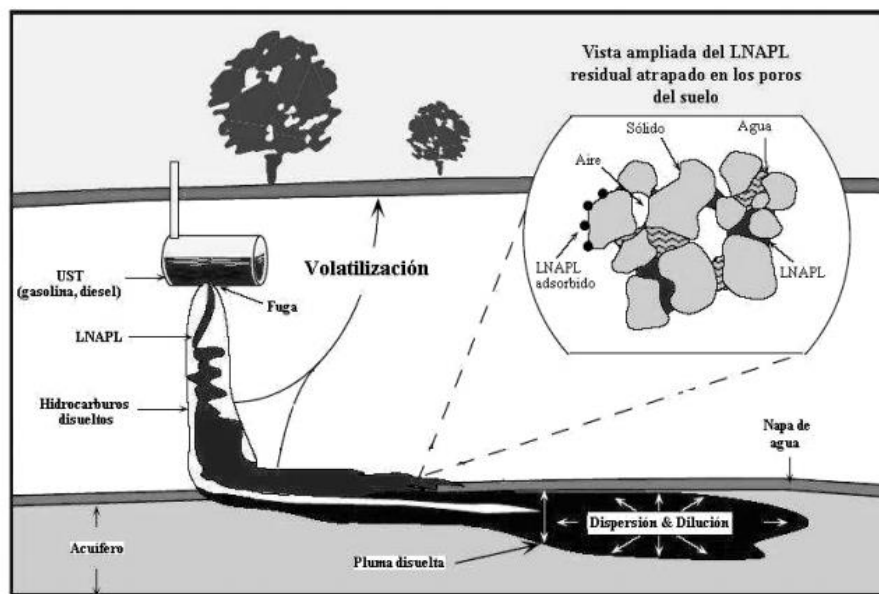


Figura6.c. Dispersión de hidrocarburos a partir de una fuga. (Modificada de Celis,2009)

6.1 Procesos que controlan el transporte de contaminantes en la zona saturada

6.1.1 Advección

Es el transporte de partículas sólidas disueltas, viajando a la velocidad promedio del agua subterránea. El promedio de la velocidad lineal depende de: la conductividad hidráulica de la formación hidrogeológica en la dirección del flujo, la porosidad de la formación y el gradiente hidráulico en la dirección del flujo. Si sólo existiera este proceso, el contaminante viajaría a la misma velocidad que el agua

En un medio poroso, el flujo de masa de un contaminante a través de una sección unidad perpendicular al flujo es igual a:

$$J = m_e \cdot C \cdot v \quad (6.2.1)$$

Siendo: J = flujo de masa, por unidad de sección y por unidad de tiempo

m_e = porosidad eficaz

C = concentración

v = velocidad lineal media (= velocidad Darcy / m_e). -

6.1.2 Difusión (transporte difusivo o "Fickiano")

Un elemento químico se mueve desde un lugar donde su concentración es relativamente alta hacia otro donde es menor, por efecto de un movimiento aleatorio de las moléculas (difusión molecular), o un movimiento aleatorio del agua donde se encuentra (difusión turbulenta) o por una combinación de ambos.

La ley de Fick es usada para describir este movimiento de los iones a una escala molecular y se expresa como:

$$FD = -Dm \cdot dC/dx \quad (6.2.2)$$

Dónde: FD = flujo másico difusivo (M/t)

Dm : coeficiente de difusión del medio poroso (L^2/t)

C : concentración del soluto (M/ L^3)

6.1.3 Dispersión

En ocasiones el movimiento del fluido no es enteramente aleatorio, si no que posee un patrón discernible pero complejo de caracterizar. En el caso de las aguas subterráneas, se determina un camino tortuoso alrededor de las partículas del suelo en la medida que se traslada desde un punto a otro. La heterogeneidad y la tortuosidad del medio generan dispersión a escala microscópica, lo que provoca una mezcla del soluto y resulta en el transporte del producto químico desde zonas de altas concentración a zonas de menor concentración. En medios porosos naturales es posible aplicar el concepto de Fick para tratar el proceso de dispersión (dispersión "Fickiana").

El flujo másico de un contaminante puede darse por dispersión mecánica o dispersión hidrodinámica.

La dispersión mecánica es la provocada por el movimiento del fluido a través del medio poroso. Esta dispersión se produce en el sentido del flujo (longitudinal) y lateralmente (transversal).

La capacidad del medio poroso para dispersar mecánicamente un fluido que circula por él se refleja en un coeficiente denominado dispersividad dinámica α (unidades: L), en el

que influyen la porosidad, la tortuosidad, la forma de los granos, etc. se distingue la dispersividad dinámica longitudinal α_L transversal α_T (en sentido transversal).

La dispersión mecánica es igual al producto de este coeficiente por la velocidad lineal media (unidades: L²/ T):

$$\text{Dispersión mecánica} = \alpha \cdot v \quad (6.2.3)$$

Dónde: α = Dispersividad dinámica (L), v = Velocidad lineal media (L/T)

v = velocidad lineal media (L/T)

La dispersión hidrodinámica es la acción conjunta de la difusión y la dispersión mecánica; ambos fenómenos no pueden considerarse aisladamente. Para tomarlos en consideración de un modo conjunto, se establece el coeficiente de dispersión hidrodinámica D :

$$D = \text{dispersión mecánica} + \text{coeficiente de difusión efectiva}$$

Desglosando este concepto en la dirección del flujo (longitudinal) y perpendicular al flujo (transversal), queda expresado así:

$$D_L = \alpha_L \cdot v + D^* \quad (6.2.4)$$

$$D_T = \alpha_T \cdot v + D \quad (6.2.5)$$

Donde:

D_L, D_T = coeficiente de dispersión hidrodinámica (longitudinal, transversal)
(unidades: L²/T)

$\alpha_L; \alpha_T$ = coeficientes de dispersividad dinámica (longitudinal, transversal)

v = velocidad lineal media (Velocidad de Darcy)

D^* = coeficiente de difusión efectiva

6.1.4. Adsorción

La adsorción es el proceso más importante que afecta el transporte de los hidrocarburos en el ambiente subterráneo y es considerada, para un contaminante orgánico no polar, un proceso de equilibrio-partición entre la fase acuosa y el medio poroso. Cuando la concentración del soluto es baja (o menor que la mitad de la solubilidad), la partición puede describirse usando la isoterma lineal, donde la concentración sorbida (C_s) es una función de la concentración acuosa (C_e) es decir $K_d = C_s/C_e$ (cm³/gr). Depende en gran medida del contenido de arcillas y/o materia orgánica de la fracción sólida y puede ser

determinada en el laboratorio a través de ensayos batch. Los datos de la concentración en la fase acuosa versus la cantidad sorbida en la fase sólida se representan gráficamente (Chin *et al.*, 1988).

El mecanismo primario de la adsorción mecánica, es la formación de un enlace hidrofóbico entre un contaminante y la materia orgánica natural asociada al acuífero. Por lo tanto, la adsorción de una sustancia específica se puede estimar del contenido de carbono orgánico en los materiales del acuífero (f_{oc}) y una constante de proporcionalidad característica de la sustancia química (k_{oc}), $K_d = k_{oc} \cdot f_{oc}$ si el contenido orgánico es suficientemente alto ($f_{oc} > 0,001$) (Karickhoff, 1984). Cuanto mayor es k_{oc} mayor es el grado de afinidad con la fracción de carbono orgánica del suelo (ASTM, 1998).

El movimiento advectivo de un contaminante que se mueve en el acuífero, es descrito matemáticamente por la dirección y la magnitud de la velocidad del centro de la masa disuelta. Las condiciones naturales: tortuosidad del medio poroso, heterogeneidades litológicas etc., generan para diferentes escalas un proceso de mezcla que en términos de transporte se denomina dispersión, y es tratado comúnmente como un proceso expresado por la primera ley de Fick.

6.1.5. Factor de Retardo

Otro parámetro importante es el que describe el grado en que los contaminantes disueltos pueden ser retrasados por la adsorción a la matriz del acuífero. El grado de retraso depende tanto de las propiedades de los compuestos contaminantes como las del acuífero. El factor de retardo (R) representa la relación entre la velocidad real del agua subterránea (v) y la velocidad promedio de un contaminante que migra (v_c) (Freeze y Cherry, 1979). El factor R depende del coeficiente de partición, la densidad aparente del sedimento acuífero (ρ_a) y la porosidad eficaz (m_e) y suponiendo equilibrio lineal local para la adsorción está dado:

$$R = 1 + \frac{\rho_a}{m_e} k_d = \frac{v}{v_c} \quad (6.2.6)$$

El factor de retardo para un contaminante disuelto caracteriza el flujo advectivo de la línea de isoconcentración correspondiente al 50% ($C/C_0 = 0,5$) de la concentración de una fuente constante (Figura 5.2.3), es decir el centro de masa de una pluma contaminante que se mueve sometida al proceso de adsorción (Freeze y Cherry, 1979). Debido a que algunas moléculas contaminantes migran más allá de esta posición debido a la dispersión, la primera aparición de un contaminante en bajas concentraciones, en algún pozo de monitoreo aguas abajo, tendrá lugar antes que el tiempo señalado por v_c .

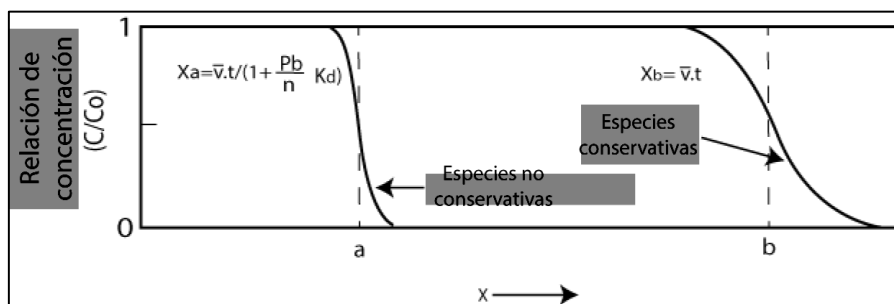


Figura 6.1.5.a Frente de avance de un soluto no adsorbido (conservativo) y otro adsorbido (no conservativo) a través de una columna de material poroso (Freeze y Cherry, 1979)

Una ecuación de transporte de hidrocarburos en la zona saturada considerando el factor de retardo es la ecuación de advección-dispersión para una fuente continua (Freeze y Cherry, 1979) (Ecuación 6.2.7)

$$C(x, t) = C_0/2 \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{Rx - vt}{2\sqrt{R\alpha_l vt}} \right) \right] \quad (6.2.7)$$

Esta ecuación permite calcular la concentración de una sustancia a una distancia (x) en un tiempo (t). Está en función del factor de retardo (R) y de la dispersividad longitudinal (α_l), si se considerara solo una dimensión. El argumento de la función de error complementario (erfc), que aparece en la ecuación de advección-dispersión, es una función tabulada, por lo que gráficos o tablas entregan directamente los valores numéricos. Más allá del frente advectivo, donde $x \gg vt$, el argumento es positivo y tiende a infinito, por lo que $\operatorname{erfc}(\infty) = 0$ y $C = 0$. En otras palabras, el punto de observación se encuentra tan lejano de la zona de dispersión que no se ha generado mezcla y solo se observa la concentración original del agua subterránea

6.1.6. Degradación

La mayoría de las sustancias químicas se hallan sujetas a reacciones de transformación bióticas (biodegradación) o abióticas, que originan la degradación de los contaminantes.

Entre las segundas cabe citar la foto degradación y la hidrólisis.

La fotodegradación es el proceso de descomposición de un compuesto químico bajo la acción de la luz del sol y es más intenso en las sustancias situadas en superficie y expuestas a la acción del sol. La hidrólisis es la reacción de degradación que se produce en algunos compuestos por medio de la acción del agua y es en ambientes saturados donde tiene mayor alcance (Chiva Vicent, 2017).

La biodegradación es un proceso que puede producirse de forma espontánea o inducida y que consiste en la utilización de procesos microbiológicos para degradar o transformar los contaminantes. Se puede producir en presencia de oxígeno (condiciones aeróbicas), o en ausencia de él (condiciones anaeróbicas) (Chiva Vicent, 2017)

En presencia de oxígeno suficiente y nutrientes, los microorganismos convertirán muchos contaminantes orgánicos en dióxido de carbono, agua y masa celular microbiana, mientras que, en su ausencia, el aceptor de electrones es otro compuesto distinto del oxígeno molecular, tal como nitrato, sulfato o dióxido de carbono y los contaminantes serán metabolizados en metano, dióxido de carbono y cantidades traza de hidrógeno gas (Chiva Vicent, 2017).

El oxígeno, cuando está presente, es el aceptor de electrones usado con preferencia, ya que proporciona la máxima cantidad de energía a los microorganismos, maximizando la producción celular y el crecimiento de los microorganismos por cantidad de donante de electrones empleado (Chiva Vicent, 2017).

Por tanto, la biodegradación aeróbica se produce generalmente de forma más rápida y proporciona una degradación más completa de los compuestos orgánicos que la biodegradación anaeróbica. No obstante, debido a la limitada solubilidad del oxígeno en agua, es difícil proporcionar grandes cantidades de éste en medios contaminados en el subsuelo (Chiva Vicent, 2017).

6.2. Tipos de Hidrocarburos de Petróleo

Los hidrocarburos son una familia de compuestos orgánicos con una gran gama de representantes, el parámetro de medición analítico utilizado es hidrocarburos totales de petróleo, TPH abreviado en inglés, representativo del conjunto de hidrocarburos y no específico a una sustancia en particular. El término TPH es usado para describir una gran familia de varios cientos de compuestos químicos originados de petróleo crudo.

Los TPH son una mezcla de productos químicos compuestos principalmente de hidrógeno y carbono, que a su vez ha sido dividido en grupos de hidrocarburos de

petróleo que se comportan en forma similar en el suelo o el agua. Estos grupos se llaman fracciones de hidrocarburos de petróleo. Cada fracción contiene muchos productos químicos individuales. Algunas sustancias químicas que pueden encontrarse en los TPH incluyen a hexano, combustibles de aviones de reacción, aceites minerales, benceno, tolueno, xilenos, naftalina y fluoreno, como también otros productos de petróleo y componentes de gasolina. Sin embargo, es probable que muestras de TPH contengan solamente algunas, o una mezcla de estas sustancias químicas (ATSDR, 1999).

Resulta de gran interés abordar la identificación de los contaminantes representativos de almacenamiento de hidrocarburos, ya que existe una diferencia en el número de carbonos que posee la cadena. Estas diferencias de carbonos les confieren distintas propiedades físico-químicas y toxicológicas (ATSDR, 1999; Park y Park, 2010). Por ejemplo, las fugas de diesel son más complicadas de tratar que las de nafta, debido a su mayor viscosidad y su menor volatilidad, movilidad y biodegradabilidad (Tsai y Kao, 2009).-

6.2.1 Fracciones de Hidrocarburos Totales del Petróleo

Los hidrocarburos totales de petróleo están conformados por dos grandes fracciones los Hidrocarburos Aromáticos (HAR) y los Hidrocarburos Alifáticos (HAL). De acuerdo a McBride (1994), los hidrocarburos alifáticos son compuestos no polares y, por lo tanto, pobres competidores con el agua. Los hidrocarburos aromáticos son compuestos no polares o muy débilmente polares respecto a los alifáticos.

Existen dos clases de hidrocarburos aromáticos (HAR): los de bajo peso molecular que tienen de 2 a 3 anillos aromáticos como el naftaleno, fluoreno, fenantreno y antraceno y derivados; y los de alto peso molecular que tienen de cuatro (4) a siete (7) anillos aromáticos como el criseno. Sus características físicas y químicas varían de acuerdo a su peso molecular y, en consecuencia, en su distribución y conducta del ambiente, lo mismo sucede con sus efectos sobre los sistemas biológicos.

Un grupo muy importante dentro de los hidrocarburos aromáticos, lo constituyen los compuestos orgánicos volátiles (COV) y dentro de ellos específicamente los BTEX (un acrónimo que significa Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno), este tipo de hidrocarburo tiene mayor presencia en la gasolina que en el diesel, por lo que, debido a sus bajos costos y sencillos métodos analíticos, sirven como elemento diagnóstico ante la presencia de una fuga. De los BTEX, el Benceno es el más peligroso, ya que está considerado un elemento cancerígeno (Repetto, 1997).

Dentro de los hidrocarburos aromáticos se encuentran también los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs). Los HAPs pueden degradarse en un período de días a semanas al reaccionar con la luz solar o con otras sustancias químicas en el aire. La mayoría de los HAPs no se disuelven fácilmente en agua. Los microorganismos pueden degradar HAPs en el suelo o en el agua después de un periodo que puede ir de semanas a meses. En el suelo, es probable que los HAPs se adhieran firmemente a partículas; y otros, se movilizan a través del suelo, pudiendo contaminar el agua subterránea. Muchos de los HAPs son compuestos estables y altamente tóxicos, algunos de ellos son conocidos por ser altamente cancerígenos y otros mutagénicos (Repetto, 1997).

Los hidrocarburos alifáticos se utilizan también para caracterizar la Fase Libre No Acuosa (FLNA), permitiendo asociar la misma al refinado de petróleo que le dio origen. Por lo que se puede definir la FLNA como derivada de **GRO** (*Gasoline Range Organics*), definida por la EPA y el Instituto Americano del Petróleo (API) como el rango de alcanos C_6 a C_{10} que cubre un rango de punto de ebullición de 60° a $170^\circ C$; **DRO** (*Diesel Range Organics*) alcanos que van desde C_{10} a C_{28} que cubren un rango de ebullición de 170 a $430^\circ C$ y; **WOO** (*Waste Oil Organics*), fracción más pesada de los hidrocarburos de petróleo procedentes de aceites pesados que cubren un rango de alcanos de C_{28} a C_{40} (Figura 6.2.1.a).

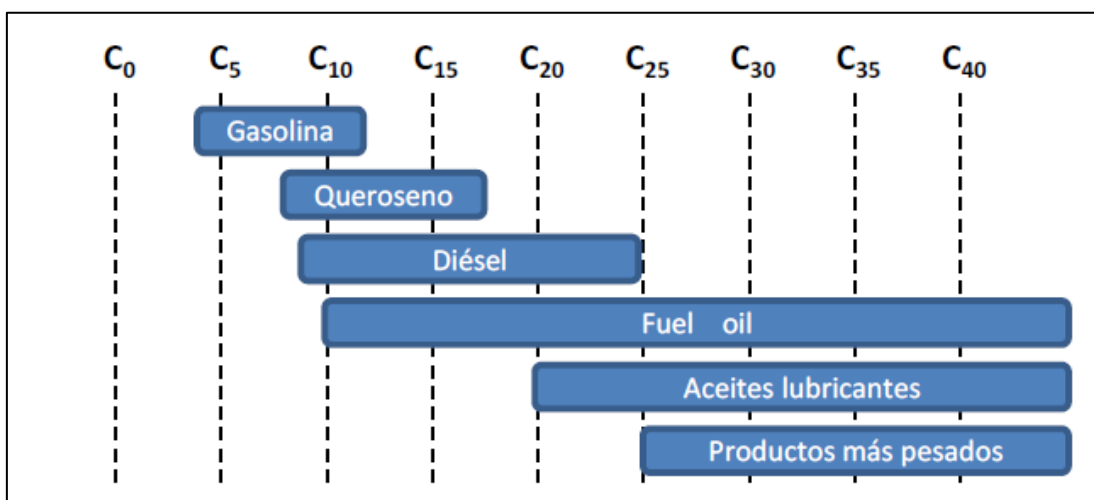


Figura 6.2. 1.a.Relación entre rango de cadena de carbono y productos derivados del petróleo (Weisman, 1998).

6.3. Zonas de Investigación

6.3.1 Puntos de Muestreo

Inicialmente se realizó un muestreo de agua subterránea en ciento veinte (120) freatómetros ubicados en el área de estudio (fig 6.3.1.a), a fin de efectuar los respectivos análisis en laboratorio y establecer el estado de situación de los lugares objeto de estudio. En cada sondeo se registraron las profundidades de la capa freática (con respecto a nivel de pozo) y se procedió a la detección de FLNA mediante sonda multifase.

Se tomó como valor guía para la profundización de la investigación la Ley Nacional 24051 de Residuos Peligrosos y la Disposición 95/2014 del Organismo Para el Desarrollo Sostenible de la Provincia de Buenos Aires.

En aquellos emplazamientos donde no se detectó presencia de contaminantes o su valor estaba por debajo de los límites establecidos en norma se los muestreó solo en una oportunidad. Donde hubo evidencia analítica de contaminación, se agruparon los sitios en dos grupos: aquellas estaciones de servicio que presentaban contaminantes disueltos en agua y por otro lado las que registraron presencia de fase libre no acuosa.

La Tabla 6.3.1.a muestra los resultados del primer monitoreo y aquellos en los que se detectaron valores anómalos de contaminantes y/o presencia de fase libre no acuosa (mayor precisiones sobre los puntos de monitoreo son exhibidos en el anexo IV)

Tabla 6.3.1.a Muestreos analítico. Agosto 2012-marzo 2014

Estación de Servicio Bandera	N° Indicador mapa	Puntos de sondeo	Presencia de FLNA	Resultados Analíticos	Estado a Junio 2014
Shell	1	8	No	SL	Operativa
Shell	2	18	No	SL	Operativa
Petrobras	3	22	Si	SL	No operativa
Petrobras	4	11	Si	SL	Operativa en remediación
YPF	5	6	No	ND	Operativa
AXION	6	8	No	SL	Operativa, final de remediación
YPF	7	9	No	SL	Operativa en remediación
YPF	8	3	No	ND	Operativa
Blanca	9	8	No	ND	No operativa
Blanca	10	9	No	ND	Operativa
Blanca	11	3	No	ND	No operativa
YPF	12	4	No	ND	Operativa
Blanca	13	14	No	SL	No operativa
Blanca	14	6	No	SL	No Operativa
YPF	15	1	Si	SL	Operativa en observación
Petrobras	16	5	Si	SL	Operativa en observación
Shell	17	5	No	ND	Operativa
Petrobras	18	2	No	ND	Operativa
Petrobras	19	1	No	ND	Operativa
YPF	20	3	No	ND	Operativa
YPF	21	2	No	ND	Operativa

SL: supera límites analíticos de detección en laboratorio.

ND: No Detectable. FLNA: Fase Libre No Acuosa

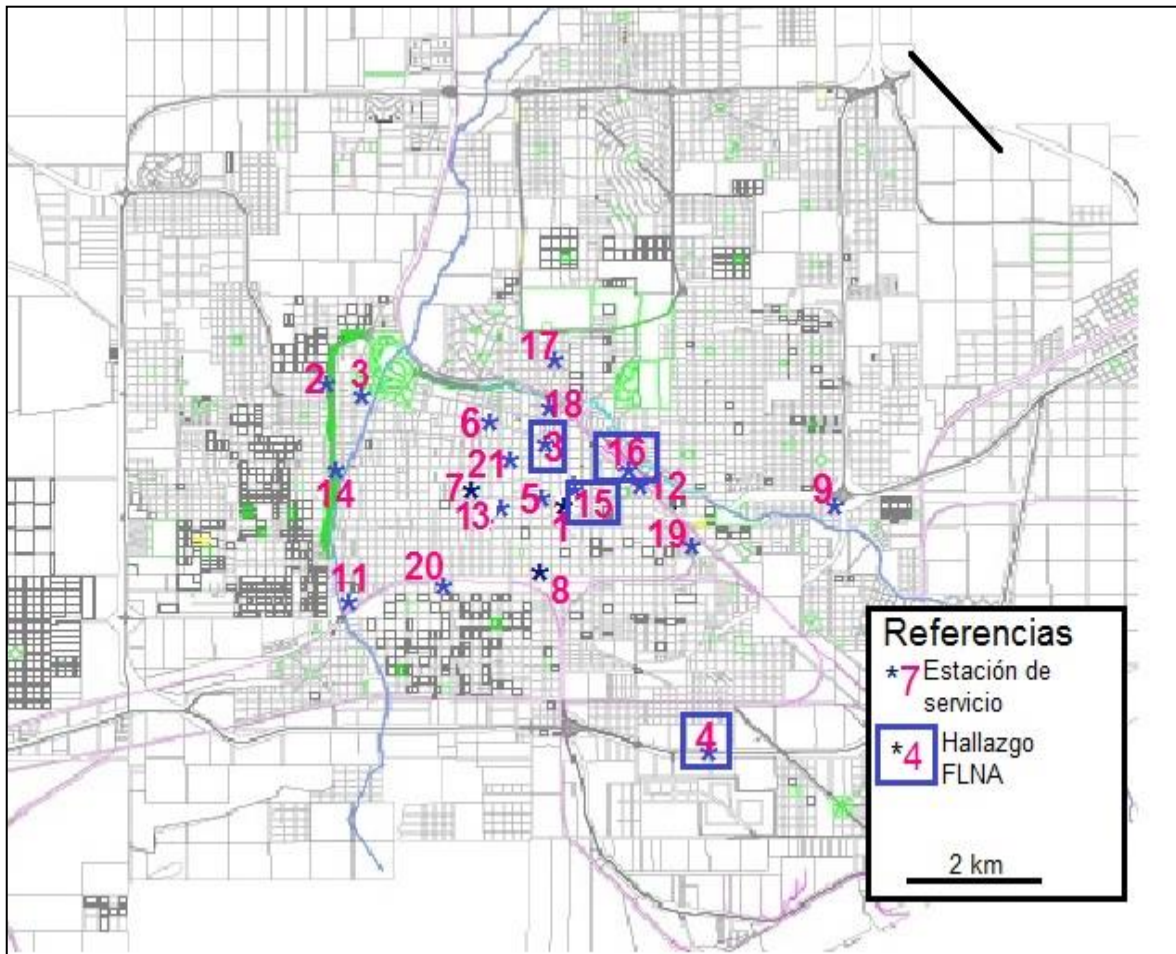


Figura. 6.3.1.a Mapa Estaciones de servicios relevadas

6.4 Caracterización de los Hidrocarburos en Agua y en FLNA

Las muestras obtenidas durante los monitoreos, fueron debidamente conservadas, refrigeradas y derivadas, al laboratorio del Comité Técnico Ejecutivo de la Municipalidad de Bahía Blanca para la caracterización de la FLNA y BTEX y a IACA S.A para la determinación de los valores de HTP y los PAHs. Los ensayos realizados se detallan en la tabla 6.4.a y los resultados obtenidos en el Anexo III.

Tabla 6.4.a. Ensayos analíticos realizados

Analito	Abreviatura	Método analítico en FLNA	Método analítico en agua
Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos	BTEX	-	EPA 8015
Hidrocarburos Totales de Petróleo	HTP	-	EPA 8015 TNRCC 1005/1006
Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares	PAHs	-	EPA 8310
Densidad	-	Densimetría	
Caracterización Cromatográfica (DRO-GRO)	-	EPA 8015	

Aquellas muestras en las que se detectaron contaminantes disueltos en agua, solo se caracterizaron y cuantificaron en una oportunidad. Se profundizó la investigación en aquellos sitios en los que se detectó presencia de fase libre no acuosa. -

6.4.1. Análisis y Caracterización de las Fase libre No acuosa Sobrenadante en la Zona Saturada a partir de Cromatogramas

El análisis cromatográfico ha sido desarrollado minuciosamente y constituye una prueba fehaciente de la presencia y tipología de contaminantes. Para el caso de estudio se realizaron análisis mediante cromatografía gaseosa, en el laboratorio del Comité Técnico Ejecutivo de la localidad de Bahía Blanca.

En este capítulo se presentan los análisis cromatográficos realizados a las muestras de fase libre no acuosa extraídas de las diferentes estaciones de servicio donde se realizaron los hallazgos. Si bien se expresan las coordenadas geográficas de los hallazgos, por una cuestión de practicidad se utilizará un nombre genérico para denominar los sitios con presencia de FLNA y a modo de referencia su ubicación esta ploteada en el mapa 6.3.1.a y anexo IV.

Tabla 6.4.1.a Hallazgos producidos luego de la caracterización cromatográfica de las FLNA analizadas

Establecimiento	Hallazgo	Nombre de fantasía	Referencia en el mapa 5.5.1
Petrobras	Nafta Súper	Alem 1	3
	Nafta Premium		
Petrobras	Gas Oil Degradado	Bahía 1	4
Petrobras	Nafta súper degradada	Celina	15
YPF	Nafta +Gas Oil	ACA	16

Nota: Las caracterizaciones analíticas de la FLNA se presentan en el anexo IV.-

6.4.1.1 Caso de estudio “ALEM 1”

Los estudios en este sitio (Punto 3, mapa 6.3.1.a y detalle en fig 6.4.1.a se iniciaron en el interior del Teatro Municipal de Bahía Blanca (frente a una Estación de Servicio), en el freático denominado PAD-15. En él pudo muestrearse una FLNA de color azul oscuro

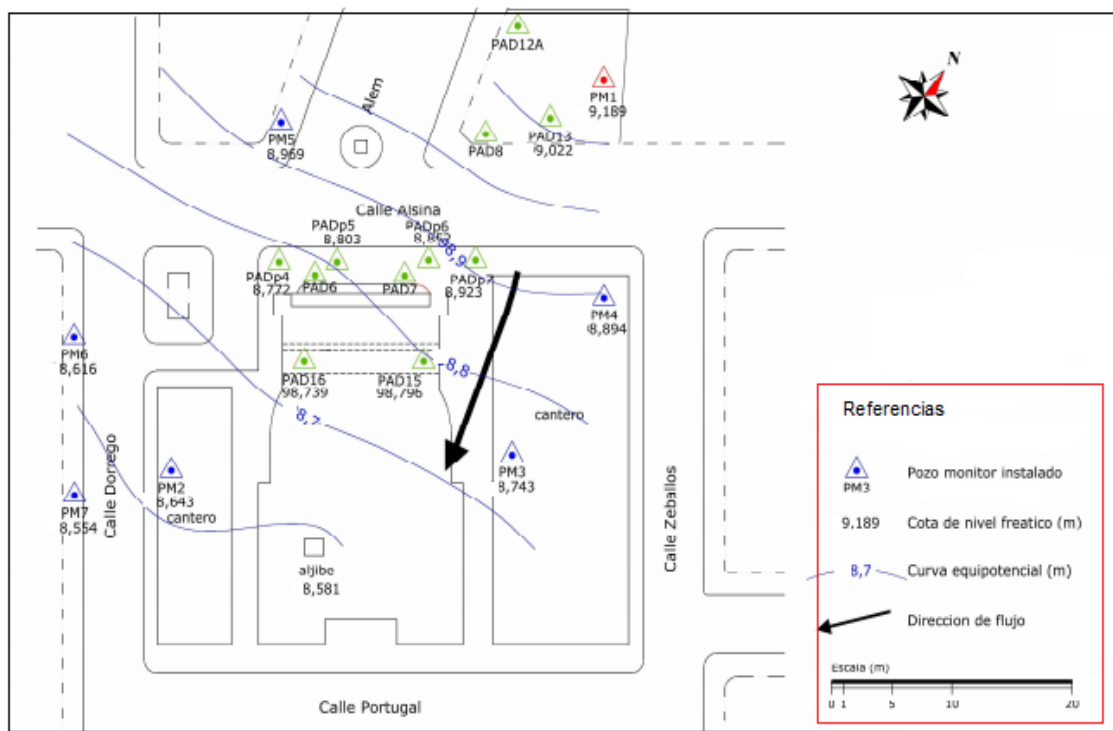


Figura 6.4.1.1.a Zona de estudio “Alem 1”

El análisis de la misma en el Comité Técnico Ejecutivo arrojó tiempos de entrapamiento versus abundancia de cadenas de carbono, que se correspondieron en su totalidad con un patrón estandarizado de nafta de tipo II (nafta súper), como se

observa en la Figura 6.4.1.1 b. La altura de los picos sirve a su vez, como un método cualitativo para determinar el grado de degradación de los elementos que constituyen las naftas, por lo que se observa en la mencionada figura la similitud entre la muestra y el patrón analizado, evidenciando que la FLNA no habría permanecido mucho tiempo en un medio oxidante.

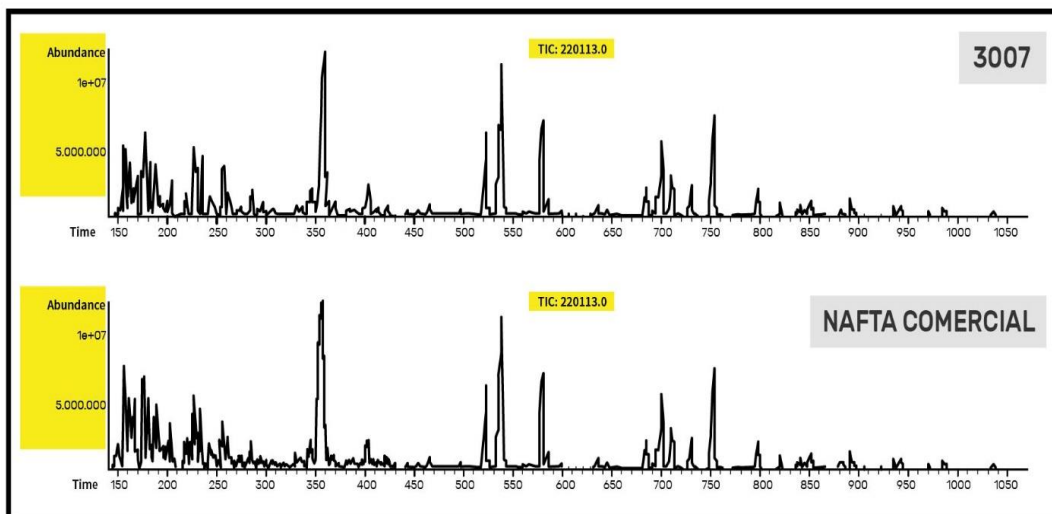


Figura 6.4.1.1.b Cromatograma Muestra 3007 Pad P15. Alem 1.

En una segunda campaña de muestreo (dos meses de producido el primer censo), se produjo un hallazgo en el punto denominado Aljibe (Figura 6.4.1.1 c) de una FLNA de color verde esmeralda, la cual fue muestreada (Muestra 3011) y derivada al laboratorio para su *screening* Cromatográfico.

Los resultados obtenidos fueron contrastados con un patrón de nafta súper (nafta grado II) y un patrón de nafta premium (nafta grado III). Como se observa en la figura 6.4.1.1.c los tiempos de atrapamiento y el contenido de carbono (ancho de los picos) indicarían claramente la presencia de una nueva FLNA con características propias de una nafta premium, sin degradación y sin signos de mezcla. Por lo que luego del segundo muestreo, en el sitio, presentaban dos plumas contaminantes procedentes del mismo foco, cuyos canales de migración habrían sido diferentes.

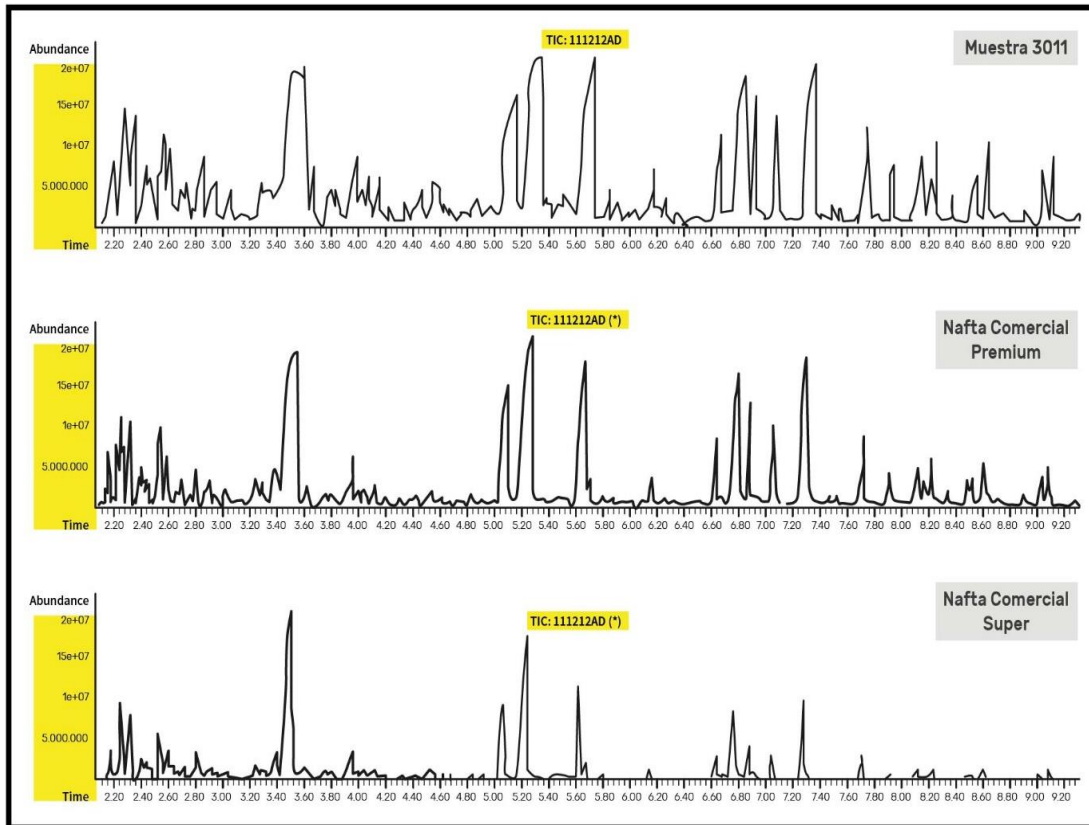


Figura6.4.1.1.c Cromatograma Muestra 3011 Versus nafta Premium y nafta súper

En una tercera campaña, realizada con una posterioridad de dos meses con respecto a la segunda, se aumentó la densidad de puntos de control, registrándose en los pozos PAD 8; PM 2, PAD 13, PADp5, PADp6, PADp4, PADp2, PAD 15, PAD 16 y aljibe (Figura 6.4.1.1.d) presencia de una fase libre no acuosa, la cual al ser analizada mostró en todos los casos cromatogramas típicos de mezclas de naftas sin degradar (Figura 6.4.1.1.d) por lo que los contaminantes registrados en campañas anteriores se habrían mezclado generando una única pluma

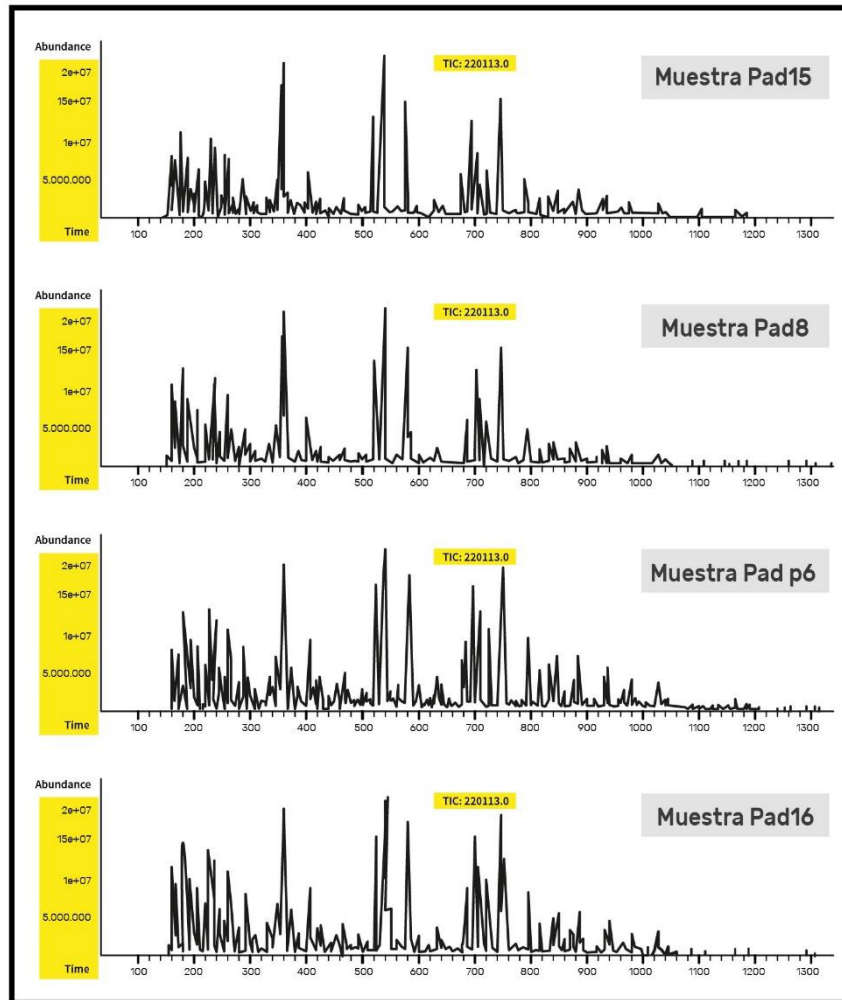


Figura 6.4.1.1.d muestras con FLNA pozos de monitoreo zona Teatro Municipal

En los pozos PM1, PM4, PM3, PM 5, PM 6, PM 7 (Figura 6.3.1.a) no se registró fase libre no acuosa, aunque los ensayos analíticos realizados a las muestras de aguas, dieron altos tenores de hidrocarburos disueltos. El pozo PM 12 fue el único que no registró contenido de hidrocarburos disueltos en ninguno de los censos ni presencia de FLNA. -

6.4.1.2 Caso de estudio “BAHÍA 1”

Durante el plan de monitoreo propuesto en el presente trabajo de tesis se descubrió FLNA de un cm de espesor en los pozos monitores PM 2 y PM 8 de la estación de servicio denominada Bahía 1 (Punto 4, Mapa 6.3.1.a y detalle en Figura 6.4.1.2.a). Los resultados de las fases muestreadas se muestran en las figuras 6.4.1.2.b

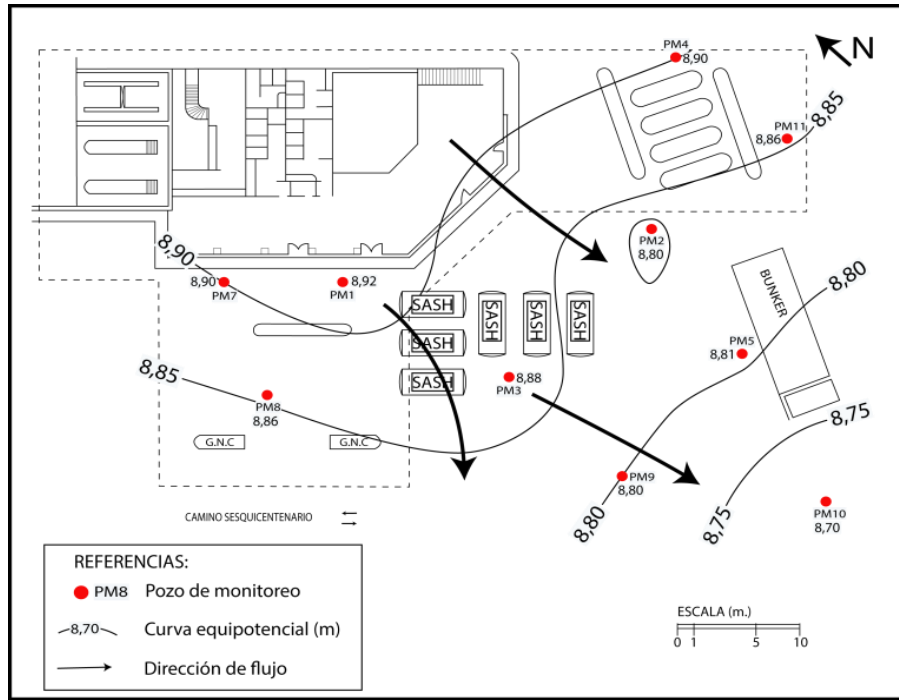


Figura6.4.1.2.a Zona de estudio Bahía 1

Se detectó en el cromatograma del PM2 (Figura 6.4.1.2.b) una FLNA de mezcla constituida por nafta-gas oil sin degradar (como se observa al enfrentarlo con un perfil patrón). En este caso y a diferencia de los cromatogramas observados en Alem 1, se aprecian mayores tiempos de retención en los entrapamientos de carbono, aspecto característico de hidrocarburos más pesados (gasoiles)

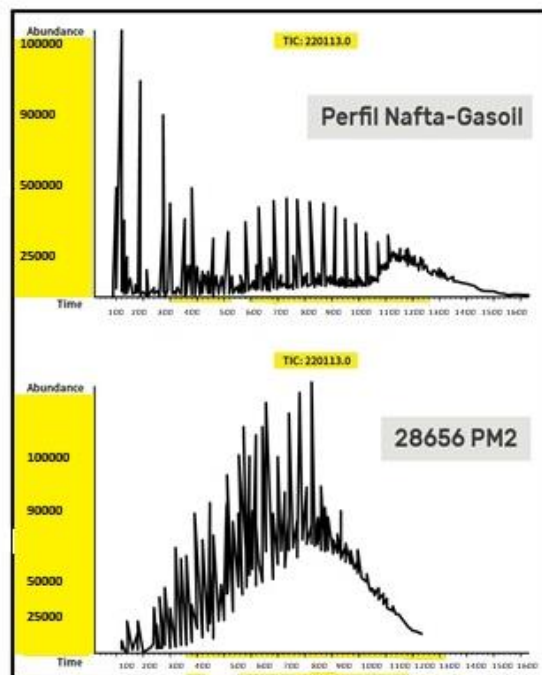


Figura 6.4.1.2.b Cromatograma PM2

La cromatografía correspondiente a la muestra de FLNA hallada en el PM8 (Figura 6.4.1.2.c.) se relaciona con una muestra con picos de nafta y gas oil, pero en ambos casos muy degradados (nótese la débil señal registrada por el cromatógrafo). Los restantes pozos muestreados no arrojaron valores de hidrocarburos por encima de los límites de referencia

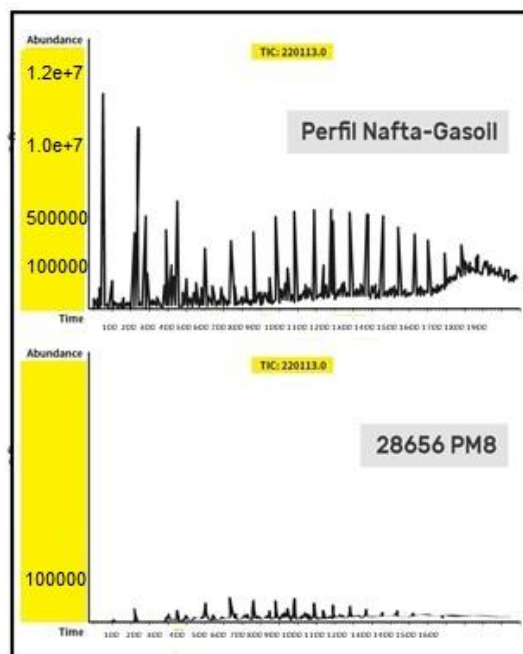


Figura 6.4.1.2.c Cromatograma Muestra 28656 PM8

6.4.1.3. Caso de estudio “CELINA”

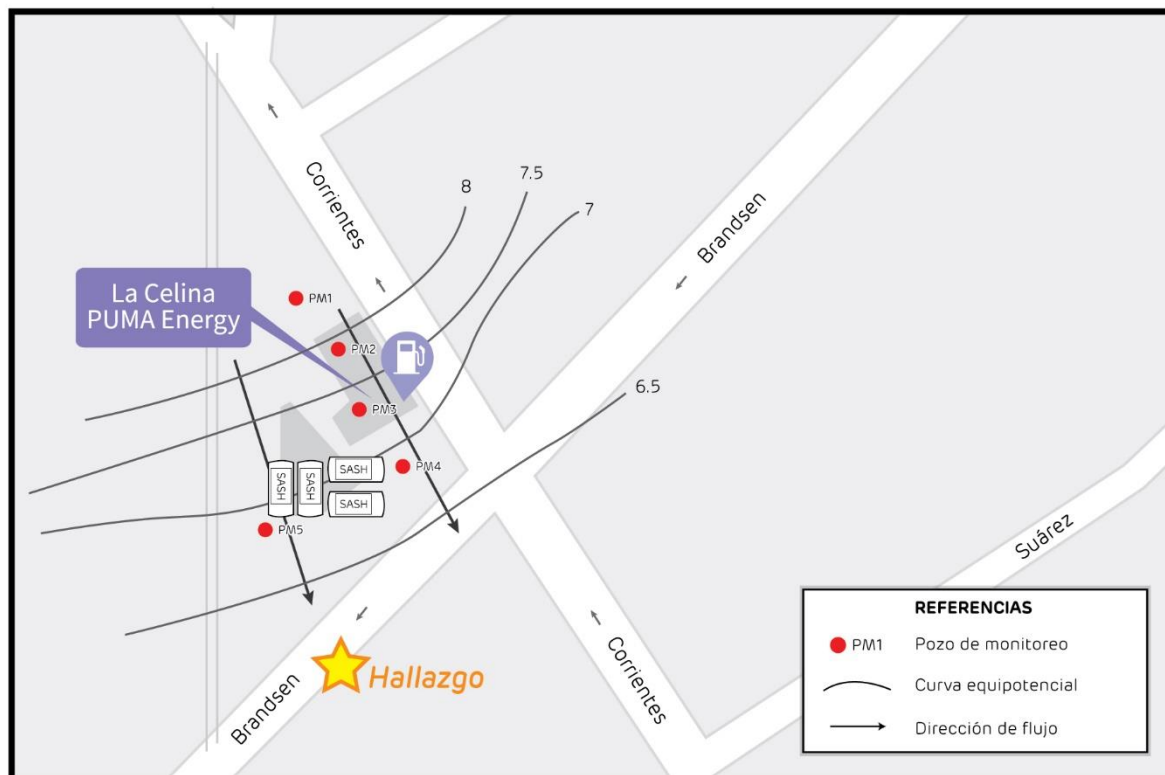


Figura 6.4.1.3.a Zona de estudio Celina

En octubre de 2014, mientras que se realizaba un zanjeo para instalar cables subterráneos de telefonía frente a la estación de servicio Celina (Punto 15, Mapa 6.3.1.a) se produjo un hallazgo de una fase libre no acuosa de color negro. El líquido fue muestreado (muestra 31529) y analizado mediante cromatografía gaseosa con FID, obteniéndose un cromatograma con tiempos de entrapamientos y altura de picos, típicos de una mezcla nafta, gasoil y un pequeño pico de un derivado de ftalato (asociado a la degradación del plástico).

Luego del hallazgo en vía pública, se muestrearon 5 pozos de monitoreo de la estación de servicio (Fig 6.4.3.1.a). En el pozo PM5 se detectó la presencia de una fase libre no acuosa de tres centímetros de espesor aparente, esta fase fue comparada mediante screening cromatográfico con la muestra 31529.

Se observó una similitud en ambos perfiles cromatográficos en cuanto al contenido hidrocarburos, determinándose mayor preservación del ftalato en el pozo 5 (Fig. 6.4.1.3.b.). La presencia de este último contaminante, sirvió como elemento diagnóstico para relacionar el foco de contaminación con el hallazgo en vía pública. Los restantes

pozos de monitoreo muestreados no arrojaron tenores de hidrocarburos por encima del límite de detección.

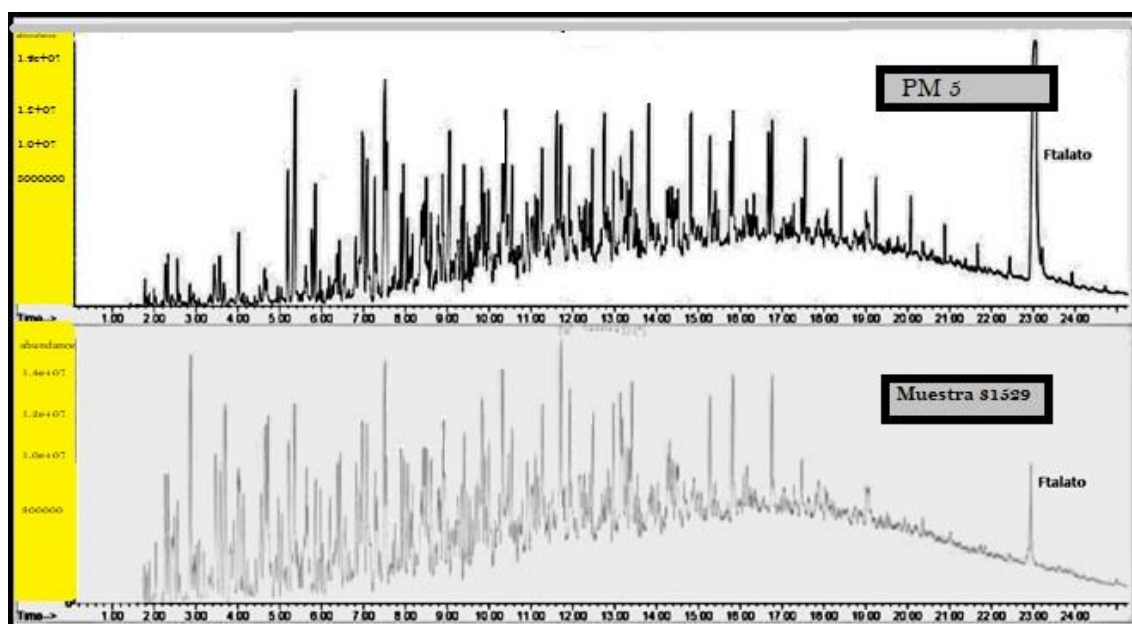


Figura 6.4.1.3.b. Cromatograma muestra 31529 versus perfil PM5.

6.4.1.4. Caso de estudio “ACÁ”

El último hallazgo registrado (punto 16, Figura 6.3.1a) fue en un sótano en un pozo con bomba de achique de la capa freática donde se registró presencia de fase inmisible con el agua. A la muestra se le realizó un *screening* cromatográfico (muestra 10207. Figura 6.4.1.4.a).

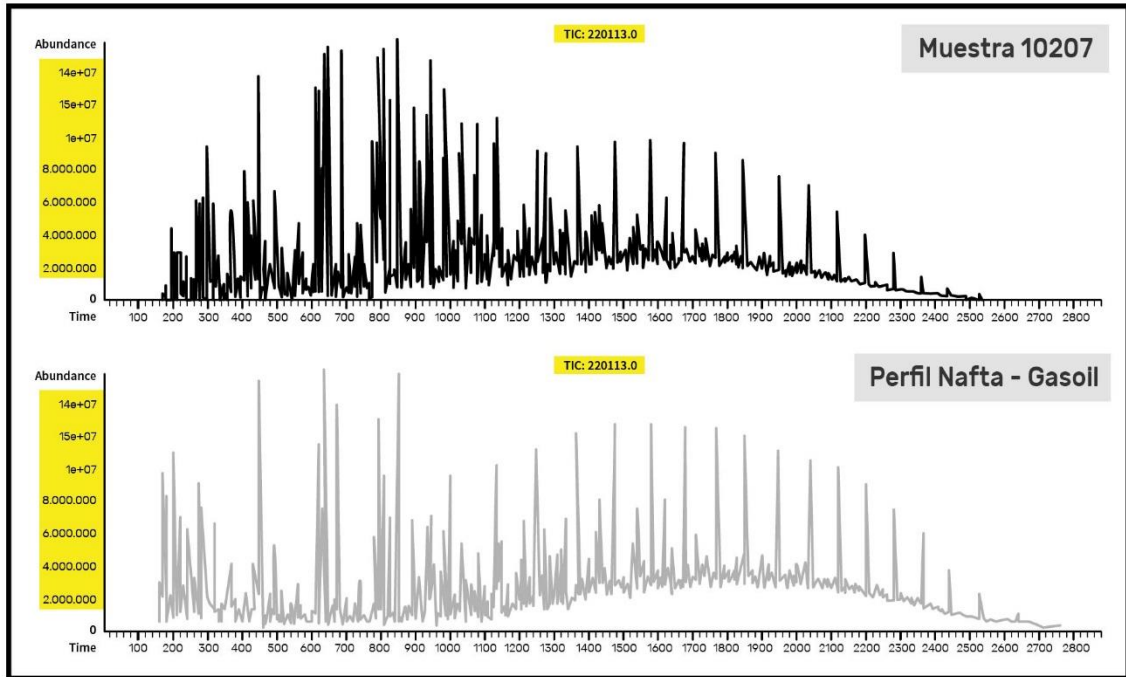


Figura 6.4.1.4.a. Comparación perfil 10207 con perfil patrón de nafta comercial.

La muestra 10207 se correspondió con una cohorte de hidrocarburo constituido por nafta y gas oil sin degradar. Si bien existe una estación de servicio enfrente del hallazgo no se disponían, al momento del mismo, de freáticos por lo que no pudo establecerse si la fase libre no acuosa provenía de la estación de servicio en cuestión. Se realizó un ensayo de hermeticidad en la totalidad de los tanques de la estación de servicio, luego del hallazgo, no detectándose pérdidas.

6.5 Transporte de Hidrocarburos Disueltos en el acuífero freático a partir de la degradación de Fases Libres No Acuosas en dos de los sitios estudiados.

Como se mencionó previamente la adsorción es el proceso más importante que afecta el transporte de los hidrocarburos en el ambiente subterráneo y es considerada, para un contaminante orgánico no polar, un proceso de equilibrio-partición entre la fase acuosa y el medio poroso. Cuando la concentración del soluto es baja (o menor que la mitad de la solubilidad), la partición puede describirse usando la isoterma lineal, donde la concentración sorbida (C_s) es una función de la concentración acuosa (C_e) es decir $K_d = C_s/C_e$ (cm^3/gr).

Para obtener los K_d fueron utilizadas soluciones con tolueno ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$) ya que es el hidrocarburo aromático de mayor presencia en las gasolinas. El estudio de adsorción de tolueno se realizó sobre muestras de suelo obtenidas en dos de las zonas con hallazgos

de Fase Libre No Acuosa (analizadas los capítulos 6.4.1.1 “Caso de estudios Alem 1” y 6.4.1.2 “Bahía 1”).

Con los datos experimentales obtenidos, se pudo calcular, para las formaciones Maldonado y Bahía Blanca, que arrojaron un Kd de 2,5 y 4,4 (cm³/gr) respectivamente. En ambos casos los valores ploteados presentaron un cierto grado de curvatura lo que podría indicar un mejor ajuste a la isoterma de Freundlich. Sin embargo, para el rango de concentraciones ensayadas, muy inferior a su solubilidad 526 mg/l (Saval *et al.*, 2004), podría aplicarse, en general, el valor de las isotermas lineales.

Existen numerosas fuentes con valores tabulados de los coeficientes Kow y koc y relaciones matemáticas entre los mismos y el Kd. Para llegar a ello es necesario la aplicación del foc, el cual fue calculado también en laboratorio y se expresa en la tabla 6.5.1.a

Tabla 6.5.1.a Características texturales y contenido de carbono orgánico

Formación	foc	% arcilla	% limo	% arena
Maldonado	0,0052	10	8	82
Bahía Blanca	0,0088	22	46	34

Una relación probada es la propuesta por Scharzenbach y Westall (1981):

$$\log \text{koc} = 0,72 (\log \text{Kow}) + 0,5 \quad (6.5.1)$$

Según Saval *et al.* (2004) para el tolueno $\log \text{Kow} = 2,8$, por lo tanto, aplicando la ecuación de advección-dispersión (Ec. 6.2.7) para una fuente continua $\text{koc} = 328$ (cm³/gr).

6.5.1 CASO 1-ALEM 1

Como se mencionó en el apartado 3.1.2.1 (geología del área de estudio) en este sitio los sedimentos atravesados corresponden a sedimentos de arenas con gravas, fragmentos de cuarcitas y calcáreos rodeados por sedimentos arcillosos y limos. La profundidad del nivel freático promedio para el momento del estudio fue de 2,1 mbbp, y la dirección general del flujo subterráneo hacia el Sur (figura 6.5.1.a).

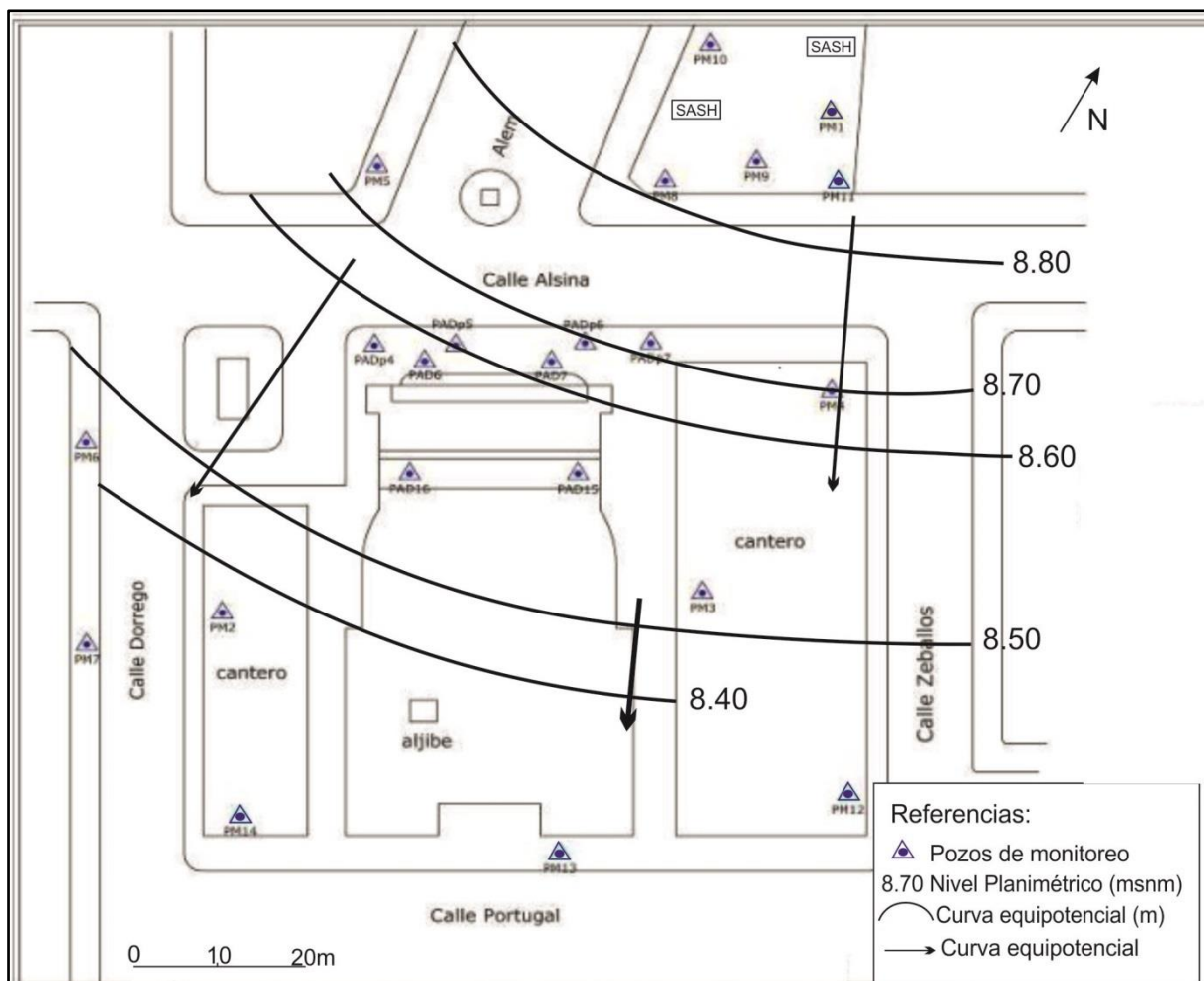


Figura 6.5.1a Esquema de situación Caso 1

Según lo descrito en el apartado 6.4.1.1 en el mes de septiembre de 2012 se detectó FLNA en los pozos de monitoreo instalados en los alrededores de los SAHS. A posteriori, en otros pozos construidos para delimitar el alcance de la FLNA, se la identificó en la dirección del flujo subterráneo hasta una distancia de 40 metros (PM 2) de la estación de servicio. Es decir que la afectación en el subsuelo, excedió los límites del predio donde se desarrolla la actividad. Desde la primera detección, que tuvo lugar en los pozos PAD 8 y PAD 13, se ejecutaron más perforaciones a fin de delimitar el alcance de la FLNA y poder establecer medidas tendientes a su extracción. Hacia septiembre de 2013 en la mayoría de los pozos se había detectado FLNA en espesores muy variables, desde 1 cm (PM 4, PADp 4, PADp 5) hasta 58 cm (PAD 15). No se detectó FLNA en los pozos PM 1, PM 3, PM 5, PM 6, PM 7, y PAD 12A.

Mediante un equipo váctor móvil se extrajeron, desde el resto de las perforaciones, diversas cantidades de combustible hasta alcanzar los 1.240 litros. Del PM 2 se extrajeron 13,5 litros entre junio 2013 a marzo 2014. Se evaluó la posibilidad de que la

FLNA solo haya alcanzado al PM 2 y de ahí se haya distribuido el producto disuelto hasta el PM 7 (a 11 metros de distancia), o bien que la FLNA haya migrado más allá, es decir a una distancia intermedia entre ambos pozos. Los pozos de monitoreo se encuentran prácticamente en una línea recta y los sedimentos atravesados, granulométricamente, son similares. (Fig. 6.5.1.1)

El gradiente hidráulico promedio para el sector es $i = 0,01$, la permeabilidad fue calculada en 1 m/d y la porosidad 0,20. Con estos valores, resulta que la velocidad real del flujo subterráneo sería 0,05 m/d. Luego, considerando $f_{oc} = 0,005$, se obtiene un $Kd = 1,64$ y aplicando la ecuación que contempla el factor de retardo (Ecuación 6.2.6) para una densidad aparente de 1,4 gr/cm³ resulta $R = 12,48$. Es decir la velocidad media de la curva de isoconcentración de 50% del tolueno ($C/C_0 = 0,5$) sería de 0,004 cm/d. De esta manera, considerando el tiempo transcurrido, desde la aparición de la FLNA en PM 2 (junio 2013) hasta la aparición de los compuestos disueltos, 0,22 mg/l, en el PM 7 (mayo de 2014), de aproximadamente unos 330 días, la misma se encontraría a 1,32 m de distancia del PM 2. Aun aplicando una dispersividad longitudinal α_l de 1 m, valor elevado para esas distancias (Lovanh et al., 2000).

De la ecuación de Ogata –Banks (Ecuación 6.2.7) resulta que en el pozo PM 7 no se debería haber detectado tolueno en fase disuelta. Por lo tanto, la FLNA, fuente continua de tolueno en solución, se encontraría a una distancia de 4 metros del PM 7 (Figura 6.5.1.2)

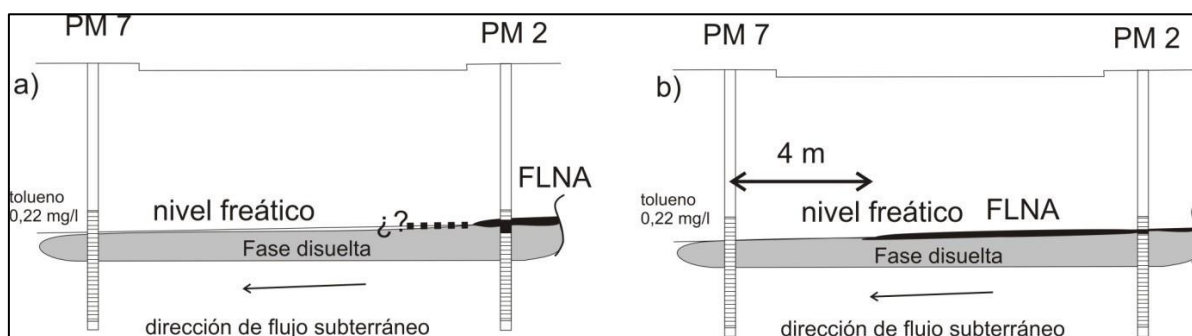


Figura 6.5.1.2. Situación inferida originalmente (a) y la estimada al aplicar el concepto de flujo dispersivo (b)

6.5.2 CASO 2 BAHIA 1

Como se mencionó en el apartado 3.1.2.1 (geología del área de estudio) los sedimentos identificados en el área corresponden a arenas y limos arenosos friables, en la base, algo calcáreos. La profundidad media del nivel freático es de 1,27 m y la dirección

general del flujo subterráneo es sur (Figura 6.5.2.a). En este sitio, para el mes de mayo de 2012, no se había registrado FLNA (tal como fuera mencionado en el apartado 6.4.1.2) en ninguno de los pozos de monitoreo, aunque sí tolueno, salvo en el PM 5 y PM 6 (este último al NE del PM 4 y fuera del área representada en la figura). Las concentraciones fueron muy variables, desde 21,7 mg/l en PM 1, hasta 0,03 mg/l en PM 4.

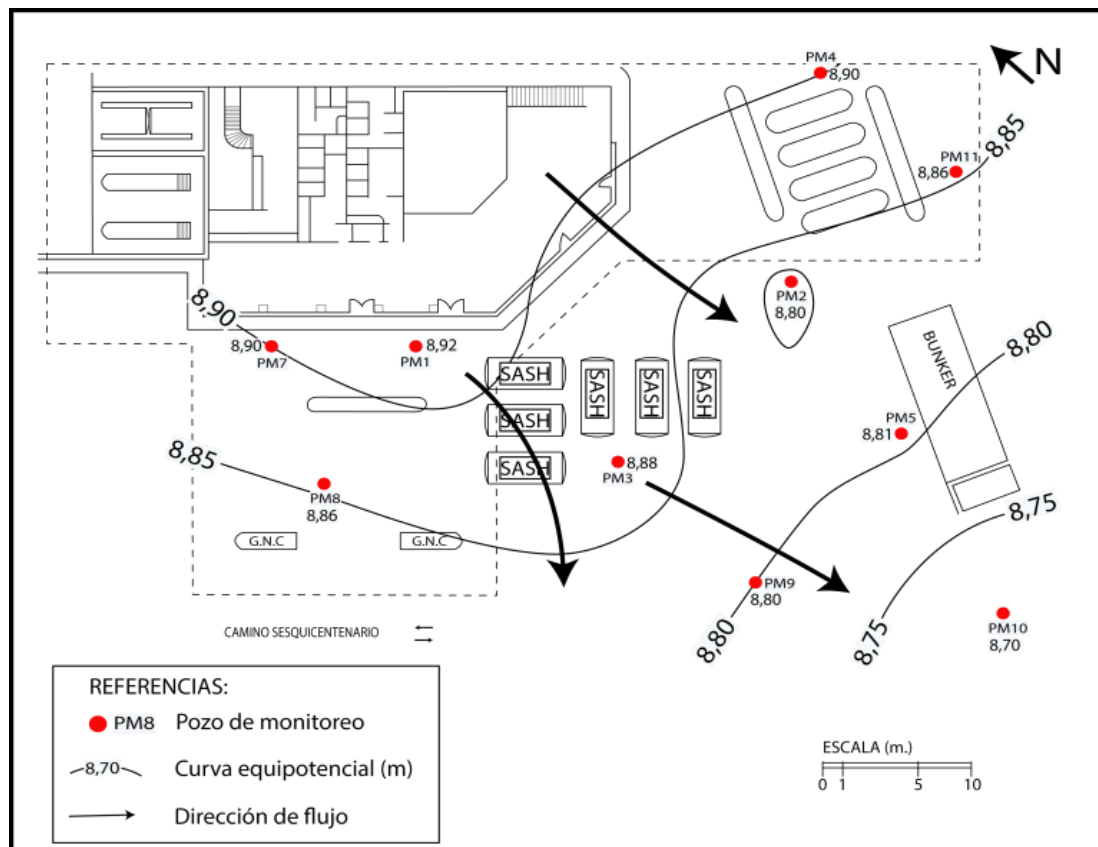


Figura 6.5.2.a Esquema de situación Caso 2

Todo el ámbito evaluado está comprendido dentro del área de la playa de la estación de servicio, es decir, que a los efectos de la elaboración de un modelo hipotético de transporte los puntos de aporte o fuentes de producto disuelto pueden ser más y podrían comprender: FLNA, en saturación residual en zona no saturada y aportes por vuelcos o derrames, las detecciones de FLNA se produjeron en los pozos PM 2, PM 4 y PM 11 que corresponden al sector de despacho de diesel ubicado al oeste del predio. Los pozos en donde se detectaron concentraciones de combustible disuelto, entre ellos tolueno, fueron todos menos el PM 5 y PM 6. En este caso se evalúa como fuente de FLNA el sector de despacho de naftas y se toma como referencia el PM 9 que está ubicado a unos 15 metros aguas abajo según el flujo subterráneo (Figura 6.5.2.1). Hay

que destacar que en el PM 3, próximo al despacho de naftas, solo se detectó producto disuelto.

El gradiente hidráulico promedio para el sector es $i = 0,005$, con una permeabilidad determinada de 1 m/d y una porosidad eficaz $n_e = 0,20$, resultando la velocidad real del flujo subterráneo de 0,025 m/d. Luego, considerando un f_{oc} de 0,005, se obtiene un K_d de 1,64 y aplicando la ecuación 6.2.6 con una densidad aparente de suelo de 1,4 gr/cm³ resulta $R = 12,48$. Es decir la velocidad media de la curva de isoconcentración de 50% del tolueno ($C/C_0 = 0,5$) sería de 0,002 cm/d. Si por ejemplo se toma un tiempo de tránsito aproximado de 360 días, la curva $C/C_0 = 0,5$ se encontraría a 0,72 m de distancia. De acuerdo a la ecuación de Ogata-Banks (Ecuación 6.2.7) y si en el PM 9 se detectaron 0,13 mg/l, considerando también una dispersividad longitudinal $\alpha_l = 1$ m, resulta que la fuente de FLNA debería haberse encontrado a 2,8 m de distancia del mismo (Figura 6.5.2.2).

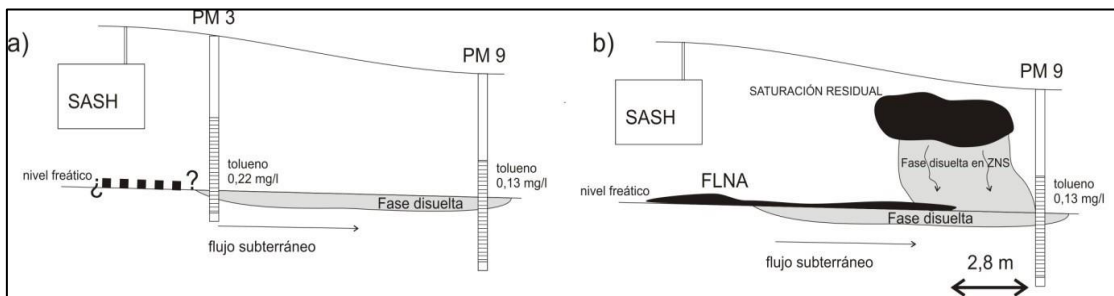


Figura 6.5.2.1. Situación inferida originalmente (a) y la estimada al aplicar el concepto de flujo dispersivo (b)

Los resultados indican que pudieron haber existido al menos dos fuentes de FLNA: pérdidas o filtraciones desde superficie y/o roturas de los SASH (Figura 6.5.2.b). Las primeras, aunque no hayan alcanzado la capa freática, contribuyen por lixiviación de los hidrocarburos solubles por parte del agua infiltrada al entrar en contacto con la fracción retenida como saturación residual. Las originadas a partir de pérdidas directas de los SASH podrían haber provocado la migración de la FLNA a través de vías preferenciales, cambios texturales en el sedimento acuífero, por sectores próximos al PM 3, que hayan permitido su desplazamiento hasta proximidades del PM 9.

6.6. Evaluación de la degradación de Hidrocarburos hallados en fase libre no acuosa a través del estudio de biomarcadores

El pristano y el fitano son hidrocarburos isoprenoides que están formados exclusivamente por átomos de hidrógeno y carbono, pero, a diferencia de los hidrocarburos lineales, se unen formando una estructura ramificada. Estas ramificaciones son las responsables de que las bacterias no puedan utilizar ni degradar estas sustancias fácilmente, por lo que son considerados marcadores biológicos ya que forman parte del agente contaminante, y se comportan igual que el hidrocarburo que se quiere remediar, pero no son atacados o serían los últimos componentes del contaminante en serlo por acciones biológicas (Ortiz *et. al*, 2003).

Estudiar la relación de los n-alcenos normales respecto a n-alcenos ramificados es una herramienta de suma utilidad. Esta relación se determina calculando la relación del peso entre un hidrocarburo de biodegradación fácil, principalmente los n-alcenos de 17 y 18 átomos de carbono (n-C₁₇ y n-C₁₈) y un hidrocarburo que se biodegrada con mayor lentitud, generalmente el pristano (Pr) y fitano (Ph). Se seleccionan estos elementos para realizar las comparaciones debido a que son los isoprenoides más abundantes en el petróleo. Se emplean, por tanto, las relaciones n-C₁₇/pristano o n-C₁₈/fitano, aunque es preferible emplear la última, ya que, en ocasiones, el agua del mar presenta pristano de forma natural. El estudio con isoprenoides, se basa en que, por un lado, la mayor parte de procesos como meteorización, lixiviación, infiltración no producen pérdidas de hidrocarburos alifáticos ramificados y su velocidad de degradación es menor que en los alcenos lineales. Por lo tanto, estudiando la evolución en el tiempo del ratio n-C₁₈/fitano, se puede estimar el grado de biorrecuperación de una zona afectada por derrame, como así también en muchos casos nuevos aportes de contaminantes al medio estudiado (Ortiz *et. al*, 2003).

Su desaparición es exclusivamente por causas físicas como la evaporación, la foto oxidación, etc. El pristano y el fitano se comportan igual que los hidrocarburos lineales con un número de átomos de carbono similar al suyo; concretamente se comportan igual que el C₁₇ y el C₁₈. Sirven también para establecer la antigüedad de un derrame, ya que permiten inferir la evolución de la degradación de hidrocarburos. En las primeras etapas, es de utilidad analizar la degradación de los hidrocarburos alifáticos, mientras los hidrocarburos aromáticos registran signos de degradación a más largo plazo (Ortiz *et al.*, 2003).

Se tomaron como pozos testigo los pozos consignados en el mapa de la figura 6.6.1.a
 En la tabla 6.6.1.a se resume el inicio del estudio, el final y la cantidad de muestras obtenidas para su análisis.

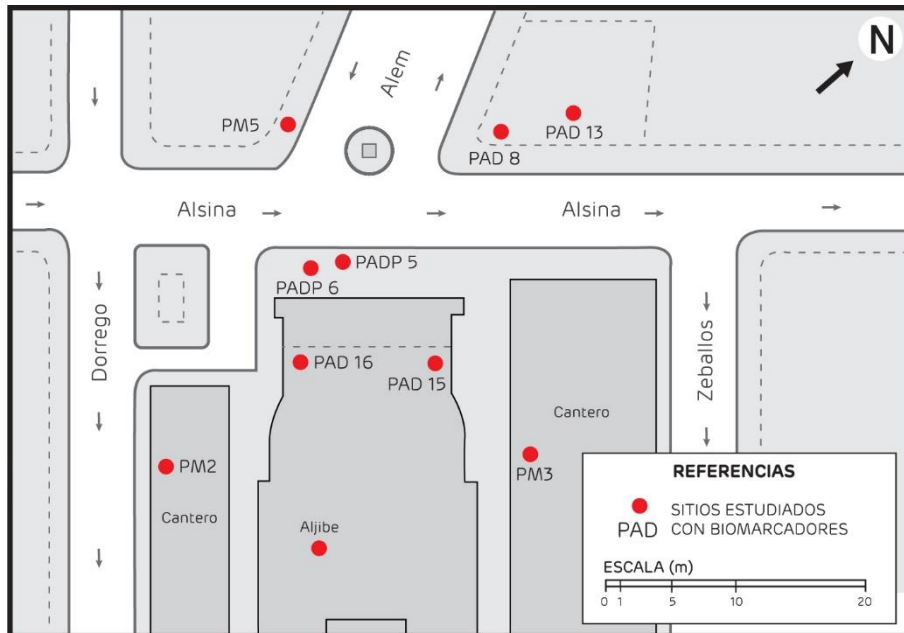


Figura 6.6.1a Mapa de Pozos en los cuales fueron estudiados biomarcadores “Alem 1”

Tabla 6.6.1.a Pozos estudiados con biomarcadores

Pozo	Inicio Muestreo	Final Muestreo	Cantidad de Muestras analizadas	Observaciones
PAD 8	10/12	8/13	8	Desaparición FLNA- Pozo destruido
PAD13	10/12	9/13	9	Desaparición FLNA-Pozo destruido.
PADP5	01/13	06/13	6	Desaparición FLNA. Jul-13
PADP6	01/13	02/14	13	Desaparición FLNA Mar-14
PM2	6/13	02/14	7	Desaparición FLNA Mar-14
PAD15	9/12	10/13	12	Desaparición FLNA Nov-13
PAD16	9/12	02/14	15	Desaparición FLNA Mar 14
ALJIBE	8/13	11/13	3	Desaparición FLNA Dic-13

Teniendo en cuenta el mapa de ubicación de pozos (Figura 6.6.1.), se observa que los pozos más cercanos a la estación de servicio son el PAD 8 y PAD 13. En el último pozo mencionado, se evidencia (Figura 6.6.2.b) que el fitano experimenta una leve disminución desde el primer muestreo al segundo. Ello podría estar dado por la degradación de la fase existente y estaría asociada a fenómenos de oxidación y evaporación. Cuatro meses posteriores al primer muestreo, se observa un incremento notable en el valor de fitano que se relaciona con un nuevo aporte de contaminante. Esto sería concordante con los resultados cromatográficos obtenidos para la segunda campaña de muestreo realizada en la zona aljibe y descrita en el capítulo anterior. Se observa también que la relación pristano no registró cambio alguno.

En el PAD 8 (Figura 6.6.2.a) se observa un decaimiento de ambas relaciones durante las primeras cuatro campañas. Esto puede ocurrir por dos causas, la primera, su ubicación con respecto al segundo pulso contaminante, al estar al SO del mismo no habría recibido el aporte de la nafta premium hallada en el aljibe. Mientras la segunda causa, se relaciona a la interrupción del suministro de la FLNA que constituyó el primer hallazgo. Por lo que, la presencia de fase libre no acuosa sería un remanente de la nafta del primer evento, la cual estaría degradándose por causas de evaporación.

Un aumento en el pristano se registra con un retardo de 3 meses con respecto al PAD 13, indicando un desplazamiento de la segunda pluma contaminante, que se habría convertido en una pluma de mezcla, tal como lo indicaría la Figura 6.4.3 del capítulo caracterizaciones cromatográficas de fases libres (cromatogramas de mezcla).

El PAD P6 (Figura 6.6.2.d) aguas abajo del PAD 13, fue muestreado a partir de la cuarta campaña y registró valores acordes a los pozos aguas arriba. Su aumento considerable en los biomarcadores, se produce a partir de la séptima campaña general (y tercera de este pozo), permitiendo inferir la llegada de un producto con menor degradación. Esto indicaría, el aporte de un nuevo pulso contaminante, que coincidiría también con los análisis cromatográficos que para la fecha estarían mostrando una mezcla de las plumas.

Todas las mediciones realizadas posteriores mostraron un decrecimiento, que indican una degradación de la nueva fase existente (compuesta por mezcla y la ausencia de nuevos aportes).

El PADP5 (Figura 6.6.2.c.) habría registrado la migración del nuevo aporte de fase libre no acuosa en la séptima campaña de muestreo (Abril 2013), en este caso el pristano duplicó su valor con respecto a determinaciones anteriores.

Los pozos de monitoreo PAD 16 y PAD 15 (Figuras 6.6.2.F.y 6.6.2.G) registraron en la cuarta campaña (al igual que el PAD 13) un aporte significativo de los valores de pristano y fitano. Si bien estos pozos están más alejados del foco contaminante la presencia de esta nueva fase podría deberse a una migración preferencial por zonas con mayor permeabilidad.

El PM2 (Figura 6.6.2.d.) fue perforado en la novena campaña de muestreo (9 meses después del primer hallazgo). Los valores de biomarcadores que se obtuvieron en el primer muestreo indican la presencia de una fase no acuosa no degradada (alta relación de fitano). Cabe destacar, que simultáneamente, se estaban realizando tareas extracción de combustibles mediante el empleo de vactor (dispositivos que utilizan el sistema de vacío para extraer la fase libre no acuosa de pozos). Esto podría haber propiciado la migración de nafta con menor degradación, por lo que la ausencia de degradación estaría asociada al evento extractivo de fase.

El aljibe (Figura 6.6.2.H), punto en el cual se descubrió la presencia del segundo tipo de FLNA, mantuvo niveles similares en sus biomarcadores desde su hallazgo hasta su desaparición 10 meses después. La ausencia de degradación permite asumir las mismas circunstancias ocurridas en las FLNA de los pozos PAD 15 Y 16.

Contaminación de hidrocarburos livianos en el acuífero freático de Bahía Blanca

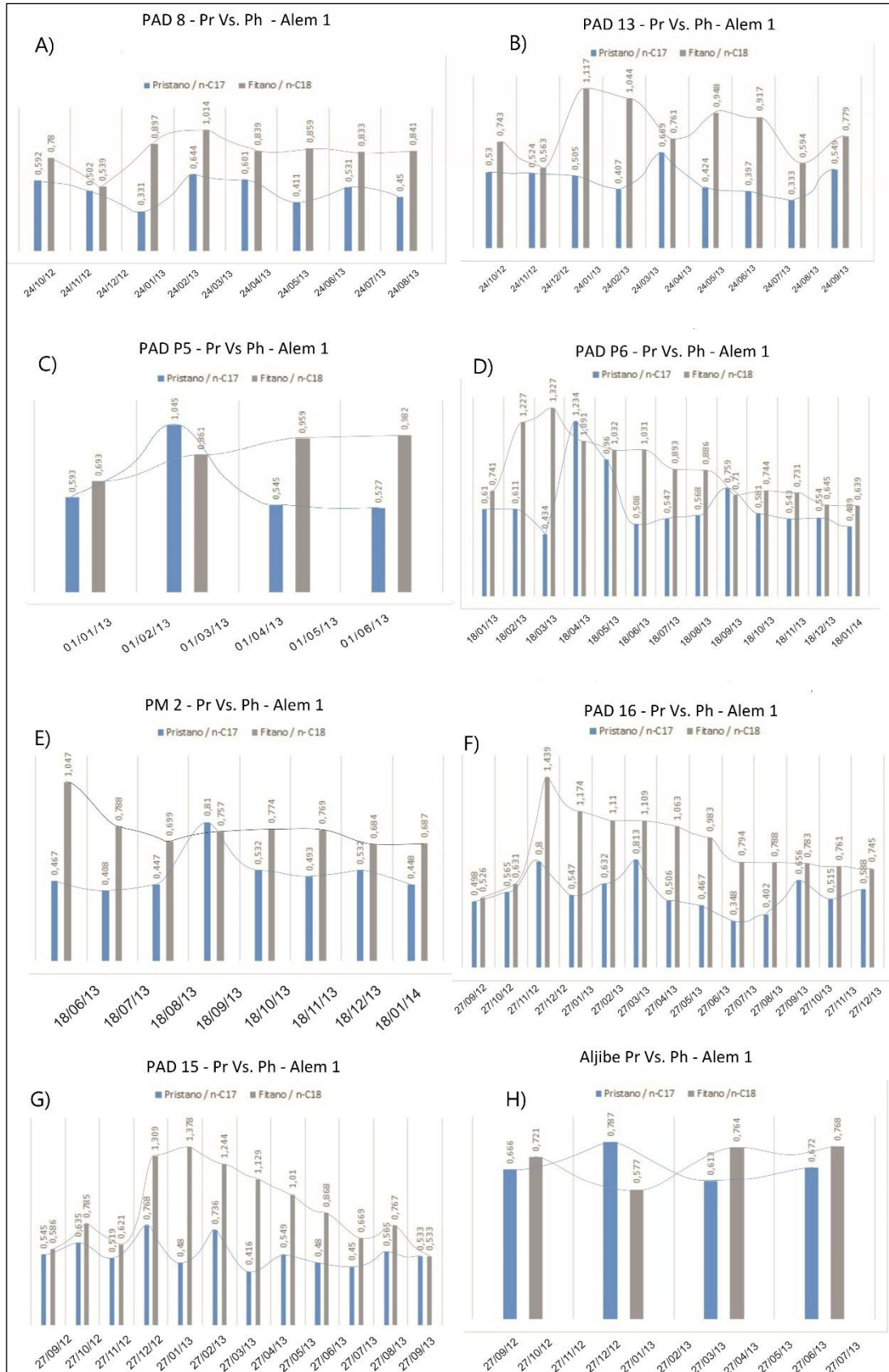


Figura. 6.6.2 Relaciones de isoprenoides obtenidas para los pozos de observación

CAPÍTULO 7. ACCIONES CORRECTIVAS DE REMEDIACIÓN BASADAS EN EL RIESGO A LA SALUD HUMANA

Como se ha visto en los capítulos precedentes han sido y le son en numerosos los casos en que los sistemas SASH han perdido hermeticidad en nuestra ciudad, generándose una afectación directa al subsuelo. Independientemente del volumen de hidrocarburo que haya sido diseminado al medio, siempre constituirá un residuo especial y por ende deberán realizarse acciones correctivas para sanear el sitio. La evaluación de los contaminantes en el subsuelo para dar inicio a una remediación suele generar controversias entre el Estado, con poder de policía, para exigir las tareas remediadoras y el operador del sitio donde se produjo la pérdida, quien tiene la obligación de pagar los daños ocasionados a terceros y remediar.

Una remediación es un proceso muy costoso y complejo desde dos aspectos: uno técnico y otro jurídico. El primero de ellos, se genera porque no hay un protocolo específico sobre que substancia utilizar como guía en la remediación. Esto ocurre porque, una vez que es eliminada la fase libre no acuosa, aún resta, por extraer, una gran cantidad de tipos de hidrocarburos disueltos en el acuífero que no presentan el mismo comportamiento ni estabilidad en el tiempo. Muchas veces pueden generarse falsas interpretaciones sobre una remediación exitosa, cuando en realidad, los hidrocarburos prospectados siguen presentes pero degradados. Los isoprenoides solo son de utilidad en presencia de fase libre. También, hay muchos aspectos en cuanto a las tecnologías a utilizar, ya que existen innumerables tratamientos *in situ* para hidrocarburos disueltos, como puede ser utilización de: bacterias, peróxido de hidrógeno, oxidación química, surfactantes y la atenuación natural. Éste último, si bien no es considerado un método de remediación en sí, es debido a la capacidad de degradación de un medio hospedante de un contaminante que puede contribuir con eficiencia en el proceso de remediación.

Como se ve, la cantidad de variables que se conjugan al momento de iniciar acciones correctivas son muchas, por lo que aunar criterios para analizar el avance de la remediación, es dificultoso. Este aspecto está ampliamente discutido en la bibliografía científica y quizás el protocolo más recomendado, parte de comenzar utilizando un parámetro global como son los Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP), para luego estudiar sus fracciones si se producen hallazgos considerables. Muchas veces también se recomienda, además de utilizar un parámetro global, realizar el estudio de una fracción de los mismos, siendo generalmente los aromáticos ligeros Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno, los elegidos por la toxicidad demostrada. La disminución de los

valores de las fracciones de hidrocarburos se traduciría en un buen trabajo de remediación pero el tiempo de disminución y el nivel de limpieza esperable es lo que genera la controversia jurídica, ya que la Norma Argentina, presenta un vacío en lo que a sitios contaminados respecta.

En la Argentina, existe la Ley 24.051 de Residuos Peligrosos, sancionada en 1992 y reglamentada por el Decreto 831/1993; en él se definen los cuerpos receptores, que son aquellos que permiten el desarrollo de actividades tales como suministro de agua al hombre y ganado, agricultura (irrigación), industria, pesca, acuicultura, generación de energía, preservación de la flora y fauna y los niveles guía (límites permisibles) de sustancias contaminantes en cada uno de ellos.

La ley tiene muchos puntos que no se consideran, por ejemplo, el agua subterránea no es considerado un cuerpo receptor, por lo que cualquier contaminante que se prospecte para remediar en el recurso hídrico subterráneo, no tiene un nivel guía para basarse. Una solución ha sido basarse en los niveles permisibles para suministro de agua al hombre para su bebida, aunque la mayoría de los acuíferos freáticos que se remedian, son someros y sus aguas no suelen ser utilizadas para el consumo humano, por lo que tender a esos valores de limpieza eroga grandes costos, cuando el precepto es remediar a condiciones que quizás no se cumplían físicoquímica ni microbiológicamente antes de un derrame.

Otro problema que surge, es que no solo no hay valores guías para el agua subterránea, sino que tampoco hay valores guías para muchos contaminantes asociados a hidrocarburos. La ley, establece que ante casos no contemplados en la norma nacional se deberá recurrir a estándares internacionales, no indicando ninguno en particular, y existen tantos estándares internacionales como tipos de contaminantes.

Un criterio tomado por el Organismo Para el Desarrollo Sostenible (OPDS) de la Provincia de Buenos Aires a través de su disposición N°95/2014 ha sido tomar como referencia para fijar niveles de limpieza la Norma Holandesa, conocida públicamente, como Tabla de Holanda. En ella se fijan criterios guías según el uso catastral que se le dé al terreno y en la norma del OPDS se fija como valores permisibles en aquellos acuíferos que no son utilizados como fuente de consumo humano, valores hasta 10 veces superiores a los fijados por Guía holandesa. Los niveles sugeridos en la mencionada norma, por ejemplo, para hidrocarburos totales de petróleo disueltos en agua es de 0,6 mg/l, (y con la tolerancia incorporada por OPDS) convierte a los parámetros de limpieza en prístinos, volviendo las remediaciones interminables para acuíferos, que como se mencionara, no son utilizados ni siquiera para riego.

En coincidencia con Pinedo (2014) y Khan *et al.* (2004) los procedimientos de remediación de un emplazamiento contaminado pueden llegar a tener costos muy elevados. Sin embargo, no en todos los casos la remediación es la mejor opción, ya que pueden existir riesgos aceptables incluso a muy altas concentraciones (Van Wezel *et al.*, 2007).

Por ello, una correcta caracterización del problema de contaminación resulta de gran importancia a la hora de tomar la decisión más adecuada (Pinedo *et al.*, 2013a). Se deben establecer los aspectos que rodean al fenómeno de contaminación, así como las herramientas necesarias para su evaluación (IHOBE, 2002). Más allá de los valores arbitrarios fijados por la Ley o los estándares nacionales, se puede analizar el medio, cuantificando y evaluando los riesgos a la Salud Humana asociados con los emplazamientos contaminados y así fijar acciones correctivas y de limpieza basadas en los riesgos toxicológicos y/o cancerígenos que un contaminante pueda producir en un ser humano teniendo en cuenta diferentes vías de exposición.

La correcta evaluación de los riesgos para la salud humana y los ecosistemas requiere la comprensión de la toxicología de los contaminantes (Verbruggen *et al.*, 2008; Burgess, 2013). Las concentraciones de las fracciones de TPH se pueden emplear para determinar los riesgos humanos y medioambientales (Bacocchi *et al.*, 2010; Park and Park, 2011; Pinedo *et al.*, 2012b). Estos riesgos deben ser calculados con una herramienta que se adecue a las necesidades del análisis. En los últimos años se han desarrollado un gran número de modelos de análisis de riesgos para la salud humana. Uno de ellos es el modelo RBCA (Risk-Based Corrective Actions o de acciones correctivas basadas en el riesgo) Tool Kit for chemical releases, que fue desarrollado por la Sociedad Americana de Ensayo de Materiales (ASTM) en los Estados Unidos (EEUU) y es ampliamente utilizado en todo el mundo (Tsai *et al.*, 2011).

El proceso RBCA está dividido en tres niveles de investigación (Tier 1, Tier 2 y Tier 3), donde cada uno de ellos involucra la obtención de información más detallada que en el nivel anterior. En principio se realiza una investigación relacionada con la historia del sitio y del derrame (Preliminary site assessment). Se plantea la ubicación de la fuente de contaminación y de los receptores, la identificación de las vías de transporte y de exposición, los usos futuros del predio. Con respecto al medio físico se reconoce la hidrogeología regional y las características geológicas regionales (profundidad a la capa freática, extensión del acuífero, dirección del gradiente hidráulico, calidad del suelo y el agua subterránea, uso real y/o potencial del acuífero, etc.). Finalmente se hace referencia al tipo de producto químico derramado, el volumen y el área del derrame, los

usos y la ubicación de las propiedades vecinas, el tipo de sistema de abastecimiento de agua potable de los receptores, los usos locales de los recursos impactados por el derrame, etc. (Poggio, 2006).

Luego de relevadas estas características del sitio, el mismo se clasifica en términos de su necesidad de aplicación de acciones de respuesta inmediata. De esta forma, la clasificación 1 estará relacionada, por lo general, con acciones inmediatas de remediación; las clasificaciones 2 y 3 involucrarán acciones de remediación a corto o mediano plazo, o acciones de monitoreo, mientras que la clasificación 4 estará vinculada con acciones sólo de monitoreo u otras a desarrollarse de acuerdo al caso particular (Poggio, 2006).

En el primer nivel de investigación "Tier 1" se desarrolla un modelo conceptual del sitio y se evalúan las fuentes de contaminación, los mecanismos de transporte, las vías de exposición y los receptores. Los niveles de contaminación existentes en el predio se comparan con los niveles guía no específicos para el sitio (Risk-Based Screening Levels (RBSL)), que están en la base de datos del software y fueron desarrollados mediante parámetros toxicológicos, físicos y de exposición estándar. Si los niveles de contaminación presentes en el sitio son mayores a los RBSL, se puede decidir remediar hasta estos niveles guía o buscar objetivos de remediación sitio-específicos, a través del nivel de investigación "Tier 2".

En esta fase de la investigación se desarrollan valores de riesgo para los receptores, relacionados con el padecimiento de enfermedades inherentes a los compuestos presentes en el sitio. Estos valores son, a su vez, comparados con estándares presentes en la norma ASTM, como ser el riesgo de padecer cáncer, que se fija como aceptable entre 10^{-4} y 10^{-6} , es decir, entre 1 en 10.000 y 1 en 1.000.000. Se desarrollan objetivos de remediación sitio-específicos basados en el riesgo. Los niveles de contaminación existentes en el predio se comparan contra estos objetivos y si los mismos son mayores a los objetivos (o SSTLs, Site Specific Target Levels) desarrollados, se puede remediar hasta estos niveles o buscar nuevos objetivos de remediación sitio-específicos, a través del nivel de investigación Tier 3. Esto último es muy poco frecuente, ya que los niveles de limpieza que suelen surgir del Tier 2 son por lo general suficientes para sanear un sitio contaminado con hidrocarburos.

Para la presente tesis, se tomaron tres emplazamientos que han sido analizados precedentemente, dos de ellos por poseer fase libre no acuosa (Alem 1 y Bahía; Fig. 5.2.1), y el tercero donde se determinó hidrocarburo disuelto en la capa freática (Liniers; Fig 5.2.1). Cabe destacar que para la realización de los cálculos de niveles de limpieza,

en primer lugar se tomó como criterio extraer la totalidad de FLNA, ya que la mera presencia de ésta, en el acuífero, requiere de acciones correctivas y de monitoreo para poder establecer los parámetros físico químicos de comportamiento.

Los SSTLs determinados en agua freática fueron calculados para los analitos de interés en los monitoreos efectuados en el último censo realizado en 2015 y de los analitos que presentaron concentraciones superiores a los respectivos límites de cuantificación de los métodos analíticos. De este modo, en relación al agua freática se consideraron Benceno, Tolueno, Etlbenceno, Xileno (BTEX), Metil-terbutil-éter (MTBE), Naftaleno, Acenafteno, Fluoreno, Fenantreno, Pireno y el parámetro Hidrocarburos Totales de Petróleo (HTP).-

7.1. Modelo Conceptual del Sitio

El Modelo Conceptual del Sitio (MCS) describe la fuente, los mecanismos de transporte, rutas/vías de exposición y receptores. El análisis se completa para receptores dentro y fuera del sitio (si es que fuese necesario) y para las condiciones actuales y potenciales de uso del suelo. Este análisis ayuda a focalizar la investigación en aquellos analitos de interés y rutas/vías de exposición que generan o puedan generar riesgo a la salud humana.

Se realizó el modelo sobre tres estaciones de servicio, con predios superiores a 500 metros cuadrados, con expendio de combustibles líquidos de cohorte Nafta Súper, Nafta Premium y Diesel. Se consideró en todos los casos también la existencia de un local comercial dentro del sitio. No se tomaron en cuenta pozos de agua subterránea para consumo, pero sí, en el sitio Liniers, se contempló el uso del agua subterránea para el llenado de las piletas del natatorio

En la Tabla 7.1. se resume las características de los sitios analizados y los contaminantes prospectados

Tabla 7.1 Características de los Sitios Analizado

PARÁMETRO	SITIO		
	ALEM 1	LINIERS	BAHIA 1
Zonificación	Residencial	Residencial	Industrial
Precipitaciones (1964-2015)	648mm	648mm	648mm
Sedimentología	Arenas y gravas interdigitadas con paquetes de arcilla y limo. Variaciones texturales laterales muy acentuadas	Malange textural en los primeros dos metros (gravas, arenas, limos y arcillas) que luego de los dos metros se estabiliza en limos arenosos con intercalaciones de limos arcillosos	Arenas y limos arenosos friables con cementación calcárea
Profundidad del acuífero	1,9 metros	2 metros	1,1 metros
Agua Superficial	A 800 metros NO metros A°Napostá (entubado)	500 metros NE A°Napostá	2100 metros Estuario de Bahía Blanca
Estructuras Subterráneas Cercanas	SI- Teatro Municipal	NO	NO
Fuente de contaminación	Hidrocarburo Liviano asociado al Corte GRO	Hidrocarburos Aromáticos livianos (BTEX)	Hidrocarburos Aromáticos Livianos asociados al Corte DRO
Analitos Utilizados	BTEX, HTP, PAH's	BTEX, HTP	BTEX, HTP, PAH's

7.1.2 Nivel de Riesgo

Para los compuestos cancerígenos, el riesgo se expresa en términos del Riesgo Incremental de Cáncer (R), que es la probabilidad incremental que un individuo desarrolle cáncer en su vida debido a la exposición a un químico carcinogénico. Matemáticamente se expresa como el producto entre el factor de pendiente (*slope factor*) del compuesto y la dosis media diaria a lo largo de la vida, o bien entre la concentración de exposición y el Factor Unitario de Riesgo (URF) en lo que atañe a la vía de inhalación. El rango de riesgo aceptable se encuadra entre 1×10^{-4} y 1×10^{-6} , aceptándose internacionalmente un valor de 1×10^{-5} .

En el caso de los compuestos no-cancerígenos, el riesgo se expresa en términos del Cociente de Peligro (Hazard Quotient o HQ por sus siglas en inglés), que es la relación entre el nivel de exposición a una sustancia (dosis o concentración) en un período de tiempo especificado y la Dosis de Referencia (RfD) o la Concentración de Referencia (RfC) derivada para el mismo período de tiempo para esa misma sustancia. El valor HQ aceptable para compuestos individuales es igual 1, habiéndose adoptado este valor para cada compuesto de interés considerado.

En síntesis, en la siguiente tabla se indican los riesgos aceptables utilizados en los

cálculos realizados:

Tabla 7.1.2 a Valores aceptables de riesgo individual

Riesgo Individual	
Compuestos Cancerígenos	Compuestos No Cancerígenos
$R = 1 \times 10^{-5}$	HQ = 1

7.2. Escenarios de Exposición

7.2.1. Evaluación de las Rutas de Exposición

Una ruta potencialmente completa de exposición consiste en tres condiciones:

- Una fuente de analitos de interés.
- Un medio de transporte de los analitos de interés.
- Un punto de contacto de los analitos de interés con un receptor.

Si cualquiera de dichas condiciones está ausente, no habrá exposición a los analitos de interés y la ruta de exposición se considerará incompleta. Consecuentemente, los niveles objetivo específicos del sitio o SSTLs son sólo calculados para las rutas de exposición potencialmente completas.

La Tabla 7.2.1.a resume las fuentes secundarias (medio físico afectado), rutas/vías de exposición y receptores, los cuales en su conjunto conforman el Modelo Conceptual del Sitio (MCS).

Tabla 7.2.1 a Medio fuente, rutas de exposición y receptores. Ingestión del agua subterránea.

Medio Fuente	Ruta de Exposición	Receptor	Clasificación de la Ruta	Comentarios
--------------	--------------------	----------	--------------------------	-------------

INGESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA				
Agua freática	Ingestión de Agua freática afectada.	ALEM 1	Incompleta	No se utiliza el agua subterránea para ingesta. Se utiliza agua potable procedente del Dique Paso Piedras y potabilizada por ABSA S.A en planta Patagonia
		Personal estación de servicio, vecindario, teatro municipal		
		BAHÍA 1	Incompleta	No se utiliza el agua subterránea para ingesta. Se utiliza agua potable procedente del Dique Paso Piedras y potabilizada por ABSA S. en planta Patagonia
		Personal estación de servicio.		
		LINIERS	Incompleta	No se utiliza el agua subterránea para ingesta. Se utiliza agua potable procedente del Dique Paso Piedras y potabilizada por ABSA S. en planta Patagonia
		Personal de estación de servicio, club deportivo, vecindario		

Tabla 7.2.1.b Medio fuente, rutas de exposición y receptores. Agua superficial hábitat sensible.

AGUA SUPERFICIAL HÁBITAT SENSIBLE				
Agua freática	Descarga a Cuerpos de Agua Superficial / contacto dérmico.	ALEM 1	Incompleta	El curso de agua superficial más cercano "aguas abajo" de la estación de servicio es el arroyo Napostá, pero se encuentra a una distancia de 1 km y su cauce se encuentra entubado.
		Agua Superficial/Hábitat Sensible		
		BAHÍA 1	Incompleta	El curso de agua más cercano es el Estuario de Bahía Blanca, a 2.3 km
		Agua Superficial/Hábitat Sensible		
		LINIERS	Potencialmente Completa	El curso de agua más cercano se encuentra a 600 metros, A°Napostá (Sin entubar). En este apartado se toma conservativamente que el agua que discurre al arroyo es interceptada por el Club para el llenado de las piletas (Criterio conservativo)
		Agua Superficial/Hábitat Sensible		
Cancha de fútbol siendo parquizada				
		ALEM 1	Incompleta	Si bien los resultados analíticos de agua freática indican afectación con hidrocarburos, la cobertura

Contaminación de hidrocarburos livianos en el acuífero freático de Bahía Blanca

Agua freática	Volatilización, migración en zona vadosa e inhalación de vapores en aire exterior.	Trabajador comercial de la estación de Servicio		<p>de hormigón superficial en buen estado de conservación constituye un impedimento para la difusión de vapores desde el suelo hacia el aire exterior.</p> <p>Asimismo, es importante señalar que aunque fuese posible dicha exposición, ésta sería mínima (debido a la dispersión atmosférica) comparada con la exposición directa a vapores orgánicos que tiene lugar durante las operaciones de despacho de combustibles</p>
		BAHÍA 1	Incompleta	<p>Si bien los resultados analíticos de agua freática indican afectación con hidrocarburos, la cobertura de hormigón superficial en buen estado de conservación constituye un impedimento para la difusión de vapores desde el suelo hacia el aire exterior.</p> <p>Asimismo, es importante señalar que aunque fuese posible dicha exposición, ésta sería mínima (debido a la dispersión atmosférica) comparada con la exposición directa a vapores orgánicos que tiene lugar durante las operaciones de despacho de combustibles</p>
		Trabajador comercial de la estación de servicio		
		LINIERS	Incompleta	<p>Si bien los resultados analíticos de agua freática indican afectación con hidrocarburos, la cobertura de hormigón superficial en buen estado de conservación constituye un impedimento para la difusión de vapores desde el suelo hacia el aire exterior.</p> <p>Asimismo, es importante señalar que aunque fuese posible dicha exposición, ésta sería mínima (debido a la dispersión atmosférica) comparada con la exposición directa a vapores orgánicos que tiene lugar durante las operaciones de despacho de combustibles</p>
Trabajador comercial de la estación de servicio				

Tabla 7.2.1.b (Cont)Medio fuente, rutas de exposición y receptores. Agua superficial hábitat sensible.

		ALEM 1	Incompleta	El uso de una máscara apropiada de protección Personal impediría la inhalación de vapores de hidrocarburos.
		Trabajador de la Construcción en la estación de servicio.		
		BAHÍA 1	Incompleta	El uso de una máscara apropiada de protección Personal impediría la inhalación de vapores de hidrocarburos.
		Trabajador de la Construcción en la estación de servicio.		
		LINIERS	Incompleta	El uso de una máscara apropiada de protección Personal impediría la inhalación de vapores de hidrocarburos.
		Trabajador de la Construcción en la estación de servicio.		

Tabla 7.2.1.c Medio fuente, rutas de exposición y receptores. Inhalación en el aire interior.

INHALACIÓN EN EL AIRE INTERIOR			
Volatilización, migración en zona vadosa e inhalación de vapores en ambiente cerrado	ALEM 1	Potencialmente completa	En el pozo más cercano al local de ventas (PM10) se registraron concentraciones de analitos de interés superiores a los límites de cuantificación analítica
	Trabajador comercial de la estación de servicio.		
	BAHÍA 1		
	Trabajador comercial de la estación de servicio.	Potencialmente completa	En el pozo PM 2 Se encontraron analitos de interés mayores a los límites de interés
	LINIERS		
	Trabajador comercial de la estación de servicio.		
	ALEM 1	Potencialmente completa	Debido a que el pozo PM10 (donde se registraron Concentraciones de analitos de interés superiores a los límites de cuantificación analítica) se sitúa en posición contigua al linde medianero, esta ruta de exposición se considera potencialmente completa a pesar de hallarse "aguas arriba" del área fuente.
	Residencial (vivienda lindera sobre Av. Alem)		
	Residencial (vivienda lindera sobre calle Alsina)		
	Empleado que trabaja en un salón del subsuelo del Teatro Municipal		
	BAHÍA 1	Incompleta	No hay viviendas linderas
	Zona industrial		
	LINIERS	Potencialmente completa	Se toma el valor registrado en el PM 10 teniendo en cuenta el sentido de escurrimiento
	Usuario Natatorio ubicado aguas abajo		
	Trabajador en el natatorio		

7.3. Escenarios Evaluados Numéricamente

De acuerdo a la información detallada en la Tabla 7.2.1.1, el cálculo de los niveles objetivo de limpieza específicos para el sitio (SSTLs) se efectuó para los escenarios de exposición que se detallan a continuación.

7.3.1 Escenario 1: Inhalación de vapores orgánicos por un empleado del Teatro Municipal en un salón situado en la planta subsuelo (ALEM 1)

Para el cálculo de SSTLs se ha considerado que el receptor es una persona adulta que trabaja 2 hs. diarias en un salón del subsuelo del Teatro Municipal con una frecuencia de 250 días/año durante 25 años (parámetros de exposición fijados para receptor comercial en la Tabla X2.4 de ASTM E1739-95 (R 2010)). Dado que el receptor está expuesto a la inhalación de vapores menos de 24 hs diarias, la mencionada frecuencia ha sido ajustada matemáticamente a una exposición continua, multiplicándola por un factor = $2\text{hs}/24\text{ hs} = 0,083$. Este ajuste arroja una frecuencia de exposición de aproximadamente 21 días/año durante 25 años. Cabe destacar que se toman estos parámetros porque no hay personal que trabaje actualmente en los sótanos del teatro.

Para este escenario, la vía de exposición involucrada es la siguiente:

- Inhalación de vapores de analitos de interés en un ambiente cerrado por un empleado del Teatro Municipal, provenientes de la volatilización de hidrocarburos solubilizados en agua freática. El ambiente cerrado donde se consideró que tiene lugar la exposición corresponde al amplio salón del subsuelo donde se encuentran instalados los pozos monitores PAD15 y PAD16.

7.3.2 Escenario 2: Inhalación de vapores orgánicos por un empleado que trabaja en el shop de las estaciones de servicios (ALEM 1, BAHÍA 1 LINIERS) y un trabajador en las piletas del Club Liniers

Para el cálculo de SSTLs se ha considerado que el receptor es una persona adulta que trabaja 8 hs diarias dentro de los shops de la estación de servicio, con una frecuencia de 250 días/año durante 25 años (parámetros de exposición fijados para receptor comercial en la Tabla X2.4 de ASTM E1739-95 (R 2010)). Dado que el receptor está expuesto a la inhalación de vapores menos de 24 hs diarias, la mencionada frecuencia ha sido ajustada matemáticamente a una exposición continua, multiplicándola por un factor = $8\text{hs}/24\text{ hs} = 0,333$. Este ajuste arroja una frecuencia de exposición de aproximadamente 84 días/año durante 25 años.

Para este escenario, la vía de exposición involucrada es la siguiente:

- Inhalación de vapores de analitos de interés en un ambiente cerrado por un empleado de la estación de servicio, provenientes de la volatilización de hidrocarburos solubilizados en agua freática. El ambiente cerrado donde tiene lugar la exposición corresponde al mini mercado de la boca de expendio;
- Empleado del complejo de piletas del Club Liniers que trabaja la misma cantidad de horas durante la misma cantidad de años.-

7.3.3 Escenario 3: Inhalación de vapores orgánicos en ambiente cerrado de uso residencial (viviendas linderas a la estación de servicio ALEM 1)

El cálculo de los SSTLs contempla que el receptor residencial está expuesto 24 hs diarias a la inhalación de vapores, con una frecuencia de 350 días/año durante 30 años (parámetros de exposición fijados para receptor residencial en la Tabla X2.4 de ASTM E1739-95 (R 2010)).

Para este escenario, la vía de exposición involucrada es la siguiente:

- Inhalación de vapores de analitos de interés en un ambiente cerrado por un morador de una vivienda lindera a la estación de servicio, provenientes de la volatilización de hidrocarburos solubilizados en agua freática.

Nota: No hay viviendas linderas donde residan personas aguas debajo de los restantes sitios de estudio.

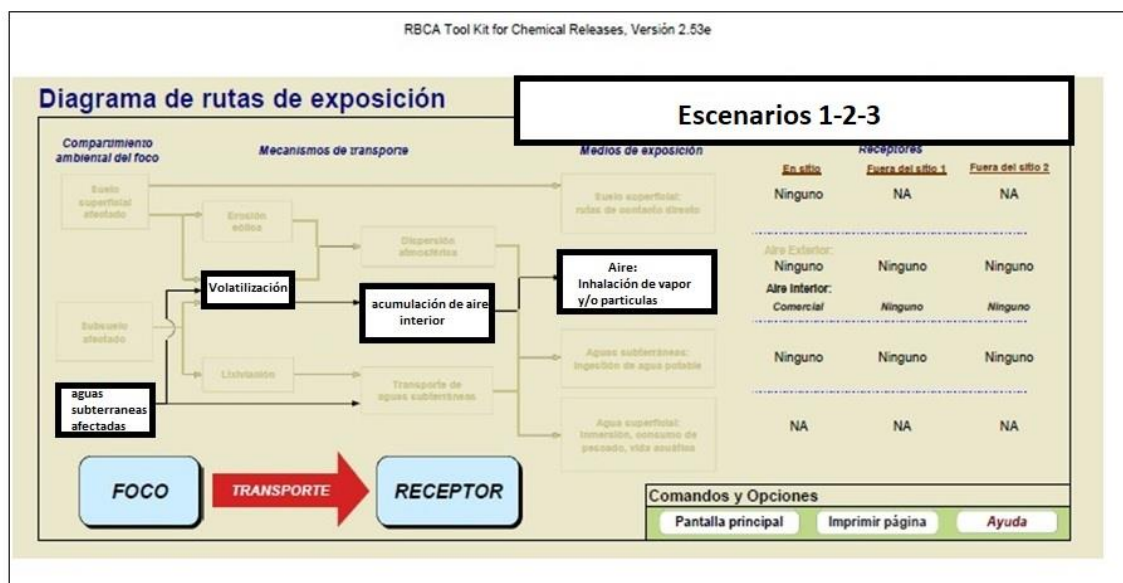


Figura 7.3.3.a Diagramas de las rutas de exposición en el Software RBCA para el cálculo de los niveles objetivos de limpieza en los Escenarios 1 a 3

7.3.4 Escenario 4: Inhalación de vapores orgánicos en aire exterior por un transeúnte de la plaza aledaña a ALEM 1 o jugador de fútbol del Club Liniers

Se idealizó un escenario en el que un receptor estaría expuesto 2 horas diarias a la inhalación de vapores orgánicos en aire exterior, con una frecuencia de 350 días/año durante 30 años (parámetros de exposición fijados para receptor residencial en la Tabla X2.4 de ASTM E1739-95 (R 2010)). Es decir, el receptor considerado es un transeúnte que durante 2 hs al día pasea por el parqueizado de la Plaza del Teatro (zona de locación del pozo PM4), inhalando vapores particionados de hidrocarburos presentes en suelos y agua freática, que han logrado difundir hacia el aire atmosférico a expensas de la ausencia de cobertura de hormigón superficial.

De este modo, dado que el receptor está expuesto a la inhalación de vapores menos de 24 horas diarias, la mencionada frecuencia (350 días/año) ha sido ajustada matemáticamente a una exposición continua, multiplicándola por un factor = $2 \text{ hs}/24 \text{ hs} = 0,083$. Este ajuste arroja una frecuencia de exposición de aproximadamente 29 días/año durante 30 años.

Para este escenario, la vía de exposición involucrada es la siguiente:

- Inhalación de vapores de analitos de interés en aire exterior por un transeúnte de la plaza del Teatro Municipal y un jugador de fútbol del Club Liniers, provenientes de la volatilización de hidrocarburos presentes en agua freática y suelos.

7.3.5 Escenario 5: Contacto dérmico, ingesta accidental de suelo e inhalación de vapores orgánicos/particulado en aire exterior (provenientes de suelos/agua freática) por un jardinero que trabaje en el parqueizado aledaño al Teatro Municipal y Jardinero del Club Liniers

Para el cálculo de los SSTLs en el teatro se ha idealizado como receptor a un jardinero que trabaje 2 días al mes, 4 horas cada jornada, los 12 meses del año durante 25 años (duración de exposición fijada para receptor comercial en la Tabla X2.4 de ASTM E1739-95 (R 2010)), efectuando el mantenimiento de los sectores parqueizados donde se localiza el pozo monitor PM4. De este modo, las tareas involucran el contacto directo con suelos afectados y la inhalación de vapores orgánicos/particulado durante 24 días al año.

Para el cálculo de los SSTLs en el Club Liniers se ha idealizado como receptor a un jardinero que trabaje 20 días al mes, 4 hs cada jornada, los 12 meses del año durante

25 años (duración de exposición fijada para receptor comercial en la Tabla X2.4 de ASTM E1739-95 (R 2010)), efectuando el mantenimiento de la cancha, se toma como máximo valor el obtenido para el pozo con hidrocarburos más cercano (distante 30 metros). De este modo, las tareas involucran el contacto directo con suelos afectados y la inhalación de vapores orgánicos/particulado durante 160 días al año.

Dado que se consideró que el receptor en ambos casos está expuesto a la inhalación de vapores/particulado menos de 24 horas diarias, la mencionada frecuencia (4 hs/24 hs) ha sido ajustada matemáticamente a una exposición continua, multiplicándola por un factor = $4\text{hs}/24\text{hs} = 0,166$. Este ajuste vía de inhalación de vapores/particulado, arroja una frecuencia de exposición de 4 días/año durante 25 años.

Para este escenario, las vías de exposición involucradas son las siguientes:

- Contacto dérmico e ingesta accidental de suelo afectado;
- Inhalación de vapores/particulado de analitos de interés en aire exterior, provenientes de suelos afectados con hidrocarburos;
- Inhalación de vapores de analitos de interés en aire exterior, provenientes de fase solubilizada.



Figura 7.3.5.a. Diagramas de las rutas de exposición en el Software RBCA para el cálculo de los niveles objetivos de limpieza en los escenarios 1 a 3

7.4. Cálculo de los niveles objetivos de limpieza específicos para el sitio (SSTLs)

Software RBCA TOOLKIT2.53

7.4.1. Parámetros de Ingreso y Supuestos

7.4.1.1 Escenario 1: Inhalación de vapores orgánicos por un empleado del Teatro Municipal en un salón situado en la planta subsuelo (Caso: ALEM1)

Se trata de un escenario de exposición conservador ya que, de acuerdo a la información obtenida, en el subsuelo del Teatro Municipal directamente no habría empleados cumpliendo funciones en forma permanente, sino que sólo se desarrollarían eventuales talleres de construcción y/o reparación de instrumentos musicales de cuerdas. De todos modos, se propone la exposición de un empleado a la inhalación de vapores de hidrocarburos 2 horas diarias, 250 días al año, durante un período de 25 años.

Los SSTLs fueron calculados sólo para aquellos analitos de interés, que en los últimos eventos de muestreo (Julio 2015), se manifestaron en los pozos PAD15 y PAD16 con concentraciones en solución superiores a los respectivos límites de cuantificación analítica: Benceno, Tolueno, Etlbenceno, Xilenos, Naftaleno, Acenafteno, Fluoreno, Fenantreno y el parámetro HTP. Los parámetros toxicológicos utilizados en los cálculos corresponden a la base de datos de USA que posee el software RBCA Tool Kit versión 2.53.

Se asume el criterio conservativo que la losa basal del subsuelo en el teatro, presenta cierto grado de agrietamiento, lo cual posibilitaría la intrusión de vapores particionados desde los compuestos solubilizados en el agua freática.

Se ha utilizado el modelo de Johnson y Ettinger para efectuar el cálculo de los factores de volatilización/migración de vapores al interior del ambiente cerrado. Se trata de un modelo muy conservador ya que no considera la biodegradación natural de las sustancias durante su migración a través del medio poroso.

Se consideró que el nivel de agua freática se halla a una profundidad de 0,57 m por debajo del piso del subsuelo del Teatro Municipal.

Los valores de las propiedades físicas del suelo asociadas a la zona no saturada y franja capilar son los predeterminados por el software RBCA Tool Kit para un suelo arenoso (USCS – Unified Soil Classification System), asimilable a la textura registrada al instalarse los pozos de monitoreo en el subsuelo del Teatro, y también identificada mediante la Tomografía Eléctrica realizada.

Superficie = 291,79 m²

Perímetro = 80,53 m

Altura (relación volumen/área de intrusión de vapores) = 3,48 m

Profundidad base del subsuelo = 1,50 m bajo nivel de vereda

De acuerdo a uno de los planos teatro, el **espesor de la losa basal** del subsuelo es igual a 30 cm. la antigüedad del edificio es mayor a 100 años, se consideró un **factor de agrietamiento** = 0,01 que es el valor conservador fijado en la Tabla X2.6 de ASTM E1739-95 (R 2010) para el cálculo de RBSLs de Tier 1. La **tasa de intercambio de aire** utilizada corresponde al valor fijado para una edificación de uso comercial en la Tabla X2.6 de ASTM E1739-95 (R 2010), es decir 0,00023/seg.

En el modelaje se ha asumido que las grietas de la losa basal están rellenas con el material inmediatamente subyacente, para el cual se considera una textura arenosa. A modo conservador se han considerado los contenidos volumétricos de aire y agua (0,33 y 0,08 respectivamente) predeterminados por el software para la zona vadosa de un suelo arenoso, y no los contenidos volumétricos asociados a la franja capilar donde el porcentaje de poros llenos con aire es significativamente inferior, lo cual minimizaría la difusión de vapores hacia el interior del ambiente cerrado.

Se consideró que existe una presión diferencial entre el suelo y el interior del ambiente cerrado, de 40 g/cm- s² valor asumido por defecto en Canadá para el cálculo de niveles Tier 1 basados en riesgo a la salud humana (Canadá-Wide Standard for Petroleum Hydrocarbons, 2008). Los valores objetivos de limpieza calculados para este escenario, se resumen en la tabla 8.5.

7.4.1.2. Escenario 2: Inhalación de vapores orgánicos por un empleado que trabaja en el shop de las estaciones de servicios (ALEM 1, BAHÍA 1 LINIERS) y un trabajador en las piletas del club Liniers

Se ha modelado la exposición de un empleado del mini mercado de la estación de servicio y de un empleado de la pileta a la inhalación de vapores 8 horas diarias, 250 días al año, durante un período de 25 años.

Se asume que la losa basal del mini mercado presenta cierto grado de agrietamiento, lo cual posibilitaría la intrusión vapores particionados desde los compuestos solubilizados en el agua freática.

Se ha utilizado el modelo de Johnson y Ettinger para efectuar el cálculo de los factores de volatilización/migración de vapores al interior de los mini mercados y de la pileta. Se trata de un modelo muy conservador ya que no considera la biodegradación natural de

las sustancias durante su migración a través del medio poroso.

El nivel del acuífero freático se tomó para Alem 1:1,9 mbbp; Liniers: 2,88 mbbp y Bahía 1: 1,251 mbbp.

Los valores de las propiedades físicas del suelo asociadas a la zona vadosa/ franja capilar son los predeterminados por el software RBCA Tool Kit para un suelo arenolimoso (USCS – Unified Soil Classification System), asimilable a la textura identificada como predominante en el subsuelo de los tres sitios analizados.

Las dimensiones del ambiente cerrado utilizadas para efectuar el modelo de intrusión de vapores a aire interior, son las que se resumen en la tabla 7.4.1.a siguientes:

Tabla 7.4.1.2.a Dimensiones utilizadas para los emplazamientos analizados

Sitio	ALEM 1	BAHÍA 1	LINIERS EESS	PILETA LINIERS
Superficie	52.8 m ²	140 m ²	65 m ²	600 m ²
Perímetro	31.6 m	96 m	48	105 m
Altura	3 m	3.3	3	6

Se tomó en todos los casos un factor de agrietamiento de = 0,001. La **tasa de intercambio de aire** utilizada corresponde al valor fijado para una edificación de uso comercial en la Tabla X2.6 de ASTM E1739-95 (R 2010), es decir 0,00023/seg.

En el modelaje se ha asumido que las grietas de la losa basal estarían rellenas con el material inmediatamente subyacente, asimilándose a la textura areno – limosa identificada como predominante. De acuerdo a los valores predeterminados por el software, este tipo de suelo tiene asociada una porosidad de 0,41, con contenidos volumétricos de aire y agua iguales a 0,29 y 0,12 respectivamente, asociados a la zona no saturada.

Conservativamente se consideró que existe una presión diferencial, entre el suelo y el interior del mini mercado, y la pileta, utilizándose un valor de 40 g/cm-s² coincidente con el valor asumido por defecto en Canadá para el cálculo de niveles Tier 1 basados en riesgo a la salud humana (PHC,2008). Los valores objetivos de limpieza calculados para este escenario, se resumen en la tabla 7.4.1.2.1.

7.4.1.3 Escenario 3: Inhalación de vapores orgánicos en ambiente cerrado de uso residencial (viviendas linderas a la estación de servicio ALEM 1)

Se ha modelado la exposición de un morador de una vivienda lindera a la estación de servicio Petrobras, situada sobre Avenida Alem. La frecuencia y duración de la

exposición utilizadas en los cálculos son las fijadas para un receptor residencial en la Tabla X2.4 de ASTM E1739-95 (R 2010) para el cálculo de RBSLs de Tier1.

Para poder efectuar el modelaje se ha asumido que directamente por debajo de las edificaciones residenciales linderas, situadas sobre Av. Alem y sobre calle Alsina, existe afectación del agua freática con analitos, de interés, en solución. Éste es un supuesto conservador ya que la propiedad situada sobre Av. Alem se encuentra “aguas arriba” del área fuente de afectación, es decir, en sentido opuesto al flujo subterráneo históricamente registrado en el sitio, manifestándose en el pozo más cercano al linde medianero (PM10) reducidas concentraciones de analitos de interés en fase solubilizada.

Se asume que la losa basal de cada vivienda presenta cierto grado de agrietamiento, lo cual posibilitaría la intrusión de vapores particionados desde los compuestos solubilizados en el agua freática.

Se ha utilizado el modelo de Johnson y Ettinger para efectuar el cálculo de los factores de volatilización/migración de vapores al interior de la vivienda. Se trata de un modelo muy conservador ya que no considera la biodegradación natural de las sustancias durante su migración a través del medio poroso.

Se consideró que el nivel de agua freática se halla a una profundidad de 1,91 mbns (metros bajo nivel de superficie), correspondiendo a la profundidad medida en el pozo PM10.

Los valores de las propiedades físicas del suelo asociadas a la zona vadosa/ franja capilar son los predeterminados por el software RBCA Tool Kit para un suelo arenolimoso (USCS – Unified Soil Classification System), asimilable a la textura identificada como predominante en los pozos monitores cercanos a los lindes medianeros de la estación deservicio.

Dado que se desconocen las características internas de las viviendas linderas a la estación de servicio, a los fines del modelaje se ha considerado un ambiente cerrado con las siguientes dimensiones:

Superficie = 25 m²

Perímetro = 20 m

Altura (relación volumen/área de intrusión de vapores) = 4 m

(altura estimada de la planta baja de la vivienda).

Como se desconoce el espesor de la losa basal de las viviendas linderas, en los cálculos fue utilizado el valor de 15 cm fijado en la Tabla X2.6 de ASTM E1739-95 (R 2010) para el cálculo de RBSLs de Tier 1. Teniendo en cuenta que ambas construcciones linderas en apariencia son añosas, se consideró un factor de agrietamiento = 0,01 que es el valor conservador fijado en la Tabla X2.6 de ASTM E1739-95 (R 2010). La tasa de intercambio de aire utilizada corresponde al valor fijado para una edificación de uso residencial en la Tabla X2.6 de ASTM E1739-95 (R 2010), es decir 0,00014/seg.

En el modelaje se ha asumido que las grietas de la losa basal están rellenas con el material inmediatamente subyacente, asimilándose a la textura areno-limosa identificada como predominante en las perforaciones realizadas en posiciones perimetrales del predio de la estación de servicio. De acuerdo a los valores predeterminados por el software, este tipo de suelo tiene asociada una porosidad de 0,41, con contenidos volumétricos de aire y agua iguales a 0,29 y 0,12 respectivamente, asociados a la zona vadosa.

Conservadoramente se consideró, que existe una presión diferencial entre el suelo y el interior de la vivienda, utilizándose un valor de 40 g/cm-s^2 coincidente con el valor asumido por defecto en Canadá para el cálculo de niveles Tier 1 basados en riesgo a la salud humana (PHC, 2008). Los valores objetivos de limpieza calculados para este escenario, se resumen en la Tabla 8.7.-

7.4.1.4 Escenario 4: Inhalación de vapores orgánicos en aire exterior por un transeúnte de la plaza aledaña a ALEM 1 o jugador de fútbol del Club Liniers.

Para este escenario de exposición se calcularon SSTLs para suelos y agua freática, en virtud de los resultados analíticos registrados en las muestras sólidas y líquidas extraídas del pozo PM4 en ALEM 1 y las muestras obtenidas de la matriz líquida del PAD 8. Se consideró que el nivel de agua freática se halla a una profundidad de 2,50 mbns (metros bajo nivel de superficie), correspondiendo a la profundidad a la que se extrajo la muestra de suelos más profunda del pozo PM4 y se tomó 2.92 mbns para el pozo PAD 8 de Liniers.

Los parámetros de aire exterior utilizados en los modelajes corresponden a una altura de zona de mezcla igual a 2 metros y una velocidad del viento igual a 5 m/s (18 km/h) correspondiente al valor promedio registrado en la Estación Comandante Espora. Los valores objetivos de limpieza calculados para este escenario, se resumen en la Tabla 8.8.

7.4.1.5 Escenario 5: Contacto dérmico, ingesta accidental de suelo e inhalación de vapores orgánicos/particulado en aire exterior (provenientes de suelos/agua freática) por un jardinero que trabaje en el parqueado aledaño al Teatro Municipal y Jardinería del Club Liniers

Se trata de un escenario totalmente idealizado. Se supone que existe una persona que efectúa el mantenimiento del parqueado, pero se desconoce la exposición diaria, frecuencia y duración de la exposición, y si usa o no elementos de protección personal durante la ejecución de los trabajos.

Para este escenario de exposición se calcularon SSTLs para agua freática, en virtud de los resultados analíticos registrados en las muestras sólidas y líquidas extraídas del pozo PM 4 y el PAD 8 matriz líquida del Club Liniers. Para el caso de ALEM1 se consideró una profundidad del nivel freático de 2,5 metros y para el Club Liniers 2,92 mbbp.

Para el cálculo de los factores de volatilización al aire ambiental desde suelos superficiales (Prof. <1m) se utilizó el modelo de volatilización de ASTM. Para el cálculo de los factores de volatilización a aire ambiental desde suelos profundos (Prof. >1m) y desde agua freática, se utilizó el modelo de Johnson y Ettinger. Se trata de modelos muy conservadores, ya que no consideran la biodegradación natural de las sustancias durante su migración a través del medio poroso.

Los parámetros de aire exterior utilizados en los modelajes corresponden a una altura de zona de mezcla igual a 2 metros y una velocidad del viento igual a 5 m/seg (18 km/h) correspondiente al valor promedio registrado en la Estación Comandante Espora (Aeropuerto de Bahía Blanca). Los valores objetivos de limpieza calculados para este escenario, se resumen en la Tabla 7.4.1.5 a

Tabla 7.4.1.5 a. Valores objetivos de limpieza (SSTLs) obtenidos Escenario 1

SSTLs en agua freática – Inhalación de vapores Receptor: empleado en salón del subsuelo del Teatro		SITIO		
		ALEM 1 (PAD 16)	BAHÍA 1	LINIERS
Analito de interés	SSTLs (mg/l)	Valor máximo (mg/l)	Valor máximo (mg/l)	Valor máximo (mg/l)
Benceno	26	11,32	N/A	N/A
Etlbenceno	> 169	4,86	N/A	N/A
Tolueno	> 530	45,67	N/A	N/A
Xilenos	> 198	45,93	N/A	N/A
Naftaleno	31	0,1284	N/A	N/A
HTP (TNRCC 1005)	600	56	N/A	N/A

Tabla 7.4.1.5.b. Valores objetivos de limpieza (SSTLs) obtenidos Escenario 2

SSTLs en agua freática – Inhalación de vapores Receptor: empleado de la estación de servicio/empleado de la Pileta		SITIO		
		ALEM (PAD 9)	BAHÍA 1 (PM1)	LINIERS (PAD 4A)
Analito de interés	SSTLs (mg/l)	Valor máximo (mg/l)	Valor máximo (mg/l)	Valor máximo (mg/l)
Benceno	18	2,499	16,53	0.16
Etlbenceno	> 169 (+)	3,012	2,05	<0,001
Tolueno	> 530 (+)	33,67	25,09	0,003
Xilenos	> 198 (+)	45,03	11,02	0,104
Naftaleno	> 31 (+)	0,103	<0.001	N/D
HTP (TNRCC 1005)	>2458	104	174	920

Tabla 7.4.1.5.c: Valores objetivos de limpieza (SSTLs) obtenidos Escenario 3

SSTLs en agua freática – Inhalación de vapores <u>Receptor</u> : morador de vivienda residencial lindera a la estación de servicio		SITIO			
		ALEM1 Vivienda calle Alsina (PM 11)	ALEM1 Vivienda calle Alem (PM10)	BAHÍA 1	LINIERS
Analito de interés	SSTLs (mg/l)	Valor máximo (mg/l)	Valor máximo (mg/l)	Valor máximo (mg/l)	Valor máximo (mg/l)
Benceno	1,5	<0.001	0.023	N/C	N/C
Etlbenceno	130	0.002	0.104	N/C	N/C
Tolueno	>530 (+)	0.007	0.5282	N/C	N/C
Xilenos	86	0.011	0686	N/C	N/C
HTP (TNRCC 1005)	>2458	<5	<5	N/C	N/C

Tabla 7.4.15.d.: Valores objetivos de limpieza (SSTLs) obtenidos Escenario 4

SSTLs en agua freática - Inhalación de vapores Receptor: transeúnte en parqueado aledaño al Teatro/ jugador de futbol		SITIO		
		ALEM 1 (PM3)	BAHÍA 1	LINIERS (PAD6A)
Analito de interés	SSTLs (mg/l)	Valor máximo (mg/l)	Valor máximo (mg/l)	Valor máximo (mg/l)
Benceno	> 1770	7,65	N/C	0,06
Etlbenceno	> 169	0,23	N/C	0,0036
Tolueno	> 530	40,19	N/C	0,127
Xilenos	> 198	39,51	N/C	0,74
Naftaleno	> 31	0,128	N/C	0,0458
HTP (TNRCC 1005)	>2458	70	N/C	446

Tabla 7.4.15.e: Valores objetivos de limpieza (SSTLs) obtenidos Escenario 5

SSTLs en agua freática - Inhalación de vapores <u>Receptor:</u> jardinero del parqueado aledaño al Teatro/ Jardinero Cancha Club Liniers		SITIO		
		ALEM 1 (PM 3)	BAHÍA 1	LINIERS (PAD 8)
Analito de interés	SSTLs (mg/l)	Valor máximo (mg/l)	Valor máximo (mg/l)	Valor máximo (mg/l)
Benceno	> 1770	7,65	N/C	0.06
Etlbenceno	> 169	0,23	N/C	<0,001
Tolueno	> 530	40,19	N/C	0,001
Xilenos	> 198	39,51	N/C	0,74
Naftaleno	> 31	0,128	N/C	N/D
HTP (TNRCC 1005)	>2458	70		

Como se ha demostrado en los escenarios evaluados, en ninguno de ellos se observa que los casos de estudio estén sobrepasando los niveles objetivos de limpieza del acuífero, por lo que en ningún caso las vías de exposición posibles, a partir del cuerpo freático con el entorno, generan un riesgo cancerígeno y/o toxicológico a la salud humana.

Cabe destacar nuevamente, que, de considerar las leyes vigentes y los estándares nacionales sugeridos por las mismas, todos los analitos considerados deberían haber sido objeto de remediación, ya que sobrepasan los límites permisibles, por consiguiente, deberían ser sus valores de limpieza, totalmente diferentes, ya que solo se evalúan valores tabulados en normas y no en situaciones que implican la calidad de vida de los seres humanos.

CAPITULO 8 CONCLUSIONES

El área de estudio, si bien se encuentra en su gran mayoría urbanizada, permite su caracterización desde varios puntos que abarcan disciplinas propias de la geología. La cobertura sedimentaria estudiada, según las descripciones realizadas de los detritos en varios sondeos, permite afirmar que la columna estratigráfica superior estudiada comienza con sedimentos que datan del Mioceno Superior identificados como Sedimentos Pampeanos o Fm Cerro Azul, continuando con sedimentos fluviales de la Fm. Lujan del Pleistoceno y los correspondientes a la Formación Bahía Blanca y La Vitícola (Holoceno). Todos ellos con mediana a buena permeabilidad y que alojan, en distintos sectores, al acuífero freático del área.

El Arroyo Napostá, ha tenido un comportamiento muy activo en el pasado reciente y esto puede observarse por la morfología de su valle y por los resultados de las tomografías eléctricas realizadas, que marcan paleocanales entrelazados, demostrando un ambiente de alta energía. Dada la cercanía del arroyo con estos paleocauces, se asume que eran parte del mismo sistema fluvial en el momento de su generación. Estas características litológicas y estratigráficas son compatibles con las descripciones antecedentes de la Formación Bahía Blanca.

También pudieron identificarse sedimentos que fueron depositados en un ambiente litoral, como son el nivel arenoso marino innominado, que correspondería, junto a la Formación Maldonado, al Pleistoceno Superior y la Formación Las Escobas, que data del Holoceno. Las dos primeras constituyen también el acuífero freático del sector, por lo que puede definirse a la zona de estudio como zona geológicamente moderna, con una cobertura sedimentaria heterogénea que ha sido muy dinámica en su corto tiempo de depositación.

La geomorfología específica del área de estudio está caracterizada por planicies o llanuras. Por encima de la cota de 10 m.s.n.m. una llanura aluvial producto del derrame de los dos cursos que la delimitan (Arroyo Napostá Grande y Maldonado) cubierta por un manto de sedimentos eólicos., lo cual se registra en el subsuelo en el subsuelo a través de la heterogeneidad litológica descrita en algunos sondeos.

Por otro lado, están los sedimentos que se depositaron en un ambiente litoral y que marcan la cota máxima a la que llegó el nivel del mar durante el Holoceno, la Formación las Escobas. Por debajo esa cota (unos 10 m.s.n.m.) las últimas ingresiones del Holoceno labraron una plataforma de abrasión marina de muy baja pendiente sobre los sedimentos Pleisto-holocenos preexistentes (llanura litoral). El sistema litoral y los

procesos sedimentarios que allí ocurren en la actualidad, pueden ser asociados a los mismos que acaecieron en el pasado.

De todos modos las acciones antrópicas sobre el paisaje, ya que juegan un rol preponderante en su modificación y consecuentemente sobre el sistema hidrológico del área.

El flujo subterráneo en la zona de estudio, escurre en su mayor parte desde el Norte, donde se encuentra la mayor parte de las zonas urbanizadas y cuyo terreno se encuentra, en su mayor parte, impermeabilizado, hacia la zona de descarga costera. Los gradientes hidráulicos están en estrecha relación con los gradientes topográficos, siendo mayores en la cabecera del área de estudio y menores en la zona de descarga, demostrando una homogeneidad de la circulación del agua subterránea con la topografía del terreno.

El acuífero, recibe recarga por agua de lluvia, la cual es rápidamente incorporada al sistema, como pudo evidenciarse en el análisis freático, aunque también recibe los aportes que recibe de la red de agua potable, la red de desagües pluviales y el tendido cloacal, a partir de las pérdidas que presentan estos tres sistemas. Las principales componentes de descarga son la evaporación directa desde la capa freática y la evapotranspiración.

Durante su circulación, la composición química de las aguas va cambiando, desde aguas de tipo bicarbonatadas sódicas en los sedimentos continentales, que gradan a cloruradas sódicas en las formaciones litorales. En esa zona costera baja se produce descarga del acuífero fundamentalmente por evaporación y evapotranspiración y los tenores de sales disueltas se elevan exponencialmente con respecto a la zona urbana.

En cuanto a la calidad de las aguas, el alto contenido de sales en toda el área estudiada hace al acuífero no apto para muchos usos. Si bien no fue objeto de estudio de esta tesis, cabe mencionar que las filtraciones de los sistemas de obras sanitarias, condicionan la aptitud, desde el punto de vista microbiológico, pues se ha detectado contaminación bacteriana en las aguas del acuífero en muchos sitios de la ciudad.

Los hallazgos de hidrocarburos libres y en fase libre no acuosa, registrados en las estaciones de servicio de la ciudad, constituyen una carga contaminante al agua subterránea durante su circulación. La tipología de los contaminantes hallados en el acuífero freático, en cada emplazamiento estudiado, tiene una correlación directa con los productos expendidos en las estaciones de servicio y las caracterizaciones cromatográficas realizadas a las distintas fases no acuosas analizadas, (las cuales

fueron confrontadas con patrones puros de naftas y gasoil).

Los hallazgos de nafta, fueron dos, uno de ellos mostró la presencia de un producto degradado, asociado a nafta tipo súper con presencia, en los cromatogramas, de ftalato que pudo ser identificado aguas abajo (Hallazgo Celina) y que se correspondería con la degradación de una sustancia derivada del polietileno.

El segundo hallazgo (Alem 1) evidenció dos productos de tipo GRO sin degradar, asociados con nafta súper y premium, en el que se pudo determinar mediante cromatogramas e isoprenoides, las diferencias en los tiempos de ocurrencia de dichos contaminantes en el acuífero, como así también su posterior mezcla y fenómenos de degradación.

Los hallazgos de fase libre de tipo diesel, fueron dos, y en un caso mostraron un producto sin degradar, el cual no pudo ser cuantificado en el acuífero por ausencia de pozos de monitoreo que permitan su prospección (Hallazgo ACA) y un diesel degradado, que por el espesor de la FLNA aparente no tendría relación directa con filtraciones de los sistemas de almacenamiento subterráneo de hidrocarburos, sino con posibles fisuras en la playa de carga de combustibles (Hallazgo Bahía 1).

La realización de tomografías eléctricas, en el sitio Alem 1, no permitió cuantificar grandes volúmenes de fase libre no acuosa, pero si determinar a través de la reconstrucción paleo ambiental del subsuelo, los lugares de alojamiento preferencial de los hidrocarburos (sitios que fueron positivamente corroborados con pozos de monitoreo). La utilización de esta técnica no invasiva, permitió definir una nueva red de monitoreo, sin la necesidad de perforar aleatoriamente para delimitar la pluma de contaminación.

La ausencia de criterios normados de niveles guías de contaminación a nivel Nacional establecidos en la Ley Nacional 24.051 y los estándares internacionales sugeridos por la provincia de Buenos Aires (Norma Holandesa) en cuanto a valores de limpieza en sitios contaminados, evidenciaron grandes falencias, ya que no tienen en cuenta ni la calidad ni el consecuente uso que se le da al acuífero. Alcanzar los valores de limpieza a los sugeridos por estos estándares, sería una tarea sumamente costosa donde los objetivos de limpieza, serían innecesarios por la carga contaminante preexistente y el quimismo del agua subterránea, que no la hace aprovechable para fuente de abastecimiento humano.

La utilización del Software RBCA permitió demostrar que en los escenarios ponderados, la contaminación del acuífero libre en ninguno de los sitios estudiados constituye un

riesgo para la salud humana en cuanto a su contenido de hidrocarburos. Por lo que utilizar criterios de limpieza similares a los que se utilizarían en fuentes de abastecimiento o aprovechamiento humano como sugieren las normas argentinas, no tiene un sentido técnico que lo sustente.

RECOMENDACIONES

Es necesario fijar, en una norma común y nacional, parámetros de limpieza de acuíferos contaminados con hidrocarburos en los que se tenga en cuenta la calidad, uso que se le da al acuífero, y riesgos toxicológicos y/o cancerígenos que podrían suscitarse en diversos escenarios que pueden interactuar con el agua subterránea (volatilización de hidrocarburos en sitios cerrados, por ejemplo). Para ello el método de acciones correctivas basadas en riesgos a la salud humana, RBCA, constituye una herramienta fiable, ya que los niveles objetivos de remediación siempre contemplan la seguridad e integridad de la salud de los seres humanos.

Se recomienda también, considerar por parte del Ministerio de Energía de la Nación a los sistemas de almacenamiento subterráneo de hidrocarburos, como lo hace con los Tanques Aéreos de Almacenamiento de Hidrocarburos, donde se debe hacer una Auditoría Ambiental de los tanques con una periodicidad de cinco (5) años. En esta auditoría se analiza el estado del suelo y del recurso hídrico subterráneo, por lo que obligaría a las estaciones de servicio a disponer de una red de freatómetros y no dejar supeditada su construcción para cuando se registran fugas y se deba iniciar una remediación. Se trata de elemento para el diagnóstico de la potencial contaminación del agua subterránea, que suma más elementos de actuación que la mera falta de hermeticidad de los sistemas SASH, hecho que se ha comprobado, en la presente tesis, que no siempre es diagnóstico para inferir fugas de combustible.

Entre las acciones correctivas y de limpieza de sitios impactados por hidrocarburos, se aconseja también considerar la tasa de atenuación natural y la biodegradación inducida a partir de la inyección de bacterias antes de calcular los niveles objetivos de limpieza.-

BIBLIOGRAFÍA

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) ,1999. Toxicological Profile for Total Petroleum Hydrocarbons (TPH). 315 p. Georgia.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), 1995. Standard Guide por Risk Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites. ASTM E 1739. Filadelfia.
- ASTM (American Society for Testing and Materials), 2004. Standard Guide por Risk Based Corrective Action. ASTM E 2081. Filadelfia. Estados Unidos.
- Atekwana E., Sauck, W., Werkema D., 2000 Investigation of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of Applied Geophysics*, 44:167-180. ISSN: 0926-9851.
- Bacocchi, R., Berardi, S., Verginelli, I., 2010. Human health risk assessment: models for predicting the effective exposure duration of on-site receptors exposed to contaminated groundwater. *Journal of Hazardous Materials*. 1-3, 226-233p. ISSN: 03043894.
- Baker, R. y Moore, J. 1998. The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies. *The Leading. Edge*, 17:1454-1458. Society of Exploration Geophysicist. Tulsa.
- Bonorino A.G, Schillizi R, y J. Kostadinoff, 1986. Investigación geológica y geofísica en la región de Bahía Blanca. *Actas III Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales*. Universidad Nacional de la Pampa (3) 55-64p. Santa Rosa.
- Bonorino, A. G. 1988. Geohidrología del sistema hidrotermal profundo de Bahía Blanca- Tesis Doctoral: Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca.
- Bonorino, A. y Sala. J.M., 1983. *Capítulo: Geohidrología*. Comisión Estudio de Suelos White-Cerri. MOP De la Provincia de Buenos Aires. Informe Final. La Plata.
- Bonorino, A.G., Albouy, R. y J.C., Carrica. 2001. Hidroquímica de un acuífero loésico. *Revista Geoacta*, (26): 33-45. Buenos Aires.
- Bonorino A. G., 2005. Acuíferos profundos e hidrotermalismo en Relatorio del XVI Congreso Geol. Argentino. La Plata 2005: 327-346.
- Burgess, L.C., 2013. Organic pollutants in soil. In: Brevik, E.C., Burgess, L.C. (Eds.), *Soils and Human Health*. CRC Press, Boca Ratón, 83-106 pp. Florida.

- Burgos J. y A Vidal, 1951. Los climas de la República Argentina según nueva clasificación de Thorntwhaite. Revista Meteoros I (1). Buenos Aires.
- Capelli de Steffens, A, Piccolo, M.C., Campos, A., 2005. Clima Urbano de Bahía Blanca. Revista Universitaria de Geografía. Vol.15, 183-186p. Bahía Blanca.
- Carrica, J., 1998. Hidrogeología de la cuenca del arroyo Napostá Grande, Provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur. Biblioteca Central. 215 pp y anexos. Inédito. Bahía Blanca.
- Carrica, J.C, Rossi, S.P, Albouy R y A.G Bonorino, 1992. Hidroquímica del agua subterránea del sector pedemontana del sector pedemontano de la vertiente sudoccidental de las Sierras Australes. . III Jornadas Bonaerenses Geológicas. Actas: 159-164. La Plata.
- Carrica J. y C. Robledo. 2002. Cálculo de la recarga de acuíferos mediante el análisis de las curvas de recesión de hidrogramas fluviales compuestos. Geoacta, 27: 16-29. ISSN 0326-7237.
- Carrica, J., R Albouy y G Bonorino, 2003. Modificaciones hidrodinámicas en el acuífero costero del área industrial de Bahía Blanca. III Congreso Argentino de Hidrogeología, Tomo I:113-122. Rosario Argentina
- Carrica J y Lexow, C., 2005. "Relación entre la desecación del suelo y los fenómenos de subsidencia ocurridos en Ingeniero White, Argentina". Geoacta, Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, 30: 47-56. ISSN 0326 7237. Buenos Aires.
- Carrica Lucía, Carrica J. y R, Albouy, 2020, Estado actual del conocimiento de los acuíferos en el partido de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente N° 45: 18-33 ISSN 2422-5703
- Capelli de Steffens A.M, M.C. Picolo y A. M Campo de Ferreras, 2006, Clima Urbano de Bahía Blanca. Rev. Univ. Geogr. Vol. 15 nro. 1. Bahía Blanca.
- Chaar, E., E. Farinati, S. Aliotta, y A. Tassone. 1992, Pleistoceno marino al sur de la ciudad de Bahía Blanca. III Jornadas Bonaerenses Geológicas. Actas: 3-12. La Plata.
- Connor J., Richard L. Bowers, Thomas E. McHugh, and AnnMarie H. Spexet. 2010. Software RBCA-Risk-Based Corrective Action Tool Kit Version 2.5e. Groundwater Services, Inc. Houston.

- DYMAS., 1974e. Contribución al mapa hidrogeológico de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000. Zonas de Bahía Blanca y Nordpatagónica. La Plata: CFI-PBA.
- De Francesco F.O, 1992. Estratigrafía del cenozoico en el flanco occidental de las sierras de Curamalal. Sierras Australes Bonaerenses. III Jornadas Geológicas Bonaerenses. Actas: 3-12. La Plata.
- Dobson R., Schroth M.H. y Zeyer J. (2007). Effect of Water-table fluctuation on dissolution and biodegradation of a multi-component, light nonaqueous-phase liquid. *Journal of Contaminant Hydrology*. 94, 235-248. ISSN: 0169-7722.
- Fidalgo, F, F.O De Francesco y R. Pascual, 1975 Geología Superficial de la llanura bonaerense. VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio: 103-138. Bahía Blanca.
- Fidalgo, F. 1983 Geología y geomorfología del área de White-Cerri y los alrededores de Bahía Blanca. Comisión Estudio de Suelos White-Cerri. MOP De la Provincia de Buenos Aires. Informe Final. La Plata.
- Folguera, A., M. P. Etcheverría, M. Zarate y L. Escoteguy, 2017. Hoja Geológica 3963-II Bahía Blanca. Provincia de Buenos Aires. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 425, 96pp., Buenos Aires.
- Freeze, R.A. y Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. Prentice Hall Inc. 604p.
- Frenquelli J., 1956, Rasgos generales de la hidrografía de la Provincia de Buenos Aires. MOP de la provincia de Buenos Aires. LEMIT Serie II, 62. La Plata.
- García, G. J. y O.M.E de García, 1964. Hidrogeología de la región de Bahía Blanca (provincias de Buenos Aires y La Pampa). Boletín N° 96 de la Dirección Nacional de Geología y Minería, 1-94. Buenos Aires.
- González Uriarte, M., 1984. Características geomorfológicas de la porción continental que rodea la Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires. IX Congreso Geológico Argentino. Actas III: 555-576. Bariloche.
- González Uriarte, M y E. Navarro. 1992 Regionalización geomorfológica para el ordenamiento territorial del Partido de Bahía Blanca. (Provincia de Buenos Aires) III Jornadas Geológicas Bonaerenses. Actas 235-240. La Plata.
- IHOBE S. A, 2006. Guía técnica para la evaluación y gestión de la contaminación del suelo por tanques de almacenamiento subterráneo. Depósito legal: Bi-2027 -06. Bilbao.

- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 1989. Mapas de suelos de la provincia de Buenos Aires. Publicación. 527 p. Buenos Aires.
- Kaaschieter, J.P, 1965 Geología de la Cuenca del Colorado. Acta Geológica Lilloana. II Jornadas de Geología Argentina.
- Khan, F.I., Husain, T., 2003. Evaluation of a petroleum hydrocarbon contaminated site for natural attenuation using 'RBMNA' methodology. Environ. Modell. Softw. 18, 179-194.
- Lafont, D., 2009 Identificación y caracterización de contaminantes metálicos en el acuífero costero del área industrial de Bahía Blanca. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur. Biblioteca Central. 137 pp y Anexos. Inédito. Bahía Blanca.
- Lovanh, N., Zhang, Y.K, Richard, C., Heathcote, R.C. y Álvarez, P.J.J., 2000. Guidelines to Determine Site-Specific Parameters for Modeling the Fate and Transport of Monoaromatic hydrocarbons in Groundwater. IOWA Comprehensive Petroleum Underground Storage Tank Fund Board. 55 pp.
- Lesser, J.M., 1995. Prospección de Contaminación de Acuíferos por Hidrocarburos. Revista del Colegio de Ingenieros Geólogos de México Vol. 1, Núm. 6, 5-8. Mexico D.F
- Lexow, C. y Bonorino, A.G., 1991. Contaminación del agua subterránea por derrames de hidrocarburos en la ciudad de Bahía Blanca". Primeras Jornadas Municipales sobre Medio Ambiente - Resúmenes. 53 p. Bahía Blanca.
- Lexow, C. y Bonorino, A.G., 1993. Contaminación de las aguas subterráneas por filtraciones de combustibles de los tanques de almacenamiento subterráneo. I Jornadas Nacionales y VI Regionales sobre Medio Ambiente. Resúmenes. 82 p. La Plata.
- Lexow, C., Albouy, R., Carrica, J.C y D. Lafont, 2014. Transporte de sustancias contaminantes del sector industrial planificado (Tornquist, provincia de Buenos Aires). Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. ASAGAI N° 32, 107- 116. ISSN 1851-7838. 9.
- Lexow, C., Pera Vallejos, G., Bauer, E., Carbajo, M., Tonelli, S. y Carrica, J., 2016. Transporte de hidrocarburos disueltos en el acuífero freático a partir de fugas en estaciones de servicio. Calidad del agua subterránea. (Eds. R.F. García y E. Mariño) Editorial Científica Universitaria – Universidad Nacional de Catamarca.

E-book (1): 147- 155. ISBN 978-987-661-222-7.

Limbozzi F., Bonorimo A.G. y Avena M.J. (2005). Aspectos geoquímicos de flúor y arsénico en un acuífero loésico. Cuenca del Arroyo Napostá Grande, Bahía Blanca. Actas. IV Congreso Argentino de Hidrogeología. Tomo 2, 113-123. Río Cuarto.

Llambias E y C. Prozzi, 1975. Ventania. VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio de la provincia de Buenos Aires: 79-103. Bahía Blanca.

Martínez Pagán, P. 2006. Aplicación de diferentes técnicas no destructivas de prospección geofísica a problemas relacionados con contaminación ambiental producida por diferentes actividades antrópicas en la Región de Murcia. Tesis Doctoral Universidad Nacional de Cartagena, 476 pp, y Anexos. Inédito. Cartagena.

McBride, M.B., 1994 Environmental chemistry of soils. Oxford University Press, Inc.416pp New York.

NMHP.1998. Netherlands Ministry of Housing, Physical Planning and Environment. Leidschendam, Holanda.

Newell, C. J., Acre, S. D., Ross, R. R. Y Hulin, S. G., 1995. Light Non-Aqueous Phase Liquids. EPA GroundWaterIssue, EPA/540/S-95/500. 28 pp. EEUU.

Paoloni J.D., Sequeira M.E., Espósito M.E. 2010. Los recursos hídricos - evaluación de la calidad. En: Ambientes y Recursos Naturales del Partido de Bahía Blanca: Clima, Geomorfología, Suelos y Aguas (Sudoeste de la provincia de Buenos Aires). Capítulo IV, 177-219. Paoloni J.D. Compilador. 1ª Edición Bahía Blanca, EdiUNS. (ISBN 978- 987-1648-22-1)

Park, I.S., Park, J.W., 2010 A novel total petroleum hydrocarbon fractionation strategy for human health risk assessment for petroleum hydrocarbon contaminated site management. Journal of Hazardous Materials.179 (1-3), 1128-1135. ISSN: 03043894.

Park, I.S., Park, J.W., 2011. Determination of a risk management primer at Petroleum-contaminant sites: developing new human health risk assessment strategy. Journal of Hazardous Materials. 2-3, 1374-1380. ISSN: 03043894.

Pazdirek, O. y Blaha V. 1996. Examples of resistivity using ME-IOO resistivity field

acquisition system. EAGE. 58th Conference and Technical Exhibition Extended Abstract 45-49. Amsterdam.

Pera Vallejos, G.; Lexow C.; Spina, D. y Tonelli, S. 2016. Análisis del riesgo a la salud humana por contaminación del acuífero freático de Bahía Blanca con hidrocarburos procedentes de estaciones de servicio. Calidad del agua subterránea. (Eds. R.F. García y E. Mariño) Editorial Científica Universitaria – Universidad Nacional de Catamarca. E-book (1): 139-146. ISBN 978-987-661-222-

Pinedo, J., Ibáñez, R., Irabien, A., 2012b. Risk assessment of total petroleum hydrocarbons (TPHs) fractions. Chemical Engineering Transaction 28, 61-66. ISSN: 2283-9216.

Pinedo J., 2014. Evaluación de riesgos en suelos afectados por hidrocarburos de petróleo. Universidad de Cantabria Tesis Doctoral. 225pp y Anexos. Inédito. Santander.

Pinedo, J., Ibáñez, R., Lijzen, J.P.A., Irabien, A., 2013b. Human Risk Assessment of Contaminated Soils by Oil Products: Total TPH Content vs. Fraction Approach. Hum. Ecol. Risk Assess. Human and Ecological Risk Assessment: An international Journal 20:5, 1231-1248, DOI:10.1080/10807039.2013.831264.

Pitney Bowes Software Pty Ltd, 2012 Endom Discover 3D. Houston 7.

Quatrocchio M, R. Guerstein, C Deschamps, C.Zavala, G Bonorino, J Kostadinoff, A. Borromei, S. Grill y L Ruiz. 1992. Estratigrafía y paleoambientes del sur de la provincia de Buenos Aires. Cuenca Ventania-Cuenca del Colorado. III Jornadas Geológicas Bonaerenses. La Plata.

Ortiz, J.E, García, M.J Rodríguez, J.L., 2003. Biomarcadores y su utilidad en la biodegradación del petróleo. Industria y Minera, 351:41-45. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.

Repetto, J.M, 1997. Toxicología Fundamental. Tercera edición. Ed. Díaz de Santos. 565p. Madrid.

Pogio, F., 2006. El análisis de riesgo RCBA en el desarrollo de objetivos de remediación. Revista Petrotecnia Vol. 44-1, 56-58. Instituto Argentino del Petróleo y el Gas. Buenos Aires.

Robinson, G.W., 1922 A new method for the mechanical analysis of soils and other

- dispersions. *Journal of Agricultural Science*, (12) 306-321. Cambridge.
- Rolleri, E., 1975 *Provincias Geológicas Bonaerenses*. VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires 29:53. Bahía Blanca.
- Rosales Aranda, R. Detección y evaluación de la contaminación del suelo por tanques enterrados de almacenamiento de hidrocarburos en estaciones de servicio. Universidad Politécnica de Cartagena. Tesis Doctoral. 232 pp y Anexos. Inédito. Cartagena.
- Rossi, P- 1996. Evolución hidroquímica del agua subterránea en la cuenca superior del arroyo Chasicó, provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca.
- Sainato, C., Lossino, B. Malleville, H., 2009. Electrical resistivity tomography applied to detect contamination on a dairy farm in the Pampean region, Argentina. *Near Surface Geophysics*, 8(2):163-172. European Association of Geoscientists and Engineers. Holanda.
- Sauck, W., Atekawana, E, Nash, M., 1998. Elevates conductivities associated with LNAPL plumes as imaged by geophysical methods. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2(3), 203-212. E-ISSN: 2319-7064.
- Sala, J. M, 1975. Recursos hídricos de la provincia de Buenos Aires, especial mención de las aguas subterráneas. VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio: 169-193.
- Sala, J.M; A.G Bonorino y J.C Carrica, 1985. Aspectos hidroquímicos del acuífero libre en los alrededores de Ingeniero White, provincia de Buenos Aires. *Primeras Jornadas Geológicas Bonaerenses*. Actas: 505:524. Tandil.
- Saval, S., Guerrero, F., Lesser, J.M. y Nieto, J.M., 2004. Contaminación de acuíferos con hidrocarburos: causas, efectos, riesgos asociados y medidas de prevención. En: *El Agua en México vista desde la Academia*. Academia Mexicana de Ciencias. 403 pp. México D.F.
- Schillizi R, y J. Kostadinoff, 1985. Basamento geofísico del área sudoccidental de las Sierras Australes, provincia de Buenos Aires. *I Jornadas Geológicas Bonaerenses*. Actas: 1055-1068. Tandil.
- Teruggi, M.E., 1957. The nature and origen of the Argentine loess. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27 (3): 322- 332. Tulsa.
- Trevisan, S., 1983. Informe geotécnico. Comisión Estudio de Suelos White-Cerri. MOP

De la Provincia de Buenos Aires. Informe Final. La Plata.

- Tricart, J. 1973. Geomorfología de la pampa deprimida. Base para estudios edafológicos y agronómicos. INTA col. científica. XII, 202 p. Buenos Aires.
- Tsai, T.T., Kao, C.M., 2009. Treatment of petroleum-hydrocarbon contaminated soils using hydrogen peroxide oxidation catalyzed by waste basic oxygen furnace slag. *Journal of Hazardous Materials*. 170 (1), 466-472.
- Tsai, C.-C., Chuang, S.-C., Liang, J.-C., & Tsai, M.J. 2011. Self-efficacy in Internet-based Learning Environments: A Literature Review. *Educational Technology & Society*, 14 (4), 222–240. ISSN 1436-4522
- USDA (United States Department of Agriculture), 2003. Keys to soil Taxonomy. Natural Resources Conservation Service (NRCS). Ninth Edition. 332p.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1989. Risk Assessment Guidance for Superfund, Volume I, Human Health Evaluation Manual, Part A, EPA/540/1-89/002, NTIS No. PB90-155581.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1996. Technical Background Document for Soil Screening Guidance, Review Draft, EPA/540/R-94/106.
- Van Wezel, A.P., Franken, R.O.G., Drissen, E., Versluijs, C.W., Van den Berg, R. 2007. Social cost-benefit analysis of the soil remediation operation in the Netherlands, MNP report 500122002/2007. The Netherlands Environmental Assessment Agency. Amsterdam.
- Ward, S. H, 1990. Resistivity and induced polarization methods: in *Geotechnical And Environmental Geophysics*, Vol I, Ward, S.H. Ed: Society of Exploration Geophysicists.
- Verbruggen, E.M.J., Beek, M., Pijnenburg, J., Traas, T.P., 2008. Ecotoxicological environmental risk limits for total petroleum hydrocarbons on the basis of internal lipid concentrations. *Environmental Toxicology. Chemistry*. 12, 2436-2448. ISSN: 1552-8618.
- Weisman, W. (Ed.) ,1998. Analysis of petroleum hydrocarbons in environmental media. Volume 1 of the Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group series. Amherst Scientific Publishers, Amherst, MA. EEUU.
- Wichmann, R. (1918). Geología e Hidrología de Bahía Blanca y sus alrededores (provincia de Buenos Aires). En D.G.M.Ge.H, *Anales de Minería y Agricultura de*

- la Nación (13) (págs. 1-67). Buenos Aires: D.G.M.Ge.H.
- Yrigoyen, M., 1975. Geología del Subsuelo y plataforma conocimientos. Geología de la Provincia de Buenos Aires. VI Congreso Geológico Argentino. Relatorio: 139-168. Bahía Blanca.
- Yrigoyen, M., 1999. Los depósitos cretácicos y terciarios de las Cuencas del Salado y del Colorado. En Caminos, R. (Ed.): Geología Argentina. Anales 29 (21): 645-649. Buenos Aires.
- Zambrano, J., 1980. Comarca de la Cuenca Cretácica del Colorado. Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias. 1033-1070pp. Córdoba.
- Zapperi, P y Campo, A. 2011. Efectos de precipitaciones intensas y su relación con las características geomorfológicas en Bahía Blanca. Revista Párrafos Geográficos, vol. 10 p. 593 – 593. Instituto de Investigaciones Geográficas de la Patagonia (IGEOPAT). Trelew.
- Zhu, T. Feng, R., Hao, J. Zhou, J., Wang, H. Wang, S. 2009. The Application of electrical resistivity tomography to detecting a buried fault: a case study. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 14:145-151. doi:10.2113/JEEG14.3145.