



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

EVALUACIÓN DE UN MODELO HIDROGEOLÓGICO EN UNA ZONA DE  
ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS

Autor

Juan Francisco Narvárez Poveda

2017



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

EVALUACIÓN DE UN MODELO HIDROGEOLÓGICO EN UNA ZONA DE  
ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS

Trabajo de Titulación en conformidad con los requisitos establecidos para optar  
por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y Remediación

Profesor guía

M.Sc. Santiago Daniel Piedra Burgos

Autor

Juan Francisco Narváez Poveda

Año

2017

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Santiago Daniel Piedra Burgos

Master of Science in Hydro Science and Engineering

C.I. 1715384150

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.

---

Daniel Hernán Hidalgo Villalba

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Especialización Ingeniería Ambiental

C.I. 1801914449



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

---

Juan Francisco Narváez Poveda

C.I. 1716637069

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi querida familia, por el apoyo, ejemplo y amor incondicional que siempre me ha brindado en cada una de mis aventuras y proyectos, especialmente a mi madre, padre, hermanas y abuelos.

A todo el equipo de SSA de El Beaterio, especialmente a Pame, Feli, Ceci, Sandrita y Cristian, por su gran colaboración para realizar este trabajo.

A mi profesor guía, Santiago, por compartir conmigo sus conocimientos y su atención brindada en cada tutoría.

A mi profesor corrector, Daniel, por el gentil tiempo brindado para revisar y mejorar este trabajo.

## DEDICATORIA

A mis amados padres, porque este logro es por y para ustedes.

A mi abuelo Germán, que desde lo más alto estoy seguro de que se siente orgulloso de su nieto y sigue bendiciendo cada uno de mis pasos.

Con Dios y por la Patria.

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo principal evaluar un modelo hidrogeológico en un centro de almacenamiento de hidrocarburos, lugar que podría ser una fuente de contaminación de aguas subterráneas. Para este fin, se estableció el convenio de tesis CONVENIO THU No. 2017074 con la empresa pública EP PETROECUADOR y se viabilizó legalmente el desarrollo del estudio en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Bajo este contexto, se partió de recopilación de información secundaria, facilitada por EP PETROECUADOR, de otras fuentes oficiales y la obtenida de estudios anteriores. Para definir el área a modelar, se utilizó el software QGIS Las Palmas 2.18.1 y se generó un modelo conceptual que representa de manera general el sistema hidrogeológico y sus condiciones de borde. Partiendo de lo anterior, se evaluó el recurso hídrico subterráneo mediante el software Processing Modflow 5.3, asumiendo un estado estacionario y movimiento por advección en doce escenarios de estudio en función de las cuatro zonas de mayor riesgo de derrame y de tres condiciones de recarga por precipitación: máxima, media y mínima; en un horizonte de tiempo constante de un año.

Como resultados, se concluye que existen tres niveles acuíferos: uno superior semiconfinado de múltiples capas en las que predomina arena en su composición, un estrato confinante de limo plástico y un acuífero inferior confinado de arena de granos gruesos y contenido de limo. La dirección de flujo es predominante hacia el Este y Noreste en los doce escenarios evaluados. El punto receptor en el extremo Este de posibles partículas de contaminación es el río de la Quebrada Sin Nombre. Se concluyó que la hipótesis alternativa que establece que el flujo se mueve de zonas de cargas hidráulicas mayores a menores es válida. Además, que existe una correlación significativa entre las cargas hidráulicas iniciales y las resultantes. También que la precipitación tiene un efecto directamente proporcional sobre la cargas hidráulicas y velocidad de flujo e inversamente proporcional sobre el tiempo de movimiento de las partículas

en llegar a los diferentes puntos receptores. Finalmente, se concluyó que el método Tratamiento y Bombeo es adecuado como mecanismo de remediación y prevención.

## ABSTRACT

The main goal of this study was to assess a hydrogeological model of a hydrocarbon storage center, which is a place that could be a source of groundwater pollution. To make this study possible, the thesis agreement CONVENIO THU No. 2017074 was established with the public company EP PETROECUADOR and the development of the present work was legally approved at Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Therefore, the first step was the recompilation of secondary information provided by EP PETROECUADOR, other official entities and from previous works. The area of the study was defined using QGIS Las Palmas 2.18.1 software. A conceptual model was created to generally represent the environment of the hydrogeological system and its boundary conditions. Consequently, the assessment of the hydrogeological model was performed using Processing Modflow 5.3, assuming steady – state flow and advective transport in twelve different scenarios, each of them related to the four zones of greater oil spill risk and to three precipitation conditions: maximum, average and minimum. A constant period length of one year was also assumed.

Thus, the results obtained in this study lead to the conclusion that there are three aquifers: an upper multiple layer partially confined aquifer, which mainly contains sand in its structure; a confining layer composed by silt; and a lower confined aquifer composed by sand with large grains and silty sand. The flow direction in the twelve evaluated scenarios is mainly to the East and Northeast. The discharge point eastward is the river of Quebrada Sin Nombre. Plus, it was concluded that the alternative hypothesis is valid considering that the groundwater flow goes from high hydraulic head zones to low hydraulic head zones. Also, that there is a correlation between the initial hydraulic heads and the calculated hydraulic heads from the model. Moreover, that the precipitation is directly proportional to the flow velocity and to the calculated hydraulic heads, and inversely proportional to the particle movement step time to the discharge

zones. Finally, it was concluded that the Pump & Treat method is accurate not only as a remediation system, but a prevention system as well.

# ÍNDICE

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción .....	1
1.1.1. Antecedentes .....	1
1.1.2. Marco referencial .....	2
1.1.3. Objetivo General .....	5
1.1.4. Objetivos específicos .....	5
1.1.5. Alcance .....	5
1.1.6. Justificación .....	6
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes e importancia de los modelos Hidrogeológicos.....	7
2.2. Fundamento teórico de un modelo hidrogeológico .....	9
2.3. Fundamentos de la hidrogeología .....	10
2.4. Conceptos básicos.....	10
2.4.1. Ciclo hidrológico.....	10
2.4.2. Agua subterránea.....	11
2.4.3. Acuíferos.....	12
2.4.4. Ley de Darcy.....	13
2.4.5. Propiedades físicas de los acuíferos .....	15
2.5. Fundamentos del Software QGIS Las Palmas 2.18.1 .....	16
2.6. Fundamentos del Software Processing Modflow 5.3.....	17
2.6.1. Historia del software.....	17
2.6.2. Códigos de procesos de Processing Modflow 5.3 .....	18
2.7. Procedimiento para realizar un modelo en Processing Modflow 5.3 .....	18
2.7.1. Crear una grilla.....	19



2.7.2.	Propiedades de las capas .....	19
2.7.3.	Definición de los parámetros del modelo.....	20
2.7.4.	Correr el modelo .....	22
2.8.	Fundamentos de geoestadística .....	22

### 3. CAPÍTULO III. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN..... 24

3.1.	Descripción de la situación actual .....	24
3.1.1.	Descripción general y localización del Terminal de Productos Limpios El Beaterio .....	24
3.1.2.	Áreas y procesos del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	26
3.2.	Área de influencia.....	34
3.2.1.	Área de influencia directa.....	34
3.2.2.	Área de influencia indirecta .....	36
3.3.	Estudio hidrogeológico mediante pozos de monitoreo.....	40
3.3.1.	Ubicación y características de los pozos de monitoreo en El Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	41
3.3.2.	Características hidrogeológicas .....	42
3.4.	Información hidrogeológica de la subcuenca hidrográfica Quito Sur.....	46
3.4.1.	Área .....	47
3.4.2.	Elevación y pendiente media.....	47
3.4.3.	Precipitación media anual .....	47
3.4.4.	Evapotranspiración .....	48
3.4.5.	Escorrentía superficial.....	48
3.4.6.	Hidrogeología de la subcuenca del Sur de Quito.....	49

### 4. CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA .....

4.1.	Recopilación de información secundaria.....	51
------	---	----

4.2. Estudios iniciales .....	52
4.2.1. Trabajos de campo .....	52
4.2.1.1. Ubicación de los pozos de monitoreo.....	52
4.2.1.2. Determinación de las cuatro zonas de riesgo de derrame del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. ....	53
4.2.1.3. Determinación de las coordenadas y cotas del río que pasa por la quebrada denominada “Quebrada Sin Nombre”.....	54
4.2.2. Determinación de la zona de estudio .....	54
4.2.2.1. Mapa de localización de pozos de monitoreo, zonas de riesgo, cotas, área del modelo y segmentos del modelo. ....	55
4.3. Desarrollo del modelo conceptual .....	56
4.3.1. Información hidrogeológica de los pozos de monitoreo. ....	56
4.3.2. Estratigrafía del suelo.....	57
4.3.3. Cotas de nivel .....	57
4.3.4. Carga hidráulica .....	58
4.3.5. Hidrogeología.....	58
4.3.6. Construcción del modelo conceptual.....	59
4.4. Evaluación del modelo numérico .....	60
4.4.1. Determinación de los límites del área de modelación y condiciones de borde .....	61
4.4.1.1. Primera fase: Modelo del área total de estudio .....	61
4.4.1.2. Segunda fase: Modelo seccionado en cuatro zonas .....	61
4.4.2. Definición de la grilla y discretización horizontal y vertical.....	62
4.4.2.1. Primera fase: Modelo del área total de estudio .....	62
4.4.2.2. Segunda fase: Modelo hidrogeológico seccionado en cuatro.....	63
4.4.3. Propiedades de las capas .....	64
4.4.4. Determinación de las condiciones de borde del modelo.....	65
4.4.5. Elevación tope y base de las capas .....	68
4.4.6. Determinación del tipo de modelo en relación a la dinámica temporal.....	69
4.4.7. Definición del intervalo de tiempo y horizonte de	

simulación .....	69
4.4.8. Determinación de las cargas hidráulicas .....	70
4.4.9. Conductividad hidráulica .....	72
4.4.10. Porosidad efectiva.....	73
4.4.11. Recarga del acuífero .....	76
4.4.12. Asignación de escenarios al modelo de flujo.....	76
4.4.13. Correr el modelo y simular el movimiento del flujo a través de PMPATH. ....	77
4.4.14. Cálculo del tiempo de movimiento de flujo .....	78

## 5. CAPÍTULO V. RESULTADOS Y

ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	79
5.1. Resultados de trabajos de campo .....	79
5.1.1. Coordenadas geográficas y cotas de los pozos de monitoreo, zonas de riesgo de derrame del Terminal de Productos Limpios El Beaterio y del río que cruza por la Quebrada Sin Nombre. ....	80
5.1.2. Mapa georreferenciado del área de estudio para la evaluación del modelo hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	83
5.2. Modelo conceptual .....	85
5.3. Modelo numérico .....	91
5.4. Escenarios de modelamiento .....	95
5.4.1. Escenario 1: .....	96
5.4.2. Escenario 2: .....	98
5.4.3. Escenario 3: .....	100
5.4.4. Escenario 4: .....	102
5.4.5. Escenario 5: .....	105
5.4.6. Escenario 6: .....	108
5.4.7. Escenario 7: .....	111
5.4.8. Escenario 8: .....	115

5.4.9.	Escenario 9: .....	120
5.4.10.	Escenario 10: .....	125
5.4.11.	Escenario 11: .....	127
5.4.12.	Escenario 12: .....	130
5.5.	Análisis de resultados de los escenarios de modelamiento.....	133
5.5.1.	Análisis escenarios Zona 1 .....	133
5.5.2.	Análisis escenarios Zona 2 .....	136
5.5.3.	Análisis escenarios Zona 3 .....	140
5.5.4.	Análisis escenarios Zona 4 .....	147
5.6.	Análisis estadístico.....	151
5.6.1.	Análisis de distribución normal .....	152
5.6.2.	Análisis de correlación .....	154
5.7.	Análisis de implementación de pozos de remediación.....	156
5.7.1.	Evaluación del método Bombeo y Tratamiento mediante Processing Modflow 5.3.....	157
5.7.2.	Especificaciones del tratamiento ex – situ de aguas subterráneas .....	161
5.7.3.	Análisis de otros métodos de tratamiento.....	163
5.7.4.	Parámetros de calidad de agua subterránea a evaluar .....	164
5.8.	Análisis de la implementación de piezómetros de monitoreo de aguas subterráneas .....	165
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	169
6.1.	Conclusiones.....	169
6.2.	Recomendaciones .....	174
	REFERENCIAS .....	178
	ANEXOS .....	182

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes del ciclo hidrogeológico.....	11
Figura 2. Grilla de un modelo en Modflow a partir de discretización espacial.....	19
Figura 3. Mapa infraestructura Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	25
Figura 4. Diagrama general de procesos del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	28
Figura 5. Mapa Implantación de la infraestructura en el área del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	33
Figura 6. Mapa del área de influencia directa del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. ....	35
Figura 7. Barrios vecinos del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. Unidad de área: m <sup>2</sup> . ....	37
Figura 8. Área de influencia indirecta del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. Unidad de Área: m <sup>2</sup> . ....	38
Figura 9. Mapa de la ubicación geográfica de los cuatro pozos de monitoreo en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	41
Figura 10. Perfil Litoestratigráfico de la zona de monitoreo de agua subterránea en las plataformas de remediación del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	43
Figura 11. Mapa de isopiezas y líneas de flujo de aguas subterráneas del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. ....	44
Figura 12. Parámetros físicos del estudio de pozos de monitoreo de aguas subterráneas del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	45
Figura 13. Perfil hidrogeológico del estudio de pozos de monitoreo de aguas subterráneas del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	46
Figura 14. Diagrama de procesos generales de la metodología.....	51
Figura 15. Datos de entrada para definir la grilla del modelo hidrogeológico de tres capas.....	62
Figura 16. Grilla utilizada en la primera fase el modelo hidrogeológico en Processing Modflow 5.3.....	63
Figura 17. Datos de entrada para definir la grilla del modelo hidrogeológico de tres capas.....	63
Figura 18. Grilla del modelo hidrogeológico de una capa. ....	64
Figura 19. Propiedades de la capa del modelo. ....	65
Figura 20. Ubicación de valores IBOUND en la grilla del modelo de la primera fase. ....	67

Figura 21. Ubicación de valores IBOUND en la grilla del modelo de la segunda fase.....	67
Figura 22. Parámetro de tiempo del modelo de una capa. ....	69
Figura 23. Mapa georreferenciado de la ubicación de los pozos de monitoreo, zonas de riesgo de derrame y área del modelo del Terminal de Productos Limpios El Beaterio .....	84
Figura 24. Modelo Conceptual del Terminal de Productos Limpios El Beaterio a partir de una imagen tipo MDT de la subcuenca del Sur de Quito. ....	86
Figura 25. Modelo conceptual de la evaluación del recurso hídrico subterráneo del Terminal de Producto de Productos Limpios El Beaterio.....	88
Figura 26. Visualización de cargas hidráulicas y vectores de velocidad de la primera capa.....	92
Figura 27. Visualización de cargas hidráulicas y vectores de velocidad de la segunda capa .....	93
Figura 28. Visualización de cargas hidráulicas y vectores de velocidad de la tercera capa.....	94
Figura 29. Escenario 1 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	96
Figura 30. Escenario 2 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	99
Figura 31. Escenario 3 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	101
Figura 32. Escenario 4 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	103
Figura 33. Escenario 5 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	106
Figura 34. Escenario 6 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	109
Figura 35. Escenario 7 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	112
Figura 36. Escenario 8 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	116
Figura 37. Escenario 9 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	121
Figura 38. Escenario 10 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	126
Figura 39. Escenario 11 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	128
Figura 40. Escenario 12 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	131

Figura 41. Resultado en función del tiempo de los escenarios de modelamiento de la zona de riesgo de derrame 1.....	133
Figura 42. Resultado en función del tiempo de los escenarios de modelamiento de la zona de riesgo de derrame 2.....	137
Figura 43. Resultado en función del tiempo de los escenarios de modelamiento de la zona de riesgo de derrame 3.....	141
Figura 44. Resultado en función del tiempo de los escenarios de modelamiento de la zona de riesgo de derrame 4.....	147
Figura 45. Prueba de Shapiro – Wilk para los datos de carga hidráulica inicial. ....	153
Figura 46. Prueba de Shapiro – Wilk para los datos de conductividad hidráulica horizontal. ....	153
Figura 47. Prueba de Shapiro – Wilk para los datos de carga hidráulica resultante o final.....	154
Figura 48. Correlación de Pearson´s entre las cargas hidráulicas iniciales y las cargas hidráulicas finales resultantes del modelo en la primera capa.....	155
Figura 49. Correlación de Pearson´s entre la conductividad hidráulica horizontal y las cargas hidráulicas finales resultantes del modelo en la primera capa.....	156
Figura 50. Pozos del sistema Bombeo y Tratamiento en el modelo hidrogeológico. Se muestran las cargas hidráulicas y vectores de velocidad resultantes una vez insertados los pozos...	159
Figura 51. Modelo hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio evaluado con el sistema de tratamiento Bombeo y Tratamiento.....	160
Figura 52. Diagrama de procesos general del sistema de Bombeo y Tratamiento Recomendado para el Terminal de Productos Limpios El Beaterio. ....	162
Figura 53. Mapa de la ubicación geográfica de los piezómetros actuales, piezómetros propuestos y pozos de remediación propuestos en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	168

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de áreas operativas y administrativas actuales del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	26
Tabla 2. Equipos e instalaciones de las áreas operativas del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	29
Tabla 3. Detalle de la capacidad de almacenamiento del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	31
Tabla 4. Área de influencia indirecta total y de cada barrio respecto al área total de los Barrios vecinos de El Terminal de Productos Limpios El Beaterio. ....	39
Tabla 5. Datos de los pozos de monitoreo en función a su ubicación y profundidad.....	42
Tabla 6. Elevación tope y base de cada capa del modelo.....	68
Tabla 7. Rango de cotas y cargas hidráulicas del modelo de tres capas. ....	71
Tabla 8. Valores de entrada para realizar el proceso de geoestadística en el Software Processing Modflow 5.3.....	73
Tabla 9. Conductividad hidráulica y porosidad efectiva capas Pozo PMB-3D. ....	74
Tabla 10. Conductividad hidráulica y porosidad efectiva capas Pozo PMB-1M. ....	75
Tabla 11. Conductividad hidráulica y porosidad efectiva capas Pozo PMB-2D.....	75
Tabla 12. Conductividad hidráulica y porosidad efectiva capas Pozo PMB-4M y río Quebrada Sin Nombre .....	76
Tabla 13. Escenarios de modelamiento evaluados. ....	77
Tabla 14. Coordenadas geográficas UTM sistema WGS84 Zona 17 Sur y cotas de los pozos de monitoreo del área de las Plataformas de RAM del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	80
Tabla 15. Coordenadas geográficas en sistema UTM de las zonas de riesgo de derrame del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	80
Tabla 16. Coordenadas geográficas en sistema UTM del río de la Quebrada Sin Nombre que colinda al extremo Este con el Terminal de Productos Limpios El Beaterio. ....	82
Tabla 17. Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 1 de modelamiento.....	97
Tabla 18. Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 2 de	



modelamiento. ....	100
Tabla 19. Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 3 de modelamiento. ....	102
Tabla 20. Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 4 de modelamiento. ....	104
Tabla 21. Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 5 de modelamiento. ....	107
Tabla 22. Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 6 de modelamiento. ....	110
Tabla 23. Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 7 de modelamiento. ....	113
Tabla 24. Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 7 de modelamiento. ....	117
Tabla 25. Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 9 de modelamiento. ....	122
Tabla 26. Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 10 de modelamiento. ....	127
Tabla 27. Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 11 de modelamiento. ....	129
Tabla 28. Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 12 de modelamiento. ....	132
Tabla 29. Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 1, piscina API, en función del tiempo. ...	134
Tabla 30. Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 1, Islas de Carga, en función del tiempo. ....	136
Tabla 31. Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 2, área de bombas, filtros y mezclas de Jet, en función del tiempo. ....	138
Tabla 32. Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 2, área central de los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y	

TB 1017, en función del tiempo.....	139
Tabla 33. Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 3, tanque de almacenamiento TB 1020, en función del tiempo. ....	143
Tabla 34. Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 3, tanque de almacenamiento TB 1014, en función del tiempo. ....	144
Tabla 35. Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 3, tanque de almacenamiento TB 1007, en función del tiempo.....	145
Tabla 36. Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 3, tanques de almacenamiento TB 1022, 1012, 1005, 1009, 1008, 1011, 1013 1010, 1003, 1001 y esferas de almacenamiento TB 1023, 1024 y 1025 en función del tiempo. ....	146
Tabla 37. Tabla 37. Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 4, tanques de la Estación Reductora, en función del tiempo.....	149
Tabla 38. Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 4, Estación Reductora, en función del tiempo. ....	150
Tabla 39. Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 4, Estación de Bombeo, en función del tiempo. ....	151
Tabla 40. Configuración del sistema Bombeo y Tratamiento.....	158
Tabla 41. Parámetros de muestra de calidad de aguas. ....	165
Tabla 42. Tabla 42. Ubicación geográfica de los piezómetros de monitoreo de aguas subterráneas propuestos para el Terminal de Productos Limpios El Beaterio.....	167

# 1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Introducción

### 1.1.1. Antecedentes

El Terminal de Productos Limpios El Beaterio es parte de la infraestructura que existe en Ecuador del sector de hidrocarburos, específicamente de las actividades de transporte y almacenamiento de productos limpios. Se encuentra localizado en la Provincia de Pichincha, Cantón Quito, Av. El Beaterio y Av. Pedro Vicente Maldonado, Barrio Guamaní – sector El Beaterio. Este terminal pertenece a la Empresa Pública de Petróleos del Ecuador EP PETROECUADOR, su construcción se llevó a cabo entre los años 1973 y 1975 y su operación inició en el año 1977, es decir, tiene un tiempo de vida de 40 años. Las operaciones que se llevan a cabo en El Beaterio son: recepción de productos limpios (gasolina súper, nafta base y diésel) por medio de los poliductos Esmeraldas – Quito y Shushufindi – Quito, almacenamiento de productos limpios en tanques de almacenamiento, mezcla para obtener gasolina Extra, filtración del combustible para la aviación Jet Fuel, transporte y despacho de los productos limpios a través del Poliducto Quito – Ambato – Riobamba y auto tanques de gasolinas y combustibles. Este Terminal abastece de estos productos derivados del petróleo al sector centro norte del país y cuenta en la actualidad con 585 trabajadores, entre personal directo, contratistas y proveedores de servicios (PETROECUADOR, 2017).

Debido a todos los procesos que se llevan a cabo con el manejo de productos limpios derivados del petróleo en este Terminal; ha sido necesaria la implementación de planes de remediación ambiental de suelos y aguas contaminadas a través del departamento llamado Restauración Ambiental (PETROECUADOR, 2017). De aquí, nace la importancia de ejercer programas

efectivos de control y remediación ambiental y como parte de los mismos, el desarrollo de modelos hidrogeológicos que permitan evaluar las aguas subterráneas y simulen el comportamiento de una posible contaminación existente en las mismas como una herramienta para implementar programas de remediación y de prevención.

### **1.1.2. Marco referencial**

El Beaterio, al tratarse de un centro operativo donde se gestiona el transporte y almacenamiento de productos limpios derivados del petróleo, presenta una serie de riesgos que han sido categorizados por EP PETROECUADOR como internos y externos. En primer lugar, los riesgos internos son aquellos que se derivan de las propias actividades que se desarrollan en el sitio, como riesgos laborales, derrames e incendios. Por otro lado, los riesgos externos son fenómenos naturales y eventos fortuitos, como sismos, erupciones volcánicas, atentados, entre otros. Tanto los riesgos internos como los externos, requieren ser evaluados de una manera adecuada para lograr medidas oportunas de prevención y contingencia. Para el caso de este estudio, se tendrá principal atención a los riesgos internos, específicamente al riesgo de derrame. El documento de EP PETROECUADOR llamado *Plan de Emergencia Terminal El Beaterio 2017*, aborda la identificación y valoración de riesgos a partir de seis zonas del terminal: Zona 1: islas de carga, patio bombas, piscinas API, generadores de emergencia, Zona 2: Planta de Jet Fuel y Mezclas (incluye tanques), Zona 3: Área de tanques de almacenamiento (incluye las esferas de almacenamiento y piscina de lodos), Zona 4: Estación de Bombeo y Estación Reductora (incluye tanques), Zona 5: Área de Almacenamiento de Residuos Industriales (incluye piscina de lodos y generadores de emergencia) y Zona 6: Área de talleres de mantenimiento. El resultado de la valoración de riesgo de derrame a partir del método de Mosler determinó que, de las seis zonas evaluadas, las cuatro primeras presentan un riesgo de carácter grande y las dos últimas un riesgo bajo (PETROECUADOR, 2017). Además, es necesario tener en cuenta que El Beaterio presenta suelos permeables, en donde es posible que

se produzca una infiltración de productos derivados del petróleo y que los mismos lleguen a las aguas subterráneas, considerando que el nivel freático es alto en esta zona y generalmente se encuentra a menos de 1.50 metros de profundidad (PETROECUADOR, 2017).

El Beaterio cumple con la Política de Seguridad y Salud de EP PETROECUADOR, en la cual se establecen los compromisos para asegurar acciones que protegen a sus colaboradores, al ambiente, sus instalaciones y a la comunidad. Bajo este marco institucional, el compromiso número dos menciona textualmente lo siguiente: “Proveer los recursos humanos, económicos, tecnológicos y financieros, necesarios para mejorar de manera continua el desempeño individual y colectivo de Seguridad, Salud y Ambiente en todas nuestras actividades”. (PETROECUADOR, 2017). Además, en base al Plan de Manejo Ambiental actualizado a través de la Auditoría Ambiental de Cumplimiento del Terminal de Productos Limpios El Beaterio 2012, se establece en el Plan de Prevención y Mitigación de Impactos y Manejo de Desechos, que contempla la protección del recurso generado por afloramientos de agua subterránea. En este mismo documento, se establece el Plan de Contingencias, cuyo fin es minimizar y reducir el riesgo de impacto ambiental generado por posibles amenazas naturales, operacionales y antrópicas. En este plan, se considera la diversidad de escenarios de emergencias y los daños colaterales que pueden generar en función a su naturaleza, magnitud y gravedad (Auditoría Ambiental, 2011).

Partiendo de este marco institucional y considerando adicionalmente el artículo 14 de la Constitución de la República del Ecuador que establece que: “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, Sumak Kawsay”. (Silec, 2017). Y, además el artículo 71 del mismo cuerpo legal que dice: “La naturaleza o Pacha Mama, donde se reproduce y realiza la vida, tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales, estructura, funciones y procesos evolutivos”.

(Silec, 2017); es, por tanto, necesario implementar medidas de prevención y remediación ante derrames que puedan afectar las aguas subterráneas.

Si bien actualmente existen medidas de remediación de pasivos ambientales en la zona (PETROECUADOR, 2017), es importante abordar este problema desde un enfoque técnico, partiendo de un modelo del recurso hídrico subterráneo mediante el software Processing Modflow 5.3, el cual permite la evaluación de los parámetros y condiciones de borde de un sistema particular de una manera simplificada conceptual y posteriormente a través de un modelo matemático y a partir de los resultados obtenidos, plantear medidas de prevención y remediación de impactos ambientales a las aguas subterráneas con potencial afectación a los ecosistemas y a la población (Toro, 2012).

Por lo anteriormente expuesto, antes de realizar un proceso de remediación de pasivos ambientales, es necesario realizar un levantamiento de línea base, dentro del cual se debe evaluar el suelo y las aguas subterráneas para simular la posibles plumas de contaminación, su dirección y posibles puntos críticos de afectación; así como identificar los lugares idóneos para establecer un plan de remediación mediante pozos, por ejemplo. Una manera técnica y eficaz de lograr este fin es mediante un modelo hidrogeológico utilizando el programa Modflow, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, que consiste en un modelador 3D por diferencias finitas y es considerado como el software más utilizado a nivel internacional para simular y predecir condiciones de aguas subterráneas e interacciones entre el suelo y las mismas. (Harbaugh, Banta, Hill, y Mc Donald, 2000).

Para este estudio, la hipótesis alternativa que se plantea para el modelo hidrogeológico evaluado en el software Processing Modflow 5.3, es que el agua subterránea se mueve de una zona de carga hidráulica mayor a una zona de carga hidráulica menor y de una cota mayor a una cota menor; por lo que los lugares que se encuentren en una cota inferior serán los que reciban mayor afectación de una posible contaminación y por tanto las medidas de remediación

deberán establecerse en estos sectores. Por otro lado, la hipótesis nula planteada es que el agua subterránea se mueve de una zona de carga hidráulica menor a una mayor y de una cota menor a una cota mayor de nivel.

### **1.1.3. Objetivo General**

Evaluar un modelo hidrogeológico en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio mediante el software Modflow.

### **1.1.4. Objetivos específicos**

- Definir el área a modelar del Terminal de Productos Limpios El Beaterio a través de geoprocésamiento con el software geográfico QGIS Las Palmas 2.18.1.
- Plantear recomendaciones de prevención y remediación ante situaciones de emergencia por derrames en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio que afecten a las aguas subterráneas.

### **1.1.5. Alcance**

El alcance de este proyecto es la evaluación de un modelo hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio mediante el software Processing Modflow 5.3. Se realizará un levantamiento de información que será empleada como los datos de entrada del modelo mediante la recopilación de información secundaria y análisis in situ y de información primaria complementaria, considerando la normativa técnica y ambiental vigente. La información secundaria que requiere el modelo es de carácter geológico, hídrico e hidrogeológico, determinando parámetros como porosidad efectiva, carga hidráulica y conductividad hidráulica. Es necesario puntualizar que el modelo hidrogeológico será evaluado específicamente asumiendo un flujo por advección, lo que significa un estado estacionario en el que el caudal no varía

en función del tiempo. Para la evaluación del modelo, se llevará a cabo una serie de corridas, realizando cambios en las variables de entrada para obtener varios escenarios del modelo hidrogeológico para el caso de estudio. Al final del proyecto, se evaluará el modelo hidrogeológico considerando tres escenarios en función a la precipitación como condición de recarga, evaluando lluvias de máxima, mínima y media, en un horizonte de tiempo constante de un año. Cada uno de estos tres escenarios será evaluado en las cuatro zonas identificadas con mayor riesgo de derrame: A) qué pasa si existe un derrame en la Zona 1: islas de carga, patio de bombas, piscinas API y generadores de emergencia. B) qué pasa si existe un derrame en la Zona 2: Planta Jet Fuel y Mezclas (incluye tanques). C) qué pasa si existe un derrame en la Zona 3: Área de tanques de almacenamiento (incluye las esferas de almacenamiento y piscina de lodos). D) qué pasa si existe un derrame en la Zona 4: Estación de Bombeo y Estación Reductora (incluye tanques). A partir de esta evaluación, se obtendrá un total de 12 escenarios y en función a los mismos, se formularán recomendaciones de prevención y contingencia ante situaciones de emergencia por derrames en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

#### **1.1.6. Justificación**

Considerando la peligrosidad que representan los derivados del petróleo en cualquier matriz ambiental y sus repercusiones en el equilibrio de los ecosistemas y la salud de las personas (Ferrera, Rojas, Poggi, y Alarcón, 2006, p-179-180), es necesario el desarrollo de un modelo hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio como una primera acción para evaluar la dirección de posibles plumas de contaminación en el agua subterránea y los focos de influencia más críticos de la misma. De este análisis, por tanto, se podría identificar cuáles deberían ser las medidas de remediación más adecuadas para el caso, en términos técnicos, ambientales y económicos.



El propósito de desarrollar un modelo hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio es que el mismo sea de utilidad y esté direccionado a ser la primera acción de un plan ambiental de prevención y contingencia de derrames.

## **2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Antecedentes e importancia de los modelos hidrogeológicos**

El interés mundial sobre las aguas subterráneas, su manejo y conservación es cada vez mayor y se ha convertido en uno de los ejes fundamentales de la sostenibilidad debido a la importancia ambiental, social y económica que representan. (Sanz, 2014). Evidencia de esto es la gestión de este tema a nivel de organismos internacionales y nacionales. En primera instancia, se resalta la inclusión del manejo de aguas subterráneas en organismos internacionales, como la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Por un lado, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura (UNESCO), establece que las aguas subterráneas presentan vital importancia debido a que son un componente significativo del ciclo hidrogeológico. Además, las cifras de la UNESCO indican que las aguas subterráneas representan el 98% del agua dulce no congelada, por tanto, son el sostén de varios servicios y ciclos ecológicos y también una fuente segura de agua de consumo humano (UNESCO, 2016). Por otro lado, la ONU a través del Plan de Las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, establece la importancia de las aguas subterráneas en el objetivo número 6: “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos” (ONU, 2015). Finalmente, La FAO en su texto oficial llamado: “Gobernanza del agua subterránea: Un marco mundial para la acción de las naciones”, establece la importancia que representa el manejo sostenible e integrado de las aguas subterráneas a nivel mundial para el abastecimiento de agua limpia y de calidad de las poblaciones (FAO, 2010).

A nivel regional del continente sudamericano, la Organización de los Estados Americanos (OEA) establece en su texto oficial llamado: “El recurso invisible Acuíferos transfronterizos: una oportunidad de cooperación internacional”, que el agua de estos recursos hídricos subterráneos puede ser aprovechada por las comunidades del mundo debido a su calidad, sin embargo, una vez agotado o contaminado este recurso, su recuperación puede tardar siglos. Aproximadamente, un tercio del total del agua que se utiliza en regiones áridas y semiáridas de América Latina se origina en acuíferos (OEA, 2004).

Por otra parte, a nivel nacional, la Constitución de la República del Ecuador, reza en el artículo 414 lo siguiente:

“El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico. Se regulará toda actividad que pueda afectar a la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua” (Silec, 2017).

Partiendo de ese marco legal, se derivan otras leyes como la Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua, que menciona lo siguiente en el artículo 79 literal c): “Controlar y prevenir la acumulación en suelo y subsuelo de sustancias tóxicas, desechos vertidos y otros elementos capaces de contaminar las aguas superficiales o subterráneas” (Silec, 2017).

Finalmente, haciendo referencia al manejo de las aguas subterráneas a nivel local, es decir el Distrito Metropolitano de Quito, la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) lidera un proyecto interinstitucional con miras a la protección de los recursos hídricos subterráneos. Este hecho parte de la participación de los países de Latinoamérica en el taller denominado “Gestión integrada para la protección y aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos”, evento auspiciado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Además del liderazgo de la EPMAPS en este proyecto, también participan otras instituciones, como la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), el Instituto Nacional de Meteorología e

Hidrología (INAMHI) y la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Los resultados que aportará este proyecto integral en pro de la protección y aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos serán recomendaciones técnicas para todas las entidades del país involucradas en el manejo de aguas subterráneas (EPMAPS, 2016).

Teniendo en consideración lo expuesto sobre aguas subterráneas, es necesario adoptar mecanismos de manejo de este recurso de carácter técnico con un enfoque preventivo y correctivo, como modelos hidrogeológicos, mismos que a nivel mundial son concebidos como herramientas capaces de simular posibles escenarios de afectación a las aguas subterráneas. (Toro, 2012).

## **2.2. Fundamento teórico de un modelo hidrogeológico**

Un modelo hidrogeológico es una representación simplificada, física o numérica, de un sistema hidrogeológico real, como una cuenca hidrográfica o acuíferos. Estos modelos, por tanto, permiten visualizar a escala el comportamiento hidrogeológico del recurso hídrico subterráneo como una herramienta de evaluación en base a información secundaria y primaria, proveniente de estudios de campo y laboratorio (Pascual, Sanz y de Bustamante, 2013).

Existen varios tipos de modelos, pero los mayormente utilizados son los conceptuales y numéricos. En primer lugar, los modelos conceptuales son la representación visual simplificada de los parámetros más importantes del sistema físico y su comportamiento. Están basados en información secundaria disponible, como información geológica, hídrica e hidrogeológica y permiten la determinación de las condiciones de borde del sistema de estudio. Partiendo de un modelo conceptual, es factible el desarrollo de un modelo numérico. Para este efecto, es necesario analizar e insertar los parámetros y condiciones de borde definidas en el modelo conceptual a un sistema matemático a través de un software de modelamiento hidrogeológico, como Processing Modflow 5.3, basado en una solución aproximada de una ecuación diferencial por diferencias finitas. (Toro, 2012).

### **2.3. Fundamentos de la hidrogeología**

Hidrogeología es una ciencia que se encarga del estudio de las aguas subterráneas y del medio geológico en que se encuentran. Esta ciencia comprende la evaluación de las propiedades físicas y químicas del recurso hídrico subterráneo y sus interacciones con el ambiente, las poblaciones y sus actividades (Vélez, 1999).

Uno de los aspectos que realzan la importancia de las aguas subterráneas, es que son aptas para el consumo humano debido a la menor contaminación que presentan al encontrarse en el subsuelo y a su capacidad natural de filtración. Se estima que más de la mitad de la población del mundo depende de este recurso. La explotación descontrolada ha generado una baja en los niveles piezométricos de casi un metro por año en ciertas zonas del mundo. Adicional a esto, existe también contaminación de las mismas por actividades antrópicas irresponsables con el ambiente, lo cual aumenta la degradación de este recurso hídrico subterráneo (Vélez, 1999).

### **2.4. Conceptos básicos**

Una vez mencionada la importancia que representan las aguas subterráneas, es necesario definir algunos conceptos hidrogeológicos que gobiernan a este recurso.

#### **2.4.1. Ciclo hidrológico**

El ciclo hidrológico es el sistema por el cual el agua del planeta Tierra circula desde océanos y mares hacia la atmósfera y hacia los continentes y posteriormente regresa superficial o subterráneamente a los mares y océanos, generándose así un ciclo en el que intervienen principalmente factores climáticos, como la temperatura, intensidad de los vientos, humedad relativa, la insolación, la cobertura vegetal, la geología, la precipitación, la evaporación, la evapotranspiración, entre otros (Collazo y Montaña, 2012), tal como indica a continuación la Figura 1.

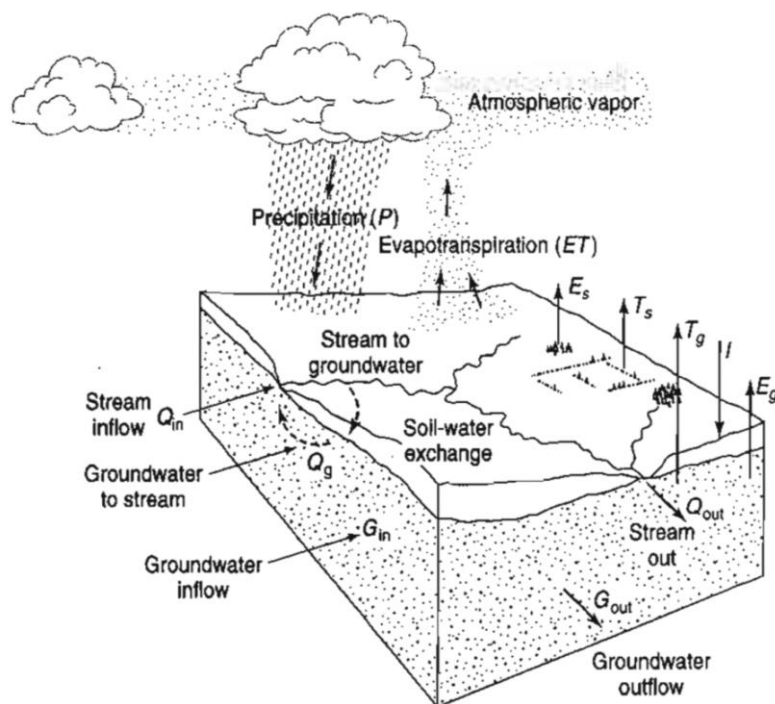


Figura 1. Componentes del ciclo hidrológico.  
Tomado de Todd, 2006.

El ciclo hidrológico se puede expresar a partir de la siguiente ecuación de balance de agua:

$$P + G_{in} - (ET + Q + G_{out}) = S \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde: P: Precipitación, G<sub>in</sub>: Caudal punto de recarga del acuífero, G<sub>out</sub>: Caudal punto de descarga del acuífero, Q: Caudal del río, S: Almacenamiento

#### 2.4.2. Agua subterránea

Es el agua que se encuentra almacenada y circula en el subsuelo, conformando acuíferos en los estratos porosos del mismo. El agua subterránea se encuentra por debajo del nivel freático, en la zona denominada saturada. La fuente de recarga de este recurso es principalmente la precipitación. Otras fuentes de alimentación pueden ser ríos, arroyos, lagos, humedales, páramos y lagunas (Collazo y Montaña, 2012).

Es posible clasificar en dos grandes zonas al subsuelo en función de la distribución vertical del agua subterránea: zona no saturada y zona saturada. Por un lado, la zona no saturada se encuentra entre la superficie del terreno y la superficie freática y sus poros están ocupados por aire y agua. Esta zona se subclasifica en zona de evapotranspiración o zona edáfica, misma que se extiende hasta donde llegan las raíces de la vegetación existente. Esta zona es considerada como un filtro natural del suelo para las aguas subterráneas debido a la gran cantidad de materia orgánica que contiene (horizonte A) y la fuerte actividad biológica vegetal y de microorganismos. Otra subclasificación de la zona no saturada es la zona intermedia o vadosa, que está comprendida entre el límite de ascenso capilar del agua y el límite de alcance de las raíces de las plantas. Finalmente, existe la zona capilar, que se sitúa desde la superficie freática hasta el límite de ascenso capilar del agua. Por otro lado, la zona saturada está localizada debajo de la superficie freática y en esta zona todos los poros de suelo existentes están saturados de agua (Collazo y Montaña, 2012).

#### **2.4.3. Acuíferos**

Se conoce como acuífero a toda formación geológica capaz de almacenar y transmitir agua subterránea. Por lo general, los estratos geológicos con altas cantidades de arenas y gravas actúan como acuíferos, mientras las formaciones que contienen mayoritariamente arcillas y limo en su composición actúan como acuífugos o acuitardos, respectivamente. Es posible clasificar a los acuíferos en tres grupos comunes en función de su estructura (Collazo y Montaña, 2012).

Por un lado, existen los acuíferos libres o no confinados, cuya base es impermeable y su nivel superior está a presión atmosférica. La recarga de este acuífero es directa a través de infiltración del agua lluvia o por infiltración de ríos o lagos, entre otros cuerpos hídricos (Harter, 2003).

Por otro lado, existen los acuíferos confinados, mismos que están limitados en la parte superior por una formación de baja a muy baja permeabilidad. La presión hidrostática en el tope del acuífero es mayor a la presión atmosférica y su recarga es lateral. Cuando se perfora un pozo en estos acuíferos, el agua subterránea

asciende rápidamente. Si el agua subterránea llega y sale a la superficie, se denomina surgente (Harter, 2003, pp. 2-4).

Finalmente, existen los acuíferos semiconfinados, que son más comunes en la naturaleza. En este tipo de acuíferos, la base, tope superior o ambos, están formados por capas de baja permeabilidad, pero no llegan a impedir la circulación vertical del agua. Estas capas de baja permeabilidad se denominan acuitardos y son la fuente de recarga o descarga de los acuíferos semiconfinados. (Harter, 2003).

El movimiento de las aguas subterráneas en acuíferos está en función de principalmente el gradiente hidráulico, que es la diferencia entre la altitud de la superficie de una zona y otra. El flujo de las aguas subterráneas está en dirección descendente del gradiente hidráulico, es decir, de zonas de mayor carga hidráulica a zonas de menor carga hidráulica (Harter, 2003).

Para el estudio del comportamiento del agua en los diferentes acuíferos anteriormente mencionados y considerando las zonas de los mismos, es necesario tener en consideración a la Ley de Darcy.

#### **2.4.4. Ley de Darcy**

El comportamiento del agua subterránea a través de un medio poroso está descrito por la Ley de Darcy. Esta ley fue propuesta por el ingeniero francés Henry Darcy en el año 1856 y expresa la proporcionalidad entre el caudal de escurrimiento de un líquido que circula a través de un medio poroso y el gradiente hidráulico, que es la relación entre dos cargas hidráulicas y la distancia recorrida. La Ley de Darcy se expresa a través de la siguiente ecuación (Sánchez, 2014).

$$Q = -A \times K \times \left(\frac{\Delta h}{\Delta L}\right) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde: Q: Caudal, A: Área (sección), k: Conductividad hidráulica,  $\Delta h$ : Cambio de la gradiente hidráulica,  $\Delta L$ : cambio de la distancia recorrida.

Como las unidades del caudal Q son  $L^3/T$ , la sección está expresada en  $L^2$ , y  $\Delta h$  y  $\Delta L$  en L, se comprueba que las unidades de permeabilidad o conductividad

hidráulica  $K$  son las de velocidad,  $L/T$ . Por tanto, la expresión correcta de la Ley de Darcy es la siguiente:

$$q = -K \times \left( \frac{dh}{dl} \right) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$q = Q/A$  (caudal que circula por  $L^2$  de sección)

$K =$  Conductividad hidráulica

$dh/dl =$  gradiente hidráulico expresado en incrementos infinitesimales.

A partir de la Ley de Darcy, es posible determinar la velocidad de Darcy y la velocidad real.

- Velocidad de Darcy:

Considerando la fórmula general de movimiento de caudal de un líquido contenido en cualquier conducto, se deriva la siguiente expresión (Sánchez, 2014):

$$VD = Q/A \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:  $VD =$  Velocidad de Darcy en  $(L/T)$ ,  $Q =$  caudal en  $(L^3/T)$ ,  $A =$  sección transversal en  $(L^2)$ .

No obstante, esta velocidad no es la real de un flujo en un medio poroso, pues el flujo no se mueve ocupando absolutamente toda la sección transversal. Es, por tanto, importante mencionar que la velocidad real en un medio poroso está en función de la porosidad, tal como expresa la siguiente ecuación:

$$VR = VD/me \quad (\text{Ecuación 5})$$

$VR:$  Velocidad real  $(L/T)$

$VD:$  Velocidad de Darcy  $(L/T)$

$me:$  Porosidad efectiva (coeficiente de cada suelo)



### 2.4.5. Propiedades físicas de los acuíferos

El comportamiento de los acuíferos está determinado en función de principalmente las siguientes propiedades físicas:

- Porosidad:

La porosidad es la capacidad que tiene un medio de tener poros, siendo un poro cualquier espacio de un material que no está ocupado por un sólido, sino por agua o aire. En términos cuantitativos, la porosidad es la relación entre el volumen de espacios vacíos y el volumen total de la roca o suelo. Comúnmente se expresa en porcentaje, multiplicando el coeficiente de la porosidad por 100, tal como indica la ecuación siguiente (Collazo y Montaña, 2012).

$$m = \left(\frac{V_v}{V_t}\right) \times 100 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde: m: porosidad, Vv: Volumen de vacíos, Vt: Volumen total.

- Porosidad efectiva:

Equivale a la razón entre el volumen de agua efectivamente liberado y el volumen total de la misma, como se expresa en la ecuación siguiente (Collazo y Montaña, 2012, p. 24):

$$m_e = V_d/V_t \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde: me: porosidad efectiva, Vd: Volumen de agua drenada por gravedad, Vt: Volumen total.

En la porosidad influyen factores como la forma, disposición y tamaño de los granos (Collazo y Montaña, 2012, p. 24).

- Conductividad hidráulica:

Conductividad hidráulica representa la facilidad que tiene un acuífero de dejar que el agua fluya a través de su estructura. Está en función de las características del medio: porosidad, tamaño, espesor, forma y arreglo de las partículas, compactación, y de la viscosidad del fluido. Este parámetro es el que caracteriza

principalmente las propiedades hídricas de los acuíferos. Sus unidades son longitud versus tiempo (L/t) (Collazo y Montaña, 2012). Es necesario definir una conductividad hidráulica para cada una de las capas, considerando dos escenarios. En el caso de que el flujo sea paralelo a las capas, se denomina conductividad hidráulica horizontal. Por otro lado, en el caso de que el flujo sea perpendicular a las capas, se denomina conductividad hidráulica vertical (Sánchez, 2014, p 3-4). Para ambos casos, se tiene las expresiones siguientes:

- Conductividad hidráulica horizontal

$$Kh = \frac{(\sum ki \times bi)}{B} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde: Kh= conductividad hidráulica horizontal (L/T), ki= conductividad hidráulica de cada una de las capas (L/T), bi= espesor de cada una de las capas (L), B= espesor total (L).

- Conductividad hidráulica vertical

$$Kv = \frac{B}{\sum \frac{bi}{ki}} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde: Kv= conductividad hidráulica vertical (L/T), ki= conductividad hidráulica de cada una de las capas (L/T), bi= espesor de cada una de las capas (L)., B= espesor total (L).

## 2.5. Fundamentos del Software QGIS Las Palmas 2.18.1

QGIS es la abreviación de Quantum GIS y se trata de un software de código abierto, o software libre y gratuito que sirve para visualizar y procesar datos geográficos. Este software fue desarrollado por la fundación OSGeo. Su primera versión fue lanzada en el año 2002, con el nombre de 0.0.1-alpha y su última versión en el año 2016, llamada Las Palmas 2.18.3. QGIS funciona con diferentes sistemas operativos, tales como Windows, Linux y Mac. Unas de las ventajas de este software libre es que integra pluggins descargables con

conexión web y que son incorporados a la interfaz gráfica del programa. Uno de los más importantes de estos es GRASS, el SIG libre de más larga trayectoria. Además, QGIS soporta extensiones espaciales de PostgreSQL, PostGIS, manejo de archivo vectoriales Shapefile, ArcInfo coverages, Mapinfo, GRASS GIS, entre otros. QGIS está desarrollado en C++, utilizando la biblioteca Qt para su interfaz gráfica de usuario (Santiago, 2017).

## **2.6. Fundamentos del Software Processing Modflow 5.3**

### **2.6.1. Historia del software**

El software Modflow, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), permite realizar modelos numéricos de aguas subterráneas a partir de diferencias finitas. Este software tuvo sus primeras versiones entre los años 1981 y 1983. Posteriormente, en el año 1988, se desarrolló su segunda versión, con ciertos cambios respecto a su lenguaje de programación, pasando del Fortran 66 al Fortran 77. De esta nueva versión, surgió el software Processing Modflow (PM). A inicios de la década de los 90, Modflow se posicionó como el software más usado a nivel mundial para modelar el flujo de las aguas subterráneas. Posterior a la versión Modflow-88, se realizó algunos cambios en su interfaz gráfica, para que presente mayor facilidad al usuario, desarrollándose la versión Modflow-96, misma que también permite simular un flujo de agua subterránea tridimensional en un medio poroso saturado. La siguiente versión desarrollada fue Modflow-2000, misma que incorpora la solución de varias ecuaciones de modelamiento en un solo software, a través del desarrollo de paquetes de procesos. Finalmente, la última versión del software fue lanzada en el año 2005, llamada Modflow-2005. Esta versión se caracteriza principalmente por incorporar dentro su sistema de modelamiento al proceso llamado PEST, cuyo propósito es asistir al usuario en la interpretación de datos y en la estimación de parámetros. En este sentido, PEST corre el modelo cuantas veces

sea necesario hasta obtener los parámetros óptimos para una posterior calibración del mismo (Simcore, 2010).

### **2.6.2. Códigos de procesos de Processing Modflow 5.3**

El software cuenta con un total de once códigos de procesos que son utilizados de manera independiente o complementaria para dar solución numérica y gráfica a diferentes escenarios de modelamiento, estos once escenarios son: PEST, MODPATH, MOC3D, MT3D, MT3DMS, MT3D99, RT3D, PHT3D, SEAWAT, Water Budget Calculator, y PMPATH (SIMCORE, 2010) Este último código de procesos es el que se utilizará para realizar la evaluación del modelo hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio y se detalla el mismo a continuación.

El código PMPATH de Processing Modflow está diseñado para modelar transporte por advección para calcular la dirección del agua subterránea. PMPATH usa un método de seguimiento de trayectoria semi analítico en MODPATH para calcular la trayectoria de las partículas y el tiempo, tanto hacia adelante como hacia atrás, para flujos en estado estacionario. La interfaz gráfica de PMPATH permite correr el modelo y visualizar la dirección de la línea de flujo o pluma y proyectar las cargas hidráulicas, decremento del nivel de agua y vectores de velocidad (Simcore, 2010).

Este será el código de modelamiento que se utilizará para el desarrollo de este estudio, pues reúne a todos los parámetros necesarios y con los que se cuenta a partir de información secundaria, considerando un flujo estacionario por advección sin procesos de reacción, y permite obtener resultados visuales de la dirección del agua subterránea en toda el área de estudio, así como determinar tiempos y velocidades de posibles partículas que simulan plumas de contaminación (Simcore, 2010).

### **2.7. Procedimiento para realizar un modelo en Processing Modflow 5.3**

### 2.7.1. Crear una grilla

El primer paso para realizar un modelo hidrogeológico en el software Processing Modflow 5.3 es definir las condiciones de borde físicas del modelo. Esto significa definir la discretización espacial del dominio del modelo a partir de un modelo conceptual. El software permite definir el espacio del modelo a través de la definición de capas (*layers*), filas y columnas, dando como resultado la formación de grillas. Cada grilla contiene celdas y cada celda representa un nodo, mismo que contiene la información de entrada al modelo, como por ejemplo: carga hidráulica, conductividad hidráulica y porosidad efectiva. A continuación, la Figura 2 muestra la estructura de una grilla en términos de capas, filas y columnas (Simcore, 2010).

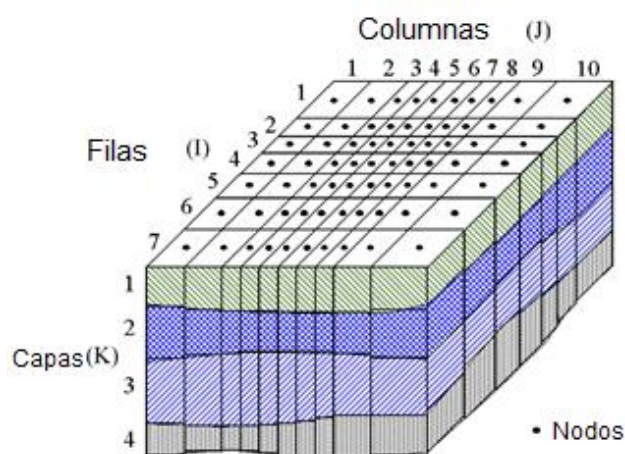


Figura 2. Grilla de un modelo en Modflow a partir de discretización espacial. Adaptado de Simcore, 2010.

### 2.7.2. Propiedades de las capas

En el software Processing Modflow 5.3, es necesario definir las capas del modelo y sus propiedades, posterior a crear la grilla. En este sentido, se define el tipo de capa o capas del modelo, que puede ser:

Tipo 0: Se utiliza cuando la capa es estrictamente confinada. Para simulaciones de transporte, el coeficiente de almacenamiento (almacenamiento específico x espesor de la capa) es utilizado para calcular la tasa de variación en el

almacenamiento. La transmisividad de cada celda es constante en la simulación (Simcore, 2010).

Tipo 1: Esta capa también es estrictamente confinada. Durante una simulación de flujo, la transmisividad de cada celda varía con el espesor de la capa saturada del acuífero (Simcore, 2010).

Tipo 2: Una capa de este tipo es parcialmente convertible entre confinada y no confinada. El coeficiente de almacenamiento específico es utilizado para calcular la tasa de cambio en el almacenamiento, en el caso de que la capa esté completamente saturada, caso contrario se utilizará el rendimiento específico. La transmisividad de cada capa es constante durante la simulación (Simcore, 2010).

Tipo 3: Una capa de este tipo es totalmente convertible entre confinada y no confinada. El coeficiente de almacenamiento específico es utilizado para calcular la tasa de cambio en el almacenamiento, en el caso de que la capa esté completamente saturada, caso contrario se utilizará el rendimiento específico. Durante una simulación de flujo, la transmisividad de cada celda varía con el espesor saturado del acuífero (Simcore, 2010).

### **2.7.3. Definición de los parámetros del modelo**

Una vez creada la grilla y definidas las propiedades de las capas, es necesario insertar los valores de los parámetros de modelamiento en cada una de las celdas de las capas. En este sentido, es necesario considerar los siguientes parámetros:

Anisotropía horizontal: Representa la relación entre la conductividad hidráulica horizontal a lo largo de columnas y la conductividad hidráulica a lo largo de las filas (Simcore, 2010).

Transmisividad: Modflow calcula la transmisividad para cada capa del modelo, que representa al producto entre la conductividad hidráulica horizontal ( $LT^{-1}$ ) y el espesor de la capa ( $L$ ) (Simcore, 2010).

Coeficiente de almacenamiento: Modflow calcula este coeficiente en función del coeficiente confinado de almacenamiento (almacenamiento específico ( $L^{-1}$ ) x espesor de la capa (L) (Simcore, 2010).

Estado de cada celda (*IBOUND*): Para desarrollar la simulación del modelo, es necesario, mediante este parámetro, activar o desactivar las celdas de cada una de las capas. Un valor positivo de *IBOUND* en una celda significa que la carga hidráulica es calculada en la simulación. Un valor negativo en una celda significa que el valor de carga hidráulica de la celda permanece constante durante la simulación. Finalmente, cero representa que la celda no está activa. Por lo general, se utilizan valores de 1, -1 y 0, respectivamente para cada caso (Simcore, 2010).

Tiempo: Modflow puede dividir el tiempo de simulación en periodos de estrés, que son a su vez divididos en etapas de tiempo. Vale la pena mencionar que la longitud de los periodos de estrés no es relevante para flujos en estado estacionario, como sí lo son para simulaciones en estado transitorio (Simcore, 2010).

Cargas hidráulicas iniciales y prescritas: Para el desarrollo de la simulación del modelo, Modflow requiere cargas hidráulicas iniciales. Para simulaciones de flujo estacionario, las cargas hidráulicas insertadas en el modelo son usadas como valores iniciales para la resolución de la ecuación de software (Simcore, 2010). Las cargas hidráulicas están en función de las cotas de nivel del terreno de estudio.

Conductividad hidráulica horizontal, vertical y transmisividad: Conductividad hidráulica horizontal es requerida para capas de tipo 1 o 3, mientras que la transmisividad es requerida para capas de tipo 0 o 2. La conductividad hidráulica horizontal es la que está presente a lo largo de las filas del modelo, mientras que la conductividad hidráulica vertical a lo largo de las columnas del modelo (Simcore, 2010).

Porosidad efectiva: Modelos de transporte, como PMPATH o MT3DMS, usan la porosidad efectiva para calcular la velocidad promedio del flujo a través del medio

poroso (Simcore, 2010). La porosidad efectiva se define como el volumen de huecos disponible para en flujo en un medio poroso, respecto del volumen total del sustrato. Por otro lado, la porosidad total es el espacio intersticial total de la roca, sin importar si influye o no al flujo de fluidos. Es por tanto que la porosidad efectiva es normalmente menor que la porosidad total. La porosidad efectiva se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$e = \frac{V_{void}}{V_{total}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:  $V_{void}$  = Volumen total de vacíos.  $V_{total}$  = Volumen total del estrado del suelo.

Recarga: Es necesario también especificar la recarga del acuífero a partir de la precipitación. Este valor es denominado en Modflow como Recharge y debe ser introducido en unidades de longitud sobre tiempo, como por ejemplo (mm/d) (SIMCORE, 2010)

#### **2.7.4. Correr el modelo**

Una vez definidas las condiciones de borde y los parámetros del modelo, se procede a correr el mismo en Modflow, que realiza el sistema de ecuaciones por diferencias finitas. Los resultados de las ecuaciones pueden ser visualizados gráficamente a partir de paquetes integrados en el software, como PMPATH, que simula la trayectoria de flujo de las partículas en el sistema y se puede observar las curvas de carga hidráulica y vectores de velocidad, a fin de evaluar desde donde y hacia donde se mueve el agua subterránea, la velocidad de las partículas y el tiempo de las mismas, en función de los parámetros y condiciones de borde insertadas (SIMCORE, 2010).

### **2.8. Fundamentos de geoestadística**

Teniendo en consideración la complejidad de la naturaleza y las interrelaciones que existen en la misma entre componentes bióticos y abióticos, surge la



necesidad de implementar métodos para comprender a la misma de una manera factible en términos técnicos y económicos. En este sentido, en cuanto a las ciencias del suelo y agua como geología, hidrología e hidrogeología, ingenieros y científicos de todo el mundo han venido desarrollando métodos cada vez más completos para modelar los fenómenos de la naturaleza, pues una descripción exacta en base a información primaria a través de muestreos o análisis in-situ de toda un área de interés como un yacimiento de petróleo o un acuífero, no es factible técnica ni económicamente (Olea, 2009).

Bajo este concepto, la geoestadística es una rama de la estadística que fue desarrollada por el Profesor Georges Matheron entre los años 1954 y 1963 y cuyo principal objetivo es la caracterización espacial de sistemas complejos parcialmente desconocidos. Es decir, la geoestadística se basa en una correlación espacial de muestras conocidas para generar valores en el área de interés en los que no se ha realizado un muestreo (Rivoirard, 2005).

El proceso de cálculo de geoestadística está basado en interpolación mediante el método de Krigeaje, que comúnmente sigue una distribución normal logarítmica, tal como indica la ecuación siguiente (Olea, 2009):

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y-\mu y)^2}{2\sigma^2 y}\right) \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

$x > 0$ ,  $x$  es la variable de interés

$y = \log x$

$\sigma$  = desviación estándar

$\mu$  = media

La mayoría de minerales y elementos químicos, así como variables de interés en ciencias del suelo como conductividad hidráulica, siguen una distribución normal logarítmica (Olea, 2009).

### **3. CAPÍTULO III. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN**

#### **3.1. Descripción de la situación actual**

##### **3.1.1. Descripción general y localización del Terminal de Productos Limpios El Beaterio**

Entre las actividades que realiza EP PETROECUADOR, está el transporte, almacenamiento y comercialización de productos limpios, o derivados del petróleo. Para esta actividad, la empresa cuenta con infraestructura e instalaciones a nivel nacional, de costa a oriente y de norte a sur. Una de estas instalaciones es el Terminal de Productos Limpios El Beaterio, que tiene un área total de 27 hectáreas, de las cuales 12 son espacios verdes y vías y 15 soportan físicamente la infraestructura e instalaciones. Está ubicado al sureste de la ciudad de Quito, Parroquia Turubamba, sector El Beaterio, Distrito Metropolitano de Quito (KANTZAM, 2016). A continuación, la Figura 3 muestra un mapa de la infraestructura del Terminal de Productos Limpios El Beaterio mediante una fotografía aérea.



*Figura 3.* Mapa infraestructura Terminal de Productos Limpios El Beaterio. Fotografía Aérea.  
Tomado de PETROEcuador, 2016.

El Terminal de Productos Limpios El Beaterio, en materia legal ambiental, fue aprobado por la Subsecretaría de Protección Ambiental del Ministerio de Minas y Petróleo mediante oficio No. 2094-SPA-DINAPAH-CSA-00616547, mediante resolución No. 001-SPA-DINAPAH-2009, del 18 de diciembre del 2006. La subsecretaría de Protección Ambiental de Minas y Petróleo otorgó la Licencia Ambiental No. 001-2009 para la Operación del Terminal de Productos Limpios El Beaterio (KANTZAM, 2016).

### 3.1.2. Áreas y procesos del Terminal de Productos Limpios El Beaterio

Este terminal de productos limpios de EP PETROECUADOR cuenta las siguientes áreas operativas y administrativas, como muestra la Tabla 1.

Tabla 1.

*Matriz de áreas operativas y administrativas actuales del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.*

<b>Áreas operativas</b>	<b>Áreas administrativas</b>
Estación reductora (Poliducto Esmeraldas-Quito-Macul y Poliducto Shushufindi-Quito).	Superintendencia
Estación de Bombeo: Poliducto Quito-Ambato-Riobamba; y mantenimiento electromecánico del poliducto.	Intendencias
Patio de tanques de almacenamiento (incluidos jet fuel). Área de despacho-Productos Limpios: Islas de carga con la Carga ventral y patio de bombas.	Jefaturas de áreas operativas
Planificación Operativa (coordinación de Gestión Empresarial).	Área de bancos y Comercializadoras.
Planta de jet fuel y mezclas: filtrado de jet fuel y preparación de gasolinas extra.	
Piscina (separador) API y piscina de lodos.	
Mantenimiento de Terminales Norte.	

Áreas operativas	Áreas administrativas
Integridad y Confiabilidad de Poliductos y Terminales	
Laboratorio de control de calidad.	
Dispensario médico (salud ocupacional).	
Comercialización-sucursal Quito.	
Bodegas (central y de comercial).	
Restauración Ambiental (RAM).	
Área de almacenamiento de residuos peligrosos	
Laboratorio de Control de Calidad.	
Seguridad, Salud y Ambiente.	
Seguridad Física y Relacionamento Comunitario.	
Parqueadero de auto tanques.	

Adaptado de KANTZAM, 2016.

Para llevar a cabo los procesos que se efectúan en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio, es necesario el trabajo conjunto de las áreas operativas y

administrativas anteriormente mencionadas, tal como muestra a continuación la Figura 4 de manera general.



*Figura 4.* Diagrama general de procesos del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.



Adaptado de KANTZAM, 2016.

A fin de obtener una mejor comprensión de los procesos que se desarrollan en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio, se describen las principales áreas operativas y el conjunto de equipos, maquinaria y sistemas eléctricos y de combustión con que las mismas cuentan para el efecto en la Tabla 2.

Tabla 2.

*Equipos e instalaciones de las áreas operativas del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.*

ÁREA	EQUIPO / INSTALACIÓN
<p>Islas de carga</p> 	<p>-Brazos de carga, contadores, accuload.</p>
<p>Patio grupo de bombas</p> 	<p>-Bombas, motores, medidores flujo, sistema eléctrico.</p>
<p>Estación reductora.</p> 	<p>-Válvulas reductoras, motores, bombas.</p>
<p>Estación de bombeo.</p> 	<p>-Embragues, bombas, motor (grupos de bombeo).</p>

ÁREA	EQUIPO / INSTALACIÓN
Planta de Jet Fuel. 	-Patio de bombas, motores, válvulas, mezclas gasolina extra y filtros
Patio de tanques 	-Tanques de almacenamiento de combustibles.

Adaptada de KANTZAM, 2016.

Debido a la importancia que representa el patio de tanques de almacenamiento del Terminal de Productos Limpios El Beaterio en términos operativos, económicos, sociales y ambientales, se detalla a continuación los tanques y su respectiva capacidad de almacenamiento.

El terminal dispone de 26 tanques cilíndricos verticales estacionarios de acero inoxidable de techo tipo flotante y fijo para el proceso de almacenamiento de combustibles. En adición, cuenta con 3 esferas de GLP (gas licuado de petróleo) adaptadas para el almacenamiento de los combustibles Súper y Diésel Premium.

La capacidad total de almacenamiento del terminal es de 627,032 barriles (100074 m<sup>3</sup>) y una capacidad real operativa de 605,585 barriles (96651 m<sup>3</sup>) (KANTZAM, 2016). A continuación, la Tabla 3 muestra el detalle de la capacidad de almacenamiento del Terminal.



Tabla 3.  
*Detalle de la capacidad de almacenamiento del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.*

<b>ID</b>	<b>Identificador del Tanque</b>	<b>Producto Almacenado</b>	<b>Capacidad máx. de Almacenamiento (galones)</b>
1	1011	DIÉSEL 2	1.493.618
2	1013	DIÉSEL 2	900.834
3	CI-01	DIÉSEL PREMIUM	1.250
4	1010	DIÉSEL PREMIUM	4.606.584
5	1022	DIÉSEL PREMIUM	2.477.843
6	1023	DIÉSEL PREMIUM	546.197
7	1025	DIÉSEL PREMIUM	546.536
8	1008	DESTILADO	123.948
9	1003	GASOLINA EXTRA	4.023.541
10	1014	GASOLINA EXTRA	669.340
11	1024	GASOLINA EXTRA	545.895
12	1016	GASOLINA EXTRA	1.163.687
13	1017	JET A -1	1.163.607
14	1018	JET A -1	473.199
15	1019	JET A -1	474.309
16	1005	NAFTA	1.234.568
17	1009	NAFTA	280.942
18	1007	NAFTA	2.261.953
19	1020	PROCESOS	1.655.812
20	CI-02	SUPER	1.909
21	1001	SUPER	2.261.509

<b>ID</b>	<b>Identificador del Tanque</b>	<b>Producto Almacenado</b>	<b>Capacidad máx. de Almacenamiento (galones)</b>
22	1012	SUPER	1.447.887
23	1621	SLOP	21.700
24	1622	SLOP	21.713
25	505	SLOP	121.274
26	509	SLOP	80.138

Adaptada de KANTZAM, 2016.

A continuación, la Figura 5 muestra el mapa de implantación de la infraestructura del Terminal de Productos Limpios El Beaterio, con la ubicación de las principales áreas operativa y administrativas anteriormente descritas.



Figura 5. Mapa Implantación de la infraestructura en el área del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

### **3.2. Área de influencia**

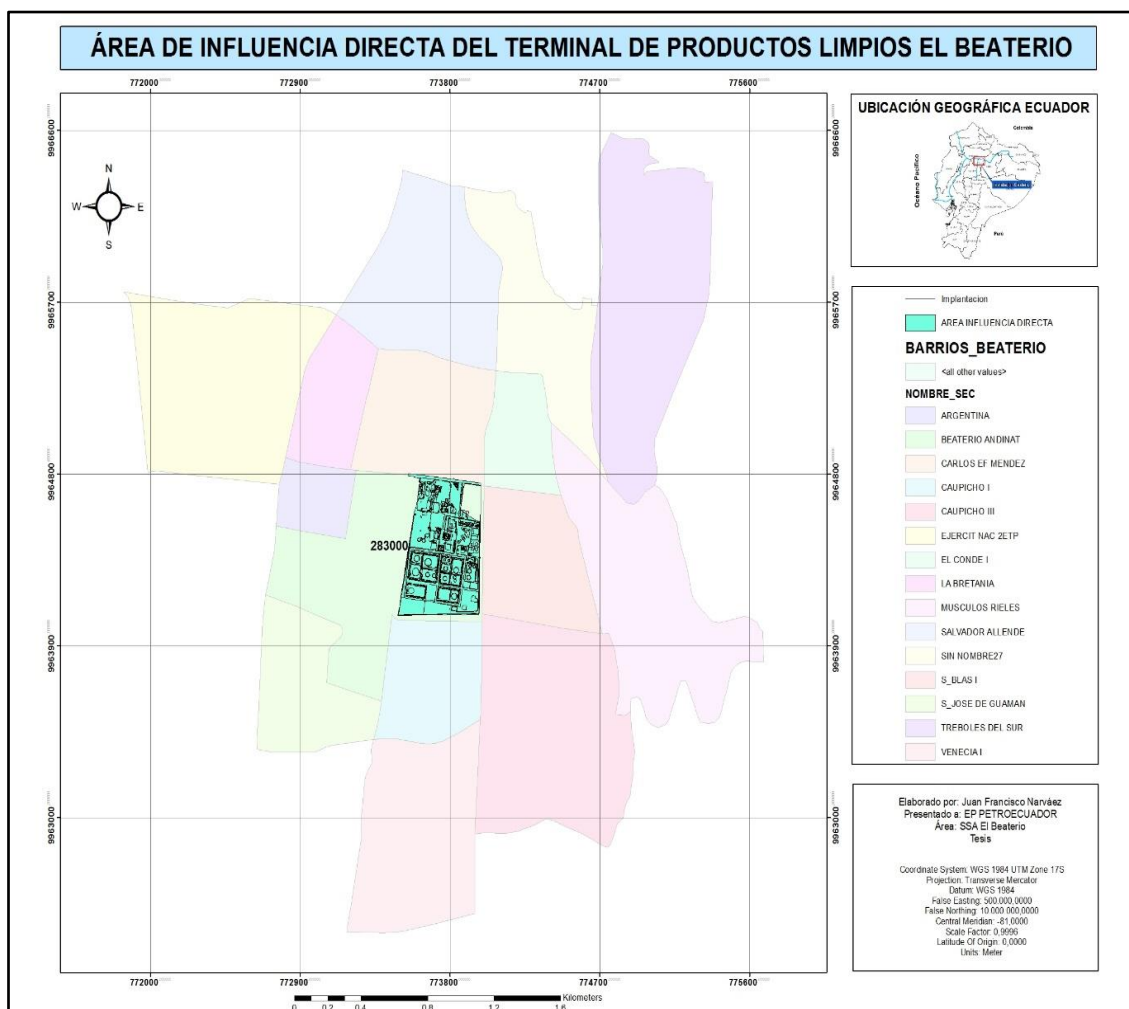
El área de influencia representa el espacio físico que, de manera positiva o negativa, se ve impactado por una actividad en especial o un proyecto.

En términos operativos y en función al abastecimiento de producto que genera el Terminal, se considera como área de influencia a toda la Sierra Centro-Norte del país, desde la provincia de El Carchi, hasta la provincia de Chimborazo; pues abastece de productos limpios derivados del petróleo por medio de auto tanques hacia el norte, y por medio del poliducto Quito-Ambato-Riobamba hacia el sur (Auditoría Ambiental, 2011).

No obstante, para determinar el área de influencia en términos ambientales, misma que será la que se considerará para el presente estudio, es necesario enfocar a los impactos que genera el Terminal de Productos Limpios El Beaterio a las matrices ambientales. Bajo este contexto, el área de influencia puede ser categorizada como directa e indirecta; siendo el área de influencia directa el espacio físico donde se presentan impactos ambientales directos, por interacción primaria, es decir, el área inmersa en las actividades que se llevan a cabo. Por otro lado, el área de influencia indirecta corresponde al espacio físico representado por la interacción de impactos indirectos sobre componentes ambientales y de este modo se genera un nuevo impacto (KANTZAM, 2016).

#### **3.2.1. Área de influencia directa**

Acorde a la Auditoría Ambiental de Cumplimiento del Terminal de Productos Limpios El Beaterio Periodo febrero 2013-febrero 2015; se considera al área de influencia directa a las instalaciones del Terminal, es decir, un área de 27 hectáreas o 270000 m<sup>2</sup>. (KANTZAM, 2016). A continuación, la Figura 6 muestra la implantación del Terminal de Productos Limpios El Beaterio y el área de influencia directa.



*Figura 6.* Mapa del área de influencia directa del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Considerando los resultados del área del Terminal de Productos Limpios El Beaterio calculados en el software QGIS Las Palmas 2.18.1, es importante acotar que el área real del terminal es de 283000 m<sup>2</sup>, como muestra la Figura 6, equivalente a 28.3 hectáreas. Esta diferencia de 1.3 hectáreas responde a que se ha considerado también dentro del área del terminal a la franja de seguridad, que es de 100 metros a la redonda. Esta área real además se verifica con la imagen aérea que se encuentra en la Figura 1, misma que indica un área de 28.2 hectáreas (PETROECUADOR, 2016). No obstante, el área real de estudio a considerar para el desarrollo de la presente tesis será la calculada de 28.3

hectáreas, pues a partir del software de información geográfica SIG se han elaborado los mapas temáticos de área de influencia, así como los mapas del área de estudio y los mismos son de utilidad para el desarrollo del modelo conceptual, por lo que se debe guardar coherencia en el trabajo numérico para la obtención de resultados estadísticamente significativos.

### **3.2.2. Área de influencia indirecta**

Acorde al mismo documento oficial anteriormente citado, el área de influencia indirecta del Terminal de Productos Limpios El Beaterio se considera alrededor de 500 metros a la redonda de las instalaciones del Terminal, involucrando a 10 barrios vecinos (KANTZAM, 2016).

A continuación, las figuras 7 y 8 muestran los mapas creados en el software QGIS Las Palmas 2.18.1 de los barrios vecinos del Terminal de Productos Limpios El Beaterio y la intersección del área de influencia indirecta con los mismos, a fin de determinar el área exacta que impacta el terminal y sus operaciones, en términos ambientales.

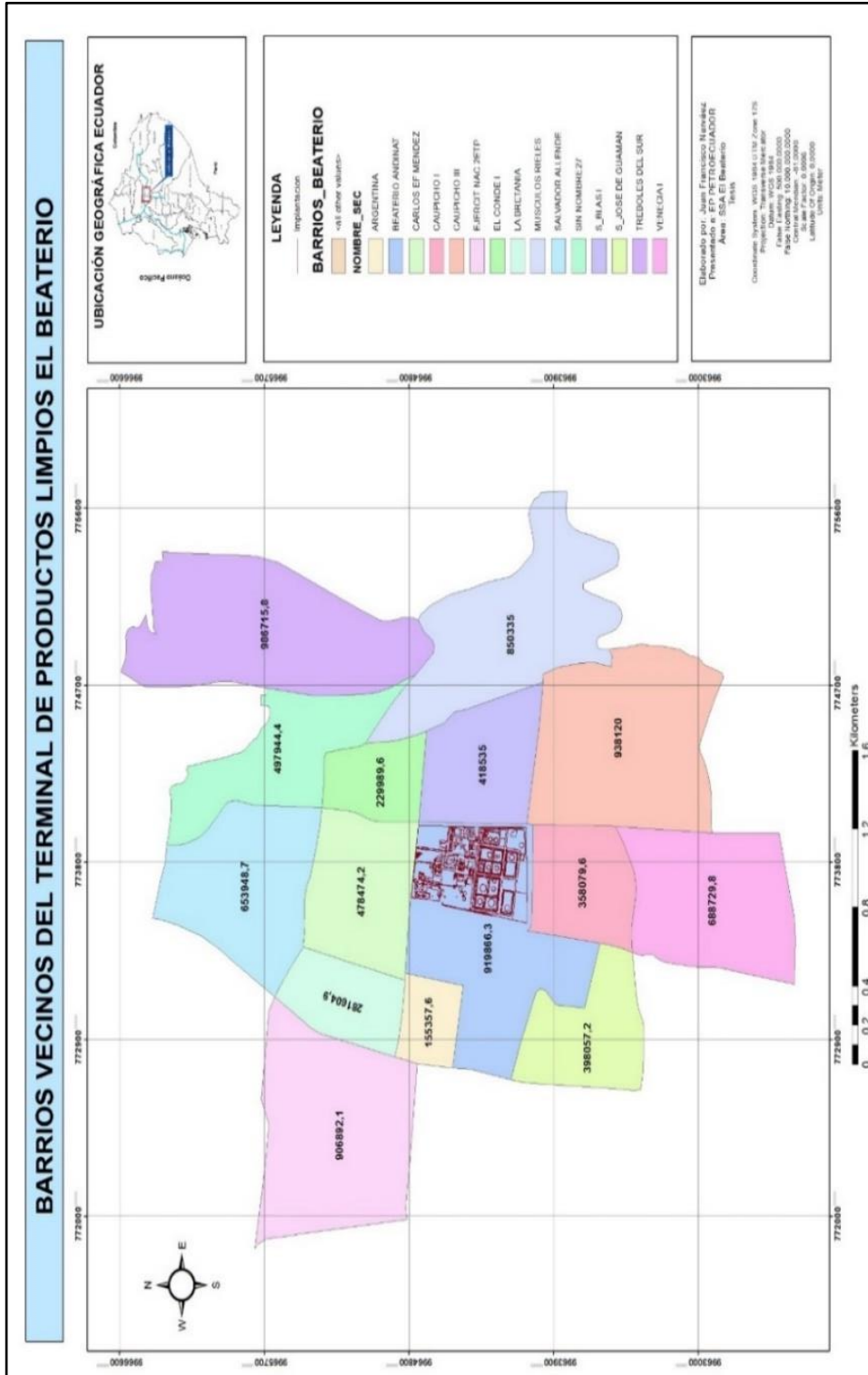


Figura 7. Barrios vecinos del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. Unidad de área: m².





A partir de los dos mapas generados y expuestos anteriormente en las Figuras 7 y 8, es posible determinar el área total de los barrios, el área de cada barrio inmersa en el área de influencia indirecta de 500 metros a la redonda de las instalaciones del Terminal, y el área total del área de influencia indirecta, tal como indica la Tabla 4 a continuación.

*Tabla 4.*

Área de influencia indirecta total y de cada barrio respecto al área total de los Barrios vecinos de El Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

<b>Nombre del Barrio</b>	<b>Área total m<sup>2</sup></b>	<b>Área influencia indirecta m<sup>2</sup></b>	<b>Porcentaje %</b>
Argentina	155357,6	64994,3	41,8
Beaterio Andinat	919866,3	818962,8	89,0
Carlos Ef Mendez	478474,2	377071,1	78,8
Caupicho I	358079,6	272236,2	76,0
Caupicho III	938120	175819,2	18,7
Ejercito NAC 2ETP	906892,1	No influye	N/A*
El Conde I	229989,6	183290,1	79,7
La Bretania	281604,9	52302,8	18,6
Musculos Rieles	850355	13754,7	1,6
Salvador Allende	653948,7	No influye	N/A*
Sin Nombre	497944,4	No influye	N/A
San Blas I	418535	332717,1	79,5
San José de Guaman	398052,2	43780,3	11,0

Tréboles del Sur	986715,8	No influye	N/A*
Venecia I	688729,8	No influye	N/A*
TOTAL en m <sup>2</sup>	8762665,2	2334928,6	26,6
TOTAL en ha	876,3	233,5	26,6

Adaptado de KANTZAM, 2016.

Nota: \*N/A significa que este barrio no está dentro del área de influencia indirecta, por lo que no se le considera en la Tabla 4 ni en la Figura 8.

### 3.3. Estudio hidrogeológico mediante pozos de monitoreo.

Una de las principales circunstancias que es necesario considerar para el desarrollo de esta tesis, es la existencia de un estudio hidrogeológico realizado en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio en el mes de diciembre del año 2016, denominado formalmente: *Implementación de Pozos de Monitoreo de Aguas Subterráneas en las Plataformas de Remediación*. Contrato No.2016063-Cci-Zno-2016. Este estudio fue realizado por una consultora TERRAHIDRO Servicios y Construcciones S.A. y fue facilitado en formato digital por EP PETROECUADOR. Este estudio fue la principal fuente de información secundaria utilizada para el desarrollo del modelo hidrogeológico en Processing Modflow 5.3.

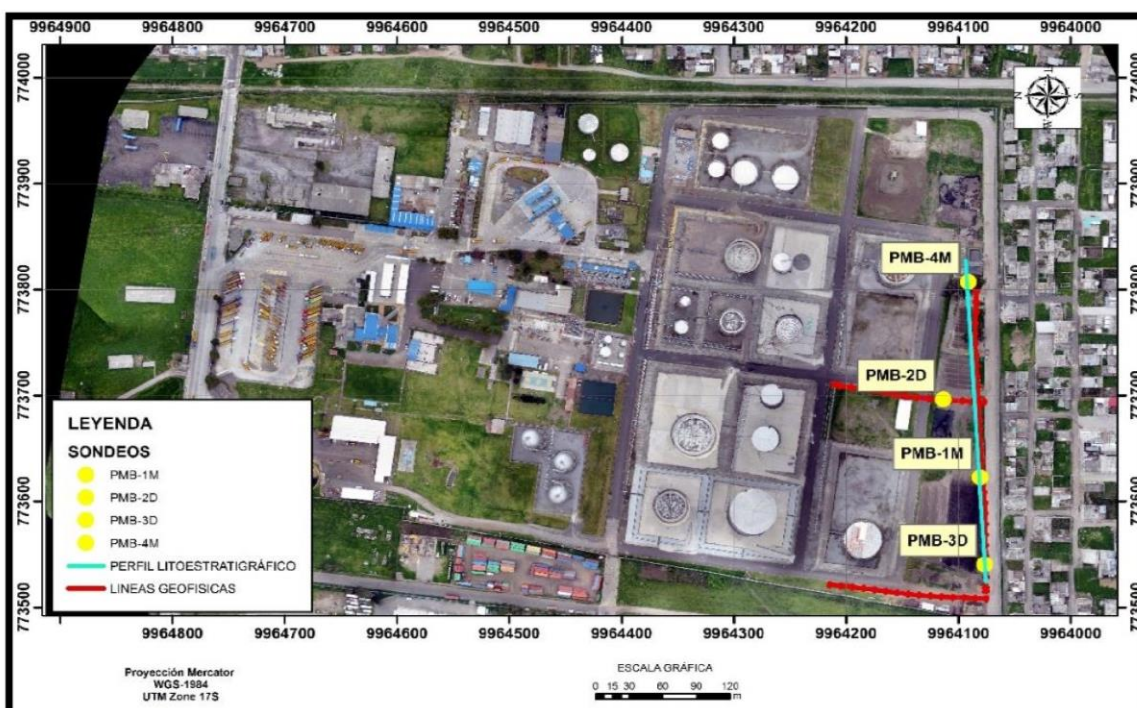
Este estudio se basó en la construcción, análisis y muestreo de cuatro pozos de monitoreo en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio, específicamente en el área de las plataformas de tratamiento de Restauración Ambiental (RAM). Estos pozos se habilitaron como piezómetros, mismos que permiten realizar el muestreo periódico del agua y establecer la variabilidad de los niveles piezométricos en función del tiempo y el espacio; y así llevar un control adecuado y estadístico de las condiciones del agua subterránea (TERRAHIDRO, 2016).

Los objetivos que se plantearon en este estudio abarcan la ubicación de los sitios y profundidades de cada pozo en base a la geofísica y condiciones superficiales

de cada plataforma de remediación, determinar las características físico-químicas de los materiales que conforman el subsuelo en el sitio de perforación, determinar de los niveles acuíferos, caracterizar las condiciones hidráulicas del acuífero, instalar piezómetros para el monitoreo de las aguas subterráneas en los diferentes niveles piezométricos, muestrear las aguas en cada sondeo y determinar las condiciones físico-químicas de la misma (TERRAHIDRO, 2016).

### 3.3.1. Ubicación y características de los pozos de monitoreo en El Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

A continuación, se muestra el mapa de ubicación geográfica de los cuatro pozos de monitoreo del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.



*Figura 9.* Mapa de la ubicación geográfica de los cuatro pozos de monitoreo en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Tomado de TERRAHIDRO, 2016.

La siguiente tabla muestra la ubicación geográfica de los cuatro pozos de monitoreo en coordenadas UTM y la cota de cada uno de los pozos, así como su profundidad, profundidad del piezómetro y nivel piezométrico.

Tabla 5.  
*Datos de los pozos de monitoreo en función a su ubicación y profundidad.*

<b>TERMINAL DE PRODUCTOS LIMPIOS EL BEATERIO</b>						
POZO	COTA	COORDENADAS UTM		PROFUNDIDAD	PROFUNDIDAD PIEZÓMETRO	NIVEL PIEZOMÉTRICO
	msnm	Norte (Y)	Este (X)	m	m	m
PMB-1M	2967.89	9964080.752	773622.756	30.00	25.00	Pozo surgente
PMB-2D	2965.24	9964113.844	773693.335	25.00	14.00	Pozo surgente
PMB-3D	2969.83	9964076.669	773540.627	40.00	35.00	Pozo surgente
PMB-4M	2963.09	9964091.355	773807.104	25.00	21.00	Pozo surgente

Adaptado de TERRAHIDRO, 2016.

### 3.3.2. Características hidrogeológicas

A partir de los trabajos de campo realizados por la consultora TERRAHIDRO, se indica en el informe que en las cuatro perforaciones de los piezómetros realizadas, se produjo un efecto denominado artesianismo surgente, lo que significa que al perforar los acuíferos y llegar a la profundidad del nivel de agua subterránea, esta fluye de manera natural hacia la superficie debido a la presión de los acuíferos. Por tanto, se concluye que los cuatro pozos son surgentes (TERRAHIDRO, 2016).

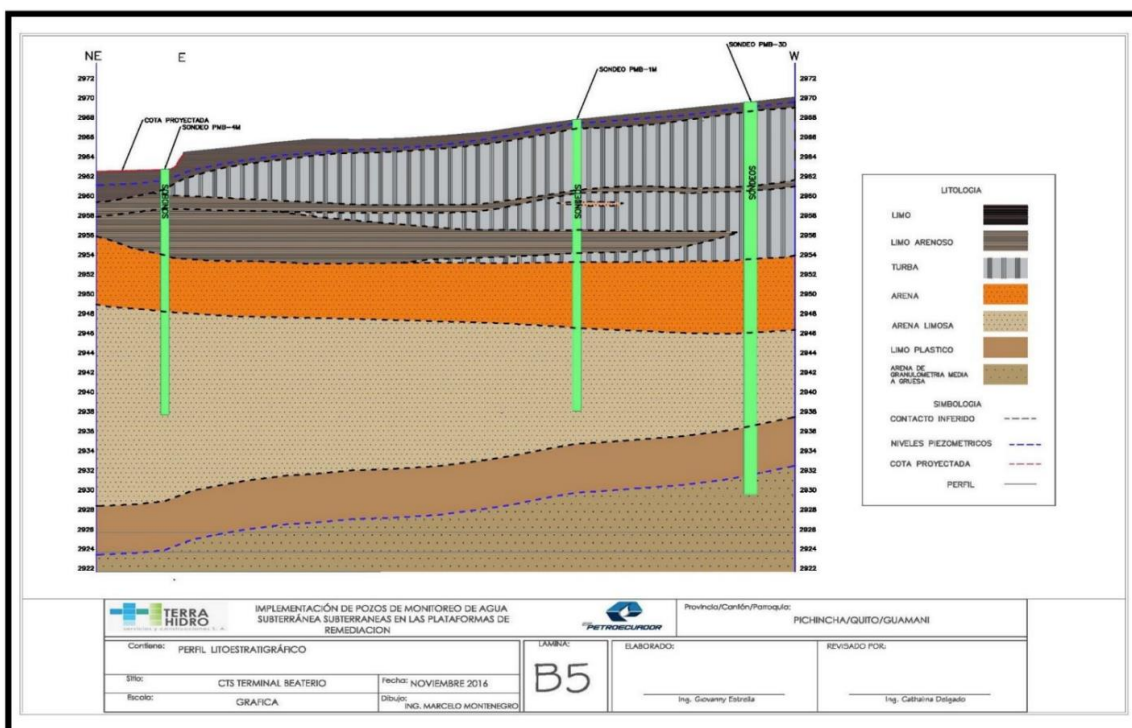
En los cuatro pozos de monitoreo del nivel piezométrico, conforme a las mediciones durante la perforación, se determinaron niveles de agua a una profundidad que varía entre 0.30 metros en el pozo PMB-3D que se encuentra en el extremo Oeste, a 1.12 metros en el Pozo PMB-4M, que se encuentra en el extremo Este.

A partir de las descripciones litoestratigráficas y de los niveles piezométricos medidos en los pozos de monitoreo, se llega a la conclusión de que existen al menos dos acuíferos, uno superficial, semiconfinado y otro profundo confinado.

La disposición de los pozos de monitoreo PMB-3D, PMB-1M, PMB-2D y PMB-4M, es de Oeste a Este y la profundidad de los niveles de agua incrementa hacia

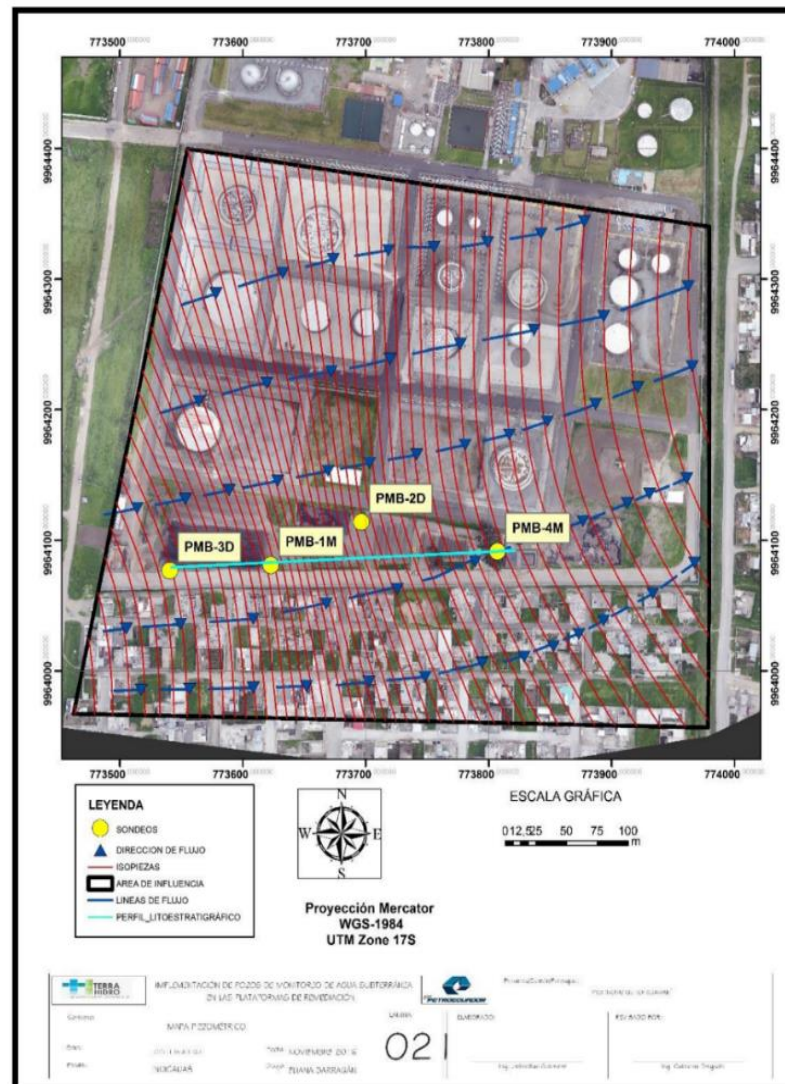
el Este, por lo que se concluye que la dirección de flujo de agua subterránea se dirige hacia el Este.

A continuación, las figuras 10 y 11 muestran los resultados del informe de monitoreo mediante pozos de Terrahidro en relación al perfil litoestratigráfico y las líneas equipotenciales y de flujo.



*Figura 10.* Perfil Litoestratigráfico de la zona de monitoreo de agua subterránea en las plataformas de remediación del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Tomado de TERRAHIDRO, 2016.



*Figura 11.* Mapa de isopiezas y líneas de flujo de aguas subterráneas del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. Tomado de TERRAHIDRO, 2016.

Por otro lado, en cuanto a las propiedades físicas de los acuíferos, en los cuatro pozos de monitoreo se realizaron ensayos de conductividad hidráulica mediante pruebas de descenso y los resultados demuestran que predominan materiales arenosos y areno-limosos, al tener valores que varían de  $10^{-2}$  a  $10^{-3}$  cm/s. A continuación, la Figura 12 muestra los principales resultados de los estudios físicos de niveles de agua, conductividad hidráulica y caudales de aforo.

Sondeo	Fecha	Mañana		Tarde		Nivel de agua mañana	Nivel de agua tarde	Caudal de aforo	Nivel piezométrico sobre la superficie	Longitud de la tubería (PVC)	Tramo Ranurado del Piezómetro	Profundidad Nivel Piezométrico final	Permeabilidad	Observaciones
		Profundidad Perforación	Profundidad Revestimiento	Profundidad Perforación	Profundidad Revestimiento									
		(m)	(m)	(m)	(m)									
PMB-1M	10/08/2016	0.00	0.00	7,50	3,30	-	1.30	-	-	25,00	12,00-22,00	Pozo Surgente	K: 8,540*10E-3	Perforación en seco
	11/08/2016	7,50	3,00	14,00	12,00	0,32	0.00	-	-					Fluido de perforación agua
	12/08/2016	14,00	12,00	19,00	18,00	0.00	0.00	0.64	1.88					Perforación en seco
	13/08/2016	19,00	18,00	26,00	20,00	0.00	0.00	4.129	>1.65					Fluido de perforación agua
	14/08/2016	26,00	20,00	30,00	20,00	0.00	0.00	8.53	-					Fluido de perforación agua
	15/08/2016	30,00	30,00	-	-	0.00	-	9.56	-					La tubería HQ se encuentra en cota.
PMB-2D	16/08/2016	0.00	0.00	16,00	15,00	-	0.00	-	-	14,00	3,00-12,00	Pozo Surgente	K:6,778*10E-4	Fluido de perforación agua
	17/08/2016	16,00	15,00	25,00	15,00	0.00	0.00	-	-					Fluido de perforación agua
	18/08/2016	25,00	25,00	-	-	0.00	-	6.09	0.35					La tubería HQ se encuentra en cota.
PMB-3D	10/08/2016	0.00	0.00	10,00	9,00	-	0,3	-	-	35,00	31,00-34,00	Pozo Surgente	K: 4,026*10E-2	Fluido de perforación agua
	11/08/2016	10,00	9,00	25,00	18,00	0.00	0.00	0.005	-					Fluido de perforación agua
	12/08/2016	25,00	18,00	28,00	18,00	0.00	0.00	1.48	> 1.5					Fluido de perforación agua polímero.
	13/08/2016	28,00	18,00	40,00	28,00	0,00	0,00	2.3	>3.10					Fluido de perforación agua polímero.
	14/08/2016	40,00	28,00	32,00	18,00	0,00	0,00	31.9	>5.53					Fluido de perforación agua polímero.
PMB-4M	15/08/2016	0,00	0,00	4,50	0,00	-	2,40	-	-	21,00	12,00-19,00	Pozo Surgente	K: 1,111*10E-3	Perforación en seco
	16/08/2016	4,50	0,00	17,50	4,50	1,12	0,00	-	-					Fluido de perforación agua
	17/08/2016	17,50	4,50	25,00	4,50	0,00	0,00	4.1	-					Fluido de perforación agua
	18/08/2016	25,00	25,00	-	-	0,00	0,00	4.82	1.87					La tubería HQ se encuentra en cota.

Figura 12. Parámetros físicos del estudio de pozos de monitoreo de aguas subterráneas del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. Tomada de TERRAHIDRO, 2016.

A partir de la información anteriormente presentada, la consultora TERRAHIDRO, concluye que la dirección de flujo es de Oeste a Este y que existen dos acuíferos, uno confinado profundo a más de 30 metros de profundidad, y otro semiconfinado y superficial, cuyos niveles de profundidad varían de 0.3 a 1.12 metros. La capa confinante entre ambos acuíferos es limo plástico, que por sus propiedades físicas y su espesor de 5 metros, actúa como un medio confinante. En suma, se concluye el estudio a través del siguiente perfil hidrogeológico.



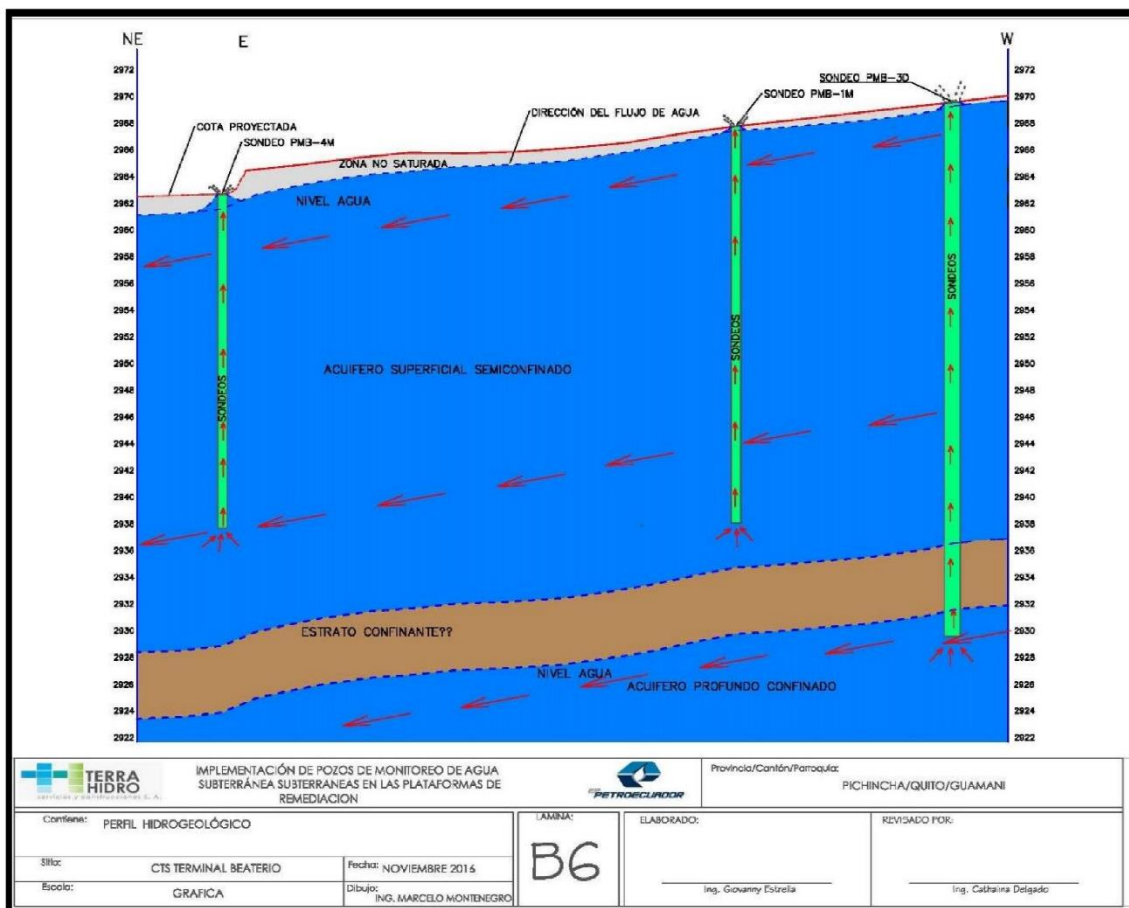


Figura 13. Perfil hidrogeológico del estudio de pozos de monitoreo de aguas subterráneas del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. Tomado de TERRAHIDRO, 2016.

### 3.4. Información hidrogeológica de la subcuenca hidrográfica Quito Sur

Adicionalmente, se tuvo en consideración como información secundaria para la determinación de las condiciones de borde, al trabajo de titulación desarrollado por Lilia Peñafiel, de la Escuela Politécnica Nacional, en el año 2009 con título: Geología y análisis del recurso hídrico subterráneo de la subcuenca del Sur de Quito. Fue relevante considerar los aspectos y parámetros que a continuación se describen en razón de que el Terminal de Productos Limpios El Beaterio se encuentra ubicado en la subcuenca del Sur de Quito.



### **3.4.1. Área**

La subcuenca del Sur de Quito tiene una formación a partir del Pleistoceno medio a causa de la actividad del sistema de fallas inversas de Quito, que ha dado como resultado las formaciones Calderón-Catequilla, Batán-La Bota y Lumbisí-Puengasí. Estas formaciones delimitan o comprenden la divisoria de aguas de la subcuenca del Sur de Quito, que tiene un área total de 127,677,757 m<sup>2</sup>, equivalente a 12,767.7 hectáreas o 127.7 km<sup>2</sup>. (Peñañiel, 2009, p. 33).

### **3.4.2. Elevación y pendiente media**

El Valle del Sur de Quito se encuentra en una planicie de un área de 53.7 km<sup>2</sup>. Presenta una altitud que varía entre 3080 m.s.n.m. en el extremo sur y 2800 m.s.n.m. en el extremo norte. Con esta topografía, presenta una pendiente promedio de 2 grados con inclinación NNE. El río Machángara, localizado al NNE de la subcuenca del Sur de Quito, se alimenta de los ríos que fluyen por las quebradas de este valle (Peñañiel, 2009, p. 34).

### **3.4.3. Precipitación media anual**

La precipitación media anual fue determinada a partir de las estaciones de monitoreo del INAMHI. Aunque para el caso del presente trabajo únicamente se consideró los valores de la precipitación media mensual del año 2016 de la estación Izobamba (siendo el último año que presenta registros y la estación de monitoreo más cercana al Terminal de Productos Limpios El Beaterio), es importante puntualizar que en la subcuenca del Sur de Quito existen en total cinco estaciones pluviométricas más que fueron consideradas para determinar los valores de precipitación multi-anual para el período 1962-2005. Los resultados indican que la estación que presenta mayor precipitación media anual es la de San Juan de Chillogallo, con un valor de 2,002.0 mm/año, seguida de la estación Quito-Observatorio, con un valor de 1,186.8 mm/año. Las estaciones Izobamba y Atacazo presentan valores similares de 1,410.8 mm/año y 1,315.2 mm/año, respectivamente. Finalmente, la estación que presenta el menor valor

de precipitación multi-anual es la de El Troje, con un valor de 919.2 mm/año (Peñañiel, 2009, p. 63-65).

En general, independientemente de la estación y del año de registro de precipitación, se puede establecer que existen dos temporadas bien marcadas, la de lluvias máximas con un pico en el mes de abril y la de déficit de lluvia con un valle en el mes de agosto (Peñañiel, 2009, p. 63-69).

#### **3.4.4. Evapotranspiración**

La evapotranspiración comprende la evaporación de agua que ocurre a través de las plantas y desde el suelo. Para el caso de la subcuenca del Sur de Quito, se ha dividido el área total de la misma de 127.7 km<sup>2</sup> en tres secciones: Flanco occidental, que comprende las caras orientales de las laderas de los complejos volcánicos Atacazo – Ninahuilca y Pichincha y tiene un área de 56.1 km<sup>2</sup>; Flanco oriental, que presenta una superficie de 17.9 km<sup>2</sup> y comprende el flanco occidental de la loma de Puengasí; y Valle del Sur de Quito, con una superficie de 53.7 km<sup>2</sup> (Peñañiel, 2009, p. 74-76).

Los valores para cada sección fueron calculados mediante el método de Thornthwaite y considerando los valores de precipitación y temperatura media multi-anual de la estación del INAMHI Izobamba. A partir de aquí, se obtuvo que la evapotranspiración en el Flanco Oriental y en el Valle del Sur de Quito es elevada, pues presenta valores de 629.0 y 608.3 milímetros, respectivamente. Por otro lado, el Flanco Occidental presenta un valor considerablemente menor de evapotranspiración, de 595.8 milímetros (Peñañiel, 2009, p. 74-76).

#### **3.4.5. Escorrentía superficial**

La escorrentía superficial se define como la cantidad de agua que fluye por la superficie de un terreno y es captada por los cuerpos hídricos. En el caso de la subcuenca del sur de Quito, la escorrentía ha sido considerada como la misma que para la subcuenca del norte de Quito al carecer de datos para estimar la escorrentía propia de la zona. En este sentido, la escorrentía anual corresponde

al 27% de la precipitación media multi-anual, lo que representa un valor de escorrentía superficial de 335.5 milímetros por año, que es el 27% de la precipitación media multi-anual de 1242.7 milímetros (Peñañiel, 2009, p. 74).

#### **3.4.6. Hidrogeología de la subcuenca del Sur de Quito**

La hidrogeología de la subcuenca del Sur de Quito ha sido estudiada desde el año 1973 por parte de la EPMAPS (Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento) a través de 51 registros de perforación, que incluyen cinco perforaciones exploratorias con recuperación de núcleos realizadas en el año 2006 (Peñañiel, 2009, p. 82).

A partir de estos antecedentes, se ha determinado que el recurso hídrico subterráneo de la subcuenca del Sur de Quito forma un único yacimiento, compuesto, en orden de menor a mayor profundidad, por un acuitardo y dos capas de acuíferos denominados acuífero superior y acuífero inferior (Peñañiel, 2009, p. 85).

Por un lado, el acuitardo formado principalmente por materiales de arena y tobas de la formación Cangahua y presenta una conductividad hidráulica media de 0.7 m/día. Su recarga proviene de la infiltración de agua potable con un valor estimado de 1'550,381 m<sup>3</sup>/año, de aguas lluvia sobre el Valle del Sur de Quito con un valor de 4'137.850 m<sup>3</sup>/año y del flanco oriental de la Loma de Puengasí (1'997.303 m<sup>3</sup>/año), alcanzando una recarga total de 7'685.534 m<sup>3</sup>/año (Peñañiel, 2009, p. 85-86).

Por otra parte, en acuífero superior es un acuífero multicapa que presenta estratos de turba, niveles de arcilla, areniscas finas, cenizas y oleadas piroclásticas, flujo piroclástico "block and ash" y toba blanca. El nivel piezométrico en este acuífero tiene una cota máxima de 3030 m.s.n.m. en el sur de la subcuenca del Sur de Quito y una cota mínima de 2790 m.s.n.m en el norte. La dirección de flujo de este nivel es de NNE-E, y se establece que parte del recurso hídrico subterráneo de la subcuenca de Quito drena hacia el Valle de Los Chillos (Peñañiel, 2009, p. 86-91).

Finalmente, el nivel acuífero inferior es semiconfinado y presenta surgencia. Este acuífero presenta un estrato confinante compuesto por depósitos de flujos de lodo cuya conductividad hidráulica es de 0.22 m/día. Las capas de este acuífero están formadas por avalanchas de escombros, brecha volcánica soldada y flujos de lava andesítica. En general, en el Valle del Sur de Quito, el acuífero inferior presenta una conductividad hidráulica de 0.97 m/día (Peñañiel, 2009, p. 92-95).

En general, la dirección de flujo de aguas subterráneas en la subcuenca del Sur de Quito a partir de ensayos de infiltración, muestran que las laderas de los complejos volcánicos Atacazo – Ninahuilca y Pichincha son los más favorables para recargar a los acuíferos debido a su elevada capacidad de infiltración. Es decir, la recarga proviene del Suroeste y la descarga se encuentra en dirección Noreste (Peñañiel, 2009, p. 96).

## **4. CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA**

La metodología que se siguió para el desarrollo del presente estudio se resume a continuación en el siguiente diagrama de procesos que se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Diagrama de procesos generales de la metodología.

Una vez definido el diagrama de procesos generales, se especifica a continuación cada uno de los procedimientos y actividades llevadas a cabo.

#### 4.1. Recopilación de información secundaria

La información secundaria fue obtenida de fuentes oficiales como EP PETROECUADOR, INAMHI y SENPLADES, junto con bibliografía recopilada de estudios anteriores de la zona, como la tesis con título *Geología y Análisis del Recurso Hídrico Subterráneo de la Subcuenca del Sur de Quito* (Peñafiel, 2009) y bibliografía confiable utilizada en el Marco Teórico. Todo este compendio bibliográfico, que se detalla en el Capítulo III Levantamiento de Información, fue utilizado como punto de partida para conocer a fondo las características de la zona de estudio en términos ambientales, especialmente hidrogeológico y definir el alcance de los siguientes procedimientos metodológicos para la consecución de los objetivos planteados.

## **4.2. Estudios iniciales**

A fin de obtener los parámetros y condiciones de borde necesarias para el desarrollo del modelo, tanto conceptual como numérico, fue necesaria la realización de estudios iniciales, mismos que estuvieron divididos en dos grandes fases que se explican a continuación: Trabajos de campo y determinación de la zona de estudio.

### **4.2.1. Trabajos de campo**

La fase de trabajos de campo, fue desarrollada en las instalaciones del Terminal de Productos Limpios El Beaterio, cumpliendo para el efecto y en todo momento las políticas internas y de seguridad, salud y ambiente de EP PETROECUADOR. Estos trabajos fueron necesarios a fin de ubicar geográficamente los pozos de monitoreo, analizar su ubicación, determinar las cuatro zonas de riesgo de derrame y determinar las cotas del río que pasa por el extremo Este del Terminal en la quebrada llamada "Quebrada Sin Nombre".

#### **4.2.1.1. Ubicación de los pozos de monitoreo.**

A pesar de que en la información encontrada en el estudio *Implementación de Pozos de Monitoreo de Aguas Subterráneas en las Plataformas de Remediación*. Contrato No.2016063-Cci-Zno-2016 (TERRAHIDRO, 2016), proporcionada por EP PETROECUADOR se especifica la ubicación geográfica de los pozos de monitoreo en coordenadas UTM WGS84-17 Sur y las cotas levantadas mediante la Centro de Tratamiento de Suelos total marca TRIMBLE en la boca de los pozos; se realizó un levantamiento de coordenadas geográficas y cotas de los cuatro pozos de monitoreo a fin de corroborar la información proporcionada anteriormente citada.

Para la ubicación geográfica de los cuatro pozos de monitoreo y su cota, fue necesaria la utilización del dispositivo portátil GPS marca GARMIN modelo Oregon 550. La ubicación geográfica en coordenadas UTM WGS84-17 Sur y las cotas levantadas fueron tomadas en la boca de cada uno de los pozos de

monitoreo y se restó la altura del mojón o hito del pozo, que es de 50. Estas mediciones fueron realizadas en una mañana despejada de nubes a fin de evitar errores de medición del satélite (Espinel, 2012).

Es necesario mencionar que este trabajo de campo se llevó a cabo únicamente con fines de comprobar la información secundaria facilitada y validar la misma, que, al ser levantada con metodologías de mayor precisión, como una estación total

#### **4.2.1.2. Determinación de las cuatro zonas de riesgo de derrame del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.**

De manera similar que el punto anterior, la determinación de las cuatro zonas de riesgo de derrame del Terminal de Productos Limpios El Beaterio fue realizada mediante la utilización del dispositivo portátil GPS marca GARMIN modelo Oregon 550. Para la determinación de estas zonas, se tomó como principal referencia a la especificación de las mismas en el documento llamado Plan de Emergencia Terminal El Beaterio 2017 (PETROECUADOR, 2017). Estas cuatro zonas con riesgo de derrame, debido a la naturaleza y actividades que se desarrollan diariamente en las mismas, son:

- Zona 1: islas de carga, patio bombas, piscinas API, generadores de emergencia.
- Zona 2: Planta de Jet Fuel y Mezclas (incluye tanques).
- Zona 3: Área de tanques de almacenamiento (incluye las esferas de almacenamiento y piscina API junto a las esferas).
- Zona 4: Estación de Bombeo y Estación Reductora (incluye tanques).

En este sentido, se realizó el levantamiento de las coordenadas geográficas de estas cuatro zonas en sistema UTM recorriendo a pie las mismas y tomando los puntos de coordenadas en los vértices de cada una de estas zonas, a fin de posteriormente crear un mapa representativo de las mismas de una manera exacta en el sistema WGS84 Zona 17 Sur utilizando el software QGIS Las Palmas 2.18.1.

#### **4.2.1.3. Determinación de las coordenadas y cotas del río que pasa por la quebrada denominada “Quebrada Sin Nombre”.**

Fue necesario determinar las coordenadas y cotas del río que cruza por la quebrada llamada por los moradores del barrio El Beaterio como “Quebrada Sin Nombre”, teniendo en cuenta que, al tratarse de un cuerpo hídrico que se encuentra a escasos metros al costado del cerramiento del lado Este del Terminal de Productos Limpios El Beaterio y que en el mismo se descargan diariamente las aguas residuales industriales una vez que son procesadas en la piscina API, así como las aguas lluvia y aguas freáticas que sale a la superficie y circulan por el sistema de ductos y canaletas del Terminal; es una condición de borde significativa que influye en el ciclo hidrogeológico y por tanto en el modelo a desarrollar. Además, haciendo hincapié a las aguas subterráneas, se puede evidenciar que las mismas si se descargan en este cuerpo hídrico por la coloración tomate y amarillenta propia de aguas freáticas con alto contenido de hierro, lo cual es una característica predominante en la subcuenca del Sur de Quito (Peñafilel, 2009, p. 1).

Para este efecto, se utilizó el mismo dispositivo portátil GPS marca GARMIN modelo Oregon 550 y se tomó un punto de referencia del río cada 9 metros, teniendo un total de 80 mediciones, considerando la misma longitud del extremo S-N del Terminal, equivalente a 720 metros para el caso de estudio del modelo hidrogeológico.

#### **4.2.2. Determinación de la zona de estudio**

Para definir la zona de estudio, se tuvo como principal referencia los archivos en formato shapefile (.shp) obtenidos de la Auditoría Ambiental de Cumplimiento y Actualización del PMA del Terminal de Productos Limpios El Beaterio (Auditoría Ambiental, 2011), facilitada por EP PETROECUADOR. Los shapefiles fueron cargados en el software de información geográfica QGIS Las Palmas 2.18.1 y a partir del mismo se realizó el respectivo procesamiento de información.



#### **4.2.2.1. Mapa de localización de pozos de monitoreo, zonas de riesgo, cotas, área del modelo y segmentos del modelo.**

En función al procedimiento anteriormente descrito se creó un mapa en el software de información geográfica QGIS Las Palmas 2.18.1, y a partir del mismo se realizó el respectivo procesamiento de información. En ese software, fue posible relacionar la información levantada en campo y la encontrada en formato shapefile de la Auditoría Ambiental de Cumplimiento y Actualización del PMA del Terminal de Productos Limpios El Beaterio (Auditoría Ambiental, 2011), facilitada por EP PETROECUADOR. En este mapa se definió el área de estudio total del modelo, el área de las cuatro zonas de riesgo, la ubicación de los pozos, la ubicación del río y las curvas de nivel.

Es necesario mencionar que el área total de las instalaciones del Terminal de Productos Limpios El Beaterio es de 28.3 hectáreas, según se ha mencionado en el Capítulo III y considerando el mapa generado a partir de una imagen aérea realizado por EP PETROECUADOR (PETROECUADOR, 2016). No obstante, para el caso de este estudio, ha sido necesario determinar un área con forma de polígono regular (rectángulo) para poder diseñar la grilla del modelo en Modflow. Para este fin, se ha completado el polígono irregular trazando líneas rectas en el extremo Oeste y Norte del área de implantación, y adicionalmente, se ha exagerado 13 metros lineales al lado Este, principalmente para incluir en el área de estudio al río de la “Quebrada sin Nombre” debido a la importancia como condición de borde que representa. De este modo, las dimensiones del área real de estudio utilizada para el modelo son 720 metros de largo por 500 metros de ancho, generando un área total de estudio para el modelo de 360000 m<sup>2</sup> o 36 hectáreas.

Finalmente, en cuanto a los segmentos del modelo, fue necesario dividir al área total del modelo anteriormente mencionado en cuatro segmentos con el fin de tener una discretización horizontal más fina y comparar los resultados de esta con los de una discretización horizontal que comprende a toda el área de estudio.

De esta manera, se puede determinar si la discretización horizontal es un factor influyente en los resultados en cuanto a dirección y velocidades de flujo.

Considerando las limitaciones del software gratuito Processing Modflow 5.3 que permite una discretización horizontal y vertical total de máximo 5000 nodos o celdas, se dividió el área de modelamiento en cuatro secciones, A, B, C y D; todas con las mismas dimensiones y considerando como condición de borde común al río de la Quebrada Sin Nombre que se encuentra al extremo Oeste del Terminal y que la recarga de aguas subterráneas proveniente de las formaciones geológicas Atacazo y Pichincha, se encuentra en el extremo Suroeste (Peñafiel, 2009, p. 83). En este sentido, se procedió a modelar la sección A primero y se utilizó los resultados de este modelo como condiciones de borde y parámetros iniciales para el desarrollo del modelo B. De manera análoga, se realizó el mismo procedimiento para las secciones C y D, utilizando los resultados del modelo de las secciones B y C respectivamente.

#### **4.3. Desarrollo del modelo conceptual**

Para el desarrollo del modelo conceptual, se consideró toda la información secundaria levantada que tiene repercusión en el sistema hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. Esta información y la metodología seguida para procesar la misma y general el modelo conceptual se describe a continuación.

##### **4.3.1. Información hidrogeológica de los pozos de monitoreo.**

Toda la información hidrogeológica encontrada en el estudio realizado por la consultora TERRAHIDRO con título: *Implementación de Pozos de Monitoreo de Aguas Subterráneas en las Plataformas de Remediación*. Contrato No.2016063-Cci-Zno-2016, fue considerada para el desarrollo del modelo conceptual en el software QGIS Las Palmas 2.18.1 y posteriormente el modelo numérico en el software Processing Modflow 5.3. A continuación, se detalla de qué manera se utilizó la información secundaria.

### **4.3.2. Estratigrafía del suelo**

La estratigrafía del suelo se obtuvo a partir de las perforaciones de los cuatro pozos de monitoreo, siendo dos de estas perforaciones de tipo destructivas, la del pozo PMB-2D y PMB-3D, y dos de tipo ensayo de recuperación continua de muestras de los pozos PMB-1M y PMB-4M (TERRAHIDRO, 2016, p. 51). De este modo, se obtuvo el perfil litoestratigráfico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio en la zona de las plataformas de Restauración Ambiental.

Además, se consideró las características de la estratigrafía del suelo de la subcuenca del Sur de Quito (Peñañiel, 2009, p. 16-20) y la caracterización de la primera capa del suelo del Terminal de Productos Limpios El Beaterio realizada en el trabajo de titulación de Yomar Álvarez con título: Suelos afectados por derrames de hidrocarburos: Alternativas de remediación en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio Petrocomercial (Álvarez, 2009, p. 56).

En el caso del modelo conceptual, se consideró a todos los estratos del suelo determinados en el estudio mencionado anteriormente y cada uno de los estratos fue representado y acotado en un modelo conceptual 3D en el Software QGIS Las Palmas 2.18.2.

### **4.3.3. Cotas de nivel**

Para el desarrollo del modelo conceptual, además de las cotas de nivel de cada uno de los cuatro pozos de monitoreo que fueron determinadas en el estudio de TERRAHIDRO, se consideró también las cotas de toda el área obtenidas a partir de la Auditoría Ambiental de Cumplimiento del Terminal de Productos Limpios El Beaterio Periodo Febrero 2013 Febrero 2015, mismas que tienen una diferencia entre cada cota de 5 msnm, así como las cotas levantadas mediante el dispositivo portátil GPS marca GARMIN modelo ORGERON 550 de las cuatro zonas de riesgo de derrame y del río que cruza por la quebrada llamada "Quebrada Sin Nombre".

#### **4.3.4. Carga hidráulica**

Con la información obtenida de las cotas de nivel, fue posible determinar las cargas hidráulicas presentes en cada una de las zonas del modelo. Para este efecto, se consideró que existe una diferencia de cota entre la zona más alta del área de estudio ubicada al SO y la zona más baja del área de estudio ubicada al NE de 25 msnm (siendo 2970 la zona más alta y 2945 la más baja), es decir, 25 metros de desnivel negativos. Se procedió a ingresar los datos de carga hidráulica considerando para cada una de las secciones del modelo, las curvas de nivel del terreno y el espesor de cada una de las capas acorde al estudio de Terrahidro (TERRAHIDRO, 2016, p. 59). Es necesario mencionar que los valores de las cargas hidráulicas de la sección del río de la Quebrada Sin Nombre, considerada como una condición de borde del modelo, fueron insertados en función al levantamiento de cotas realizado, en el cual se verificó que existe a lo largo de toda la sección de la Quebrada Sin Nombre, una profundidad de 3 metros desde la rasante del terreno hasta el espejo de agua del río, por lo que el valor insertado en este sector fue tres metros menos que la carga hidráulica de la sección contigua al mismo, siguiendo las curvas de nivel. Para cada rango, se consideró el límite inferior para calcular la carga hidráulica de la capa 1 considerando un valor constante inferior de cota de 2922 msnm en todos los casos.

#### **4.3.5. Hidrogeología**

En función de los análisis y resultados del estudio realizado por TERRAHIDRO, se describió las características hidrogeológicas de los acuíferos del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. Estas características, al estar detalladas por tramos de profundidad en cada pozo (TERRAHIDRO, 2016, p. 60-61), se consideraron para determinar la conductividad hidráulica horizontal y vertical, así como la porosidad efectiva de cada una de las capas del modelo para cada uno de los escenarios determinados. Estos valores fueron obtenidos a partir de tablas de bibliografía confiable sobre hidrogeología, geotecnia y suelos. Fue necesario determinar los valores de estos parámetros en tablas (Todd, 2006, p. 36-93)

debido a que, en el estudio realizado, únicamente se detalla un valor de conductividad hidráulica para cada pozo y de un solo tramo de la estratigrafía del suelo, lo cual no es válido para el desarrollo de un modelo hidrogeológico de todo el Terminal y tampoco en concepto, pues de ser así, el suelo estaría distribuido en capas verticales y no horizontales, como realmente es.

Además, para el cálculo de los valores de conductividad hidráulica horizontal, conductividad hidráulica vertical y porosidad efectiva, también se consideró las curvas de nivel del terreno. Los valores calculados, en este sentido, guardan la misma explicación que el expuesto anteriormente para las cargas hidráulicas, por lo que a partir del rango de cota de cota 2955-2950, hasta el rango de cota más bajo de 2945-2940, los valores tanto de conductividad hidráulica horizontal y vertical, como de porosidad efectiva, fueron constantes, considerando un valor fijo de estos valores correspondientes al rango de cota que precede, es decir, de 2960-2055. Se consideraron los valores calculados en este rango tendiendo como referencia que el perfil del terreno, en función de las curvas de nivel, tiene un desnivel negativo, en sentido SO-NE; por lo que, al no ser posible calcular con los recursos disponibles el perfil estratigráfico en todas las zonas del terminal, como por ejemplo en la zonas NE, se asume que los valores del rango de cota inferior disponibles de 2055-2950, se mantienen constantes hacia las cotas inferiores.

#### **4.3.6. Construcción del modelo conceptual**

A partir de todas las actividades anteriormente descritas, desde la recopilación de información secundaria hasta los trabajos de campo, fue posible comprender la hidrogeología de la zona de estudio y las condiciones de borde de la misma y a partir de ahí, construir un modelo conceptual que ilustra, de manera representativa y general, la configuración de los acuíferos y la dirección de flujo de las aguas subterráneas. Este modelo conceptual fue desarrollado en el software AutoCAD 2013, importando la implantación e información geográfica desde el software QGIS Las Palmas 2.18.3.

Para comprender de mejor manera los aspectos anteriormente mencionados, se creó, en primer lugar, un modelo conceptual en función a la elevación del terreno, es decir un Modelo Digital de Terreno (MDT), de la zona de la subcuenca del Sur de Quito con la implantación del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. Para este efecto, se utilizó una imagen TIFF obtenida de la plataforma de datos de satélites de la NASA del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, Global Data Explorer, 2017). Esta imagen TIFF fue procesada en el software QGIS Las Palmas 2.18.1. La resolución vertical y horizontal de la imagen TIFF es de 100 dpi, con una dimensión en pixeles de 59 de ancho por 79 de alto.

#### **4.4. Evaluación del modelo numérico**

Una vez construido el modelo conceptual, se procedió a evaluar la hidrogeología del Terminal de Productos Limpios El Beaterio mediante un modelo numérico de tres capas en el software Processing Modflow 5.3. Es necesario mencionar que la evaluación del modelo numérico se ejecutó en dos fases: La primera, evaluando el área total del terminal a través de una discretización horizontal con celdas de 20 m de ancho por 20 m de largo; y la segunda, evaluando el área total del modelo seccionado en cuatro zonas iguales, cada una con una discretización horizontal de celdas de 6 m de ancho por 10 metros de largo. Se evaluó el modelo hidrogeológico en estas dos fases mencionadas principalmente por dos razones, la primera por razones técnicas de factibilidad operativa del software; y la segunda, debido a que a partir de los resultados de las dos fases, es posible comparar si la discretización horizontal es determinante para modificar la dirección de flujo en cada uno de los escenarios evaluados y también validar que la dirección de flujo es en efecto la que indica el modelo de tres capas de toda el área (fase 1) y las referencias bibliográficas.

Los parámetros hidrogeológicos de ambas fases fueron insertados siguiendo la misma metodología. La principal variación entre las dos fases radica en la determinación de los límites del área de modelación y condiciones de borde, así como la discretización horizontal y vertical de la grilla de modelamiento.

#### **4.4.1. Determinación de los límites del área de modelación y condiciones de borde**

##### **4.4.1.1. Primera fase: Modelo del área total de estudio**

Para definir el área de modelamiento en el software Processing Modflow versión 5.3, fue necesario considerar que esta versión gratuita del software permite una discretización horizontal y vertical total de máximo 5000 nodos o celdas. En este sentido, para poder realizar simulaciones del modelo de tres capas considerando toda el área de interés, fue necesario realizar una discretización horizontal y vertical considerando una grilla que resulte en celdas de 20 metros de largo por 20 metros de ancho y teniendo en cuenta como condiciones de borde común por un lado al río de la Quebrada Sin Nombre que se encuentra al extremo Oeste del Terminal; y por otro lado a la recarga de aguas subterráneas proveniente de las formaciones geológicas Atacazo y Pichincha, que se encuentra en el extremo Suroeste (Peñañiel, 2009, pp. 96-97).

##### **4.4.1.2. Segunda fase: Modelo seccionado en cuatro zonas**

Partiendo nuevamente de la consideración de que la versión gratuita del software permite una discretización horizontal y vertical total de 5000 nodos o celdas, fue necesario, a fin de tener una discretización horizontal y vertical más fina, dividir el área de modelamiento en cuatro secciones, A, B, C y D; todas con las mismas dimensiones y considerando como condición de borde común al río de la Quebrada Sin Nombre que se encuentra al extremo Oeste del Terminal y que la recarga de aguas subterráneas proveniente de las formaciones geológicas Atacazo y Pichincha, se encuentra en el extremo Suroeste (Peñañiel, 2009, pp. 96-77 ). En este sentido, se procedió a modelar la sección A primero y se utilizó los resultados de este modelo como condiciones de borde y parámetros iniciales para el desarrollo del modelo B. De manera análoga, se realizó el mismo procedimiento para las secciones C y D, utilizando los resultados del modelo de las secciones B y C respectivamente.

## 4.4.2. Definición de la grilla y discretización horizontal y vertical

### 4.4.2.1. Primera fase: Modelo del área total de estudio

A continuación, se presentan los datos de entrada utilizados en el software Processing Modflow 5.3 para diseñar la discretización horizontal y vertical de la grilla en la que se evaluará el modelo hidrogeológico de tres capas de toda el área del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Section	Parameter	Value
Layer (K Dimension)	Number of Layers	3
	Model Thickness	48
	Model Top Elevation	0
Row (I Dimension)	Number of Rows	36
	Model Extent	720
Column (J Dimension)	Number of Columns	25
	Model Extent	500
Cross-Sectional Display	Vertical Exaggeration	25

*Figura 15.* Datos de entrada para definir la grilla del modelo hidrogeológico de tres capas.

Bajo esta configuración de grilla, el dimensionamiento espacial del modelo resulta en un total de 900 celdas o nodos en cada capa, obteniendo un total de 2700 celdas en toda el área del modelo.

Considerando estos parámetros cada celda mide 20 metros de largo por 20 metros de ancho, resultando en un área por celda de 400 m<sup>2</sup> y un área total del modelo, tal como enseña la Figura 2, de 360000 m<sup>2</sup> o 36 hectáreas. A continuación, la Figura 16 muestra la grilla del modelo hidrogeológico.



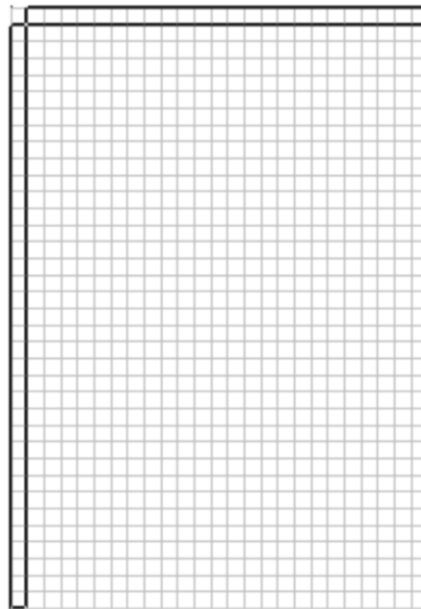


Figura 16. Grilla utilizada en la primera fase el modelo hidrogeológico en Processing Modflow 5.3.

#### 4.4.2.2. Segunda fase: Modelo hidrogeológico seccionado en cuatro

A continuación, se presentan los datos de entrada utilizados en el software Processing Modflow 5.3 para diseñar la grilla. Como se mencionó anteriormente, el dimensionamiento de la grilla es el mismo para cada una de las cuatro secciones de modelamiento.

Figura 17. Datos de entrada para definir la grilla del modelo hidrogeológico de tres capas.

Bajo esta configuración de grilla, el dimensionamiento espacial del modelo resulta en un total de 4500 celdas o nodos en toda de cada sección, obteniendo un total de 18000 celdas en toda el área del modelo.

Considerando parámetros, el modelo de la Sección A, así como los modelos B, C y D, tienen 1500 celdas o nodos en cada una de las tres capas. Cada celda mide 6 metros de largo por 10 metros de ancho, resultando en un área por celda de 60 m<sup>2</sup>. A continuación, la Figura 18 muestra la grilla de la Sección A, por poner un ejemplo, del modelo hidrogeológico.

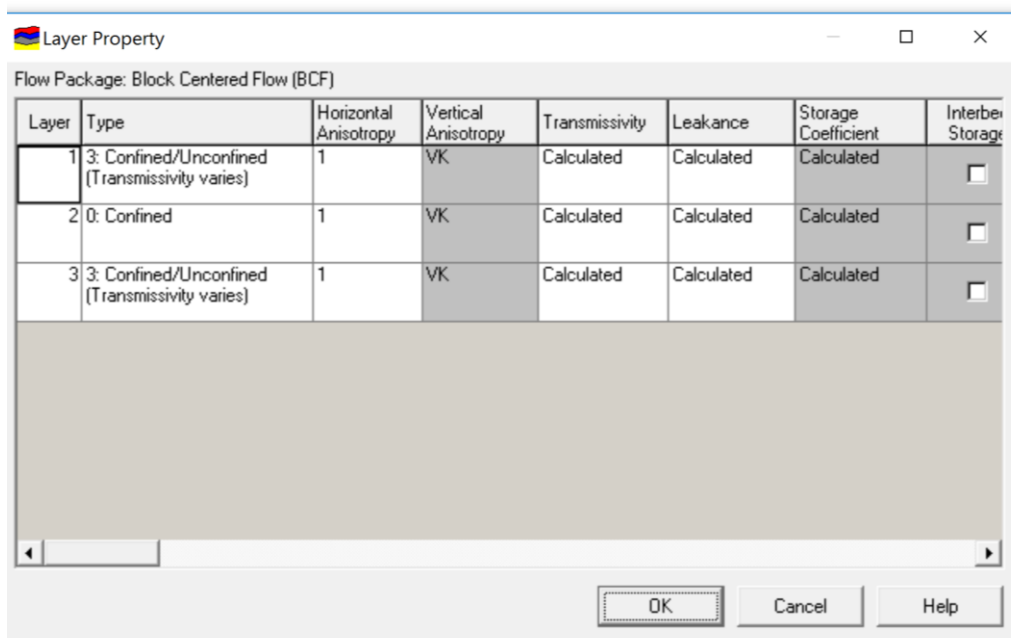


*Figura 18.* Grilla del modelo hidrogeológico de una capa.

#### **4.4.3. Propiedades de las capas**

A continuación, para el modelo en cuestión de tres capas, tanto para la fase 1 como para la fase 2, se consideró que las capas 1 y 3 son de tipo 3, lo que significa que son totalmente convertibles entre confinadas y no confinadas. El coeficiente de almacenamiento específico es utilizado para calcular la tasa de cambio en el almacenamiento, en el caso de que la capa esté completamente saturada, caso contrario se utilizará el rendimiento específico (Simcore, 2010, pp. 47-48). Se consideró este tipo de capas debido a las propiedades de los materiales arenosos que prevalecen en las mismas que para el caso de la capa 1, cumplen las características de un acuífero superficial y de un acuífero profundo la capa 3. Por otro lado, para el caso de la capa 2, se consideró que la misma es de tipo 0, lo que significa que esta capa actúa como un medio

impermeable debido a sus propiedades geológicas y el perfil litoestratigráfico y no representa un acuífero que permite el ingreso y egreso de aguas subterráneas (TERRAHIDRO, 2016). A continuación, la Figura 19 muestra las propiedades insertadas en el modelo para la capa.



Layer	Type	Horizontal Anisotropy	Vertical Anisotropy	Transmissivity	Leakance	Storage Coefficient	Interbed Storage
1	3: Confined/Unconfined (Transmissivity varies)	1	VK	Calculated	Calculated	Calculated	<input type="checkbox"/>
2	0: Confined	1	VK	Calculated	Calculated	Calculated	<input type="checkbox"/>
3	3: Confined/Unconfined (Transmissivity varies)	1	VK	Calculated	Calculated	Calculated	<input type="checkbox"/>

Figura 19. Propiedades de la capa del modelo.

#### 4.4.4. Determinación de las condiciones de borde del modelo

Las condiciones de borde de un modelo numérico en Modflow se definen a partir de las propiedades de cada capa. En el software Processing Modflow 5.3, se define las condiciones de borde a través del parámetro *IBOUND*.

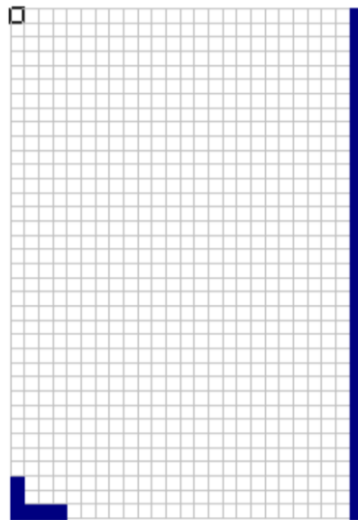
En este sentido, se agregó valores de -1 y 1 a las celdas, dependiendo si las mismas presentan una carga hidráulica constante durante la simulación, o si las cargas hidráulicas son calculadas por el modelo durante la simulación. No se insertó valores 0, pues este valor significa que la capa está inactiva, lo cual no representa la realidad de este estudio. En consecuencia, se insertó valores de -1 a las celdas donde se encuentra el arroyo que pasa por la quebrada denominada "Quebrada Sin Nombre", misma que colinda a 2 metros al Este del

Terminal de Productos Limpios El Beaterio. También, se insertó valores de -1 en el extremo SO del área de modelamiento de grilla, en virtud de que el trabajo de titulación con nombre: Geología y Análisis del Recurso Hídrico Subterráneo de la Subcuenca del Sur de Quito (Peñafiel, 2009, pp. 96-97), se concluye que los complejos volcánicos Atacazo – Ninahuilca y Pichincha son los más favorables para recargar los acuíferos en el valle del Sur de Quito, debido a su alta capacidad de infiltración, y estos complejos se encuentran ubicados al S y al O del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. Vale la pena mencionar que tanto para la condición de borde del río de la Quebrada sin Nombre, como la zona de recarga, los valores de -1 que fijan una carga hidráulica constante fueron insertados únicamente en la capa 1 del modelo debido a que es la única que presenta un contacto con la superficie al tratarse del acuífero superficial y a que tiene mayor espesor en el perfil litoestratigráfico planteado. La capa 2, por otro lado, representa un medio confinante por sus propiedades geológicas, por lo que es una capa que no actúa como acuífero, es decir, no puede ni retener ni transmitir agua. Finalmente, la capa 3 representa al acuífero somero o profundo, mismo que es considerado como el acuífero de reserva de la Cuenca de Quito, por lo que no interactúa directamente con la superficie (Peñafiel, 2009, pp. 92-95).

Para este efecto, se tuvo como referencia la ubicación de la quebrada mencionada en el software QGIS Las Palmas 2.28.1 a una escala de 1:7.800, que es igual a la escala gráfica proyectada en la interfaz de Processing Modflow y la visualización de la misma en Google Earth. También, se diseñó una grilla con la implantación y la misma escala en AutoCAD 2013, a fin de localizar los datos de IBOUND, así como todos los otros datos de los parámetros del modelo, con mayor precisión. A continuación, las Figuras 20 y 21 muestran la configuración de los valores de IBOUND en la grilla del modelo.

Cabe mencionar que los valores -1 correspondientes a la recarga SO de aguas subterráneas fueron insertadas en un valor representativo de 60 metros hacia el norte y 80 metros hacia el Este en la primera capa de la primera fase del modelo. En la segunda fase del modelo, este valor de IBOUND fue insertado únicamente

en la Sección A del modelo, es decir, en la sección que se encuentra en el extremo sur. Los valores representativos para esta condición de borde fue 40 metros hacia el este y de 24 metros hacia el norte. Por otro lado, los valores de -1 correspondientes al río de la Quebrada Sin Nombre fueron insertados a lo largo de todo el extremo este en únicamente la primera capa de toda el área de modelo de la primera fase, y en el extremo este de cada una de las cuatro secciones del modelo hidrogeológico.



*Figura 20.* Ubicación de valores IBOUND en la grilla del modelo de la primera fase.



*Figura 21.* Ubicación de valores IBOUND en la grilla del modelo de la segunda fase.

Es necesario especificar que los valores de los parámetros que requiere el modelo, para cada una de las tres capas, fueron insertados en función del Mapa

de ubicación de pozos monitoreo, zonas de riesgo de derrame y área del modelo del Terminal de Productos Limpios El Beaterio, siguiendo las cotas de nivel y teniendo en consideración el perfil litoestratigráfico.

#### 4.4.5. Elevación tope y base de las capas

Para la elevación tope de cada una de las tres capas, tanto para la primera como para la segunda fase del modelo, se consideraron los valores siguientes que indica la Tabla 7, en función del perfil litoestratigráfico, la topografía (TERRAHIDRO, IMPLEMENTACIÓN DE POZOS DE MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS PLATAFORMAS DE REMEDIACIÓN. CONTRATO No.2016063-CCI-ZNO-2016 , 2016) y el modelo conceptual de tres capas. Es necesario mencionar que por defecto, Processing Modflow 5.3. establece como valor de 0 absoluto a la base de toda la sección vertical a modelar, por lo que los valores de elevaciones tope y base de las capas son positivos.

Tabla 6.  
*Elevación tope y base de cada capa del modelo.*

Elevaciones y bases de cada capa del modelo					
Rango de Cota	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Elevación/Base	Observaciones
2975-2970	48	15	10	Elevación (m)	Se consideraron estos valores para todo el modelo en función de las curvas de nivel del terreno. En la condición de borde del río, se restó 3 metros al valor correspondiente según las curvas de nivel. Esto debido a la profundidad de la Quebrada Sin Nombre. No se consideraron las cotas exactas de los piezómetros en razón de que es un valor puntual que no abarca todo el espacio de cada una de las curvas de nivel del terreno.
	15	10	0	Base (m)	
2970-2965	43	14	9	Elevación (m)	
	14	9	0	Base (m)	
2965-2960	38	9	4	Elevación (m)	
	9	4	0	Base (m)	
2960-2955	33	7	2	Elevación (m)	
	7	2	0	Base (m)	
2955-2950	28	7	2	Elevación (m)	
	7	2	0	Base (m)	
2950-2945	23	7	2	Elevación (m)	
	7	2	0	Base (m)	
2945-2940	18	7	2	Elevación (m)	
	7	2	0	Base (m)	

#### 4.4.6. Determinación del tipo de modelo en relación a la dinámica temporal

Como se mencionó en el alcance de la tesis, el modelo hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio será evaluado considerando un modelo de flujo estacionario por movimiento de advección únicamente, tanto para la primera como para la segunda fase. Esto significa un estado en el que el caudal no varía en función del tiempo. Esta consideración asumida no está alejada de la realidad, pues la advección es función del gradiente hidráulico por la conductividad hidráulica dividido para la porosidad y es el principal fenómeno que controla el movimiento de una pluma de contaminación en un medio poroso (Mordojovich, 2009, p. 9).

A continuación, la Figura 22 muestra el valor de tiempo insertado para la simulación del modelo.

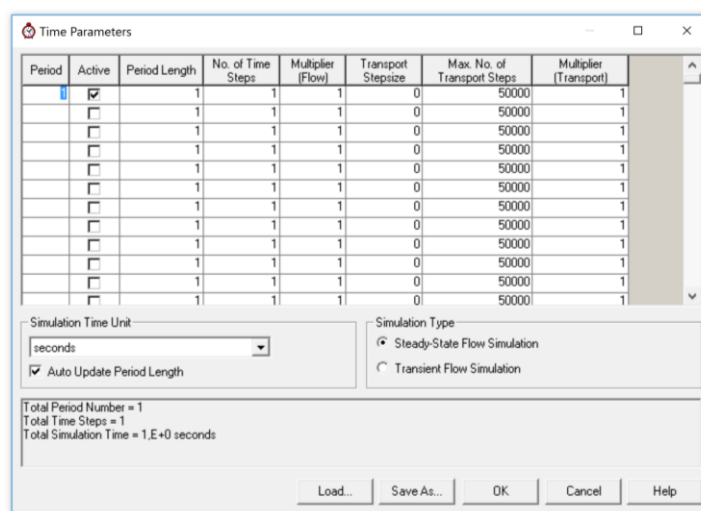


Figura 22. Parámetro de tiempo del modelo de una capa.

#### 4.4.7. Definición del intervalo de tiempo y horizonte de simulación

Para el caso de este estudio, para ambas fases se consideró un intervalo de tiempo en segundos de 31'557,600, lo que equivale a 365 días o un año. Cada etapa de simulación corresponde a este tiempo de simulación, por ejemplo, si se realiza 5 etapas, se tendrá un horizonte de simulación de 5 años. No se definió

un horizonte de simulación general para todo el modelo en razón de que es de interés evaluar en qué tiempo una posible contaminación en cada una de las zonas de riesgo de derrame y bajo cada una de las condiciones de precipitación ya descritas, llega, en función a la dirección y vectores de velocidad, a áreas de influencia directa o zonas sensibles del Terminal de Productos Limpios El Beaterio considerando un movimiento netamente por advección.

#### **4.4.8. Determinación de las cargas hidráulicas**

Para la determinación de las cargas hidráulicas de las fases uno y dos, se consideraron las curvas de nivel del terreno y el perfil litoestratigráfico. De este modo, se obtuvo siete intervalos de cota en toda el área del terreno. Cada intervalo de cota tiene una diferencia de 5 metros de desnivel. La cota más alta se encuentra en el extremo Suroeste, equivalente a 2970 msnm y la cota más baja se encuentra en el extremo Noreste con un valor de 2940 msnm. Es decir, existe un desnivel negativo total en el terreno del área del Terminal de Productos Limpios El Beaterio de 30 metros.

Además, se puede determinar que existe una diferencia de cota entre el pozo PMB-3D, que es el que se encuentra en el extremo Oeste del Terminal, y el pozo PMB-1M, que se encuentra en el extremo Este del Terminal, de 7 metros, con cotas de 2970 y 2963 msnm respectivamente. Considerando el perfil litoestratigráfico, se tiene una cota mínima de 1922 msnm (TERRAHIDRO, 2016). También se consideró las cotas del río de la Quebrada Sin Nombre, mismo que se encuentra a 3 metros de desnivel negativo desde la rasante y su lecho de agua tiene una profundidad media de 30 centímetros.

A partir de estos datos, fue posible determinar los espesores de cada capa, así como también las cargas hidráulicas de las mismas, teniendo como nivel de referencia que el valor 0 se encuentra en la cota 1922 msnm, según lo establecido por el software Processing Modflow (SIMCORE, 2010). En este sentido, para el caso de esta simulación de tres capas, se procedió a ingresar los datos de carga hidráulica conforme se muestra a continuación en la Tabla 9.



Para poder ubicar las cargas hidráulicas en la grilla del modelo, se utilizó la imagen de la infraestructura y área de modelo de ArcGis en escala 1:7.800, misma que corresponde a la escala proyectada de la grilla en Processing Modflow y en la que, conforme se determinó en la discretización horizontal de capas y columnas al momento de crear la grilla, cada celda tiene un largo de 8.6 m y de ancho 8.6 m. Para ajustar la precisión de insertar los valores de carga hidráulica en cada celda, se creó una grilla en AutoCAD 2013 con la misma escala de ArcGis y la misma escala de Processing Modflow, en la cual se superpuso la infraestructura y las cotas.

Tabla 7.

*Rango de cotas y cargas hidráulicas del modelo de tres capas.*

<b>CARGA HIDRÁULICA MODELO HIDROGEOLÓGICO DEL TERMINAL DE PRODUCTOS LIMPIOS EL BEATERIO.</b>				
<b>Cargas hidráulicas en metros</b>				
<b>Rango de cota (msnm)</b>	<b>Capa 1</b>	<b>Capa 2</b>	<b>Capa 3</b>	<b>Observaciones</b>
2975-2970	48	15	10	Se consideraron estos valores para todas las secciones del modelo.
2970-2965	43	14	9	En la condición de borde de río, se restó 3 metros al valor correspondiente según las curvas de nivel. Esto debido a la profundidad de la Quebrada Sin Nombre.
2965-2960	38	9	4	No se consideraron las cotas exactas de los piezómetros en razón de que es un valor puntual que no abarca todo el espacio de cada una de las curvas de nivel del terreno.
2960-2955	33	7	2	En la primera fila del extremo S de las secciones B, C y D, se insertaron las cargas hidráulicas en m resultantes de los modelos de las secciones A, B y C, respectivamente.
2955-2950	28	7	2	
2950-2945	23	7	2	
2945-2940	18	7	2	

#### 4.4.9. Conductividad hidráulica

Se insertó el parámetro de conductividad hidráulica en m/s teniendo en cuenta los valores de conductividad hidráulica que se indican en la sección 4.4.9 calculados a través de tablas bibliográficas en función al tipo de estratos del suelo, tanto para la primera como para la segunda fase (Todd, 2006, p. 93). En este sentido, al ser una simulación de tres capas y que comprende a todo el modelo, se consideró a los valores calculados para la capa 1 de los pozos de monitoreo ubicados en el extremo Sur del terminal, como datos iniciales para realizar un proceso de geoestadística y de ese modo representar una heterogeneidad en los valores siguiendo un método de dispersión normal gaussiana o también llamado krigado a partir de un valor medio y una desviación estándar (SIMCORE, 2010). Este proceso de geoestadística fue aplicado únicamente a la primera capa del modelo, pues las capas dos y tres presentan homogeneidad en su composición, por lo que no varía los valores de conductividad hidráulica ni tampoco porosidad. Estas consideraciones fueron aplicadas para realizar las simulaciones correspondientes en las cuatro zonas de riesgo y posteriormente comparar los resultados de las mismas.

Tratándose de un modelo de tres capas, fue necesario inicialmente determinar valores de conductividad hidráulica horizontal y vertical, con las expresiones que se indican a continuación. Los valores de conductividad hidráulica de cada una de las capas para los cuatro pozos de monitoreo fueron determinados en función del perfil litoestratigráfico (TERRAHIDRO, 2016, p. 62) a partir de tablas de bibliografía en materia hidrogeológica (Todd, 2006, p. 93).

$$Kh = \frac{(\sum ki \times bi)}{B} \quad \text{(Ecuación 11)}$$

Donde: Kh= conductividad hidráulica horizontal (L/T), ki= conductividad hidráulica de cada una de las capas (L/T), bi= espesor de cada una de las capas (L), B= espesor total (L).

$$Kv = \frac{B}{\sum \left( \frac{bi}{ki} \right)} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

Donde:  $K_v$ = conductividad hidráulica vertical (L/T),  $k_i$ = conductividad hidráulica de cada una de las capas (L/T),  $b_i$ = espesor de cada una de las capas,  $B$ = espesor total.

Considerando que la conductividad horizontal y vertical de las capas 2 y 3 están en función de un solo espesor y tipo de suelo, se procedió a considerar una relación de 10:1, es decir, que la conductividad hidráulica horizontal es 10 veces mayor que la vertical (USGS, 2009), esto considerando la formación y disposición de los granos, o la presencia de láminas intercaladas de menor permeabilidad (Sánchez, 2014).

A continuación, la Tabla 8 muestra los valores utilizados para realizar el proceso de geoestadística en el modelo.

Tabla 8.

*Valores de entrada para realizar el proceso de geoestadística en el Software Processing Modflow 5.3.*

<b>Desviación estándar capa 1</b>	
Kh (m/s)	Kv (m/s)
0,0000426	0,00000385
0,0000411	0,00000341
0,0000326	0,00000311
0,0000397	0,00000355
<b>Valores de Desviación Estándar</b>	
4,42794E-06	3,07463E-07

#### 4.4.10. Porosidad efectiva

Para el caso de la porosidad efectiva, se consideró el mismo planteamiento que el anteriormente descrito para conductividad hidráulica, sin embargo no se aplicó geoestadística, ni para la primera ni para la segunda fase, en este parámetro, pues no se encontró bibliografía que respalde que la porosidad sigue una





Tabla 12.

*Conductividad hidráulica y porosidad efectiva capas Pozo PMB-4M y río Quebrada sin Nombre*

Cálculo de Conductividad hidráulica y porosidad efectivda									
TERMINAL DE PRODUCTOS LIMPIOS EL BEATERIO									
Capa	mi (m)	ki (m/d)	ki (m/s)	Θe	Capas PMB-4M Cota 2965-2960	mi (m)	Kh (m/s)	Kv (m/s)	Θe
Limo	2	0.08	9.26E-07	0.46	Capa 1 (materiales arenosos)	34	3.97E-05	3.55E-06	0.43
Turba	0.5	0.2	2.31E-06	0.41					
Limo arenoso	6	0.08	9.26E-07	0.46					
Arena	5.5	12	1.39E-04	0.39	Capa 2 (materiales)	5	9.26E-07	9.26E-08	0.46
Arena limosa	20	2.5	2.89E-05	0.43					
Limo Plástico	5	0.08	9.26E-07	0.46	Capa 3 (arena gruesa)	2	0.00052	5.21E-05	0.39
Arena limosa	2	45	5.21E-04	0.39					
M total (m)	41				M total (m)	41			
Kh (m/s)	0.00006								
Kv (m/s)	2.74E-06								
Θe total	0.43								

#### 4.4.11. Recarga del acuífero

Para introducir el valor de recarga, se tomó en cuenta los valores de precipitación total mensual de la estación meteorológica Izobamba, que es la más cercana al Terminal de Productos Limpios El Beaterio, tanto para la primera como para la segunda fase del modelo. Estos datos fueron proporcionados por el INAMHI y se consideró a los datos mensuales del año 2016 como referencia para realizar la simulación en base a tres escenarios de recarga por medio de la precipitación: Máximo, condición de verano y la media.

#### 4.4.12. Asignación de escenarios al modelo de flujo

Como se mencionó en el alcance del presente trabajo, se efectuó una evaluación al modelo hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio en función a tres condiciones de precipitación: máxima, mínima y media; y en relación a las áreas consideradas como zonas de riesgo de derrame. En este sentido, se evaluó un total de 12 escenarios en la primera y en la segunda fase del modelo hidrogeológico.

Los valores de precipitación fueron insertados como recarga del modelo en las celdas activas de la capa superior del modelo. La Tabla 13 muestra los escenarios de modelamiento evaluados.

Tabla 13.  
*Escenarios de modelamiento evaluados.*

Escenarios	Definición	Precipitación (mm/mes)	Recarga (m/s)	Zona de riesgo
Escenario 1	Lluvia máxima	318,7	1,23E-07	1
Escenario 2	Condición de verano	10,6	4,09E-09	1
Escenario 3	Media anual	116,1	4,48E-08	1
Escenario 1	Lluvia máxima	318,7	1,23E-07	2
Escenario 2	Condición de verano	10,6	4,09E-09	2
Escenario 3	Media anual	116,1	4,48E-08	2
Escenario 1	Lluvia máxima	318,7	1,23E-07	3
Escenario 2	Condición de verano	10,6	4,09E-09	3
Escenario 3	Media anual	116,1	4,48E-08	3
Escenario 1	Lluvia máxima	318,7	1,23E-07	4
Escenario 2	Condición de verano	10,6	4,09E-09	4
Escenario 3	Media anual	116,1	4,48E-08	4

#### **4.4.13. Correr el modelo y simular el movimiento del flujo a través de PMPATH**

Uno de los códigos de procesos de Modflow es PMPATH y se utilizó el mismo para simular el movimiento y dirección de partículas de flujo en cada fase y en cada uno de los escenarios planteados. Esta interfaz de modelamiento es en 2D. Para que sea más visible el resultado de cada una de las simulaciones, se procedió a montar a la implantación y zonas de riesgo del Terminal en la grilla de Modflow en PMPATH.

Bajo esta metodología, los 12 escenarios planteados fueron modelados teniendo en cuenta la simulación de partículas de una posible contaminación en el o en los lugares que, en base a incidentes de derrames anteriores y a la realidad actual del Terminal de Productos Limpios El Beaterio, se asume que presentan mayor probabilidad de ocurrencia de derrames.

#### 4.4.14. Cálculo del tiempo de movimiento de flujo

Considerando la justificación del presente trabajo de titulación, se determinó el tiempo en que las partículas se mueven en cada uno de los doce escenarios hacia las zonas de influencia directa sensibles en el Terminal y que potencialmente puede repercutir en impactos ambientales a las poblaciones aledañas de la zona. Este procedimiento se realizó para la primera y segunda fase del modelo.

La siguiente expresión es la que utiliza el software Processing Modflow 5.3 para determinar la velocidad horizontal y vertical en función de la conductividad hidráulica horizontal o vertical, de la variación de la carga hidráulica y de la distancia entre cada una de las etapas de tiempo del modelo.

$$V = k \times \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

k= conductividad hidráulica (m/s),

$\Delta L$ = variación de la carga hidráulica (m),

L= distancia entre los dos puntos de la sección (m)

Considerando un flujo estacionario y todas las condiciones de borde y parámetros establecidos para este modelo hidrogeológico, es posible determinar el tiempo a través de la expresión siguiente:



$$t = \frac{L}{V} \quad \text{(Ecuación 15)}$$

Donde:

t= tiempo (s)

L= Distancia (m)

V= Velocidad (horizontal o vertical)

El cálculo del tiempo fue realizado teniendo en cuenta la distancia (L) en función a la discretización horizontal de la grilla de modelamiento, misma que como se mencionó anteriormente, tiene celdas de 20 metros de largo por 20 metros de ancho la primera fase del modelo; y en la segunda fase se consideró una discretización horizontal de 10 metros de largo por 6 metros de ancho.

Además, se calculó un tiempo para la velocidad horizontal y otro para la vertical en cada una de las etapas de modelamiento (cada etapa equivale a un año). Esto con el fin de no solamente evaluar el movimiento del agua subterránea de manera horizontal, sino también vertical en las capas del modelo.

## **5. CAPÍTULO V. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **5.1. Resultados de trabajos de campo**

Como se mencionó en la metodología, los trabajos de campo comprendieron el levantamiento de las coordenadas geográficas UTM sistema WGS84 Zona 17 Sur para la determinación de las cotas y localización geográfica de los pozos de monitoreo (piezómetros), de las cuatro zonas de riesgo y del río de la Quebrada Sin Nombre. A continuación, se presentan los resultados de esta fase.

### 5.1.1. Coordenadas geográficas y cotas de los pozos de monitoreo, zonas de riesgo de derrame del Terminal de Productos Limpios El Beaterio y del río que cruza por la Quebrada Sin Nombre.

Las tablas 14, 15 y 16 muestran las cotas y coordenadas geográficas UTM sistema WGS84 Zona 17 Sur de los pozos de monitoreo, zonas de riesgo de derrame y del río que cruza por la Quebrada Sin Nombre, respectivamente.

Tabla 14.

*Coordenadas geográficas UTM sistema WGS84 Zona 17 Sur y cotas de los pozos de monitoreo del área de las Plataformas de RAM del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.*

<b>TERMINAL DE PRODUCTOS LIMPIOS EL BEATERIO</b>			
POZO	COTA	COORDENADAS UTM	
	msnm	Norte (Y)	Este (X)
PMB-1M	2967,8	9964080	773623
PMB-2D	2965,2	9964115	773695
PMB-3D	2969,8	9964079	773539
PMB-4M	2963,1	9964092	773809

Tabla 15.

*Coordenadas geográficas en sistema UTM de las zonas de riesgo de derrame del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.*

<b>Terminal de Productos Limpios El Beaterio</b>		
Zona de riesgo de derrame	Coordenadas UTM	
	Este (X)	Norte (Y)
<b>Zona 1</b> Islas de carga, Patio de bombas, generadores y Piscina API	773834	9964549
	773937	9964524
	773972	9964527
	773972	9964518

<b>Terminal de Productos Limpios El Beaterio</b>		
Zona de riesgo de derrame	Coordenadas UTM	
	Este (X)	Norte (Y)
	773930	9964515
	773915	9964456
	773840	9964442
	773833	9964380
	773796	9964384
	773829	9964506
<b>Zona 2</b> Planta de Jet y mezclas + tanques de almacenamiento de Jet	773892	9964370
	773971	9964355
	773967	9964185
	773892	9964367
<b>Zona 3</b> Área de tanques de almacenamiento, plataformas de restauración ambiental (RAM) y esferas de almacenamiento.	773883	9964363
	773739	9964386
	773558	9964406
	773677	9964393
	773689	9964506
	773581	9964513
	773558	9964403
	773520	9964152
	773511	9964067
	773702	9964073
	773855	9964113
	773855	9964113
	773860	9964205
773883	9964366	
	773760	9964392

Terminal de Productos Limpios El Beaterio		
Zona de riesgo de derrame  <b>Zona 4</b>  Estación de Bombeo  Estación Reductora	Coordenadas UTM	
	Este (X)	Norte (Y)
	773719	9964397
	773744	9964508
	773804	9964492

Tabla 16.

*Coordenadas geográficas en sistema UTM del río de la Quebrada Sin Nombre que colinda al extremo Este con el Terminal de Productos Limpios El Beaterio.*

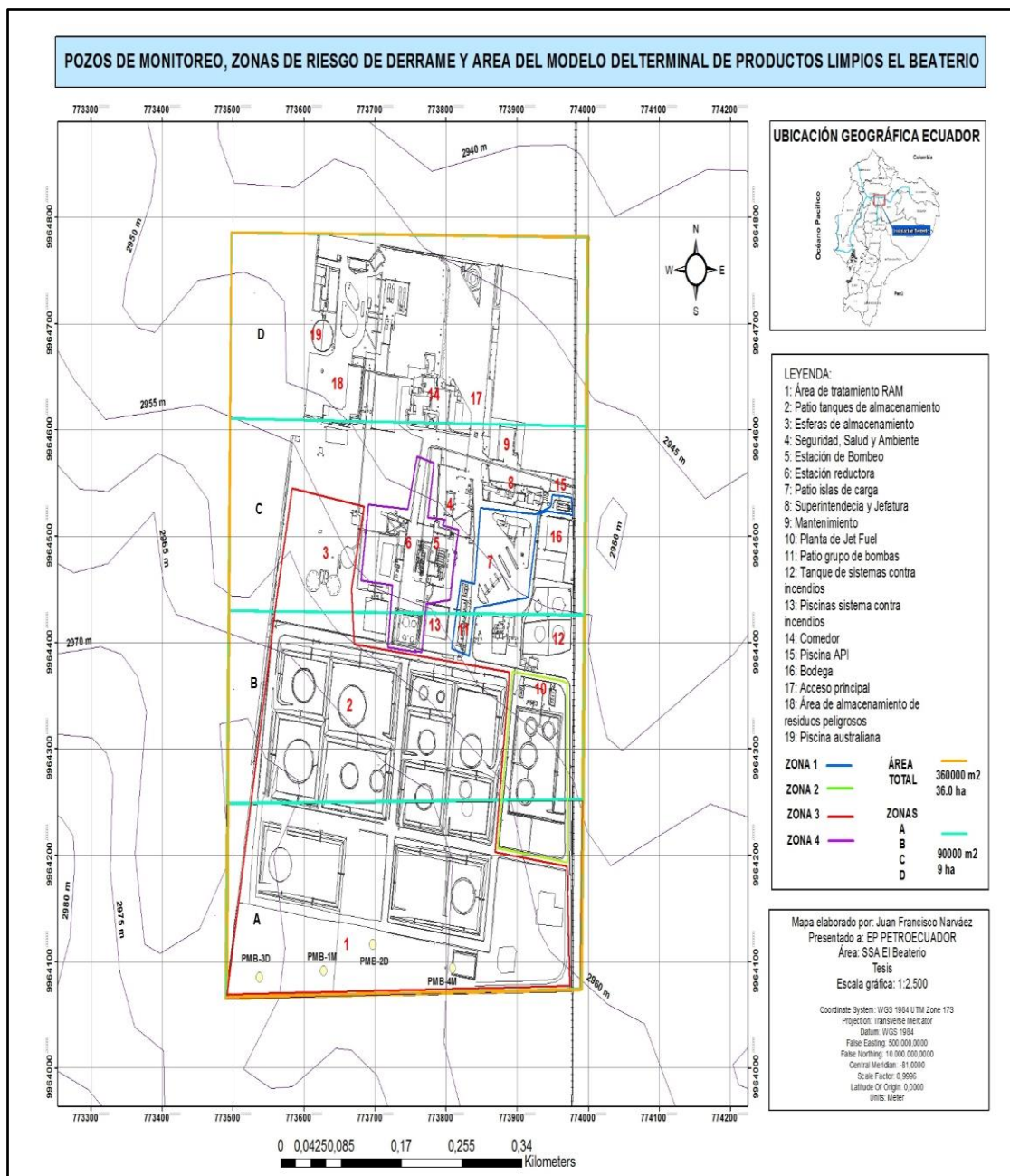
Terminal de Productos Limpios El Beaterio						
Sección	Coordenadas UTM nivel del terreno			Coordenadas UTM espejo de agua		
	Este (X)	Norte (Y)	Cota	Este (X)	Norte (Y)	Cota
<b>1</b>	774000	9964680	2944	773996	9964680	2941
<b>2</b>	774001	9964596	2946	773997	9964596	2943
<b>3</b>	774001	9964512	2948	773999	9964512	2945
<b>4</b>	774000	9964421	2950	773998	9964421	2947
<b>5</b>	774001	9964333	2952	773999	9964333	2949
<b>6</b>	774000	9964247	2955	773998	9964247	2952
<b>7</b>	774001	9964159	2957	773999	9964159	2954
<b>8</b>	774001	9964070	2960	773999	9964070	2957

Estas secciones del río señaladas se encuentran ubicadas en sentido N-S, desde la sección 1 a la 8. Entre cada toma de coordenadas y cotas existe una equidistancia de 90 metros, por lo que al presentar 720 metros de largo el Terminal, se cuenca con las ocho secciones que se indican. Además, como se observa, se tomaron coordenadas y cotas tanto en la superficie del terreno que

se encuentra al mismo nivel que el Terminal de Productos Limpios El Beaterio, como en la parte baja de la Quebrada Sin Nombre, en el espejo de agua del río que cruza por la misma. En campo, para medir la distancia entre cada sección, así como para tomar las cotas y coordenadas, se utilizó el dispositivo GPS portátil marca Garmin modelo Oregon 550.

#### **5.1.2. Mapa georreferenciado del área de estudio para la evaluación del modelo hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.**

A partir de los trabajos de campo efectuados y de la información secundaria recopilada, específicamente la información en formato shapefile (.shp) de la Auditoría Ambiental de Cumplimiento y Actualización del PMA del Terminal de Productos Limpios El Beaterio (Auditoría Ambiental, 2011), facilitada por EP PETROECUADOR, fue posible elaborar el mapa georreferenciado que se muestra a continuación en coordenadas UTM sistema WGS84 Zona 17 Sur.



*Figura 23.* Mapa georreferenciado de la ubicación de los pozos de monitoreo, zonas de riesgo de derrame y área del modelo del Terminal de Productos Limpios El Beaterio

En este mapa se representa el área utilizada para evaluar el modelo hidrogeológico en las dos fases. Por un lado, se representa la primera fase, señalando el área total de 36 hectáreas (todo el polígono rectangular). Por otro lado, se representa la segunda fase, señalando el área total seccionada en cuatro zonas de iguales dimensiones, resultando en que cada una tiene un área de 9 hectáreas.

También, se señala en la Figura 23 las cuatro zonas identificadas como de mayor riesgo de derrame (PETROECUADOR, 2017). La Zona 1: islas de carga, patio bombas, piscinas API y generadores de emergencia tiene un área de 8909,6 m<sup>2</sup>. La Zona 2: Planta de Jet Fuel y Mezclas (incluye tanques), tiene un área de 14825,5 m<sup>2</sup>. Por otro lado, la Zona 3: Área de tanques de almacenamiento (incluye las esferas de almacenamiento y piscina API junto a las esferas de almacenamiento), tiene un área de 139300,9 m<sup>2</sup>. Finalmente, la Zona 4: Estación de Bombeo y Estación Reductora (incluye tanques), presenta un área de 13488,9 m<sup>2</sup>.

## **5.2. Modelo conceptual**

A partir de la recopilación de información secundaria, desarrollo de estudios iniciales, análisis de estas fases y la creación del mapa de la zona de estudio, se desarrolló el modelo conceptual, acorde a la metodología descrita anteriormente en el capítulo IV. Las Figuras 24 y 25 muestran el modelo conceptual a continuación.

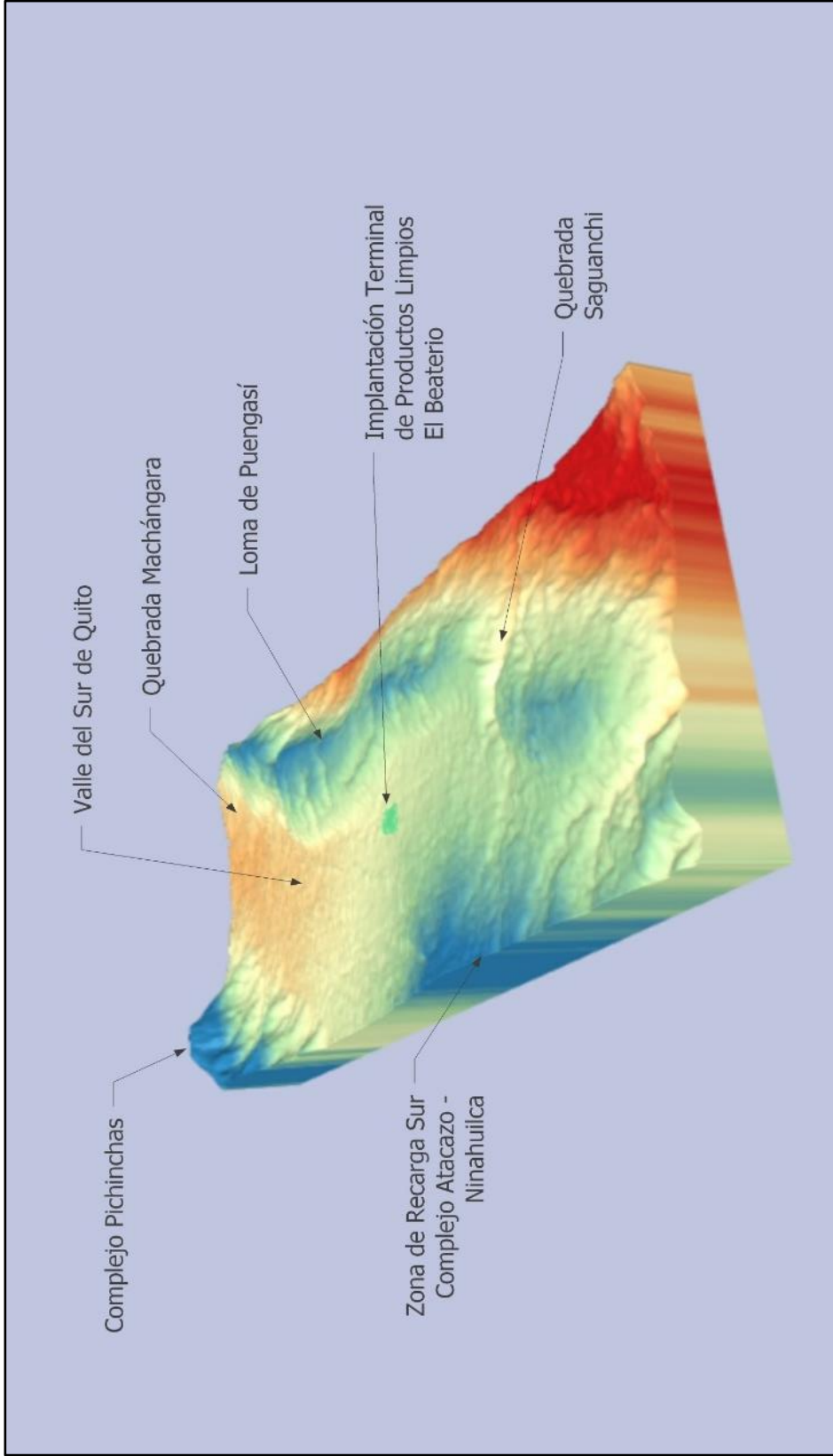


Figura 24. Modelo Conceptual del Terminal de Productos Limpios El Beaterio a partir de una imagen tipo MDT de la subcuenca del Sur de Quito.



Como se observa en la Figura 24, para comprender de mejor manera las características hidrogeológicas de la zona de estudio, se creó en primer lugar un modelo conceptual en función a la elevación del terreno, es decir un Modelo Digital de Terreno (MDT), de la zona de la subcuenca del Sur de Quito con la implantación del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. Para este efecto, se utilizó una imagen TIFF obtenida de la plataforma de datos de satélites de la NASA del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, Global Data Explorer, 2017). Esta imagen TIFF fue procesada en el software QGIS Las Palmas 2.18. con una resolución vertical y horizontal de 100 dpi dimensión en pixeles de 59 de ancho por 79 de alto.

Del MDT creado, fue posible determinar y comprobar que en efecto, como señala la información secundaria levantada, la zona de recarga del sistema de acuíferos de la subcuenca del Sur de Quito proviene de las formaciones geológicas Atacazo – Ninahuilca, mismas que se encuentran en el extremo Suroeste del Terminal El Beaterio. Además, fue posible determinar que el punto de descarga de los cuerpos hídricos de la subcuenca del Sur de Quito es el río Machángara que se encuentra aguas abajo en dirección Noreste. Adicionalmente, fue posible determinar los otros límites y condiciones de borde de la cuenca en mención, como es el Complejo Pichinchas al Noroeste, el Valle del Sur de Quito al Norte, la Loma de Puengasí al Este y la Quebrada Saguanchi al Sureste.

Una vez comprendido, de manera macro, el sitio hidrogeológico y sus condiciones de borde ubicadas en la Subcuenca del Sur de Quito, fue posible crear el modelo conceptual hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio que se muestra a continuación.

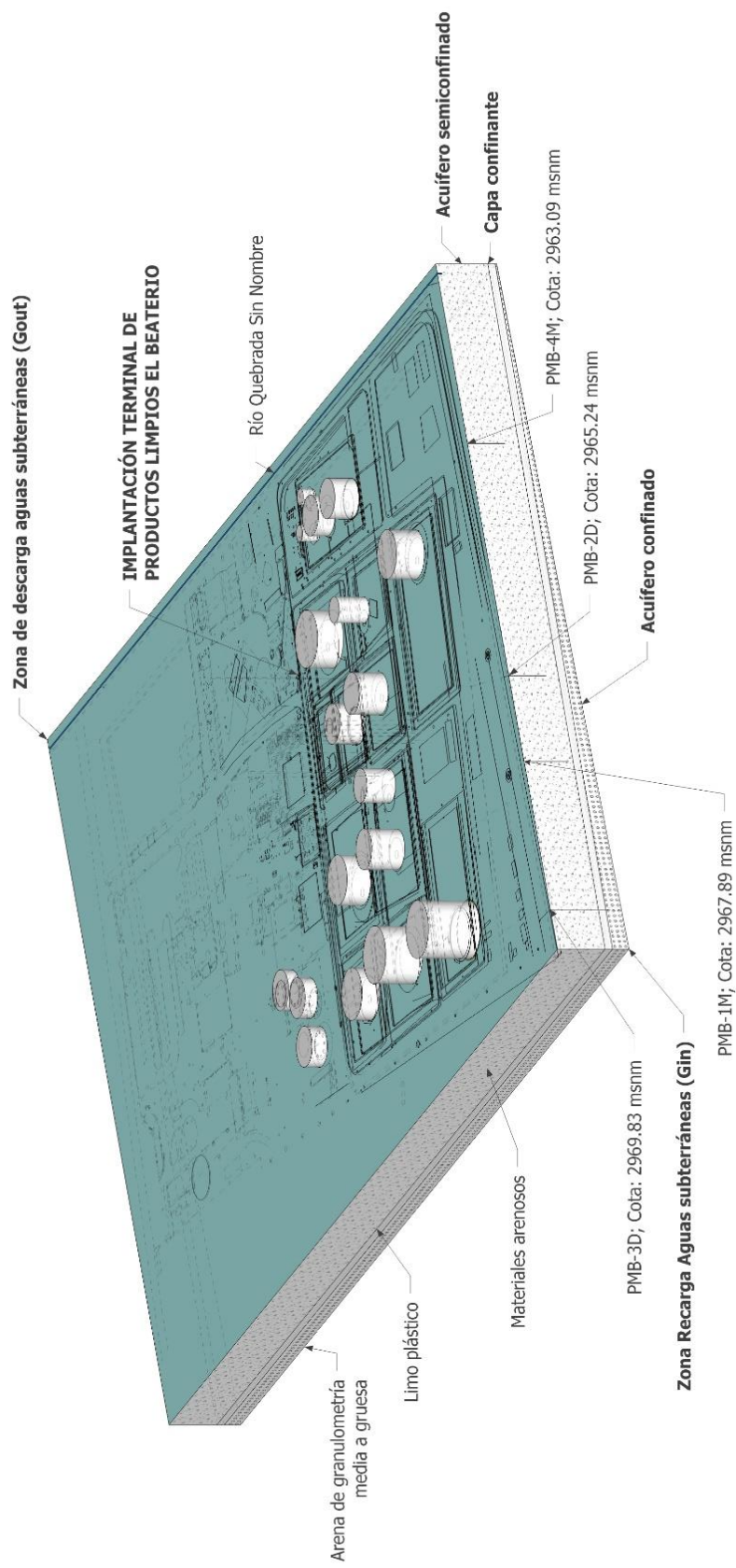


Figura 25. Modelo conceptual de la evaluación del recurso hídrico subterráneo del Terminal de Producto de Productos Limpios El Beaterio.

Como se puede ver en la Figura 25, el recurso hídrico subterráneo del Terminal de Productos Limpios El Beaterio, que se encuentra dentro de la subcuenca del Sur de Quito, está conformado por tres niveles: Un acuífero superior, una capa confinante, y un acuífero inferior.

Por un lado, el acuífero superior está conformado por capas de materia orgánica, limo arenoso, turba y materiales arenosos. Este nivel acuífero superior tiene una profundidad media en el Terminal de 33 m y presenta una conductividad hidráulica horizontal, en sentido O-E, considerando los valores obtenidos del perfil litoestratigráfico de los pozos de monitoreo en unidades de m/s de (TERRAHIDRO, 2016, p. 59), de  $4.26 \times 10^{-5}$ ,  $4.11 \times 10^{-5}$ ,  $3.62 \times 10^{-5}$  y  $3.97 \times 10^{-5}$ . Por otro lado, los valores de conductividad hidráulica vertical, siguiendo la misma metodología, son:  $3.85 \times 10^{-6}$ ,  $3.41 \times 10^{-6}$ ,  $3.11 \times 10^{-6}$  y  $3.55 \times 10^{-6}$ . En cuanto a la porosidad efectiva, los valores obtenidos siguiendo la misma metodología son: 0.41, 0.42, 0.43 y 0.43. Considerando que estos valores de conductividad hidráulica y porosidad efectiva son propios de materiales con contenido de arena, que tienen la capacidad de recibir y transmitir agua con facilidad, todas las capas previamente mencionadas fueron agrupadas en este primer nivel denominado acuífero superior, que actúa como un acuífero semiconfinado, teniendo en cuenta que el nivel medio, que se detalla a continuación, actúa como un medio confinante.

Por otra parte, existe un nivel medio denominado estrato confinante. Este nivel está conformado por una sola capa de limo plástico de un espesor general en todo el modelo del Terminal de Productos Limpios El Beaterio de 5 metros. La conductividad hidráulica horizontal de este nivel es de  $9.26 \times 10^{-7}$  m/s, mientras que la vertical es de  $9.26 \times 10^{-8}$  m/s. La porosidad efectiva de 0.46. Tomando en cuenta las propiedades hidrogeológicas de esta capa y su espesor de 5 metros, se consideró que se trata de una capa confinante y no un acuífero.

Finalmente, el acuífero inferior, es un nivel que está conformado por una sola capa de arena limosa con granos gruesos. Es necesario mencionar que los espesores de este nivel, así como de los dos anteriores, fueron determinados en función al perfil litoestratigráfico obtenido del estudio de TERRAHIDRO que

presenta una profundidad máxima de 48 metros (TERRAHIDRO, 2016). El espesor modelado de este nivel fue de 10 metros en la zona occidental y decrece a un espesor de 2 metros en la zona oriental. En base a la bibliografía consultada de la zona de la subcuenca del sur de Quito, este nivel acuífero inferior tiene un espesor que supera los 50 metros (Peñañiel, 2009, pp. 96-97). Los valores de conductividad hidráulica para este nivel son de  $5.2 \times 10^{-4}$  m/s y de  $5.2 \times 10^{-5}$  m/s, para la conductividad hidráulica horizontal y vertical respectivamente. La porosidad efectiva tiene un valor de 0.39. Considerando estas características hidrogeológicas, se considera que este acuífero tiene mayor transmisividad y que el flujo de aguas subterráneas en el mismo será mayor que en los dos niveles anteriores.

El área del modelo conceptual es de 36 hectáreas. El largo del área de estudio es de 500 metros y el ancho de 720 metros. Como se ilustra en la Figura 27 del modelo conceptual, se ha insertado como condición de borde al río de la Quebrada Sin Nombre. Este cuerpo hídrico superficial normalmente, debido a su tamaño de aproximadamente dos metros de ancho y un lecho de agua de 30 cm (en condiciones secas), no debería ser modelado al considerar que no interactúa con el acuífero superior. No obstante, considerando que el río se encuentra en una quebrada de tres metros de profundidad respecto al nivel del terreno y a las propiedades geológicas de las primeras capas del acuífero superior en las que predominan materiales arenosos y a que históricamente, el nivel freático del lugar se encuentra a menos de un metro de profundidad, (TERRAHIDRO, 2016, p. 60-61), se asume que sí existe recarga o descarga desde entre el acuífero superior y el cuerpo hídrico en mención.

Por otro lado, como se observa en el modelo conceptual realizado a través de un modelo digital de terreno (MDT) que se ilustra en la Figura 26, se consideró como condición de borde a la recarga lateral proveniente de los flancos de los complejos volcánicos Atacazo – Ninahuilca (Peñañiel, 2009, p. 96).

En función a los parámetros hidrogeológicos mencionados de los tres niveles mencionados y a las condiciones de borde del área de estudio, se considera que existe una dirección de flujo de aguas subterráneas en dirección N-E.

### **5.3. Modelo numérico**

A continuación, se presentan los resultados del modelo numérico evaluado en el software Processing Modflow 5.3 en los 12 escenarios descritos en la metodología. Estos escenarios fueron evaluados únicamente en la primera fase en razón de que se comprobó que la discretización horizontal para el caso de este modelo no influye en el cambio de la dirección de flujo ni el resultado de cargas hidráulicas generadas por el software Processing Modflow 5.3. Los resultados fueron evaluados en función de las cargas hidráulicas resultantes, direcciones de flujo, vectores de velocidad y tiempo.

Previo a evaluar cada uno de los escenarios de modelamiento, se muestra a continuación el resultado del modelo en Processing Modflow 5.3 de la primera fase, a fin de tener una visión general del comportamiento del recurso hídrico subterráneo del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

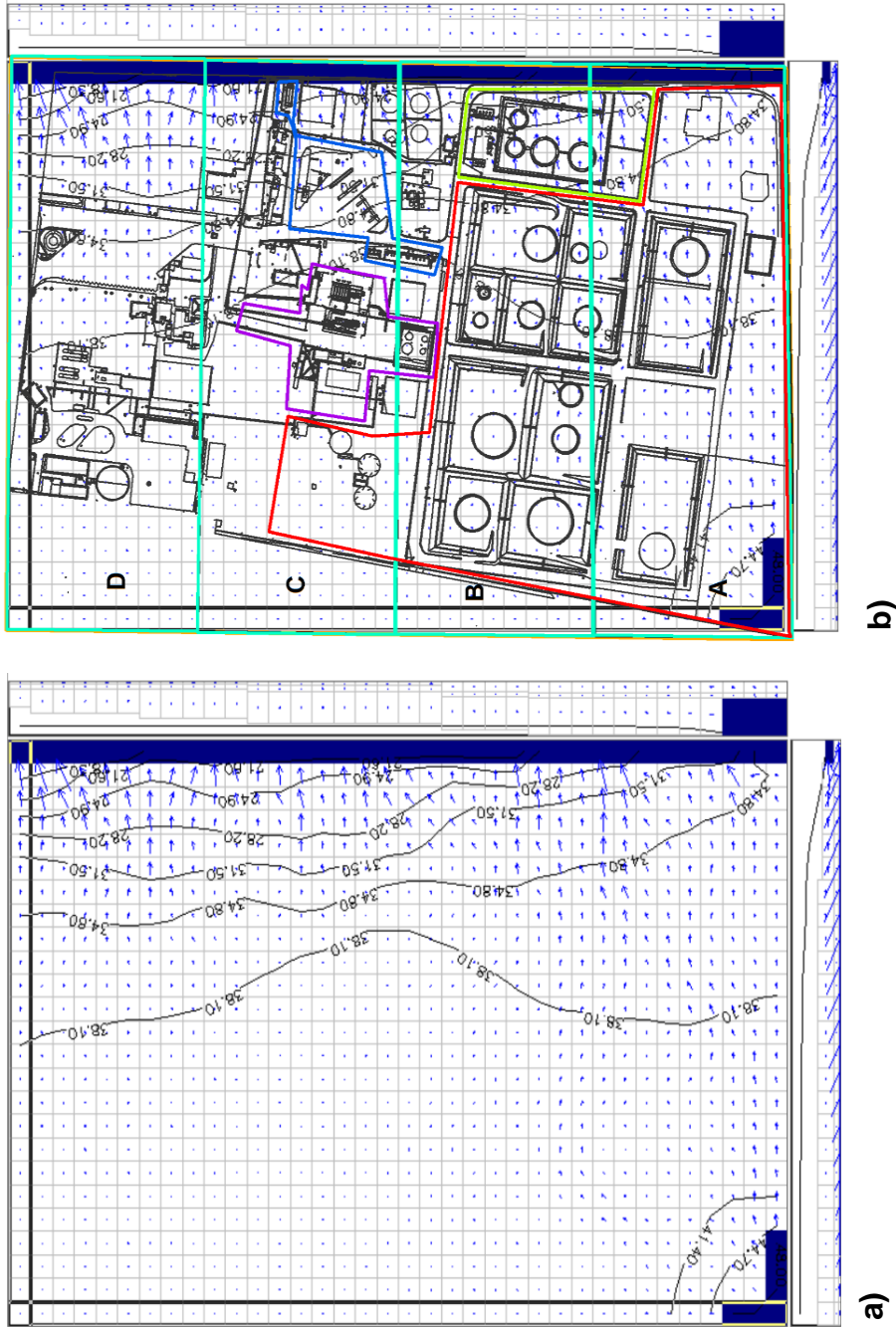


Figura 26. Visualización de cargas hidráulicas y vectores de velocidad de la primera capa

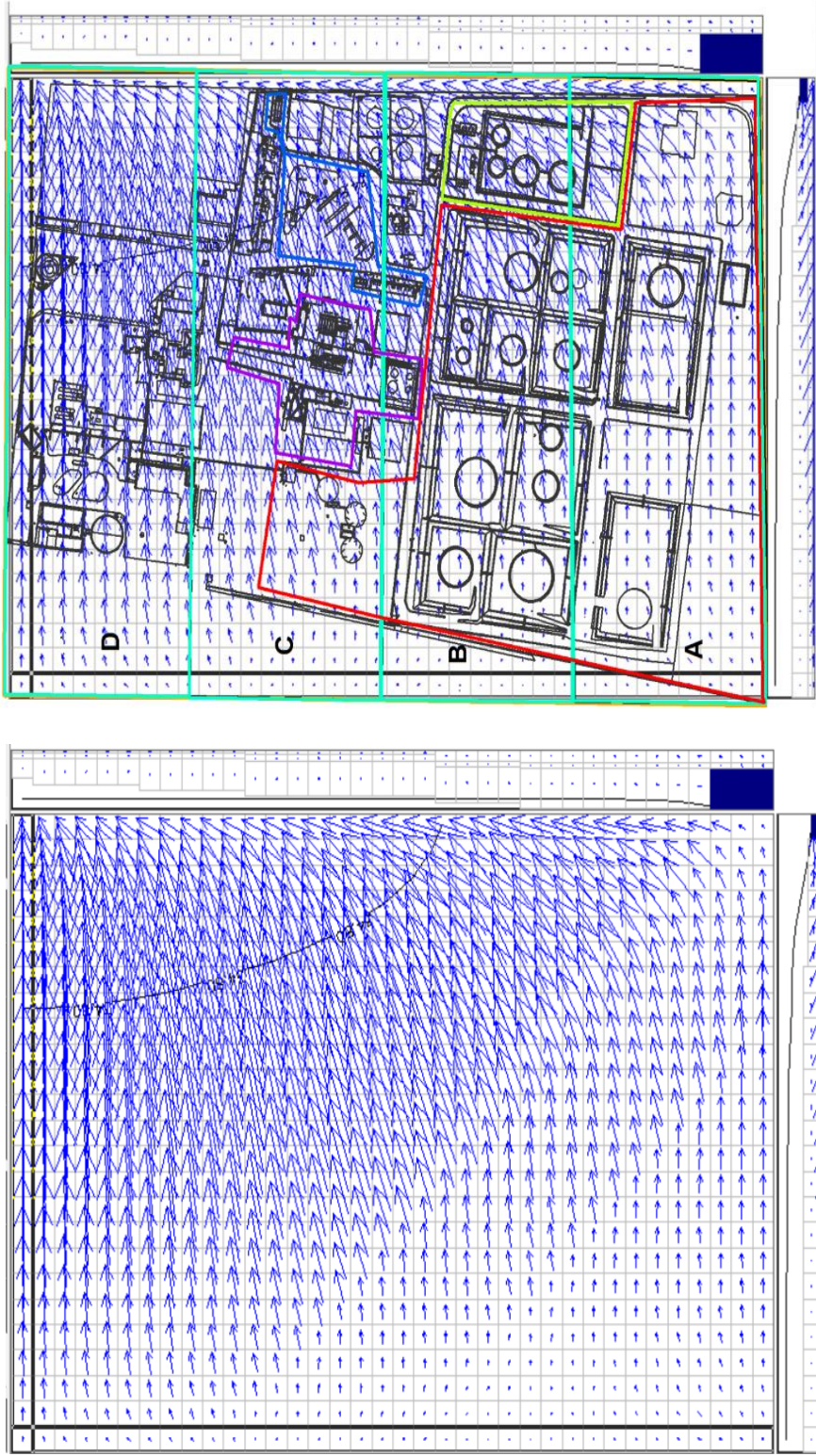
a) Resultados sin la implantación del Terminal

b) Resultados con la implantación del Terminal y las Zonas de Riesgo.



**Figura 27.** Visualización de cargas hidráulicas y vectores de velocidad de la segunda capa.  
a) Resultados sin la implantación del Terminal  
b) Representa los resultados con la implantación del Terminal.





a)

b)

Figura 28. Visualización de cargas hidráulicas y vectores de velocidad de la tercera capa.  
a) representa estos resultados sin la implantación del Terminal.  
b) representa los resultados con la implantación del Terminal.



Como se puede ver en las Figuras 26, 27 y 28, en la capa 1 y capa 3 se observa que las cargas hidráulicas siguen una secuencia de mayor a menor desde el extremo este al extremo Oeste. En este mismo sentido, los vectores de velocidad que son perpendiculares a las cargas, se encuentran dispuestos de manera predominante en dirección E-NE. Esto es más visible en la capa 3, debido a sus propiedades hidrogeológicas propias de un acuífero con valores de conductividad hidráulica y porosidad de materiales netamente arenosos. Por otro lado, en la capa 2, se puede evidenciar que al tratarse del estrato confinante, los vectores de velocidad disminuyen considerablemente haciendo que los mismos sean casi imperceptibles, lo que significa que el flujo en esta capa, aunque guarda la misma secuencia que en las capas 1 y 2, es menor y lento.

En términos generales, se evidencia que el flujo del recurso hídrico subterráneo, bajo las condiciones planteadas, tiene una dirección desde el SO hacia el E-NE.

#### **5.4. Escenarios de modelamiento**

Los Escenarios de modelamiento fueron evaluados únicamente en la capa 1, en razón de que es la capa que presenta mayor espesor en todos los casos y una clara heterogeneidad de suelos, que, teniendo como característica común presentar arenas en su composición, presentan diferentes conductividades hidráulicas. Esta capa actúa como un acuífero semiconfinado, como se mencionó anteriormente. Además, teniendo en cuenta que, de ocurrir un derrame en cualquiera de los escenarios, el Terminal de Productos Limpios El Beaterio cuenta con un Plan de Emergencia en el que se determinan las acciones de la Brigada de Derrames (PETROECUADOR, 2017) para contener estos eventos, adicional a las propias barreras preventivas de infraestructura actualmente existentes como canaletas, sumideros y diques de contención en los tanques de almacenamiento; por lo que es poco probable que una contaminación llegue a la capa 2 sin antes ser contenida y remediada y menos aún a la capa 3, considerando lo anteriormente mencionado y que la capa 2 actúa como un medio confinante.

#### 5.4.1. Escenario 1:

El escenario 1 comprende a la Zona 1: Islas de carga, patio de bombas, generadores y piscina API, evaluada con la condición de lluvia máxima en el mes de abril de 2016, considerando una recarga de  $1.23 \times 10^{-7}$  m/s.

A continuación, se muestran los resultados de la evaluación del modelo hidrogeológico en este escenario en función de las cargas hidráulicas, vectores de velocidad y simulación del movimiento de partículas de una posible contaminación en las Islas de Carga y piscina API, que son las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de un evento de derrame debido a los procesos que se llevan a cabo diariamente en estos lugares y a que históricamente, ya se han suscitado derrames en los mismos. (PETROECUADOR, 2017).

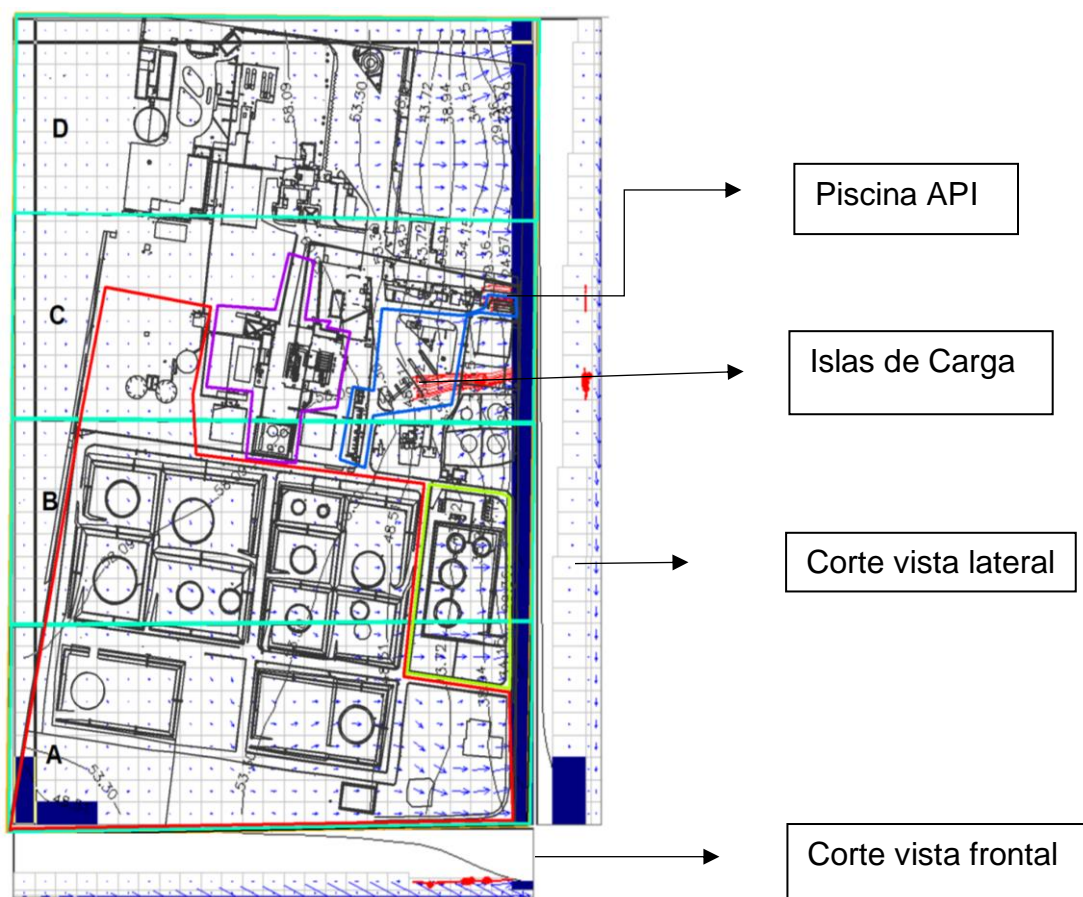


Figura 29. Escenario 1 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Como se puede observar en la Figura 29, el resultado de la dirección de flujo de la simulación de las partículas de una posible contaminación por derrame en las Islas de Carga y piscina API es hacia el Este. Como se observa en el corte de vista frontal del área de modelo, las partículas de una posible contaminación se mueven de manera horizontal únicamente, sin llegar a las capas 2 y 3 y teniendo como cuerpo receptor al río de la Quebrada Sin Nombre.

Los vectores de velocidad son perpendiculares a las curvas de cargas hidráulicas, mismas que están dispuestas de mayor a menor en dirección Oeste-Este. Se puede observar la velocidad de flujo incrementa en dirección E.

En cuanto al tiempo en el que estas partículas de simulación de una posible contaminación tardan en llegar al río de la Quebrada Sin Nombre, a continuación, la Tabla 17 muestra la matriz de cálculo en Excel bajo el procedimiento anteriormente descrito en la metodología.

Tabla 17.

*Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 1 de modelamiento.*

Escenarios / Área		L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
<b>Escenario 1</b>	API	20,00	5,8E-06	3442340,79	40	0,1
	<b>Total</b>	<b>20,00</b>	<b>5,8E-06</b>	<b>3442340,79</b>	<b>40</b>	<b>0,1</b>
	Islas de Carga	20,00	9,4E-07	21276595,74	246	0,7
		20,00	1,8E-06	11111111,11	129	0,4
		20,00	3,2E-06	6250000,00	72	0,2
		20,00	5,4E-06	3703703,70	43	0,1
		20,00	7,6E-06	2631578,95	30	0,1
	<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>3,8E-06*</b>	<b>44972989,51</b>	<b>521</b>	<b>1,4</b>

Nota: \*La Velocidad total en m/s resultante está expresada como el promedio de las velocidades de cada sección.

Como se observa en la Tabla 17, en el caso de existir una contaminación por derrame de productos derivados del petróleo en este escenario y la misma infiltrarse en el subsuelo, específicamente en el acuífero superior (nivel 1), la misma tarda en llegar a su punto receptor que es el río de la Quebrada Sin Nombre, ubicado en dirección Este, 40 días si el derrame se produce en la Piscina API y 521 días si el mismo ocurre en las Islas de Carga.

#### **5.4.2. Escenario 2:**

El escenario 2 comprende a la Zona 1: Islas de carga, patio de bombas, generadores y piscina API, evaluada con la condición de verano con baja precipitación en el mes de agosto de 2016, lo que equivale a una recarga de  $4.09 \times 10^{-9}$  m/s.

A continuación, se muestran los resultados de la evaluación del modelo hidrogeológico en este escenario en función de las cargas hidráulicas, vectores de velocidad y simulación del movimiento de partículas de una posible contaminación en las Islas de Carga y piscina API, que son las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de un evento de derrame debido a los procesos que se llevan a cabo diariamente en estos lugares y a que históricamente, ya se han suscitado derrames en los mismos. (PETROECUADOR, 2017).

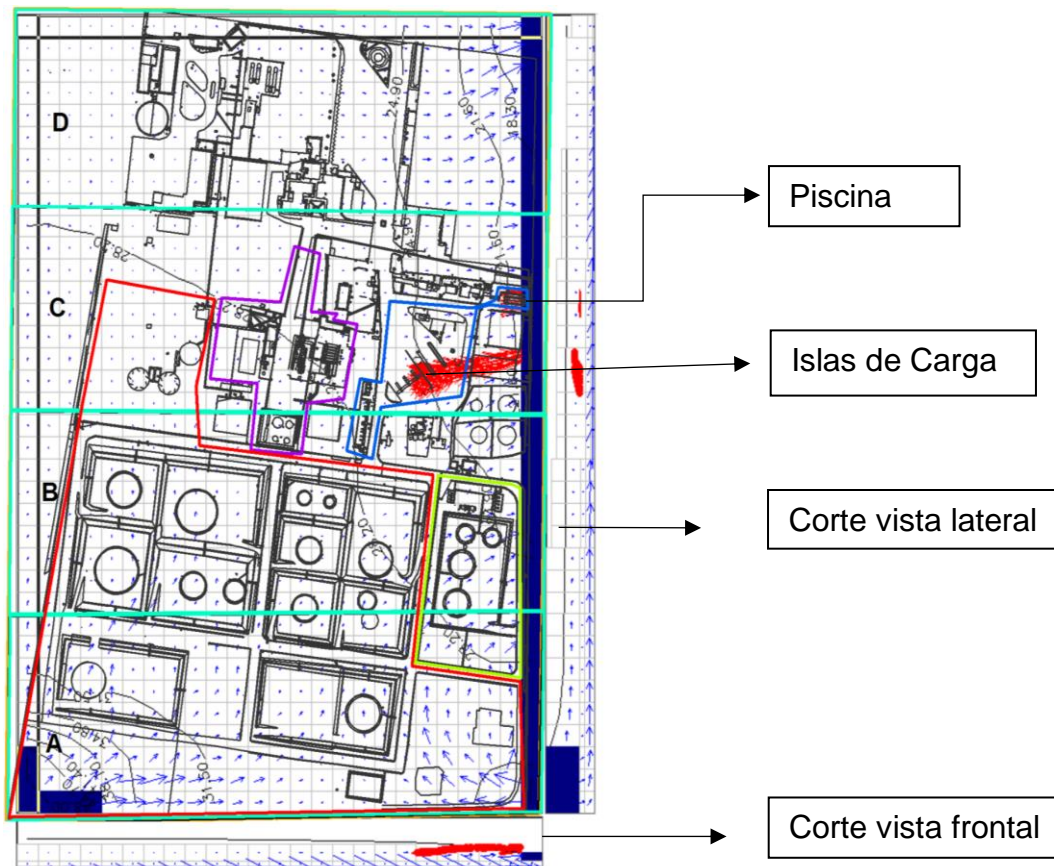


Figura 30. Escenario 2 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Como se puede ver en la Figura 30, el resultado de la dirección de flujo de la simulación de las partículas de una posible contaminación por derrame en las Islas de Carga y piscina API es hacia el Este, de manera análoga que el Escenario 1 anteriormente expuesto en función a las cargas hidráulicas y vectores de velocidad.

En cuanto al tiempo en el que estas partículas de simulación de una posible contaminación tardan en llegar al río de la Quebrada Sin Nombre, la Tabla 18 muestra la matriz de cálculo en Excel bajo el procedimiento anteriormente descrito en la metodología.

Tabla 18.

*Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 2 de modelamiento.*

Escenario / Área		L (m)	Vh (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
<b>Escenario 2</b>	API	20,00	1,2E-06	17094017,09	198	0,5
	<b>Total</b>	<b>20,00</b>	<b>1,2E-06*</b>	<b>17094017,09</b>	<b>198</b>	<b>0,5</b>
	Islas de Carga	20,00	1,7E-07	117647058,82	1362	3,7
		20,00	3,0E-07	66006600,66	764	2,1
		20,00	5,7E-07	35087719,30	406	1,1
		20,00	7,7E-07	25974025,97	301	0,8
		20,00	1,2E-06	16666666,67	193	0,5
	<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>6,0E-07*</b>	<b>261382071,42</b>	<b>3025</b>	<b>8,3</b>

Nota: \*La Velocidad total en m/s resultante está expresada como el promedio de las velocidades de cada sección.

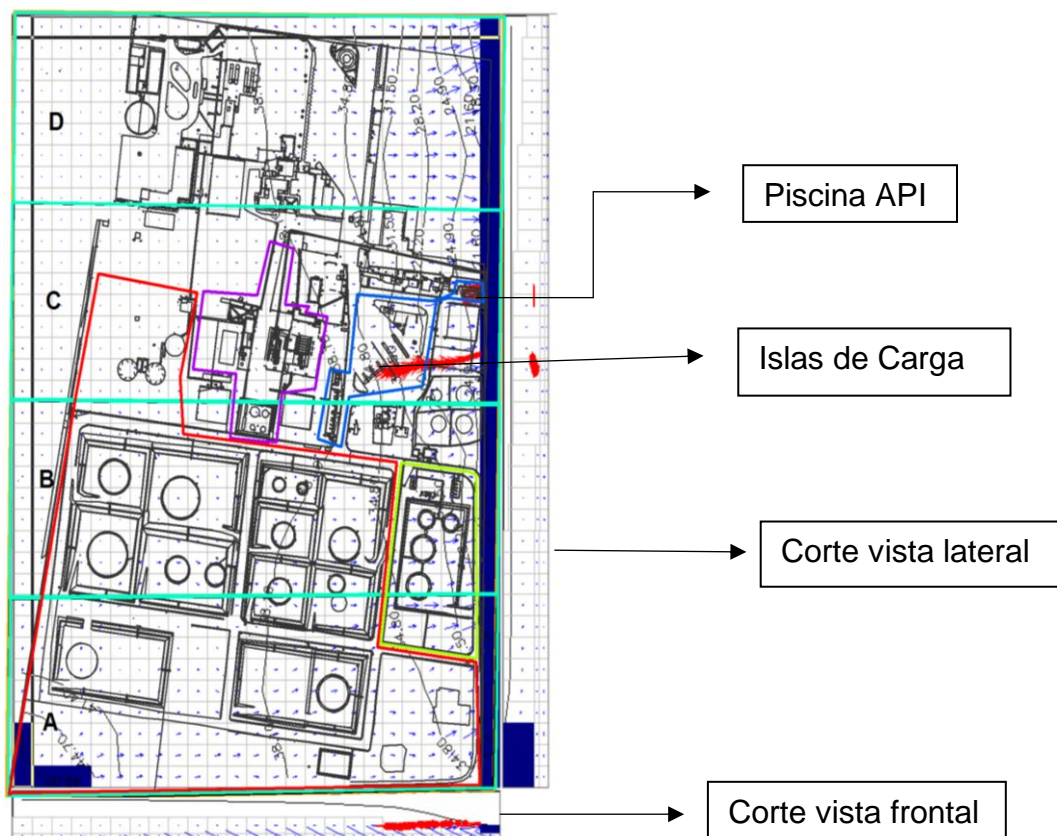
Como se observa en la Tabla 18, en el caso de existir una contaminación por derrame de productos derivados del petróleo en este escenario y la misma infiltrarse en el subsuelo, específicamente en el acuífero superior (nivel 1), la misma tarda en llegar a su punto receptor que es el río de la Quebrada Sin Nombre ubicado en dirección Este 198 días si el derrame se produce en la Piscina API y 3025 días si el mismo ocurre en las Islas de Carga.

#### 5.4.3. Escenario 3:

El escenario 3 comprende la zona de riesgo denominada Zona 1: Islas de carga, patio de bombas, generadores y piscina API, evaluada con la condición de precipitación media anual del año 2016, equivalente a una recarga de  $4.48 \times 10^{-8}$  m/s.

A continuación, se muestran los resultados de la evaluación del modelo hidrogeológico en este escenario en función de las cargas hidráulicas, vectores de velocidad y simulación del movimiento de partículas de una posible contaminación en las Islas de Carga y piscina API, que son las áreas con mayor

probabilidad de ocurrencia de un evento de derrame debido a los procesos que se llevan a cabo diariamente en estos lugares y a que históricamente, ya se han suscitado derrames en los mismos. (PETROECUADOR, 2017).



*Figura 31.* Escenario 3 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Como muestra la Figura 31, el resultado de la dirección de flujo de la simulación de las partículas de una posible contaminación por derrame en las Islas de Carga y piscina API es hacia el Este, de manera análoga que el Escenario 1 y 2, anteriormente expuestos en función a las cargas hidráulicas y vectores de velocidad.

En cuanto al tiempo en el que estas partículas de simulación de una posible contaminación tardan en llegar al río de la Quebrada Sin Nombre, a continuación se muestra la matriz de cálculo en Excel bajo el procedimiento anteriormente descrito en la metodología.

Tabla 19.

*Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 3 de modelamiento.*

Escenario / Área		L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
<b>Escenario 3</b>	API	20,00	2,8E-06	7142857,14	83	0,2
	<b>Total</b>	<b>20,00</b>	<b>2,8E-06*</b>	<b>7142857,14</b>	<b>83</b>	<b>0,2</b>
	Islas de Carga	20,00	4,4E-07	45454545,45	527	1,4
		20,00	8,5E-07	23529411,76	272	0,7
		20,00	1,5E-06	13333333,33	154	0,4
		20,00	2,6E-06	7692307,69	89	0,2
		20,00	3,7E-06	5405405,41	63	0,2
	<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>1,8E-06*</b>	<b>95415003,65</b>	<b>1104</b>	<b>3,0</b>

Nota: \*La Velocidad total en m/s resultante está expresada como el promedio de las velocidades de cada sección.

Como se observa en la Tabla 19, en el caso de existir una contaminación por derrame de productos derivados del petróleo en este escenario y la misma infiltrarse en el subsuelo, específicamente en el acuífero superior (nivel 1), la misma tarda en llegar a su punto receptor que es el río de la Quebrada Sin Nombre ubicado en dirección Este; 83 días si el derrame se produce en la Piscina API y 1104 días si el mismo ocurre en las Islas de Carga.

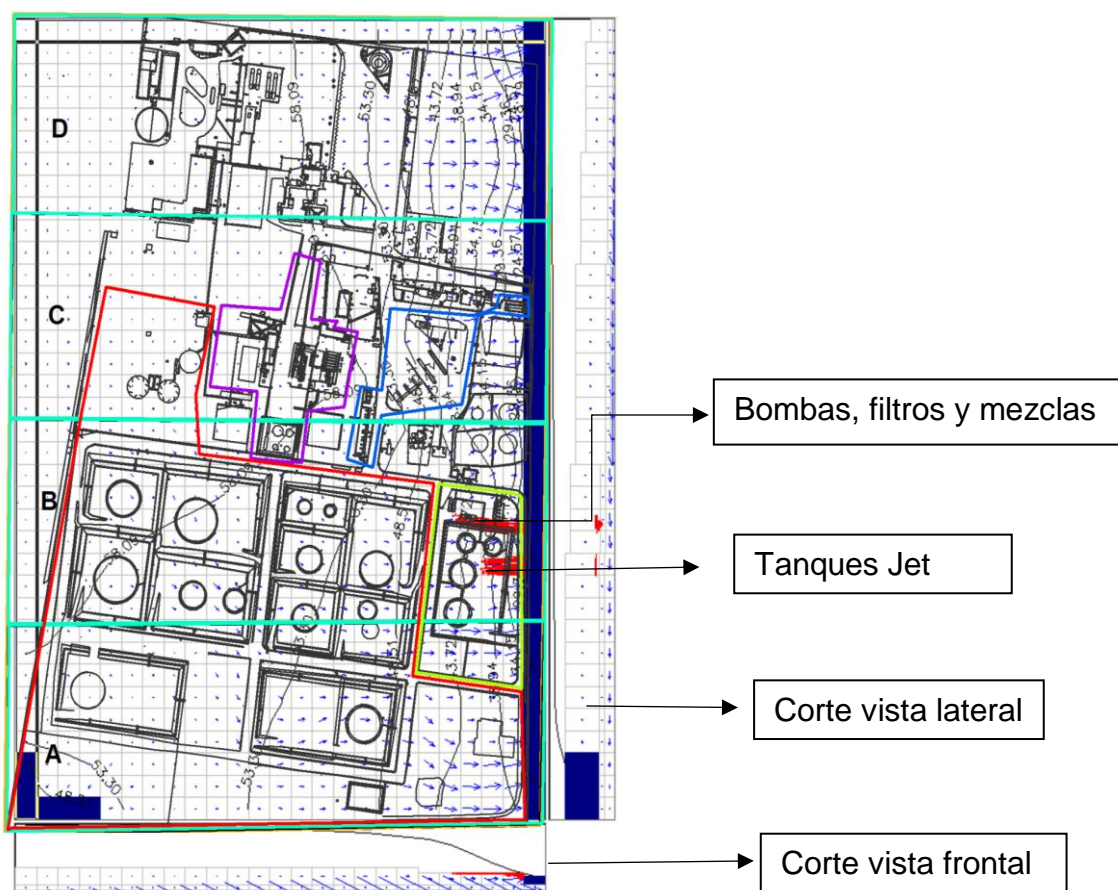
#### 5.4.4. Escenario 4:

El escenario 4 comprende la zona de riesgo denominada Zona 2: Planta de Jet Fuel y mezclas, incluido los tanques de almacenamiento de Jet, evaluada con la condición de precipitación máxima equivalente al registro de precipitación del mes de abril del año 2016, lo que significa una recarga de  $1.23 \times 10^{-7}$  m/s.

A continuación, se muestran los resultados de la evaluación del modelo hidrogeológico en este escenario en función de las cargas hidráulicas, vectores



de velocidad y simulación del movimiento de partículas de una posible contaminación en la zona de bombas de recepción de Jet, Filtros micrónicos de Jet y bombas de mezclas de la gasolina Extra; y entre los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017, que son las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de un evento de derrame debido a los procesos que se llevan a cabo diariamente en las mismas. (PETROECUADOR, 2017).



*Figura 32.* Escenario 4 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Como señala la Figura 32, el resultado de la dirección de flujo de la simulación de las partículas de una posible contaminación por derrame en la zona de riesgo de derrame 2, específicamente en la zona de bombas de recepción de Jet, Filtros micrónicos de Jet y bombas de mezclas de la gasolina Extra y entre los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017; es hacia el Este.

Como se observa en el corte de vista frontal del área de modelo, las partículas de una posible contaminación se mueven de manera horizontal únicamente, sin llegar a las capas 2 y 3 y teniendo como cuerpo receptor al río de la Quebrada Sin Nombre.

Los vectores de velocidad son perpendiculares a las curvas de cargas hidráulicas, mismas que están dispuestas de mayor a menor en dirección Oeste-Este. Se puede observar la velocidad de flujo incrementa en dirección E.

En cuanto al tiempo en el que estas partículas de simulación de una posible contaminación tardan en llegar al río de la Quebrada Sin Nombre, la Tabla 20 muestra la matriz de cálculo en Excel bajo el procedimiento anteriormente descrito en la metodología.

Tabla 20.

*Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 4 de modelamiento.*

Escenario / Área		L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
<b>Escenario 4</b>	Bombas, filtros y mezclas	20,00	1,9E-06	10526315,79	122	0,3
		20,00	1,8E-06	11111111,11	129	0,4
		20,00	2,8E-06	7142857,14	83	0,2
	<b>Total</b>	<b>60,00</b>	<b>2,2E-06*</b>	<b>28780284,04</b>	<b>333</b>	<b>0,9</b>
	Centro tanques Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017	20,00	6,9E-06	2898550,72	34	0,1
	20,00	6,4E-06	3125000,00	36	0,1	

	<b>Total</b>	<b>40,00</b>	<b>6,7E-06*</b>	<b>6023550,72</b>	<b>70</b>	<b>0,2</b>
--	--------------	--------------	-----------------	-------------------	-----------	------------

Nota: \*La Velocidad total en m/s resultante está expresada como el promedio de las velocidades de cada sección.

Como se ve en la Tabla 20, en el caso de existir una contaminación por derrame de productos derivados del petróleo en este escenario y la misma infiltrarse en el subsuelo, específicamente en el acuífero superior (nivel 1), la misma tarda en llegar a su punto receptor que es el río de la Quebrada Sin Nombre ubicado en dirección Este; 333 días si el derrame se produce en el área de Bombas y filtros de Jet y de mezclas de la gasolina Extra; y tarda 70 días si el mismo ocurre en el área central de los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017.

#### **5.4.5. Escenario 5:**

El escenario 5 comprende la zona de riesgo denominada Zona 2: Planta de Jet Fuel y mezclas, incluido los tanques de almacenamiento de Jet, evaluada con la condición de verano con baja precipitación en el mes de agosto de 2016, lo que equivale a una recarga de  $4.09 \times 10^{-9}$  m/s.

A continuación, se muestran los resultados de la evaluación del modelo hidrogeológico en este escenario en función de las cargas hidráulicas, vectores de velocidad y simulación del movimiento de partículas de una posible contaminación en la zona de bombas de recepción de Jet, Filtros micrónicos de Jet y bombas de mezclas de la gasolina Extra; y entre los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017, que son las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de un evento de derrame debido a los procesos que se llevan a cabo diariamente en las mismas. (PETROECUADOR, 2017).

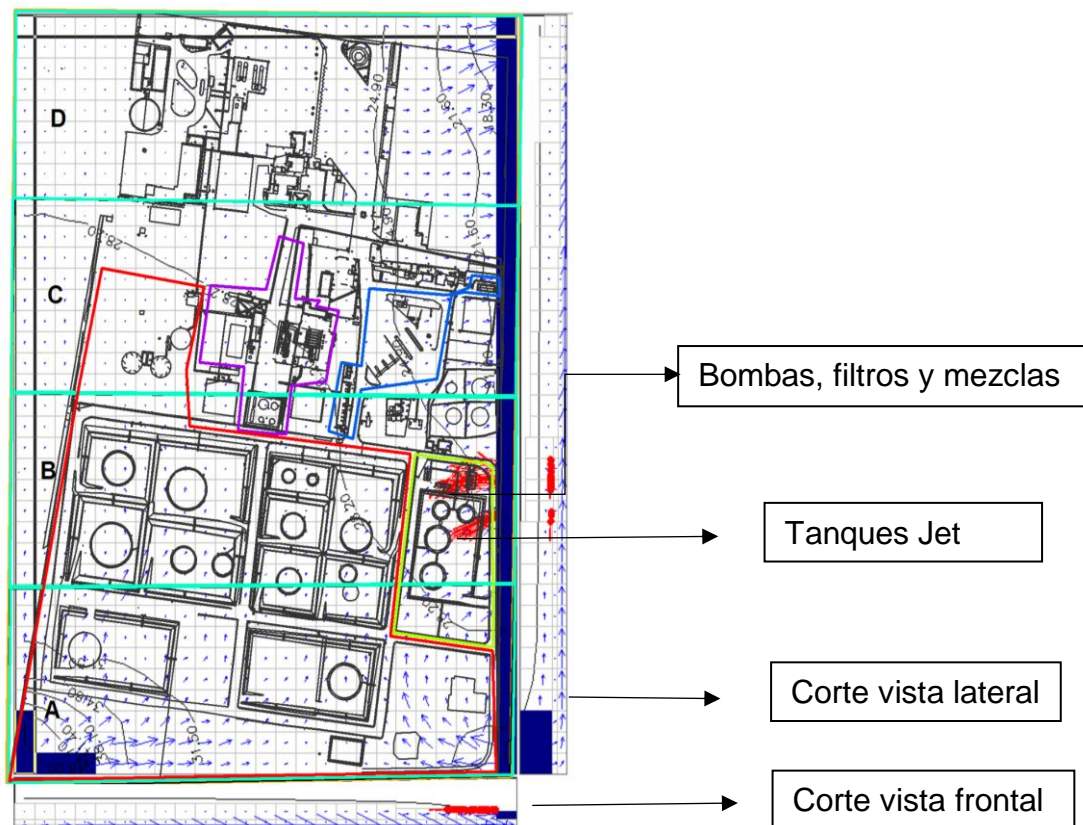


Figura 33. Escenario 5 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Como se puede observar en la Figura 33, el resultado de la dirección de flujo de la simulación de las partículas de una posible contaminación por derrame en la zona de riesgo de derrame 2, específicamente en la zona de bombas de recepción de Jet, Filtros micrónicos de Jet y bombas de mezclas de la gasolina Extra y entre los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017; es hacia el Noreste. Como se observa en el corte de vista frontal del área de modelo, las partículas de una posible contaminación se mueven de manera horizontal únicamente, sin llegar a las capas 2 y 3 y teniendo como cuerpo receptor al río de la Quebrada Sin Nombre.

Los vectores de velocidad son perpendiculares a las curvas de cargas hidráulicas, mismas que están dispuestas de mayor a menor en dirección Oeste-Este. Se puede observar la velocidad de flujo incrementa en dirección Noreste.

En cuanto al tiempo en el que estas partículas de simulación de una posible contaminación tardan en llegar al río de la Quebrada Sin Nombre, la Tabla 21 muestra la matriz de cálculo en Excel bajo el procedimiento anteriormente descrito en la metodología.

Tabla 21.

*Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 5 de modelamiento.*

Escenario / Área		L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
<b>Escenario 5</b>	Bombas, filtros y mezclas	20,00	6,1E-07	32786885,25	379	1,0
		20,00	4,4E-07	45454545,45	526	1,4
		20,00	4,4E-07	45454545,45	526	1,4
	<b>Total</b>	<b>60,00</b>	<b>5,0E-07*</b>	<b>123695976,15</b>	<b>1432</b>	<b>3,9</b>
	Centro tanques Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017	20,00	1,1E-06	18181818,18	210	0,6
		20,00	9,7E-07	20618556,70	239	0,7
		20,00	2,2E-06	9090909,09	106	0,3
	<b>Total</b>	<b>60,00</b>	<b>1,4E-06*</b>	<b>47891283,97</b>	<b>554</b>	<b>1,5</b>

Nota: \*La Velocidad total en m/s resultante está expresada como el promedio de las velocidades de cada sección.

Como indica Tabla 21, en el caso de existir una contaminación por derrame de productos derivados del petróleo en este escenario y la misma infiltrarse en el subsuelo, específicamente en el acuífero superior (nivel 1), la misma tarda en llegar a su punto receptor que es el río de la Quebrada Sin Nombre ubicado en dirección Este; 1432 días, si el derrame se produce en el área de Bombas y filtros de Jet y de mezclas de la gasolina Extra; y tarda 554 días si el mismo ocurre en

el área central de los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017.

#### **5.4.6. Escenario 6:**

El escenario 6 comprende la zona de riesgo denominada Zona 2: Planta de Jet Fuel y mezclas, incluido los tanques de almacenamiento de Jet, evaluada con la condición de precipitación media anual del año 2016, equivalente a una recarga de  $4.48 \times 10^{-8}$  m/s.

A continuación, se muestran los resultados de la evaluación del modelo hidrogeológico en este escenario en función de las cargas hidráulicas, vectores de velocidad y simulación del movimiento de partículas de una posible contaminación en la zona de bombas de recepción de Jet, Filtros micrónicos de Jet y bombas de mezclas de la gasolina Extra; y entre los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017, que son las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de un evento de derrame debido a los procesos que se llevan a cabo diariamente en las mismas. (PETROECUADOR, 2017).

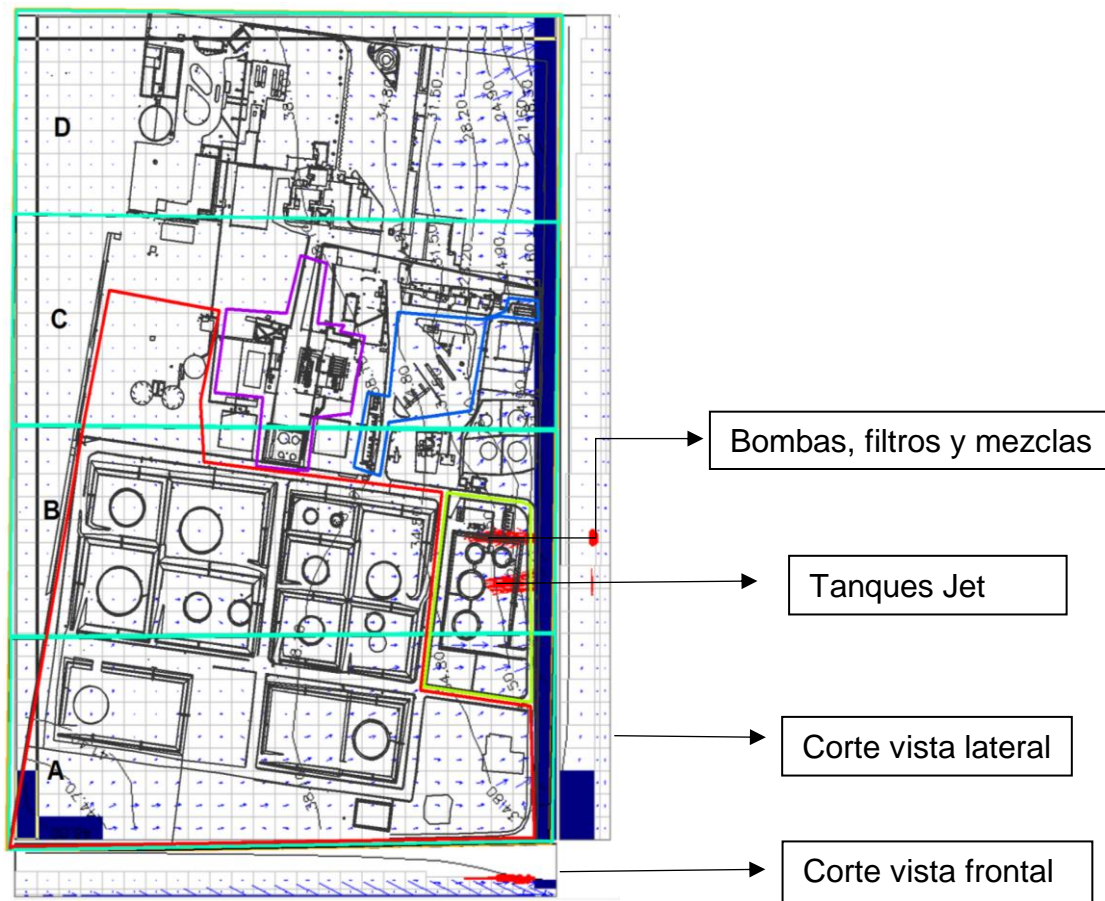


Figura 34. Escenario 6 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Como se puede observar en la Figura 34, el resultado de la dirección de flujo de la simulación de las partículas de una posible contaminación por derrame en la zona de riesgo de derrame 2, específicamente en la zona de bombas de recepción de Jet, Filtros micrónicos de Jet y bombas de mezclas de la gasolina Extra y entre los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017; es hacia el Este. Como se observa en el corte de vista frontal del área de modelo, las partículas de una posible contaminación se mueven de manera horizontal únicamente, sin llegar a las capas 2 y 3 y teniendo como cuerpo receptor al río de la Quebrada Sin Nombre.

Los vectores de velocidad son perpendiculares a las curvas de cargas hidráulicas, mismas que están dispuestas de mayor a menor en dirección Oeste-Este. Se puede observar la velocidad de flujo incrementa en dirección E.



En cuanto al tiempo en el que estas partículas de simulación de una posible contaminación tardan en llegar al río de la Quebrada Sin Nombre, la Tabla 22 muestra la matriz de cálculo en Excel bajo el procedimiento anteriormente descrito en la metodología.

*Tabla 22.*

Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 6 de modelamiento.

<b>Escenarios / Área</b>		<b>L (m)</b>	<b>V (m/s)</b>	<b>t (s)</b>	<b>t (d)</b>	<b>t (a)</b>
<b>Escenario 6</b>	Bombas,	20,00	9,9E-07	20202020,20	234	0,6
	filtros y	20,00	9,1E-07	21978021,98	254	0,7
	mezclas	20,00	1,5E-06	13333333,33	154	0,4
	<b>Total</b>	<b>60,00</b>	<b>1,1E-06*</b>	<b>55513375,51</b>	<b>643</b>	<b>1,8</b>
	Centro	20,00	3,1E-06	6451612,90	75	0,2
	tanques Jet					
	Fuel TB					
1018, TB	20,00	2,8E-06	7142857,14	83	0,2	
1019 y TB						
1017						
<b>Total</b>	<b>40,00</b>	<b>3,0E-06*</b>	<b>13594470,05</b>	<b>157</b>	<b>0,4</b>	

Nota: \*La Velocidad total en m/s resultante está expresada como el promedio de las velocidades de cada sección.

Como se observa en la Tabla 22, en el caso de existir una contaminación por derrame de productos derivados del petróleo en este escenario y la misma infiltrarse en el subsuelo, específicamente en el acuífero superior (nivel 1), la misma tarda en llegar a su punto receptor que es el río de la Quebrada Sin Nombre ubicado en dirección Este; 643 días, si el derrame se produce en el área de Bombas y filtros de Jet y de mezclas de la gasolina Extra; y tarda 157 días si el mismo ocurre en el área central de los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017.



#### 5.4.7. Escenario 7:

Debido a la extensión de esta zona de riesgo equivalente a 139300,9 m<sup>2</sup> y a que en la misma se encuentran los tanques y esferas de almacenamiento de productos limpios, mismos que, a pesar de estar contenidos dentro de un dique de seguridad y a que el suelo debajo de los mismos está impermeabilizado con concreto; es necesario realizar simulaciones en estos sectores teniendo en cuenta la gravedad del impacto que representaría que el contenido de estos tanques y esferas de almacenamiento, debido la existencia de fisuras en el suelo o a eventos de emergencia como un desastre natural, se infiltre a los acuíferos y contamine el recurso hídrico subterráneo.

En este sentido, las zonas que serán evaluadas en el escenario 7, 8 y 9 son las siguientes:

- Tanque TB 1022
- Tanque TB 1020
- Tanque TB 1014
- Tanque TB 1012
- Tanque TB 1007
- Tanque TB 1005
- Zona central tanques TB 1009 y TB 1008
- Zona central tanques TB 1011 y TB 1013
- Tanque TB 1010
- Tanque TB 1003
- Tanque TB 1001
- Esferas de almacenamiento TB 1023, TB 1024 y TB 1025

El escenario 7 comprende la zona de riesgo denominada Zona 3: Área de tanques de almacenamiento (incluye las esferas de almacenamiento y piscina API junto a las esferas), evaluada en las 12 zonas mencionadas anteriormente con la condición de precipitación máxima equivalente al registro de precipitación del mes de abril del año 2016, lo que significa una recarga de  $1.23 \times 10^{-7}$  m/s.

A continuación, se muestran los resultados de la evaluación del modelo hidrogeológico en este escenario en función de las cargas hidráulicas, vectores de velocidad y simulación del movimiento de partículas de una posible contaminación en las zonas anteriormente mencionadas.



*Figura 35.* Escenario 7 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Como se muestra en la Figura 35, el resultado de la dirección de flujo de la simulación de las partículas de una posible contaminación por derrame en la zona de riesgo de derrame 3, específicamente en las zonas anteriormente mencionadas y que se muestran en la Figura 35; es hacia el Sureste, bajo las condiciones expuestas del escenario 7. Como se observa en el corte de vista frontal del área de modelo, las partículas de una posible contaminación se mueven de manera horizontal únicamente, sin llegar a las capas 2 y 3. La única zona modelada en este escenario en la que las partículas de una posible

contaminación llegan al río de la Quebrada Sin Nombre es en el tanque TB 1020, de mezclas de gasolina.

Los vectores de velocidad son perpendiculares a las curvas de cargas hidráulicas, mismas que están dispuestas de mayor a menor en dirección Oeste-Este en las secciones C y D y en dirección Noroeste-Sureste en las secciones A y B. Se puede observar la velocidad de flujo incrementa, en todas las secciones, en dirección Este.

En cuanto al tiempo en el que estas partículas de simulación de una posible contaminación tardan en llegar su punto receptor, que es la base del acuífero superior y al río de la Quebrada Sin Nombre, la Tabla 23 muestra la matriz de cálculo en Excel bajo el procedimiento anteriormente descrito en la metodología.

Tabla 23.

*Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 7 de modelamiento.*

Escenarios / Área		L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
<b>Escenario 7</b>	TB 1022	10,00	2,9E-07	34482758,62	399	1,1
	<b>Total</b>	<b>10,00</b>	<b>2,9E-07</b>	<b>34482758,62</b>	<b>399</b>	<b>1,1</b>
	TB 1020	20,00	3,9E-06	5128205,13	60	0,2
		20,00	4,1E-06	4878048,78	57	0,2
		20,00	3,8E-06	5263157,89	61	0,2
		20,00	5,7E-06	3508771,93	41	0,1
		20,00	5,9E-06	3389830,51	40	0,1
		20,00	5,9E-06	3389830,51	39	0,1
		20,00	7,0E-06	2857142,86	33	0,1
		20,00	8,1E-06	2469135,80	29	0,1
	<b>Total</b>	<b>160,00</b>	<b>0,00000555*</b>	<b>30884123,41</b>	<b>357</b>	<b>1,0</b>
	TB 1014	10,00	1,8E-06	5555555,56	64	0,2
		20,00	2,2E-06	9090909,09	105	0,3
		20,00	2,4E-06	8333333,33	96	0,3

Escenarios / Área		L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
		20,00	2,3E-06	8695652,17	101	0,3
	<b>Total</b>	<b>70,00</b>	<b>2,2E-06*</b>	<b>31675450,15</b>	<b>367</b>	<b>1,0</b>
	TB 1012	20,00	2,5E-06	8000000,00	93	0,3
		20,00	2,5E-06	8000000,00	93	0,3
		20,00	2,6E-06	7692307,69	89	0,2
		20,00	2,8E-06	7142857,14	83	0,2
	<b>Total</b>	<b>80,00</b>	<b>2,6E-06*</b>	<b>30835164,84</b>	<b>357</b>	<b>1,0</b>
	TB 1007	20,00	1,6E-06	12500000,00	145	0,4
		20,00	1,7E-06	11764705,88	136	0,4
		20,00	1,5E-06	13333333,33	154	0,4
	<b>Total</b>	<b>60,00</b>	<b>1,6E-06*</b>	<b>37598039,22</b>	<b>435</b>	<b>1,2</b>
	TB 1005	20,00	9,1E-07	21978021,98	254	0,7
		20,00	2,2E-06	9090909,09	105	0,3
		10,00	2,7E-06	3703703,70	43	0,1
	<b>Total</b>	<b>50,00</b>	<b>1,9E-06*</b>	<b>34772634,77</b>	<b>402</b>	<b>1,1</b>
	TB 1009	20,00	1,1E-06	18181818,18	210	0,6
	TB 1008	20,00	1,4E-06	14285714,29	165	0,5
	<b>Total</b>	<b>40,00</b>	<b>1,3E-06*</b>	<b>32467532,47</b>	<b>376</b>	<b>1,0</b>
	TB 1011	20,00	2,6E-06	7692307,69	89	0,2
	TB 1013	20,00	1,9E-06	10526315,79	122	0,3
	<b>Total</b>	<b>40,00</b>	<b>2,3E-06*</b>	<b>18218623,48</b>	<b>211</b>	<b>0,6</b>
	TB 1010	20,00	5,8E-07	34482758,62	399	1,1
	<b>Total</b>	<b>20,00</b>	<b>5,8E-07</b>	<b>34482758,62</b>	<b>399</b>	<b>1,1</b>
	TB 1003	20,00	1,3E-06	15384615,38	178	0,5
		20,00	9,9E-07	20202020,20	234	0,6
	<b>Total</b>	<b>40,00</b>	<b>1,1E-06*</b>	<b>35586635,59</b>	<b>412</b>	<b>1,1</b>
	TB 1001	20,00	1,4E-06	14285714,29	165	0,5
		20,00	1,6E-06	12500000,00	145	0,4

Escenarios / Área		L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
	<b>Total</b>	<b>40,00</b>	<b>1,5E-06*</b>	<b>26785714,29</b>	<b>310</b>	<b>0,8</b>
	Esferas	10,00	2,7E-07	37037037,04	429	1,2
	<b>Total</b>	<b>10,00</b>	<b>2,7E-07</b>	<b>37037037,04</b>	<b>429</b>	<b>1,2</b>

Nota: \*La Velocidad total en m/s resultante está expresada como el promedio de las velocidades de cada sección.

Como señala la Tabla 23, en el caso de existir una contaminación por derrame de productos derivados del petróleo en este escenario y la misma infiltrarse en el subsuelo, específicamente en el acuífero superior (nivel 1), esta tarda en llegar a su punto receptor que es la base de este nivel acuífero y el tope de la capa confinante el siguiendo una dirección predominante hacia e Sureste y Este en promedio 1 año en cada área evaluada. Es necesario mencionar que la única área evaluada que dio como resultado una dirección de flujo de la pluma de una posible contaminación hacia el Este y con punto receptor el río de la Quebrada Sin Nombre, mismo que es el punto receptor de la mayoría de escenarios evaluados, es el tanque de almacenamiento TB 1020. En esta área, las partículas de contaminación de un posible derrame tardan 357 en llegar al punto receptor mencionado.

#### 5.4.8. Escenario 8:

El escenario 8 comprende la zona de riesgo denominada Zona 3: Área de tanques de almacenamiento (incluye las esferas de almacenamiento y piscina API junto a las esferas), evaluada con la condición de verano con baja precipitación en el mes de agosto de 2016, lo que equivale a una recarga de  $4.09 \times 10^{-9}$  m/s.

A continuación, se muestran los resultados de la evaluación del modelo hidrogeológico en este escenario en función de las cargas hidráulicas, vectores de velocidad y simulación del movimiento de partículas de una posible contaminación en las zonas anteriormente descritas en el Escenario 7.



Figura 36. Escenario 8 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Como se puede observar en la Figura 36, el resultado de la dirección de flujo de la simulación de las partículas de una posible contaminación por derrame en la zona de riesgo de derrame 3, específicamente en las zonas anteriormente mencionadas y que se muestran en la Figura 36; es hacia el Noreste. Esta tendencia de flujo es predominante en las proximidades del extremo Este del Terminal, mientras que al extremo Oeste predomina una tendencia de dirección de flujo hacia el Norte. Como se observa en el corte de vista frontal del área de modelo, las partículas de una posible contaminación se mueven de manera horizontal únicamente, sin llegar a las capas 2 y 3. Las únicas zonas modeladas en este escenario en las que las partículas de una posible contaminación llegan al río de la Quebrada Sin Nombre son el tanque TB 1020, de mezclas de gasolina, el tanque TB 1014 de gasolina Extra y el tanque TB 1007 de gasolina de procesos.

Los vectores de velocidad son perpendiculares a las curvas de cargas hidráulicas, mismas que están dispuestas de mayor a menor en dirección Oeste-Noreste. Se puede observar la velocidad de flujo incrementa, en todas las secciones, en dirección Este.

En cuanto al tiempo en el que estas partículas de simulación de una posible contaminación tardan en llegar su punto receptor, que es la base del acuífero superior y al río de la Quebrada Sin Nombre, la Tabla 24 muestra la matriz de cálculo en Excel bajo el procedimiento anteriormente descrito en la metodología.

Tabla 24.

*Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 7 de modelamiento.*

Escenarios / Área		L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
Escenario 8	TB 1022	20,00	1,8E-06	11111111,11	129	0,4
		20,00	1,6E-06	12500000,00	145	0,4
		20,00	1,4E-06	14285714,29	165	0,5
		20,00	1,2E-06	16666666,67	193	0,5
		20,00	7,2E-07	27777777,78	322	0,9
		20,00	3,4E-07	58823529,41	681	1,9
		20,00	2,8E-07	71428571,43	827	2,3
		10,00	2,7E-07	37037037,04	429	1,2
		10,00	4,0E-07	24752475,25	286	0,8
	<b>Total</b>	<b>160,00</b>	<b>8,9E-07*</b>	<b>274382882,97</b>	<b>3176</b>	<b>8,7</b>
	TB 1020	20,00	5,5E-07	36363636,36	421	1,2
		20,00	7,4E-07	27027027,03	312	0,9
		20,00	8,5E-07	23529411,76	272	0,7
		20,00	8,0E-07	25000000,00	289	0,8
		20,00	1,0E-06	20000000,00	232	0,6
		20,00	6,2E-07	32258064,52	373	1,0

Escenarios / Área		L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
		20,00	1,0E-06	20000000,00	232	0,6
		20,00	8,8E-07	22727272,73	263	0,7
		20,00	1,1E-06	18181818,18	210	0,6
		20,00	2,2E-06	9090909,09	105	0,3
	<b>Total</b>	<b>200,00</b>	<b>9,7E-07*</b>	<b>234178139,67</b>	<b>2710</b>	<b>7,4</b>
	TB 1014	10,00	3,7E-07	27027027,03	313	0,9
		10,00	3,7E-07	27027027,03	313	0,9
		20,00	6,9E-07	28985507,25	336	0,9
		10,00	4,9E-07	20408163,27	236	0,6
		10,00	4,9E-07	20408163,27	236	0,6
		20,00	9,0E-07	22222222,22	257	0,7
		20,00	4,0E-07	50000000,00	579	1,6
		20,00	7,6E-07	26315789,47	305	0,8
	<b>Total</b>	<b>120,00</b>	<b>5,6E-07*</b>	<b>222393899,53</b>	<b>2574</b>	<b>7,1</b>
	TB 1012	5,00	2,7E-07	18518518,52	214	0,6
		5,00	2,7E-07	18518518,52	214	0,6
		5,00	2,7E-07	18518518,52	214	0,6
		5,00	3,0E-07	16666666,67	193	0,5
		5,00	3,0E-07	16666666,67	193	0,5
		5,00	2,1E-07	23809523,81	276	0,8
		20,00	2,1E-07	95238095,24	1102	3,0
<b>Total</b>	<b>50,00</b>	<b>2,6E-07*</b>	<b>207936507,94</b>	<b>2407</b>	<b>6,6</b>	
TB 1007	20,00	3,6E-07	55555555,56	643	1,8	
	20,00	6,0E-07	33333333,33	386	1,1	
	10,00	5,4E-07	18518518,52	214	0,6	
	10,00	6,8E-07	14705882,35	170	0,5	
	10,00	6,2E-07	16129032,26	187	0,5	
	10,00	6,4E-07	15625000,00	181	0,5	



Escenarios / Área		L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
		10,00	8,9E-07	11235955,06	130	0,4
		20,00	7,3E-07	27397260,27	317	0,9
		10,00	6,5E-07	15384615,38	178	0,5
	<b>Total</b>	<b>120,00</b>	<b>6,3E-07*</b>	<b>207885152,73</b>	<b>2406</b>	<b>6,6</b>
	TB	20,00	1,5E-07	133333333,33	1543	4,2
	1005	20,00	1,7E-07	117647058,82	1362	3,7
	<b>Total</b>	<b>40,00</b>	<b>1,6E-07*</b>	<b>250980392,16</b>	<b>2905</b>	<b>8,0</b>
	TB	20,00	1,0E-07	200000000,00	2314	6,3
	1009					
	TB	20,00	8,2E-07	24390243,90	282	0,8
	1008					
	<b>Total</b>	<b>40,00</b>	<b>4,6E-07*</b>	<b>224390243,90</b>	<b>2597</b>	<b>7,1</b>
	TB	20,00	4,8E-07	41666666,67	482	1,3
		20,00	4,9E-07	40816326,53	472	1,3
	1011	20,00	3,9E-07	51282051,28	593	1,6
	TB	20,00	4,0E-07	50000000,00	579	1,6
	1013	10,00	3,0E-07	33333333,33	386	1,1
		5,00	2,0E-07	25000000,00	289	0,8
	<b>Total</b>	<b>95,00</b>	<b>3,8E-07*</b>	<b>242098377,81</b>	<b>2802</b>	<b>7,7</b>
	TB	20,00	3,3E-07	60606060,61	702	1,9
	20,00	2,1E-07	95238095,24	1102	3,0	
1010	20,00	2,2E-07	90909090,91	1052	2,9	
	5,00	2,6E-07	19230769,23	223	0,6	
<b>Total</b>	<b>65,00</b>	<b>2,6E-07*</b>	<b>265984015,98</b>	<b>3079</b>	<b>8,4</b>	
TB	20,00	3,9E-07	51282051,28	594	1,6	
	20,00	2,7E-07	74074074,07	857	2,3	
1003	20,00	2,3E-07	86956521,74	1006	2,8	
	10,00	1,8E-07	55555555,56	643	1,8	

<b>Escenarios / Área</b>		<b>L (m)</b>	<b>V (m/s)</b>	<b>t (s)</b>	<b>t (d)</b>	<b>t (a)</b>
	<b>Total</b>	<b>70,00</b>	<b>2,7E-07*</b>	<b>267868202,65</b>	<b>310</b>	<b>8,5</b>
	TB 1001	20,00	4,9E-07	40816326,53	472	1,3
		20,00	4,7E-07	42553191,49	493	1,3
		20,00	4,9E-07	40816326,53	472	1,3
		20,00	4,2E-07	47619047,62	551	1,5
		20,00	3,2E-07	62500000,00	723	2,0
		20,00	2,2E-07	90909090,91	1052	2,9
	<b>Total</b>	<b>120,00</b>	<b>4,0E-07*</b>	<b>325213983,08</b>	<b>3764</b>	<b>10,3</b>
	Esferas	20,00	6,7E-08	298507462,69	3455	9,5
	<b>Total</b>	<b>20,00</b>	<b>6,7E-08*</b>	<b>298507462,69</b>	<b>3455</b>	<b>9,5</b>

Nota: \*La Velocidad total en m/s resultante está expresada como el promedio de las velocidades de cada sección.

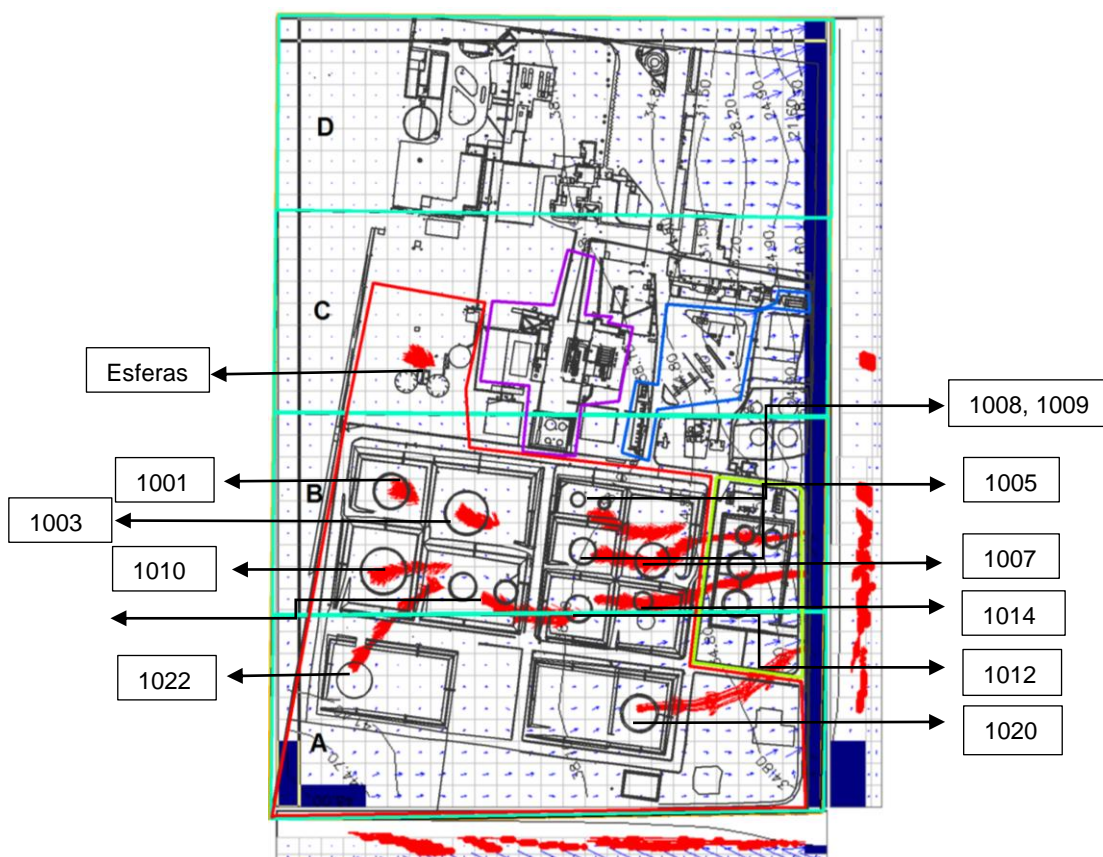
Como se observa en la Tabla 24, en el caso de existir una contaminación por derrame de productos derivados del petróleo en este escenario y la misma infiltrarse en el subsuelo, específicamente en el acuífero superior (nivel 1), esta tarda en llegar a su punto receptor que es la base de este nivel acuífero y el tope de la capa confinante, siguiendo una dirección predominante hacia el Noreste y Este, en promedio 8 años. Es necesario mencionar que en las simulaciones realizadas en las áreas de los tanques de almacenamiento TB 1020, de mezclas de gasolina, el tanque TB 1014 de gasolina Extra y el tanque TB 1007 de gasolina de procesos, el flujo de la pluma de una posible contaminación es hacia el Noreste y con punto receptor el río de la Quebrada Sin Nombre, En estas áreas las partículas de contaminación de un posible derrame tardan 7.4, 7.1 y 6.6 años, respectivamente, en llegar al punto receptor mencionado.

#### **5.4.9. Escenario 9:**

El escenario 9 comprende la zona de riesgo denominada Zona 3: Área de tanques de almacenamiento (incluye las esferas de almacenamiento y piscina

API junto a las esferas), evaluada con la condición de precipitación media anual del año 2016, equivalente a una recarga de  $4.48 \times 10^{-8}$  m/s.

A continuación, se muestran los resultados de la evaluación del modelo hidrogeológico en este escenario en función de las cargas hidráulicas, vectores de velocidad y simulación del movimiento de partículas de una posible contaminación en las zonas anteriormente descritas en el Escenario 7.



*Figura 37.* Escenario 9 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Como se observa en la Figura 37, el resultado de la dirección de flujo de la simulación de las partículas de una posible contaminación por derrame en la zona de riesgo de derrame 3, específicamente en las zonas anteriormente mencionadas y que se muestran en la Figura 37; es hacia el Este. Esta tendencia de flujo es predominante en las proximidades del extremo Este del Terminal, mientras que al extremo Oeste predomina una tendencia de dirección de flujo

hacia el Noreste. Como se observa en el corte de vista frontal del área de modelo, las partículas de una posible contaminación se mueven de manera horizontal únicamente, sin llegar a las capas 2 y 3. Las únicas zonas modeladas en este escenario en las que las partículas de una posible contaminación llegan al río de la Quebrada Sin Nombre son el tanque TB 1020, de mezclas de gasolina, el tanque TB 1014 de gasolina Extra y el tanque TB 1007 de gasolina de procesos.

Los vectores de velocidad son perpendiculares a las curvas de cargas hidráulicas, mismas que están dispuestas de mayor a menor en dirección Oeste-Noreste. Se puede observar la velocidad de flujo incrementa, en todas las secciones, en dirección Este.

En cuanto al tiempo en el que estas partículas de simulación de una posible contaminación tardan en llegar su punto receptor, que es la base del acuífero superior y al río de la Quebrada Sin Nombre, la Tabla 25 muestra la matriz de cálculo en Excel bajo el procedimiento anteriormente descrito en la metodología.

Tabla 25.

*Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 9 de modelamiento.*

Escenarios / Área		L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
Escenario 9	TB 1022	20,00	5,6E-07	35714285,71	413	1,1
		20,00	8,7E-07	22988505,75	266	0,7
		20,00	9,0E-07	22222222,22	257	0,7
		20,00	8,5E-07	23529411,76	272	0,7
	<b>Total</b>	<b>80,00</b>	<b>8,0E-07*</b>	<b>104454425,45</b>	<b>1209</b>	<b>3,3</b>
	TB 1020	20,00	1,4E-06	14285714,29	165	0,5
		20,00	1,3E-06	15384615,38	178	0,5
		20,00	1,1E-06	18181818,18	210	0,6
		20,00	1,9E-06	10526315,79	121	0,3

		20,00	1,6E-06	12500000,00	145	0,4
		20,00	1,8E-06	11111111,11	128,6	0,4
		20,00	2,4E-06	8333333,33	97	0,3
	<b>Total</b>	<b>140,00</b>	<b>1,6E-06*</b>	<b>90322908,09</b>	<b>1045</b>	<b>2,9</b>
	TB 1014	20,00	8,2E-07	24390243,90	282	0,8
		20,00	1,1E-06	18181818,18	210	0,6
		20,00	1,3E-06	15384615,38	178	0,5
		20,00	4,9E-07	40816326,53	472	1,3
		20,00	4,9E-07	40816326,53	472	1,3
		10,00	9,0E-07	11111111,11	128	0,4
		10,00	4,0E-07	25000000,00	289	0,8
	<b>Total</b>	<b>120,00</b>	<b>7,9E-07*</b>	<b>175700441,64</b>	<b>2034</b>	<b>5,6</b>
	TB 1012	20,00	9,4E-07	21276595,74	246	0,7
		20,00	7,1E-07	28169014,08	326	0,9
		20,00	9,4E-07	21276595,74	246	0,7
		20,00	1,3E-06	15384615,38	178	0,5
		20,00	2,0E-06	10000000,00	116	0,3
		20,00	1,3E-06	15384615,38	178	0,5
	<b>Total</b>	<b>120,00</b>	<b>1,2E-06*</b>	<b>111491436,34</b>	<b>1290</b>	<b>3,5</b>
	TB 1007	20,00	7,6E-07	26315789,47	305	0,8
		20,00	8,7E-07	22988505,75	266	0,7
		20,00	7,3E-07	27397260,27	317	0,9
		20,00	2,0E-06	10000000,00	116	0,3
		20,00	2,5E-06	8000000,00	93	0,3
		20,00	2,3E-06	8695652,17	105	0,3
		20,00	3,8E-06	5263157,89	61	0,2

	<b>Total</b>	<b>140,00</b>	<b>1,9E-06*</b>	<b>108660365,56</b>	<b>1258</b>	<b>3,4</b>
	<b>TB 1005 Total</b>	20,00	3,7E-07	54054054,05	626	1,7
		20,00	5,0E-07	40000000,00	463	1,3
		20,00	1,2E-06	16666666,67	193	0,5
		20,00	1,4E-06	14285714,29	165	0,5
		20,00	8,7E-06	2298850,57	27	0,1
		<b>100,00</b>	<b>2,4E-06*</b>	<b>127305285,58</b>	<b>1473</b>	<b>4,0</b>
	TB 1009 TB 1008	5,00	3,9E-07	12820512,82	148	0,4
		5,00	3,3E-07	15151515,15	175	0,5
		20,00	5,5E-07	36363636,36	421	1,2
		20,00	6,4E-07	31250000,00	362	1,0
	<b>Total</b>	<b>50,00</b>	<b>4,8E-07*</b>	<b>95585664,34</b>	<b>1106</b>	<b>3,0</b>
	TB 1011 TB 1013	10,00	4,3E-07	23255813,95	269	0,7
		20,00	5,3E-07	37735849,06	437	1,2
		20,00	5,9E-07	33898305,08	392	1,1
	<b>Total</b>	<b>50,00</b>	<b>5,2E-07*</b>	<b>94889968,09</b>	<b>1098</b>	<b>3,0</b>
	TB 1010	20,00	2,2E-07	90909090,91	1052	2,9
		20,00	4,5E-07	44444444,44	514	1,4
	<b>Total</b>	<b>40,00</b>	<b>3,4E-07*</b>	<b>135353535,35</b>	<b>1567</b>	<b>4,3</b>
	TB 1003	10,00	1,5E-07	66666666,67	772	2,1
		10,00	1,5E-07	66666666,67	772	2,1
	<b>Total</b>	<b>20,00</b>	<b>1,5E-07*</b>	<b>133333333,33</b>	<b>1543</b>	<b>4,2</b>
	TB 1001	10,00	2,6E-07	38461538,46	445	1,2
		10,00	2,0E-07	50000000,00	579	1,6

	<b>Total</b>	<b>20,00</b>	<b>2,3E-07*</b>	<b>88461538,46</b>	<b>1024</b>	<b>2,8</b>
	Esferas	10,00	5,4E-08	185185185,19	2143	5,9
	<b>Total</b>	<b>10,00</b>	<b>5,4E-08</b>	<b>185185185,19</b>	<b>2143</b>	<b>5,9</b>

Nota: \*La Velocidad total en m/s resultante está expresada como el promedio de las velocidades de cada sección.

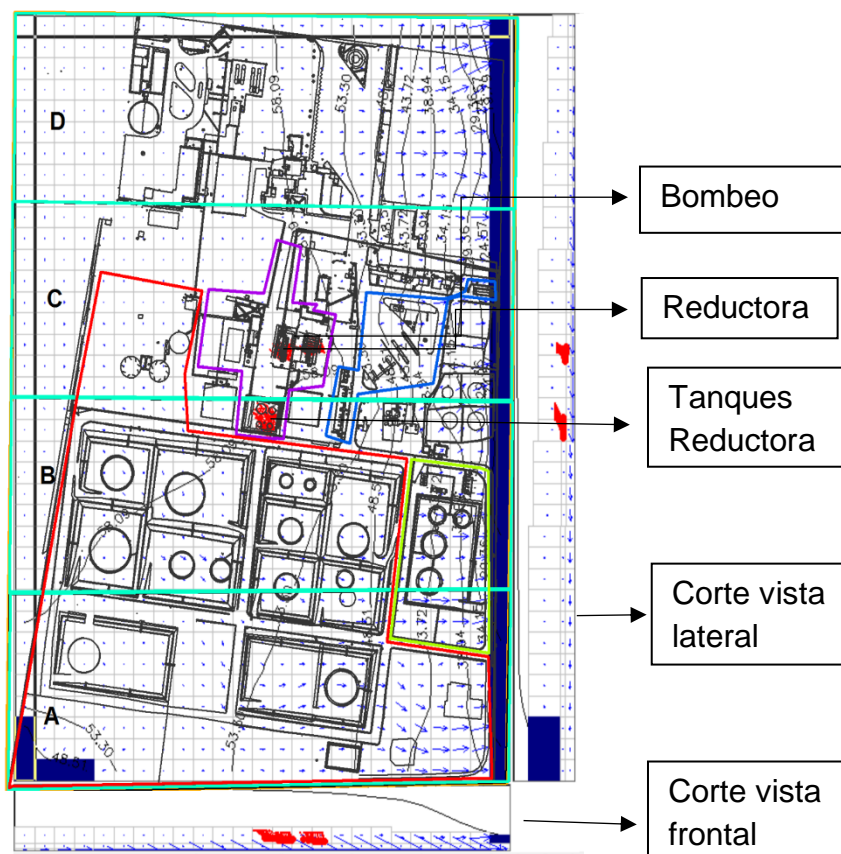
Como detalla la Tabla 25, en el caso de existir una contaminación por derrame de productos derivados del petróleo en este escenario y la misma infiltrarse en el subsuelo, específicamente en el acuífero superior (nivel 1), esta tarda en llegar a su punto receptor que es la base de este nivel acuífero y el tope de la capa confinante, siguiendo una dirección predominante hacia el Noreste y Este, en promedio 3.8 años. Es necesario mencionar que en las simulaciones realizadas en las áreas de los tanques de almacenamiento TB 1020, de mezclas de gasolina, el tanque TB 1014 de gasolina Extra y el tanque TB 1007 de gasolina de procesos, el flujo de la pluma de una posible contaminación es hacia el Noreste y con punto receptor el río de la Quebrada Sin Nombre, En estas áreas las partículas de contaminación de un posible derrame tardan 2.9, 5.6 y 3.6 años, respectivamente, en llegar al punto receptor mencionado.

#### **5.4.10. Escenario 10:**

El escenario 10 comprende a la Zona de riesgo 4: Estación de Bombeo y Estación Reductora (incluye tanques), evaluada con la condición de lluvia máxima en el mes de abril de 2016, considerando una recarga de  $1.23 \times 10^{-7}$  m/s.

A continuación, se muestran los resultados de la evaluación del modelo hidrogeológico en este escenario en función de las cargas hidráulicas, vectores de velocidad y simulación del movimiento de partículas de una posible contaminación en los tanques de la Estación Reductora, grupo de bombas de la Estación Reductora y grupo de bombas de la Estación de Bombeo, considerando que son las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de un evento de derrame debido a los procesos que se llevan a cabo diariamente en estos lugares

y a que históricamente, ya se han suscitado derrames en los mismos. (PETROECUADOR, 2017).



*Figura 38.* Escenario 10 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Como se muestra en la Figura 38, el resultado de la dirección de flujo de la simulación de las partículas de una posible contaminación por derrame en los tanques de la Estación Reductora, grupo de bombas de la Estación Reductora y grupo de bombas de la Estación de Bombeo, es hacia el Este. Como se observa en el corte de vista frontal del área de modelo, las partículas de una posible contaminación en estas áreas fueron evaluadas únicamente en la primera capa, que corresponde al nivel acuífero superior a fin de determinar el tiempo en que esta posible contaminación tarda en llegar al límite inferior del acuífero superior y al límite superior del estrato confinante de limo plástico (capa 2).



Los vectores de velocidad son perpendiculares a las curvas de cargas hidráulicas, mismas que están dispuestas de mayor a menor en dirección Oeste-Este. Se puede observar la velocidad de flujo incrementa en dirección E.

En cuanto al tiempo en el que estas partículas de simulación de una posible contaminación se mueven desde la superficie hacia la base del nivel acuífero superior, la Tabla 26 muestra la matriz de cálculo en Excel bajo el procedimiento anteriormente descrito en la metodología.

Tabla 26.

*Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 10 de modelamiento.*

Escenarios / Área		L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
Escenario 10	Tanques Reductora	20,00	6,2E-07	32258064,52	373	1,0
	<b>Total</b>	<b>20,00</b>	<b>6,2E-07</b>	<b>32258064,52</b>	<b>373</b>	<b>1,0</b>
	Reductora	10,00	2,7E-07	37037037,04	429	1,2
	<b>Total</b>	<b>10,00</b>	<b>2,7E-07</b>	<b>37037037,04</b>	<b>429</b>	<b>1,2</b>
	Bombeo	10,00	1,9E-07	52631578,95	609	1,7
	<b>Total</b>	<b>10,00</b>	<b>1,9E-07</b>	<b>52631578,95</b>	<b>609</b>	<b>1,7</b>

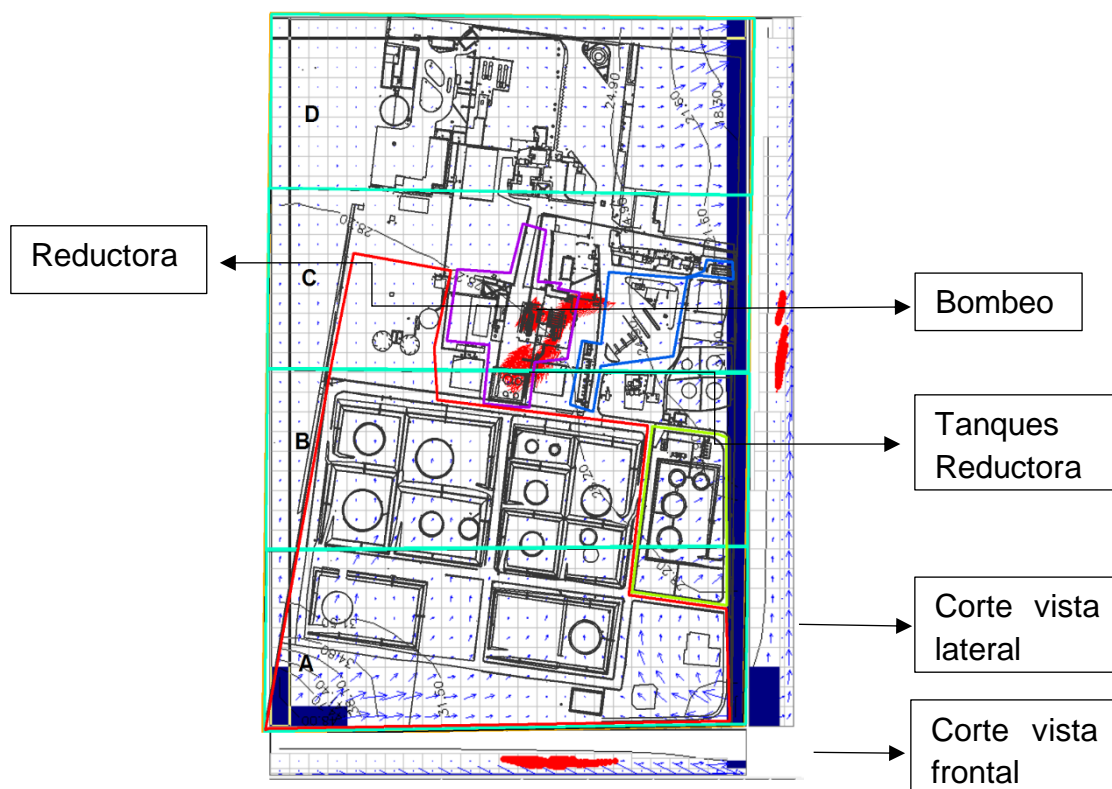
Como indica la Tabla 26, en el caso de existir una contaminación por derrame de productos derivados del petróleo en este escenario y la misma infiltrarse en el subsuelo, específicamente en el acuífero superior (nivel 1), la misma tarda en llegar a su punto receptor evaluado que es la base este nivel, siguiendo una dirección de flujo predominante hacia el Este, 373 días en los Tanques de la Estación Reductora, 429 días en la Estación Reductora y 609 días en la Estación de Bombeo.

#### 5.4.11. Escenario 11:

El escenario 11 comprende a la Zona de riesgo 4: Estación de Bombeo y

Estación Reductora (incluye tanques), evaluada con la condición de verano con baja precipitación en el mes de agosto de 2016, lo que equivale a una recarga de  $4.09 \times 10^{-9}$  m/s.

A continuación, se muestran los resultados de la evaluación del modelo hidrogeológico en este escenario en función de las cargas hidráulicas, vectores de velocidad y simulación del movimiento de partículas de una posible contaminación en los tanques de la Estación Reductora, grupo de bombas de la Estación Reductora y grupo de bombas de la Estación de Bombeo, considerando que son las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de un evento de derrame debido a los procesos que se llevan a cabo diariamente en estos lugares y a que históricamente, ya se han suscitado derrames en los mismos. (PETROECUADOR, 2017).



*Figura 39.* Escenario 11 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Como se puede observar en la Figura 39, el resultado de la dirección de flujo de

la simulación de las partículas de una posible contaminación por derrame en los tanques de la Estación Reductora, grupo de bombas de la Estación Reductora y grupo de bombas de la Estación de Bombeo, es hacia el Noreste. Como se observa en el corte de vista frontal del área de modelo, las partículas de una posible contaminación en estas áreas fueron evaluadas únicamente en la primera capa, que corresponde al nivel acuífero superior a fin de determinar el tiempo en que esta posible contaminación tarda en llegar al límite inferior del acuífero superior y al límite superior del estrato confinante de limo plástico (capa 2).

Los vectores de velocidad son perpendiculares a las curvas de cargas hidráulicas, mismas que están dispuestas de mayor a menor en dirección Oeste-Noreste. Se puede observar la velocidad de flujo incrementa en dirección Noreste.

En cuanto al tiempo en el que estas partículas de simulación de una posible contaminación se mueven desde la superficie hacia la base del nivel acuífero superior, la Tabla 27 muestra la matriz de cálculo en Excel bajo el procedimiento anteriormente descrito en la metodología.

Tabla 27.

*Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 11 de modelamiento.*

Escenarios / Área		L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
Escenario 11	Tanques Reductora	20,00	1,7E-07	117647058,82	1362	3,7
		20,00	8,3E-08	240963855,42	2789	7,6
	<b>Total</b>	<b>40,00</b>	<b>1,3E-07*</b>	<b>358610914,25</b>	<b>4151</b>	<b>11,4</b>
	Reductora	20,00	6,4E-08	312500000,00	3617	9,9
		10,00	6,9E-08	144927536,23	1677	4,6
	<b>Total</b>	<b>30,00</b>	<b>6,7E-08*</b>	<b>457427536,23</b>	<b>5294</b>	<b>14,5</b>
	Bombeo	20,00	6,9E-08	289855072,46	3355	9,2
	<b>Total</b>	<b>20,00</b>	<b>6,9E-08</b>	<b>289855072,46</b>	<b>3355</b>	<b>9,2</b>

Nota: \*La Velocidad total en m/s resultante está expresada como el promedio de las velocidades de cada sección.

Como indica la Tabla 27, en el caso de existir una contaminación por derrame de productos derivados del petróleo en este escenario y la misma infiltrarse en el subsuelo, específicamente en el acuífero superior (nivel 1), la misma tarda en llegar a su punto receptor evaluado que es la base este nivel, siguiendo una dirección de flujo predominante hacia el Noreste, 11.4 años en los Tanques de la Estación Reductora, 14.5 años en la Estación Reductora y 9.2 años en la Estación de Bombeo.

#### **5.4.12. Escenario 12:**

El escenario 12 comprende a la Zona de riesgo 4: Estación de Bombeo y Estación Reductora (incluye tanques), evaluada con la condición de precipitación media anual del año 2016, equivalente a una recarga de  $4.48 \times 10^{-8}$  m/s.

A continuación, se muestran los resultados de la evaluación del modelo hidrogeológico en este escenario en función de las cargas hidráulicas, vectores de velocidad y simulación del movimiento de partículas de una posible contaminación en los tanques de la Estación Reductora, grupo de bombas de la Estación Reductora y grupo de bombas de la Estación de Bombeo, considerando que son las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de un evento de derrame debido a los procesos que se llevan a cabo diariamente en estos lugares y a que históricamente, ya se han suscitado derrames en los mismos. (PETROECUADOR, 2017).

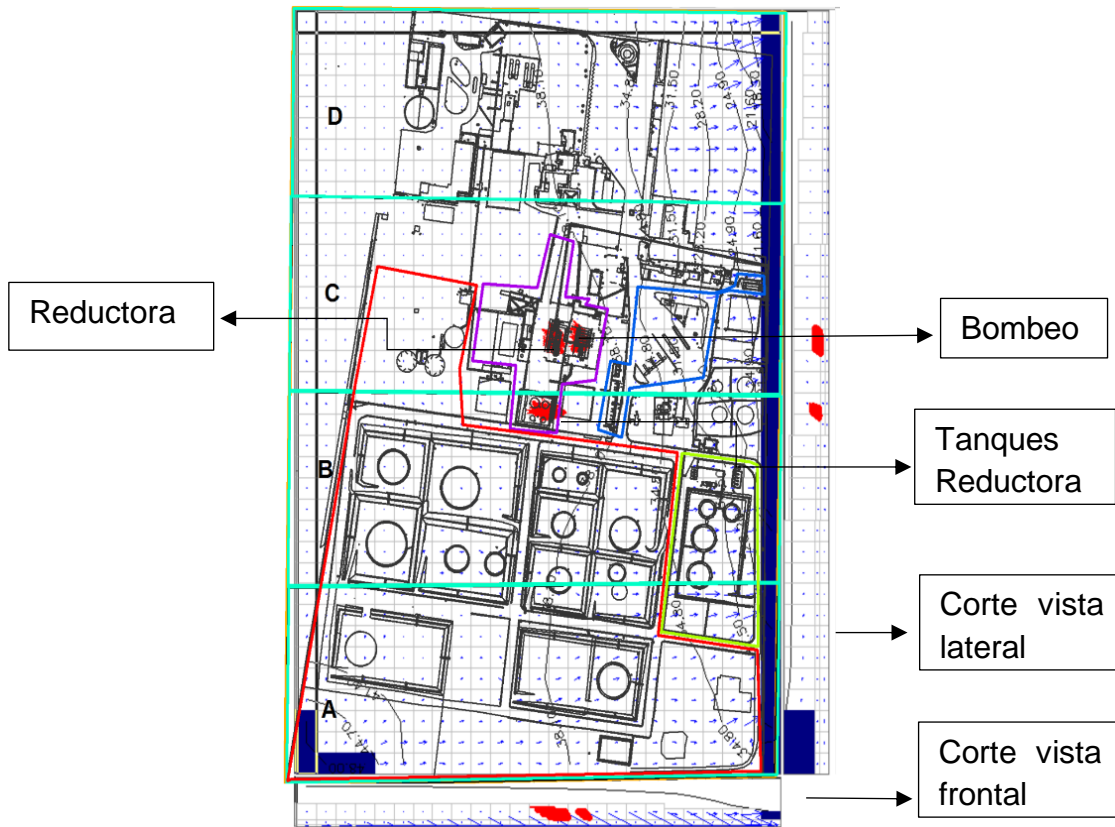


Figura 40. Escenario 12 de modelamiento hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Como se observa en la Figura 40, el resultado de la dirección de flujo de la simulación de las partículas de una posible contaminación por derrame en los tanques de la Estación Reductora, grupo de bombas de la Estación Reductora y grupo de bombas de la Estación de Bombeo, es hacia el Este. Como se observa en el corte de vista frontal del área de modelo, las partículas de una posible contaminación en estas áreas fueron evaluadas únicamente en la primera capa, que corresponde al nivel acuífero superior a fin de determinar el tiempo en que esta posible contaminación tarda en llegar al límite inferior del acuífero superior y al límite superior del estrato confinante de limo plástico (capa 2).

Los vectores de velocidad son perpendiculares a las curvas de cargas hidráulicas, mismas que están dispuestas de mayor a menor en dirección Oeste-Este. Se puede observar la velocidad de flujo incrementa en dirección Este.

En cuanto al tiempo en el que estas partículas de simulación de una posible contaminación se mueven desde la superficie hacia la base del nivel acuífero superior, la Tabla 28 muestra la matriz de cálculo en Excel bajo el procedimiento anteriormente descrito en la metodología

Tabla 28.

*Matriz de cálculo del tiempo de movimiento de partículas de una posible contaminación en el Escenario 12 de modelamiento.*

Escenarios / Área		L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	t (a)
Escenario 12	Tanques Reductora	20,00	2,2E-07	90909090,91	1052	2,9
	<b>Total</b>	<b>20,00</b>	<b>2,2E-07</b>	<b>90909090,91</b>	<b>1052</b>	<b>2,9</b>
	Reductora	10,00	6,6E-08	151515151,52	1754	4,8
	<b>Total</b>	<b>10,00</b>	<b>6,6E-08</b>	<b>151515151,52</b>	<b>1754</b>	<b>4,8</b>
	Bombeo	10,00	7,5E-08	133333333,33	1543	4,2
	<b>Total</b>	<b>10,00</b>	<b>7,5E-08</b>	<b>133333333,33</b>	<b>1543</b>	<b>4,2</b>

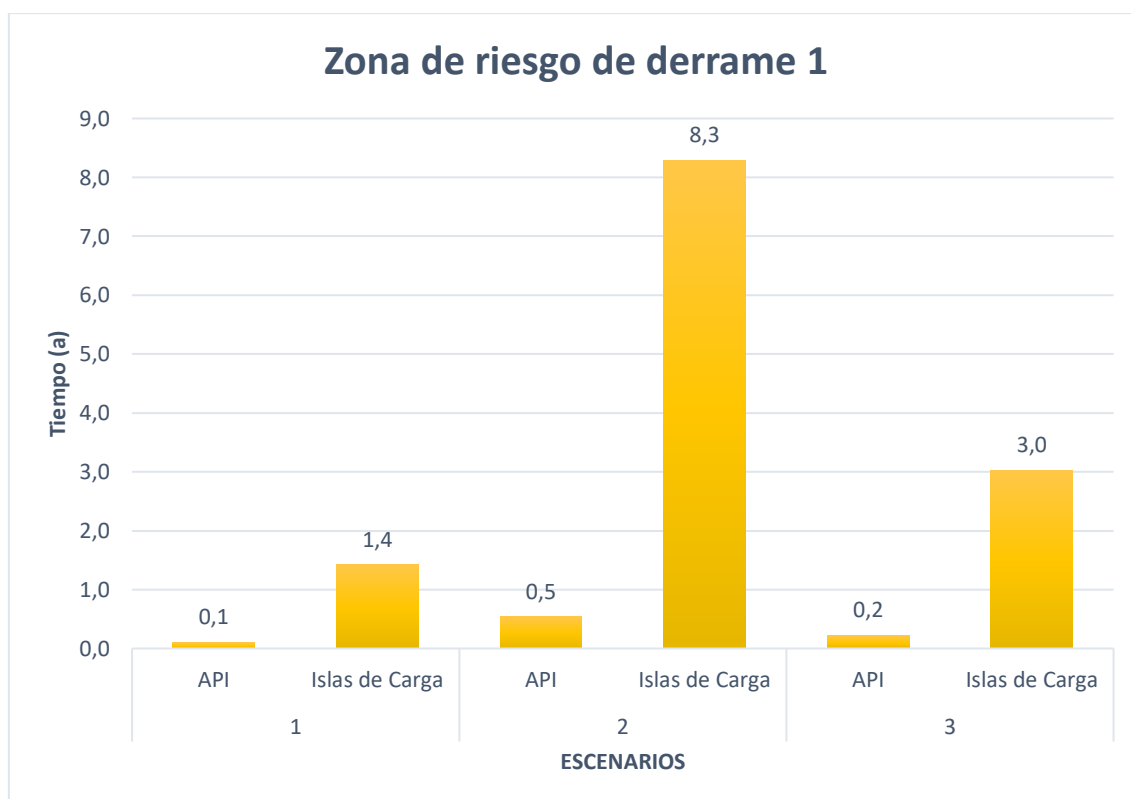
Como se señala en la Tabla 28, en el caso de existir una contaminación por derrame de productos derivados del petróleo en este escenario y la misma infiltrarse en el subsuelo, específicamente en el acuífero superior (nivel 1), la misma tarda en llegar a su punto receptor evaluado que es la base este nivel, siguiendo una dirección de flujo predominante hacia el Este, 1052 días en los Tanques de la Estación Reductora, 1754 días en la Estación Reductora y 1543 días en la Estación de Bombeo.

## 5.5. Análisis de resultados de los escenarios de modelamiento

A partir de los resultados obtenidos y presentados anteriormente, se procesa a realizar un análisis de los doce escenarios de modelamiento relacionando la zona de riesgo y el área en que se encuentran los mismos.

### 5.5.1. Análisis escenarios Zona 1

La Zona 1 fue evaluada en la piscina API e Islas de carga a través de los escenarios 1, 2 y 3, cada uno de estos asumiendo una recarga por precipitación constante en todo el horizonte de tiempo de modelación equivalente a un valor de  $1.23 \times 10^{-7}$  m/s para el escenario 1,  $4.09 \times 10^{-9}$  m/s para el escenario 2 y de  $4.48 \times 10^{-8}$  m/s para el escenario 3. A continuación, la Figura 41 muestra una gráfica comparativa de los resultados de estos escenarios en función del tiempo en años.



*Figura 41.* Resultado en función del tiempo de los escenarios de modelamiento de la zona de riesgo de derrame 1.

*Por un lado, en la piscina API en el Escenario 2 con la condición de recarga de precipitación baja en verano, el tiempo resultante es de 0.5 años, lo que equivale a 198 días; mientras que con la condición de recarga de precipitación media del escenario 3, el tiempo baja a 0.2 años, lo que significa 83 días. En este mismo sentido, producto de una recarga máxima de precipitación, el tiempo baja aún más a 0.1 años o 40 días, en el escenario 1. E definitiva, en los tres escenarios expuestos el tiempo en que las partículas de una posible contaminación tardan en llegar a su punto receptor que es el Río de la Quebrada Sin Nombre, en dirección Este, es menor a un año. Es posible determinar, por tanto, que la recarga constante de precipitación asumida en todo el horizonte temporal de modelamiento sí influye en el tiempo.*

En términos porcentuales, existe una disminución de tiempo del 58% entre en escenario 2 y 3; y del 80% entre el escenario 2 y 1. Eso representa que, de haber una contaminación en esta área, asumiendo una precipitación media anual como referencia de recarga, el tiempo en que la misma se mueve, específicamente por advección, incrementa en un factor de 2.4 al existir condiciones de baja precipitación como en el escenario 2; y disminuye en un factor de 2.1 en condiciones de precipitaciones fuertes, como las de los meses de abril, como en el escenario 1.

Es posible determinar las siguientes expresiones del modelo hidrogeológico evaluado en función del tiempo en la zona de riesgo 1 en el área de la piscina API bajo las condiciones previamente mencionadas.

Tabla 29.

*Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 1, piscina API, en función del tiempo.*

<b>En condiciones de baja precipitación</b>	<b>En condiciones de alta precipitación</b>
$T_s = T_m \times 2.4$	$T_p = T_m \div 2.1$



Donde:	Donde:
Ts= Tiempo en condiciones de baja precipitación (días)	Tp= Tiempo en condiciones de alta precipitación (días)
Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)	Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)

Por otro lado, en cuanto a las Islas de Carga, situación similar ocurre en relación al tiempo en que las partículas de una posible contaminación tardan en llegar a su punto receptor que es el Río de la Quebrada Sin Nombre, en dirección Este, con los escenarios 1, 2 y 3. Por un lado, en las Islas de Carga en el Escenario 2 con la condición de recarga de precipitación baja en verano, el tiempo resultante es de 8.3 años, lo que equivale a 3025 días; mientras que con la condición de recarga de precipitación media del escenario 3, el tiempo baja a 3 años, lo que significa 1104 días. Siguiendo esta relación, producto de una recarga máxima de precipitación, el tiempo baja aún más a 1.4 años, lo que es igual a 521 días.

Es decir, en términos porcentuales, existe una disminución de tiempo del 64% entre el escenario 2 y 3; y del 83% entre el escenario 2 y 1. Eso representa que, de haber una contaminación en esta área, asumiendo una precipitación media anual como referencia de recarga, el tiempo en que la misma se mueve, específicamente por advección, incrementa en un factor de 2.7 al existir condiciones de baja precipitación como en el escenario 2; y disminuye en un factor de 2.1 en condiciones de precipitaciones fuertes, como las de los meses de abril, como en el escenario 1.

Por tanto, es posible determinar las siguientes expresiones del modelo hidrogeológico evaluado en función del tiempo en la zona de riesgo 1 en el área de Islas de Carga, bajo las condiciones previamente mencionadas.

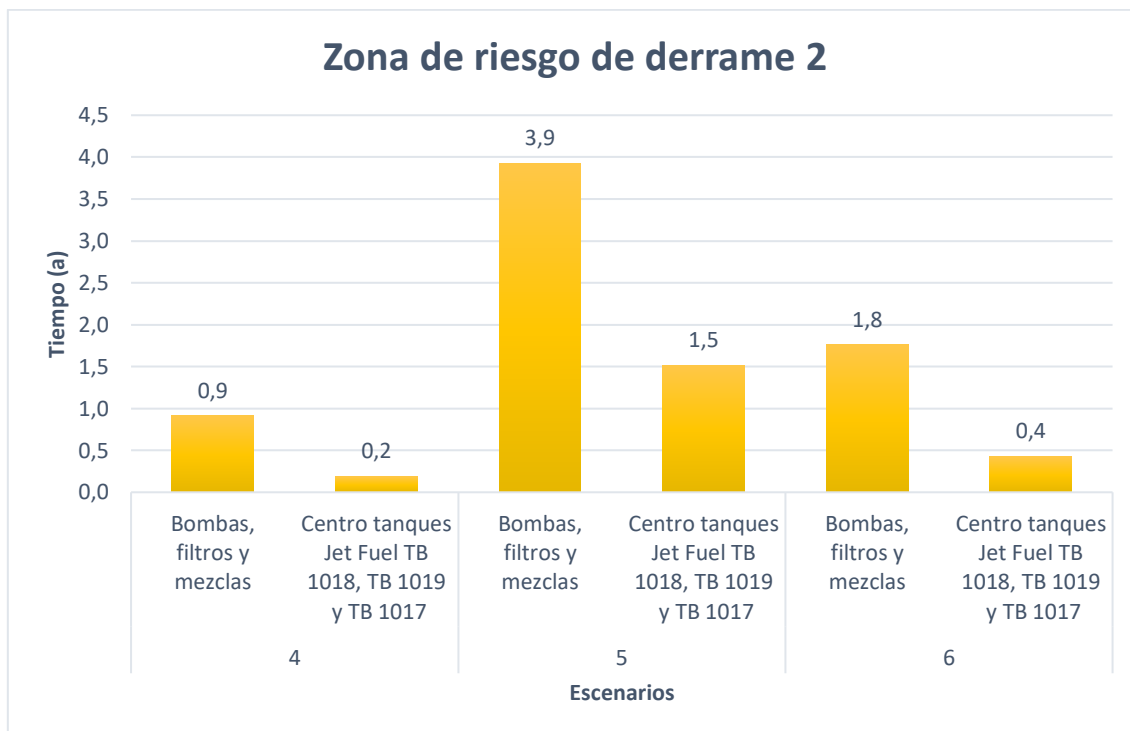
Tabla 30.

*Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 1, Islas de Carga, en función del tiempo.*

<b>En condiciones de baja precipitación</b>	<b>En condiciones de alta precipitación</b>
$T_s = T_m \times 2.7$	$T_p = T_m \div 2.1$
Donde:	Donde:
Ts= Tiempo en condiciones de baja precipitación (días)	Tp= Tiempo en condiciones de alta precipitación (días)
Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)	Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)

### 5.5.2. Análisis escenarios Zona 2

La Zona 2 fue evaluada en el área de bombas de recepción de Jet, Filtros micrónicos de Jet y bombas de mezclas de la gasolina Extra y entre los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017, a través de los escenarios 4, 5 y 6, cada uno de estos asumiendo una recarga por precipitación constante en todo el horizonte de tiempo de modelación equivalente a un valor de  $1.23 \times 10^{-7}$  m/s para el escenario 4,  $4.09 \times 10^{-9}$  m/s para el escenario 5 y de  $4.48 \times 10^{-8}$  m/s para el escenario 6. La Figura 42 muestra una gráfica comparativa de los resultados de estos escenarios en función del tiempo en años.



*Figura 42.* Resultado en función del tiempo de los escenarios de modelamiento de la zona de riesgo de derrame 2.

Como se muestra en la Figura 42, el tiempo en que las partículas de una posible contaminación tardan en llegar a su punto receptor que es el Río de la Quebrada Sin Nombre, en dirección Este, es menor a un año en el escenario 4, tanto en el área de bombas, filtros y mezclas como en el área central de los tanques de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017; y también en esta misma área en el escenario 6. Es posible determinar que la recarga constante de precipitación asumida en todo el horizonte temporal de modelamiento sí influye en el tiempo.

Por un lado, en el área de bombas, filtros y mezclas, en el Escenario 5 con la condición de recarga de precipitación baja en verano, el tiempo resultante es de 3.9 años, lo que equivale a 1432 días; mientras que con la condición de recarga de precipitación media del escenario 6, el tiempo baja a 1.8 años, lo que significa 643 días. En este mismo sentido, debido a una recarga máxima de precipitación, el tiempo baja aún más a 0.9 años o 333 días, en el escenario 4.

Es decir, en términos porcentuales, existe una disminución de tiempo del 55% entre en escenario 5 y 6; y del 77% entre el escenario 5 y 4. Esto representa que,

de haber una contaminación en esta área, asumiendo una precipitación media anual como referencia de recarga, el tiempo en que la misma se mueve, específicamente por advección, incrementa en un factor de 2.2 al existir condiciones de baja precipitación como en el escenario 5; y disminuye en un factor de 1.9 en condiciones de precipitaciones fuertes, como las de los meses de abril, como en el escenario 4.

Por tanto, es factible determinar las siguientes expresiones del modelo hidrogeológico evaluado en función del tiempo en la zona de riesgo 2 en el área de bombas, filtros y mezclas de Jet bajo las condiciones previamente mencionadas.

Tabla 31.

*Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 2, área de bombas, filtros y mezclas de Jet, en función del tiempo.*

<b>En condiciones de baja precipitación</b>	<b>En condiciones de alta precipitación</b>
$T_s = T_m \times 2.2$ <p>Donde:</p> <p>T<sub>s</sub>= Tiempo en condiciones de baja precipitación (días)</p> <p>T<sub>m</sub>= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)</p>	$T_p = T_m \div 1.9$ <p>Donde:</p> <p>T<sub>p</sub>= Tiempo en condiciones de alta precipitación (días)</p> <p>T<sub>m</sub>= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)</p>

Por otro lado, en cuanto al área central de los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017, situación similar ocurre en relación al tiempo en que las partículas de una posible contaminación tardan en llegar a su punto receptor que es el Río de la Quebrada Sin Nombre, en dirección Este, con los escenarios 4, 5 y 6. Por un lado, en el Escenario 5 con la condición de recarga de precipitación baja en verano, el tiempo resultante es de 1.5 años, lo que

equivale a 554 días; mientras que con la condición de recarga de precipitación media del escenario 6, el tiempo baja a 0.4 años, lo que significa 157 días. Siguiendo esta relación, producto de una recarga máxima de precipitación, el tiempo baja aún más a 0.2 años, lo que es igual a 70 días.

Es decir, en términos porcentuales, existe una disminución de tiempo del 72% entre el escenario 5 y 6; y del 87% entre el escenario 5 y 4. Esto representa que, de haber una contaminación en esta área, asumiendo una precipitación media anual como referencia de recarga, el tiempo en que la misma se mueve, específicamente por advección, incrementa en un factor de 3.5 al existir condiciones de baja precipitación como en el escenario 5; y disminuye en un factor de 2.2 en condiciones de precipitaciones fuertes, como las de los meses de abril, como en el escenario 4.

Es posible, por ende, determinar las siguientes expresiones del modelo hidrogeológico evaluado en función del tiempo en la zona de riesgo 2 en el área central de los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017, bajo las condiciones previamente mencionadas.

Tabla 32.

*Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 2, área central de los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017, en función del tiempo.*

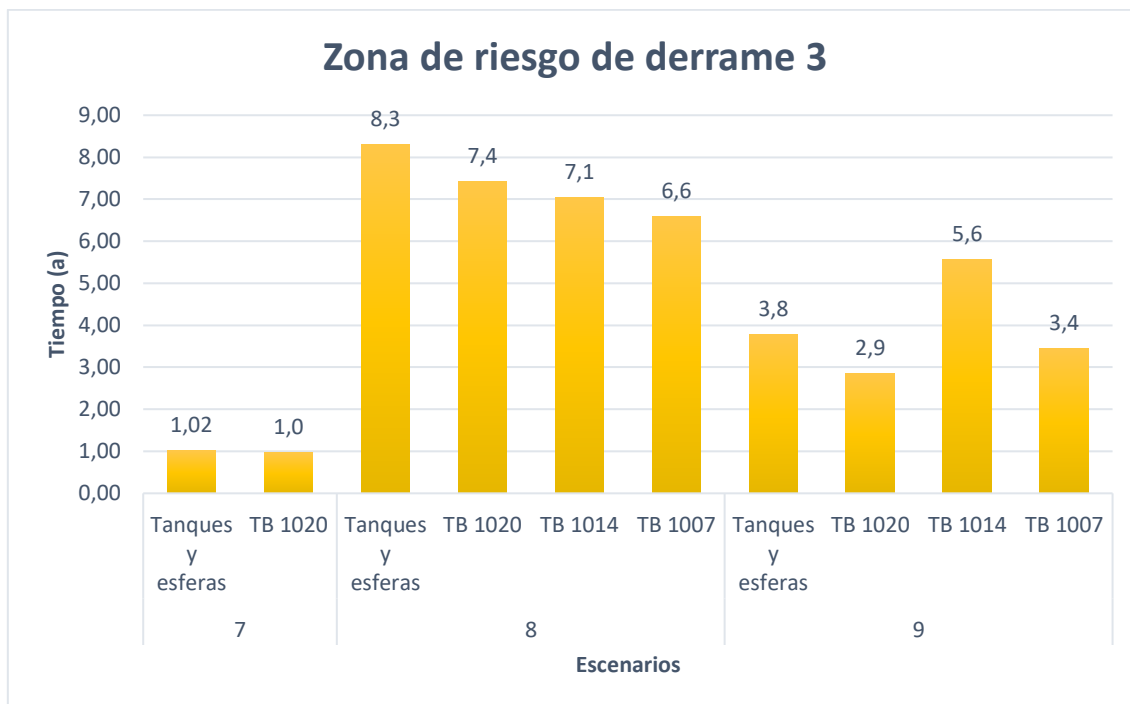
<b>En condiciones de baja precipitación</b>	<b>En condiciones de alta precipitación</b>
$T_s = T_m \times 3.5$	$T_p = T_m \div 2.2$
Donde:	Donde:
Ts= Tiempo en condiciones de baja precipitación (días)	Tp= Tiempo en condiciones de alta precipitación (días)
Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)	Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)

### 5.5.3. Análisis escenarios Zona 3

La Zona 3 fue evaluada a través de los escenarios 7, 8 y 9, cada uno de estos asumiendo una recarga por precipitación constante en todo el horizonte de tiempo de modelación equivalente a un valor de  $1.23 \times 10^{-7}$  m/s para el escenario 7,  $4.09 \times 10^{-9}$  m/s para el escenario 8 y de  $4.48 \times 10^{-8}$  m/s para el escenario 9, en el área de patio de tanques de almacenamiento y en las esferas de almacenamiento.

Todos los tanques de almacenamiento de esta zona fueron modelados simulando posibles partículas de contaminación a fin de determinar las cargas hidráulicas, dirección de flujo, vectores de velocidad y el tiempo en que las mismas tardan en llegar a su punto receptor siguiendo un movimiento estacionario por advección en la primera capa que corresponde al nivel acuífero superior. En este sentido, se obtuvo como resultado que únicamente en los tanques de almacenamiento que se encuentran más cercanos al extremo Este del Terminal que son el TB 1020, TB 1014 y TB 1007, las partículas simuladas de una posible contaminación llegan al río de la Quebrada Sin Nombre en dirección Noreste. Para el caso de los otros tanques de almacenamiento: TB 1022, TB 1012, TB 1005, TB 1009, TB 1008, TB 1011, TB 1013, TB 1010, TB 1003, TB 1001 y las esferas de almacenamiento TB 1023, TB 1024 y TB 1025, el punto receptor es la base del nivel acuífero superior modelado en la capa 1 en dirección Este y Noreste. Partiendo de lo anteriormente expuesto, se presenta a continuación el análisis de los resultados en función al tiempo promedio en los tanques y esferas de almacenamiento que tienen como punto receptor la base del nivel acuífero superior para los escenarios 7, 8 y 9; y en análisis en función al tiempo de los tanques TB 1020, TB 1014 y TB 1007 en los escenarios 7, 8 y 9.

A continuación, la Figura 43 muestra una gráfica comparativa de los resultados de estos escenarios en función del tiempo en años.



*Figura 43.* Resultado en función del tiempo de los escenarios de modelamiento de la zona de riesgo de derrame 3.

Como se puede observar en la Figura 43, en los tres escenarios expuestos, las partículas de contaminación simuladas en el Tanque de almacenamiento TB 1020, que se encuentra al extremo Sureste del Terminal, llegan al río de la Quebrada Sin Nombre como punto receptor. Es posible determinar que, en función al tiempo, las partículas tardan un año en el escenario 7, 7.4 años en el escenario 8 y 2.9 años en el escenario 9. En este mismo sentido, el tiempo evaluado en los tanques TB 1014 y 1007 en los escenarios 8 y 9, en los cuales las partículas simuladas de una posible contaminación también llegan al río de la Quebrada Sin Nombre, el tiempo en el escenario 8 para el caso del tanque TB 1014 es de 7.1 años, mientras en el escenario 9 es de 5.6 años. En cuanto al tanque 1007, el tiempo en el escenario 8 es de 6.6 años, mientras en el escenario 9 es de 3.4 años. En ambos escenarios, se puede observar que el tiempo disminuye en función a la variación de la recarga de precipitación. Finalmente, en cuanto a los tanques y esferas de almacenamiento TB 1022, TB 1012, TB 1005, TB 1009, TB 1008, TB 1011, TB 1013, TB 1010, TB 1003, TB 1001 y las esferas de almacenamiento TB 1023, TB 1024 y TB 1025, que tienen como punto

receptor la base del nivel acuífero superior, se puede observar que en los tres escenarios planteados, el tiempo es incrementa conforme decrece la recarga por la precipitación, desde un tiempo de 1.02 años, en el escenario 7, a 3.8 años y 8.3 años en los escenarios 9 y 8, respectivamente. Es posible determinar que la recarga constante de precipitación asumida en todo el horizonte temporal de modelamiento sí influye en el tiempo y que existe una relación inversamente proporcional, a mayor precipitación menor tiempo.

Analizando en primer lugar al tanque TB 1020, en el Escenario 8 con la condición de recarga de precipitación baja en verano, el tiempo resultante es de 7.4 años, lo que equivale a 2710 días; mientras que con la condición de recarga de precipitación media del escenario 9, el tiempo baja a 2.9 años, lo que significa 1045 días. En este mismo sentido, debido a una recarga máxima de precipitación, el tiempo baja aún más a 1 año o 365 días, en el escenario 7.

Es decir, en términos porcentuales, existe una disminución de tiempo del 61% entre en escenario 8 y 9; y del 87% entre el escenario 8 y 7. Esto representa que, de haber una contaminación en esta área, asumiendo una precipitación media anual como referencia de recarga, el tiempo en que la misma se mueve, específicamente por advección, incrementa en un factor de 2.6 al existir condiciones de baja precipitación como en el escenario 8; y disminuye en un factor de 2.9 en condiciones de precipitaciones fuertes, como las del mes de abril evaluadas en el escenario 7.

Se puede determinar las siguientes expresiones del modelo hidrogeológico evaluado en función del tiempo en la zona de riesgo 3 en el área del Tanque TB 1020 bajo las condiciones previamente mencionadas.



Tabla 33.

*Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 3, tanque de almacenamiento TB 1020, en función del tiempo.*

<b>En condiciones de baja precipitación</b>	<b>En condiciones de alta precipitación</b>
$T_s = T_m \times 2.6$	$T_p = T_m \div 2.9$
Donde:	Donde:
Ts= Tiempo en condiciones de baja precipitación (días)	Tp= Tiempo en condiciones de alta precipitación (días)
Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)	Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)

Es necesario mencionar, además, que en base a inspecciones realizadas en campo a la zona de riesgo 3, el tanque de almacenamiento TB 1020 es considerado como el que presenta mayor peligro de derrame y que de existir una contaminación a las aguas subterráneas producto del mismo, las partículas de contaminación se infiltrarán más rápido en el suelo hacia el nivel acuífero superior y posteriormente hacia al río de la Quebrada Sin Nombre debido a que el suelo del tanque es de ripio y no está impermeabilizado con concreto ni tampoco geo membrana. Se evidencia este hecho con la presencia de una ligera capa de vegetación en las paredes y en el suelo del cubeto o dique de contención.

Por otro lado, en cuanto a los tanques TB 1014 y TB 1007, es posible determinar que existe una relación inversamente proporcional entre el valor de recarga de precipitación asumido de manera constante en todo el horizonte temporal y el tiempo en que las partículas de una posible contaminación llegan al río de la Quebrada Sin Nombre en los escenarios 8 y 9.

Haciendo referencia al tanque 1014, en el Escenario 8 con la condición de recarga de precipitación baja en verano, el tiempo resultante es de 7.1 años, lo que equivale a 2574 días; mientras que con la condición de recarga de precipitación media del escenario 9, el tiempo baja a 5.6 años, lo que significa 2034 días.

En términos porcentuales, existe una disminución de tiempo del 21% entre en escenario 8 y 9. Esto representa que, de haber una contaminación en esta área, asumiendo una precipitación media anual como referencia de recarga, el tiempo en que la misma se mueve, específicamente por advección hacia el Noreste, incrementa en un factor de 1.3 al existir condiciones de baja precipitación, como en el escenario 8. Es posible determinar la siguiente expresión del modelo hidrogeológico evaluado en función del tiempo en la zona de riesgo 3 en el área del Tanque TB 1014 bajo las condiciones previamente mencionadas.

Tabla 34.

*Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 3, tanque de almacenamiento TB 1014, en función del tiempo.*

<b>En condiciones de baja precipitación</b>
$T_s = T_m \times 1.3$
Donde:
T <sub>s</sub> = Tiempo en condiciones de baja precipitación (días)
T <sub>m</sub> = Tiempo en condiciones de precipitación media (días)

Por otra parte, en cuanto al área del tanque de almacenamiento TB 1007, situación similar ocurre en relación al tiempo en que las partículas de una posible contaminación tardan en llegar a su punto receptor que es el Río de la Quebrada

Sin Nombre, en dirección Noreste, con los escenarios 8 y 9. En el Escenario 8 con la condición de recarga de precipitación baja en verano, el tiempo resultante es de 6.6 años, lo que equivale a 2406 días; mientras que con la condición de recarga de precipitación media del escenario 9, el tiempo baja a 3.4 años, lo que significa 1258 días.

En términos porcentuales, existe una disminución de tiempo del 48% entre el escenario 8 y 9. Esto representa que, de haber una contaminación en esta área, asumiendo una precipitación media anual como referencia de recarga, el tiempo en que la misma se mueve específicamente por advección, incrementa en un factor de 1.9 al existir condiciones de baja precipitación como en el escenario 8. Se puede determinar la siguiente expresión del modelo hidrogeológico evaluado en función del tiempo en la zona de riesgo 3 en el área del tanque TB 1007, bajo las condiciones previamente mencionadas.

*Tabla 35.*

*Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 3, tanque de almacenamiento TB 1007, en función del tiempo.*

<b>En condiciones de baja precipitación</b>
$T_s = T_m \times 1.9$
Donde:
Ts= Tiempo en condiciones de baja precipitación (días)
Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)

Finalmente, en cuanto a la evaluación del modelo hidrogeológico de los tanques TB 1022, TB 1012, TB 1005, TB 1009, TB 1008, TB 1011, TB 1013, TB 1010, TB 1003, TB 1001 y las esferas de almacenamiento TB 1023, TB 1024 y TB 1025,

en el Escenario 8 con la condición de recarga de precipitación baja en verano, el tiempo resultante es de 8.3 años, lo que equivale a 3032 días; mientras que con la condición de recarga de precipitación media del escenario 9, el tiempo baja a 3.8 años, lo que significa 1348 días. En este mismo sentido, debido a una recarga máxima de precipitación, el tiempo baja aún más a 1.02 años o 370 días, en el escenario 7.

En términos porcentuales, existe una disminución de tiempo del 56% entre en escenario 8 y 9; y del 88% entre el escenario 8 y 7. Esto representa que, de producirse una contaminación en estas áreas, asumiendo una precipitación media anual como referencia de recarga, el tiempo en que la misma se mueve, específicamente por advección, incrementa en un factor de 2.2 al existir condiciones de baja precipitación como en el escenario 8; y disminuye en un factor de 3.6 en condiciones de precipitaciones fuertes, como las del mes de abril evaluadas en el escenario 7.

Se puede determinar las siguientes expresiones del modelo hidrogeológico evaluado en función del tiempo en la zona de riesgo 3 en el área de los tanques de almacenamiento TB 1022, TB 1012, TB 1005, TB 1009, TB 1008, TB 1011, TB 1013, TB 1010, TB 1003, TB 1001 y las esferas de almacenamiento TB 1023, TB 1024 y TB 1025, bajo las condiciones previamente mencionadas.

Tabla 36.

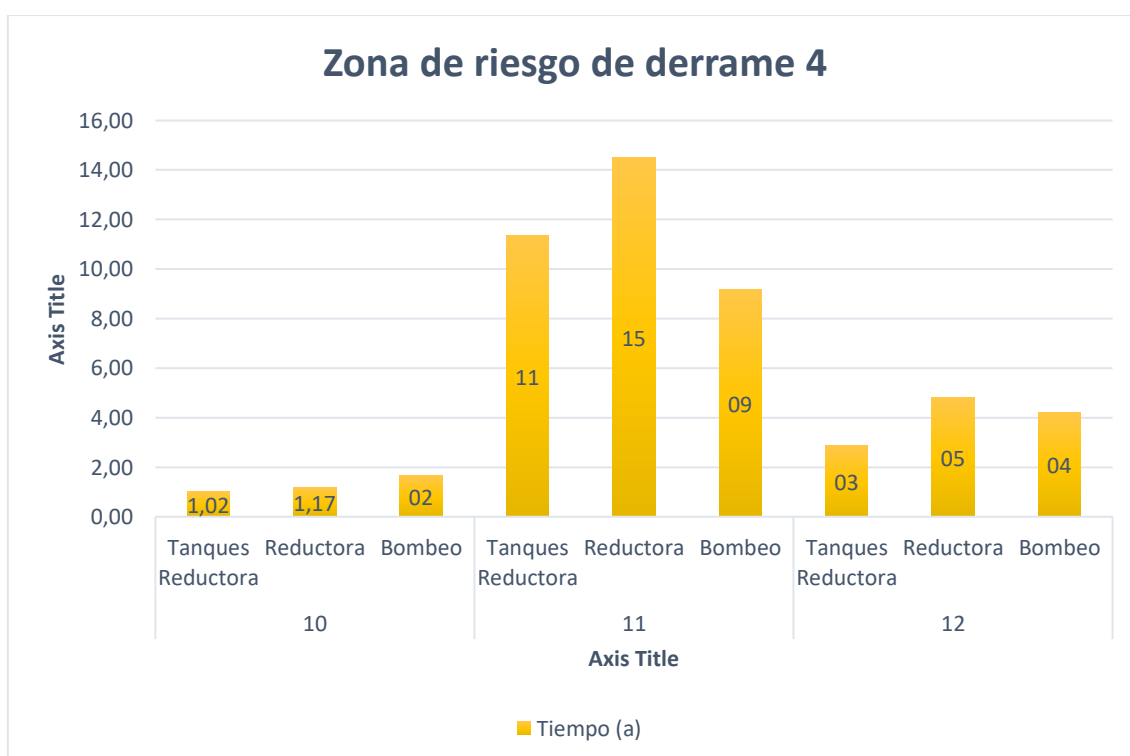
*Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 3, tanques de almacenamiento TB 1022, 1012, 1005, 1009, 1008, 1011, 1013, 1010, 1003, 1001 y esferas de almacenamiento TB 1023, 1024 y 1025 en función del tiempo.*

<b>En condiciones de baja precipitación</b>	<b>En condiciones de alta precipitación</b>
<p style="text-align: center;"><math>T_s = T_m \times 2.2</math></p> <p>Donde:</p>	<p style="text-align: center;"><math>T_p = T_m \div 3.6</math></p> <p>Donde:</p>

Ts= Tiempo en condiciones de baja precipitación (días)	Tp= Tiempo en condiciones de alta precipitación (días)
Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)	Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)

#### 5.5.4. Análisis escenarios Zona 4

La Zona 4 fue evaluada en el área de Tanques de la Estación Reductora, Estación Reductora y Estación de Bombeo, a través de los escenarios 10, 11 y 12, cada uno de estos asumiendo una recarga por precipitación constante en todo el horizonte de tiempo de modelación equivalente a un valor de  $1.23 \times 10^{-7}$  m/s para el escenario 10,  $4.09 \times 10^{-9}$  m/s para el escenario 11 y de  $4.48 \times 10^{-8}$  m/s para el escenario 12. La Figura 44 muestra una gráfica comparativa de los resultados de estos escenarios en función del tiempo en años.



*Figura 44.* Resultado en función del tiempo de los escenarios de modelamiento de la zona de riesgo de derrame 4.

Como se observa en la Figura 44, el tiempo en que las partículas de una posible contaminación tardan en llegar a su punto receptor que es la base del nivel acuífero superior, en dirección Este, es de alrededor de un año en el escenario 10, tanto en los Tanques de la Estación Reductora, como en la Estación Reductora y la Estación de Bombeo. Es posible determinar que la recarga constante de precipitación asumida en todo el horizonte temporal de modelamiento sí influye en el tiempo.

Por un lado, en el área de Tanques de la Estación Reductora, en el Escenario 11 con la condición de recarga de precipitación baja en verano, el tiempo resultante es de 11 años, lo que equivale a 4151 días; mientras que con la condición de recarga de precipitación media del escenario 12, el tiempo baja a 3 años, lo que significa 1052 días. En este mismo sentido, debido a una recarga máxima de precipitación, el tiempo baja aún más a 1.02 años o 373 días, en el escenario 10.

Es decir, en términos porcentuales, existe una disminución de tiempo del 75% entre en escenario 11 y 12; y del 91% entre el escenario 11 y 10. Esto representa que, de haber una contaminación en esta área, asumiendo una precipitación media anual como referencia de recarga, el tiempo en que la misma se mueve, específicamente por advección, incrementa en un factor de 3.9 al existir condiciones de baja precipitación como en el escenario 11; y disminuye en un factor de 2.8 en condiciones de precipitaciones fuertes, como las de los meses de abril, como en el escenario 10.

Es posible determinar las siguientes expresiones del modelo hidrogeológico evaluado en función del tiempo en la zona de riesgo 4 en el área de tanques de la Estación Reductora bajo las condiciones previamente mencionadas.

Tabla 37.

*Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 4, tanques de la Estación Reductora, en función del tiempo.*

<b>En condiciones de baja precipitación</b>	<b>En condiciones de alta precipitación</b>
$T_s = T_m \times 3.9$	$T_p = T_m \div 2.8$
Donde:	Donde:
Ts= Tiempo en condiciones de baja precipitación (días)	Tp= Tiempo en condiciones de alta precipitación (días)
Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)	Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)

Por otro lado, en cuanto al área de la Estación Reductora, situación similar ocurre en relación al tiempo en que las partículas de una posible contaminación tardan en llegar a su punto receptor que es la base del nivel acuífero superior, en dirección Este, con los escenarios 10, 11 y 12. Por un lado, en el Escenario 11 con la condición de recarga de precipitación baja en verano, el tiempo resultante es de 15 años, lo que equivale a 5294 días; mientras que con la condición de recarga de precipitación media del escenario 12, el tiempo baja a 5 años, lo que significa 1754 días. Siguiendo esta relación, producto de una recarga máxima de precipitación en el escenario 10, el tiempo baja aún más a 1.17 años, lo que es igual a 429 días.

En términos porcentuales, existe una disminución de tiempo del 67% entre el escenario 11 y 12; y del 92% entre el escenario 11 y 10. Esto representa que, de haber una contaminación en esta área, asumiendo una precipitación media anual como referencia de recarga, el tiempo en que la misma se mueve, específicamente por advección, incrementa en un factor de 3 al existir condiciones de baja precipitación como en el escenario 11; y disminuye en un

factor de 4.1 en condiciones de precipitaciones fuertes, como las de los meses de abril, como en el escenario 12.

Se puede determinar las siguientes expresiones del modelo hidrogeológico evaluado en función del tiempo en la zona de riesgo 4 en la Estación Reductora, bajo las condiciones previamente mencionadas.

Tabla 38.

*Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 4, Estación Reductora, en función del tiempo.*

<b>En condiciones de baja precipitación</b>	<b>En condiciones de alta precipitación</b>
$T_s = T_m \times 3.0$	$T_p = T_m \div 4.1$
Donde:	Donde:
Ts= Tiempo en condiciones de baja precipitación (días)	Tp= Tiempo en condiciones de alta precipitación (días)
Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)	Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)

Finalmente, en cuanto en cuanto al área de la Estación de Bombeo, situación similar ocurre en relación al tiempo en que las partículas de una posible contaminación tardan en llegar a su punto receptor que es la base del nivel acuífero superior, en dirección Este, con los escenarios 10, 11 y 12. Por un lado, en el Escenario 11 con la condición de recarga de precipitación baja en verano, el tiempo resultante es de 9 años, lo que equivale a 3355 días; mientras que con la condición de recarga de precipitación media del escenario 12, el tiempo baja a 4 años, lo que significa 1543 días. Siguiendo esta relación, producto de una recarga máxima de precipitación en el escenario 10, el tiempo baja aún más a 2 años, lo que es igual a 609 días.



En términos porcentuales, existe una disminución de tiempo del 54% entre el escenario 11 y 12; y del 82% entre el escenario 11 y 10. Esto representa que, de haber una contaminación en esta área, asumiendo una precipitación media anual como referencia de recarga, el tiempo en que la misma se mueve, específicamente por advección, incrementa en un factor de 2.2 al existir condiciones de baja precipitación como en el escenario 11; y disminuye en un factor de 2.5 en condiciones de precipitaciones fuertes, como las de los meses de abril, como es el caso del escenario 12.

Se puede, por tanto, determinar las siguientes expresiones del modelo hidrogeológico evaluado en función del tiempo en la zona de riesgo 4 en la Estación de Bombeo, bajo las condiciones previamente mencionadas.

Tabla 39.

*Expresiones resultantes de la evaluación del modelo hidrogeológico en la Zona 4, Estación de Bombeo, en función del tiempo.*

<b>En condiciones de baja precipitación</b>	<b>En condiciones de alta precipitación</b>
$T_s = T_m \times 2.2$	$T_p = T_m \div 2.5$
Donde:	Donde:
Ts= Tiempo en condiciones de baja precipitación (días)	Tp= Tiempo en condiciones de alta precipitación (días)
Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)	Tm= Tiempo en condiciones de precipitación media (días)

## 5.6. Análisis estadístico

A fin de determinar la relación que existen entre los parámetros hidrogeológicos del modelo que en teoría siguen una distribución normal: cargas hidráulicas iniciales y conductividad hidráulica horizontal; y que influyen en las cargas

hidráulicas resultantes del modelo y por tanto en la dirección del flujo, vectores de velocidad y tiempos, se muestra a continuación los análisis estadísticos realizados en el software de análisis estadístico R-Studio mediante la prueba de Shapiro – Wilk, para determinar si cada una de las variables en efecto sigue una distribución normal; y mediante de la prueba de Pearson's, para determinar la correlación existente entre por un lado, las cargas hidráulicas iniciales (insertadas en el modelo) y las cargas hidráulicas resultantes (calculadas por el modelo) y por otro lado, entre la conductividad hidráulica horizontal y las cargas hidráulicas resultantes del modelo. Para este análisis estadístico, se consideraron únicamente los valores de la capa 1, que representa al nivel acuífero superior, para todas las variables y pruebas en razón de que, como se mencionó anteriormente, esta nivel acuífero es el que presenta mayor heterogeneidad en sus datos debido a que es un nivel multicapa y también el nivel con mayor espesor modelado, considerando que en la sección anterior de análisis de los resultados de los escenarios de modelamiento, se consideró estrictamente a este nivel.

#### **5.6.1. Análisis de distribución normal**

Este análisis fue realizado mediante el software R-Studio utilizando la prueba de Shapiro – Wilk, que indica si un grupo de datos sigue una distribución normal. En este sentido, se importaron los datos de los parámetros de cargas hidráulicas iniciales, conductividad hidráulica horizontal y cargas hidráulicas resultantes, en formato CSV (comma separated values por sus siglas in inglés) al software R-Studio y se obtuvo los resultados que se indican a continuación.

Para analizar estos resultados, se consideró como hipótesis nula que los datos provienen de una distribución normal, con un valor de significancia de p-value igual a 0.05.

En primera instancia, en cuanto a las cargas iniciales que fueron insertadas para correr el modelo hidrogeológico en el software Processing Modflow 5.3, el resultado de la prueba de Shapiro – Wilk, como se indica a continuación en la Figura 45, muestra que el valor de p-value es mayor al valor al valor de

significancia de 0.05, por lo que no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los datos de las cargas hidráulicas iniciales sí responden a una distribución normal.

```
Shapiro-Wilk normality test
data: data5[c(1:900), ]
W = 0.99777, p-value = 0.2713
```

Figura 45. *Prueba de Shapiro – Wilk para los datos de carga hidráulica inicial.*

Por otro lado, en cuanto a la conductividad hidráulica horizontal, el resultado de la prueba de Shapiro – Wilk, como se muestra a continuación en la Figura 46, indica que el valor de p-value es mayor al valor de significancia de 0.05, por lo que no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los datos de la conductividad hidráulica horizontal sí responden a una distribución normal.

```
Shapiro-wilk normality test
data: data6[c(1:900), ]
W = 0.99723, p-value = 0.1265
```

Figura 46. *Prueba de Shapiro – Wilk para los datos de conductividad hidráulica horizontal.*

Finalmente, en relación a los datos de las cargas hidráulicas resultantes del modelo, el análisis de resultados a través de la prueba de Shapiro – Wilk, como señala a continuación la Figura 47, muestra que el valor de p-value es mayor al valor de significancia de 0.05, por lo que no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los datos de la conductividad hidráulica horizontal sí responden a una distribución normal.

```

Shapiro-Wilk normality test
data:  data4[c(1:900), ]
W = 0.99851, p-value = 0.6502

```

*Figura 47.* Prueba de Shapiro – Wilk para los datos de carga hidráulica resultante o final.

### 5.6.2. Análisis de correlación

Este análisis fue realizado mediante el software R-Studio utilizando la prueba de correlación de Pearson's, que se utiliza cuando los datos siguen una distribución normal y sirve para comprobar si dos variables presentan una relación lineal entre sí, es decir, si la variable dependiente cambia de manera lineal en función a la variable independiente.

Para este propósito, se importaron los datos de los parámetros de cargas hidráulicas iniciales, conductividad hidráulica horizontal y cargas hidráulicas resultantes, en formato CSV (comma separated values por sus siglas in inglés) al software R-Studio y se obtuvo los resultados que se indican a continuación.

El análisis de la prueba de Person's fue efectuado considerando el valor de  $r$  (cor). Si  $r < 0$ , existe una correlación negativa, es decir, las dos variables se relacionan en sentido inverso. Por otro lado, si  $r > 0$ , existe una correlación positiva, lo que significa que las dos variables analizadas se relacionan de manera lineal y directa. Mientras más alto sea este valor y más cercano esté a 1, significa que las variables están relacionadas de manera lineal casi perfecta (siendo 1 el valor de correlación positiva perfecta).

Además, también se consideró si el valor resultante de  $r$  (cor) es positivo o negativo en torno a la dirección. Si las dos variables tienen a crecer simultáneamente, el coeficiente es positivo, mientras que si una variable tiende a crecer y la otra a decrecer, el coeficiente es negativo.

Finalmente, también se consideró el valor de significancia de p-value equivalente a 0.05. Si el valor obtenido de p-value es menor o igual al valor de significancia, se concluye que la correlación es estadísticamente significativa y diferente de 0; mientras que si el valor de p-value es mayor al valor de significancia, la correlación no es estadísticamente significativa.

Considerando lo anteriormente expuesto, en cuanto a la correlación entre las cargas hidráulicas iniciales y las cargas hidráulicas finales resultantes del modelo en la primera capa, a continuación, la Figura 48 muestra los resultados de este análisis.

```
Pearson's product-moment correlation
data: data5[c(1:900), ] and data4[c(1:900), ]
t = 9.0287, df = 898, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.2274215 0.3472834
sample estimates:
      cor
0.2884823
```

*Figura 48.* Correlación de Pearson's entre las cargas hidráulicas iniciales y las cargas hidráulicas finales resultantes del modelo en la primera capa.

Se puede observar que el valor de  $r$  (cor) es de 0.2884823, que indica que existe una débil correlación lineal entre estas variables, pero la misma es positiva. El valor de p-value confirma que de hecho existe una correlación estadísticamente significativa entre estas variables y que la misma es diferente de 0.

Por otro lado, en relación a la correlación entre los valores de conductividad hidráulica horizontal y las cargas hidráulicas finales resultantes del modelo en la primera capa, a continuación, la Figura 49 muestra los resultados de este análisis.

```

Pearson's product-moment correlation

data: data6[c(1:900), ] and data4[c(1:900), ]
t = -1.7604, df = 898, p-value = 0.07867
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.123520508  0.006727964
sample estimates:
      cor
-0.05864585

```

*Figura 49.* Correlación de Pearson's entre la conductividad hidráulica horizontal y las cargas hidráulicas finales resultantes del modelo en la primera capa.

Se puede observar que el valor de  $r$  ( $cor$ ) es de  $-0.05864586$ , que denota que existe una leve correlación negativa, es decir, las variables conductividad hidráulica horizontal y cargas hidráulicas resultantes, se relacionan en sentido inverso. El valor de  $p$ -value indica que no existe una correlación estadísticamente significativa entre estas variables, al ser menor que el valor de significancia de  $0.05$ .

### 5.7. Análisis de implementación de pozos de remediación

Con el objetivo de plantear recomendaciones de remediación ante los resultados de una posible contaminación en los escenarios anteriormente expuestos, se procede a realizar un análisis en torno a la opción de implementar pozos de remediación y utilizar el método denominado "Bombeo y Tratamiento" para aguas subterráneas en las áreas que, acorde a los resultados obtenidos, resultan más críticas. Estas áreas son: La Piscina API, Islas de Carga, Planta de Jet: bombas de recepción de Jet, Filtros micrónicos de Jet y bombas de mezclas de la gasolina Extra; y entre los tanques de almacenamiento de Jet Fuel TB 1018, TB 1019 y TB 1017, tanque de almacenamiento TB 1007, tanque de almacenamiento TB 1014 y tanque de almacenamiento TB 1020.

Estas áreas han sido consideradas como las más críticas ante un posible evento de derrame y contaminación de aguas subterráneas debido a que las partículas de una posible contaminación se dirigen hacia el Este y Noreste y llegan en

menos de un año en la mayoría de los casos al río de la Quebrada Sin Nombre que colinda con el Terminal de Productos Limpios El Beaterio en el extremo Este. Este cuerpo hídrico fluye en dirección sureste y desemboca, finalmente, en la Quebrada del Río Machángara, cruzando por los barrios vecinos al Terminal: San Blas I, El Conde I, Carlos EF Mendez, Sin Nombre, y Salvador Allende. En este sentido, el impacto ambiental que se pudiere generar de una posible contaminación de las aguas subterráneas en las áreas mencionadas previamente dentro del Terminal de Productos Limpios El Beaterio, afectaría no solamente a la naturaleza y la ecología del cuerpo hídrico, sino también posiblemente a las poblaciones que habitan en estos barrios.

#### **5.7.1. Evaluación del método *Bombeo y Tratamiento* mediante Processing Modflow 5.3**

En análisis realizado para implementar pozos de remediación en las áreas críticas mencionadas mediante el software Processing Modflow 5.3, se realizó incorporando el paquete “Well” al modelo hidrogeológico. Para este fin, se consideró el valor de recarga de una precipitación media equivalente a la media del año 2016, que es  $4.48 \text{ E-}08 \text{ m/s}$ .

La metodología de Bombeo y Tratamiento consiste en bombear agua subterránea hacia la superficie a través de bombas sumergibles y pozos para posteriormente tratar la misma mediante mecanismos ex – situ adecuados a las propiedades físicas y químicas de estas aguas. Además, esta metodología también se emplea para contener la pluma de contaminación debido al cono de abatimiento que se forma en las cargas hidráulicas producto del efecto de succión de la bomba del pozo (EPA, 2012). Es por estas razones que se escogió a esta metodología como recomendación de tratamiento y también porque en el proceso de construcción de los pozos, se puede obtener información hidrogeológica como un perfil litroestratigráfico, calidad de aguas y niveles piezométricos de los acuíferos en el extremo Este del Terminal y de este modo evaluar si en efecto el flujo de aguas subterráneas tiene una dirección Oeste – Este, como indica la bibliografía y los resultados del presente estudio.

El tiempo de tratamiento de las aguas subterráneas mediante este método depende de las concentraciones de la contaminación, de la magnitud de la pluma de contaminación, de la velocidad de flujo del agua subterránea y del mecanismo que se utilice para remediar estas aguas una vez extraídas hacia la superficie.

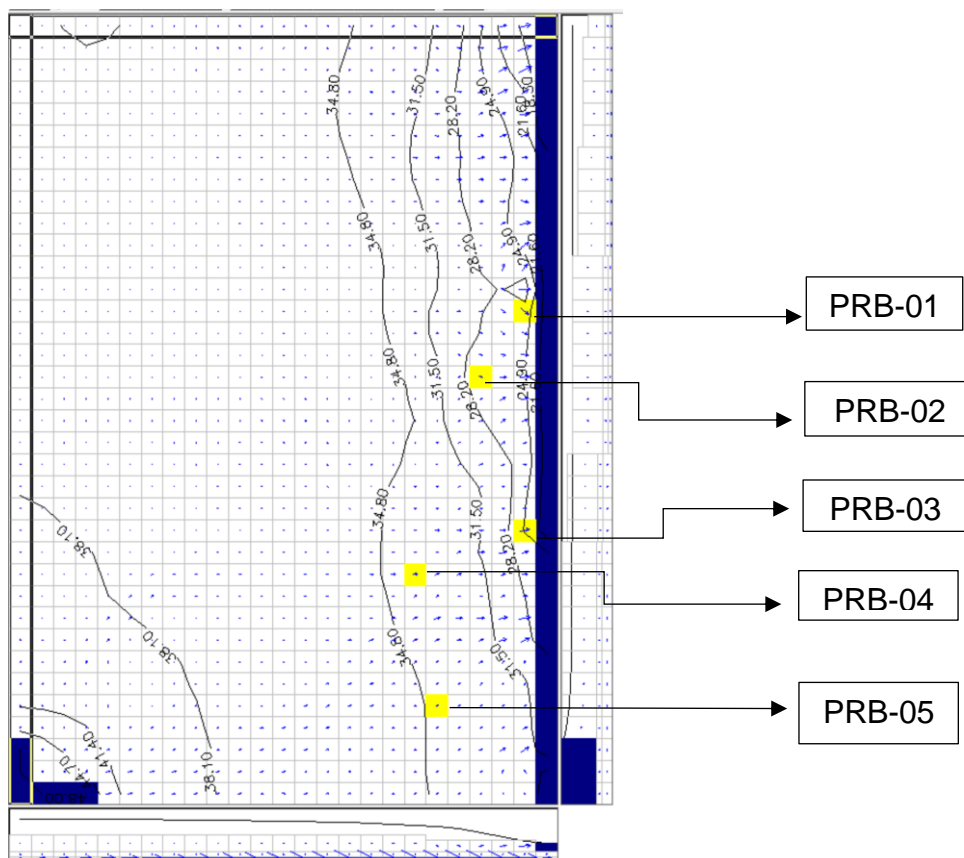
A continuación, la Tabla 40 muestra la configuración del sistema Bombeo y Tratamiento evaluado en el resultado del modelo hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio mediante el software Processing Modflow 5.3.

Tabla 40.  
*Configuración del sistema Bombeo y Tratamiento*

Pozo	Zona de riesgo	Área	Coordenadas UTM		Cota (msnm)	Profundidad (m)	Caudal (L/min)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	PSI	Diámetro (pulgadas)	Bomba
			Este	Norte							
PRB-01	Zona 1	Piscina API	773.966,8255	9.964.528,6685	2943	16	4.9	0.00008	5-120	3.6	AP4+B
PRB-02	Zona 1	Islas de Carga	773.895,9758	9.964.453,1151	2950	16	4.9	0.00008	5-120	3.6	AP4+B
PRB-03	Zona 2	Planta de Jet y tanques	773.956,8301	9.964.335,2283	2953	21	14.7	0.00025	5-120	3.6	AP4+B
PRB-04	Zona 3	TB 1007 y TB 1014	773.850,1146	9.964.258,499	2961	26	19.6	0.0003	5-120	3.6	AP4+B
PRB-05	Zona 3	TB 1020	773.883,9225	9.964.154,7233	2962	29	4.9	0.00008	5-120	3.6	AP4+B

A partir de la Tabla 40, fue posible insertar en el modelo del programa Processing Modflow 5.3 los 5 pozos del sistema Bombeo y Tratamiento anteriormente mencionado, tal como muestra a continuación la Figura 50. Los valores de caudal fueron asumidos considerando trabajos anteriores de esta naturaleza en otras instalaciones operativas de EP PETROECUADOR en las que se implementó este mismo sistema de tratamiento (PETROECUADOR, 2017).





*Figura 50.* Pozos del sistema Bombeo y Tratamiento en el modelo hidrogeológico. Se muestran las cargas hidráulicas y vectores de velocidad resultantes una vez insertados los pozos.

Como se observa en la Figura 50, las cargas hidráulicas se alteraron en torno al radio de influencia de los pozos, haciendo que los vectores de velocidad cercanos a los pozos se dirijan hacia los mismos. A fin de evaluar el funcionamiento de los pozos con los caudales de bombeo establecidos en la Tabla 40, se realizó simulaciones de partículas de una posible contaminación en las mismas áreas evaluadas anteriormente sin la existencia de los pozos. La Figura 51 muestra los resultados de dicha evaluación.

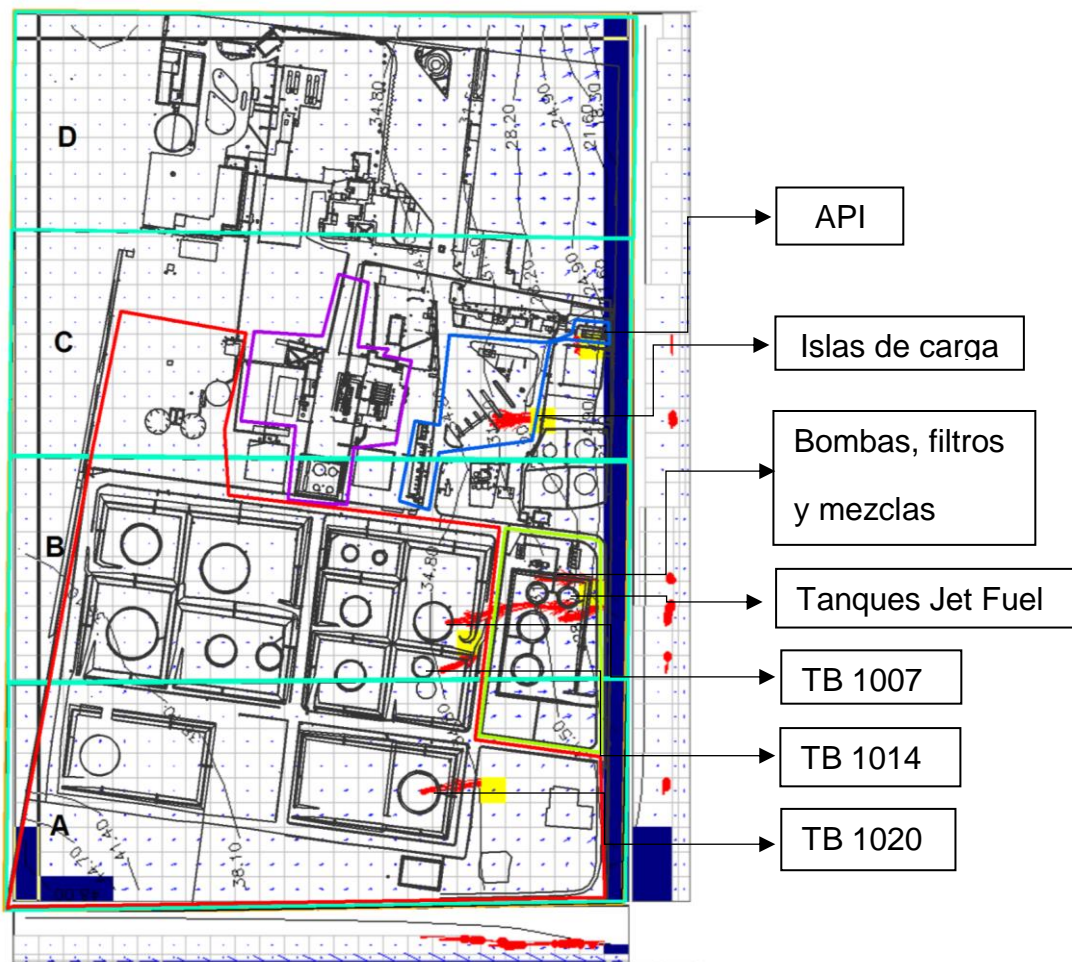


Figura 51. Modelo hidrogeológico del Terminal de Productos Limpios El Beaterio evaluado con el sistema de tratamiento Bombeo y Tratamiento.

Como muestra la Figura 51, absolutamente todas las partículas simuladas de posibles contaminaciones a las aguas subterráneas, específicamente en el nivel acuífero superior, son captadas por cada uno de los 5 pozos de monitoreo insertados en el modelo. Se puede observar que parte de las partículas de contaminación del tanque TB 1007 son captadas por el pozo PRB-04 y la mayor parte por el pozo PRB-03. En todos los casos, las direcciones de flujo son hacia el Este y se evita que las partículas de contaminación, siguiendo esta dirección, lleguen al río que cruza por la Quebrada Sin Nombre, por lo que se comprueba la efectividad de este sistema de tratamiento para el estudio en cuestión. En los Anexos 2, 3 y 4 se puede observar el diseño de ingeniería básica de los pozos,

el mapa georreferenciado de la ubicación de los pozos y el presupuesto referencial requerido para la implementación de este sistema de tratamiento.

### **5.7.2. Especificaciones del tratamiento ex – situ de aguas subterráneas**

Una vez que las aguas subterráneas contaminadas fueron bombeadas a la superficie, conforme se explicó anteriormente, existen algunos métodos de tratamiento que permiten remediar las mismas e incluso su posible reinyección al acuífero. Para el caso de este estudio, se detalla a continuación el método de remediación ex – situ que se considera que se acopla de una manera técnica y factible a la realidad del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Normalmente, el agua subterránea bombeada es almacenada en un tanque receptor y posteriormente tratada en uno o varios tanques mediante procesos de aireación y procesos químicos. No obstante, considerando que en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio ya existe actualmente un sistema de tratamiento de aguas contaminadas en el área asignada al departamento de Restauración Ambiental (RAM) que funciona de una manera eficaz para disminuir concentraciones de DQO de más de 2000 mg/l, se considera que sería posible el tratamiento de las aguas subterráneas bombeadas en este sistema. A continuación, la Figura 52 muestra el diagrama de procesos del tratamiento ex – situ en mención.

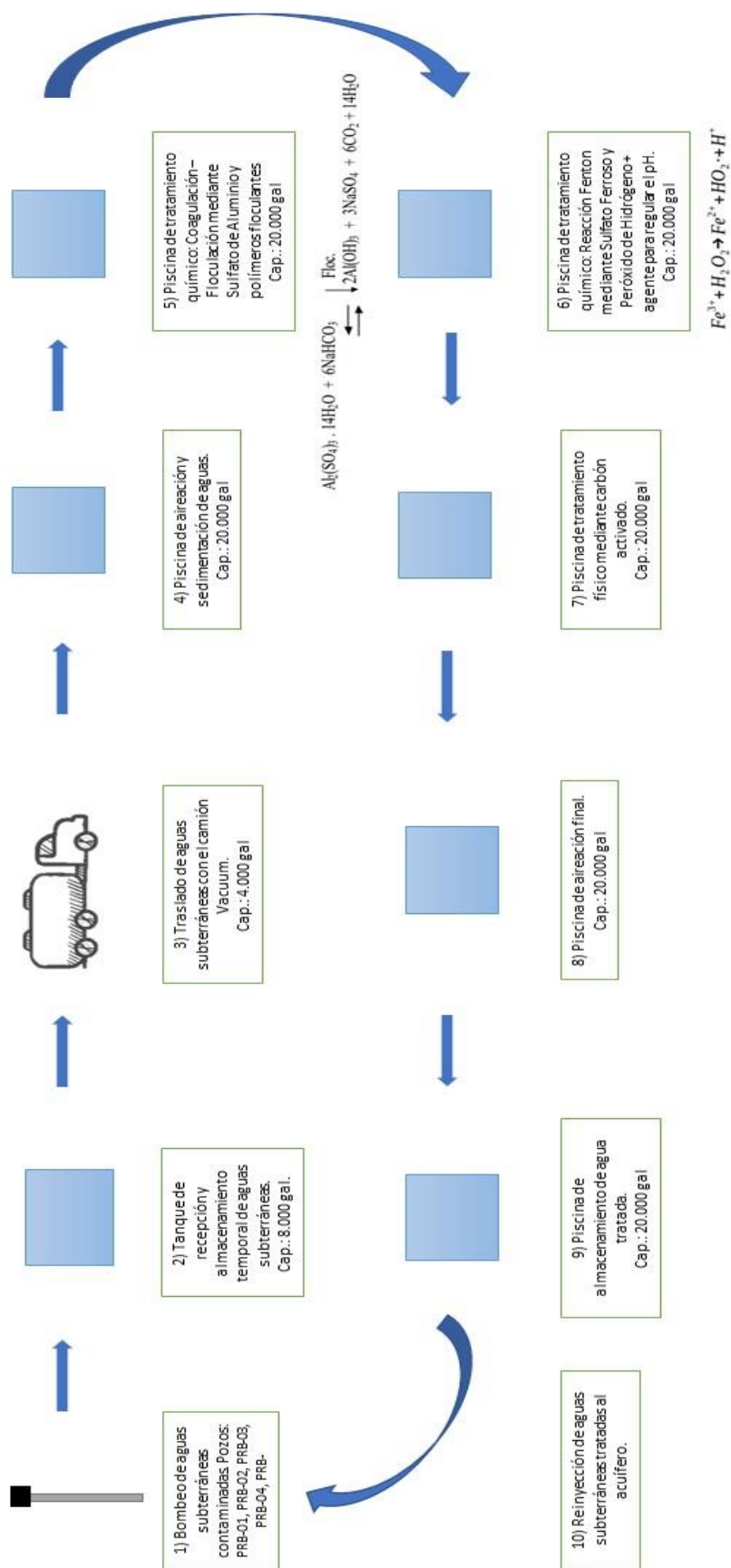


Figura 52. Diagrama de procesos general del sistema de Bombeo y Tratamiento Recomendado para el Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

En relación con el diagrama de procesos general que muestra la Figura 52, se considera que el tiempo que demora el tratamiento ex – situ, en base a visitas de campo del sistema de tratamiento de RAM, es entre dos a tres semanas, dependiendo de las concentraciones de contaminación de las aguas subterráneas y de la disponibilidad de volumen en las piscinas de tratamiento, pues en las mismas se tratan actualmente aguas contaminadas con productos limpios y lodos de fondos de tanque.

Es importante destacar que no se tendrá un caudal constante de entrada de aguas subterráneas contaminadas al sistema de Tratamiento y Bombeo mencionado, sino que el mismo únicamente se aplicará en los casos en que se produzca una contaminación a las aguas subterráneas que no haya podido ser contenida en su totalidad de manera inmediata a través de métodos mecánicos y superficiales.

### **5.7.3. Análisis de otros métodos de tratamiento**

Considerando las características hidrogeológicas del sitio de estudio, otra metodología que se plantea como factible a ser utilizada en el caso de producirse una contaminación a las aguas subterránea es el uso de Barreras reactivas permeables. El reciente desarrollo de este método de remediación presenta una alternativa potencialmente viable y mejor que la clásica metodología de Bombeo y Tratamiento.

Las barreras reactivas permeables son básicamente muros o paredes que se construyen por debajo de la superficie para limitar el flujo de aguas subterráneas contaminadas o bien para eliminar por completo la contaminación de las mismas. Para este efecto, el material de las barreras es permeable, es decir, contiene poros que permite el flujo de las aguas subterráneas a su través. En la pared existen materiales reactivos que pueden ser de distinto tipo, dependiendo del tipo de contaminación, y tienen la función de atrapar por adsorción y/o absorción las partículas químicas contaminantes o en su defecto transformarlas, por medio de agentes reactivos como peróxido de hidrógeno o Fenton, en sustancias químicas inofensivas para el ambiente.

Este método de remediación es utilizable únicamente para tratar la pluma de contaminación de agua subterránea, mas no para la fuente de dicha contaminación y existen dos tipos principales de barreras reactivas permeables: Paredes en forma de embudo y zanja continua.

El primero de estos se utiliza para plumas de contaminación en acuíferos heterogéneos, y su finalidad es conducir de manera controlada el flujo de agua subterránea hacia célula reactiva.

Por otro lado, el segundo tipo de barrera reactiva permeable es utilizado en situaciones en las que la pluma de contaminación se encuentra en un acuífero homogéneo, por lo que el flujo de la pluma de contaminación se dirige libremente, sin mayor complejidad y de manera natural por gradiente hidráulico, hacia la célula reactiva.

Considerando las propiedades heterogéneas del acuífero superficial que se encuentra en el Terminal de Productos El Beaterio, se recomienda que el método de barrera reactiva permeable con paredes en forma de embudo resultaría eficaz, y debería construirse una barrera reactiva en cada una de las áreas críticas con riesgo de derrame y contaminación al río de la Quebrada Sin Nombre, que han sido determinadas en el modelo hidrogeológico evaluado; de acuerdo a esto, se necesitaría un total de siete barreras.

Las principales ventajas de este método, frente al de Bombeo y Tratamiento Convencional, son que carecen de partes móviles, equipamiento y ruido. Presentan bajos costos de operación y mantenimiento por una menor utilización de energía. No existe exposición a las personas y al ambiente de los reactivos presentes en las barreras. Además, no altera en gran medida el flujo de agua subterránea.

#### **5.7.4. Parámetros de calidad de agua subterránea a evaluar**

Considerando la normativa legal vigente que regula al sector hidrocarburífero en materia ambiental, el Reglamento Ambiental de Actividades Hidrocarburíferas del Ecuador (RAOHE), que tiene carácter legal de Decreto Ejecutivo (D.E. 1215), establece los siguientes parámetros como obligatorios a ser muestreados en la Tabla 4b. Estos parámetros deberán ser muestreados durante todo el proceso de remediación independientemente de cuál sea este. Es decir, es necesario monitorear concentraciones iniciales, concentraciones durante el tratamiento y concentraciones finales, a fin de garantizar la eficacia del método y que las aguas subterráneas puedan ser usadas en otro fin, como riego, o en su defecto, reinyectadas al acuífero.

Tabla 41.  
Parámetros de muestra de calidad de aguas.

Tipo de análisis	Parámetro	Unidad	Método	Norma (RAOHE D.E 1215)
Análisis de Campo	pH	N/A	SM/4500-H	6<pH<8
	Conductividad eléctrica	μS/cm	EPA 9050A	<170
	Oxígeno Disuelto	ppm	EPA 160.1	N/A
	Sólidos Totales Disueltos	mg/L	EPA 160.1	N/A
	Temperatura	°C	EPA 9050A	N/A
Análisis de Laboratorio	pH	N/A	SM/4500-H	6<pH<8
	Conductividad eléctrica	μS/cm	EPA 9050A	<170
	Hidrocarburos Totales de Petróleo (C8-C40)	mg/kg	EPA 8260D	< 0.5
	Benceno (a) pireno	mg/kg	EPA 8260D	< 0.0003
	Benceno (b) fluoranteno	mg/kg	EPA 8260D	< 0.0003
	Benceno (g, h, i) perileno	mg/kg	EPA 8260D	< 0.0003
	Benceno (k) fluoranteno	mg/kg	EPA 8260D	< 0.0003
	Fluoranteno	mg/kg	EPA 8260D	< 0.0003
	Indeno (1, 2, 3, c, d) pireno	mg/kg	EPA 8260D	< 0.0003

### 5.8. Análisis de la implementación de piezómetros de monitoreo de aguas subterráneas

Partiendo del hecho de que a partir del estudio hidrogeológico realizado por TERRAHIDRO en el año 2016 con título: *Implementación de Pozos de Monitoreo de Aguas Subterráneas en las Plataformas de Remediación*. Contrato No.2016063-Cci-Zno-2016, fue posible la evaluación del modelo hidrogeológico que se presenta en este trabajo, es importante mencionar, a manera de

recomendación técnica, que sería importante la ejecución de un segundo estudio hidrogeológico que abarque no solamente el área de las Plataformas de Remediación Ambiental, como fue el caso del estudio de TERRAHIDRO que estuvo compuesto por cuatro piezómetros, sino que contemple la perforación e implementación de piezómetros en todas las áreas operativas del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

El objetivo principal de realizar el estudio hidrogeológico mencionado sería: Determinar las propiedades hidrogeológicas de las áreas operativas del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. De este objetivo principal, se derivan los siguientes objetivos secundarios, como: analizar la calidad de aguas subterráneas en cada uno de los pozos de monitoreo, identificar el perfil estratigráfico de cada pozo de monitoreo y evaluar un modelo hidrogeológico de transporte por advección, dispersión y difusión en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

Este último objetivo secundario mencionado, se alinea con los resultados presentados en el presente trabajo, pues se podrá, a partir de la información hidrogeológica inicial ya levantada y generada, perfeccionar el modelo hidrogeológico y así mismo, incorporar transporte de concentraciones de contaminación, en el caso de que los piezómetros que se proponen determinen la existencia de la misma.

Considerando lo anterior, se ha propuesto la implementación de 11 piezómetros de monitoreo de aguas subterráneas, en base a inspecciones realizadas en campo de las áreas operativas y zonas de riesgo y a la distribución horizontal de los cuatro piezómetros ya existentes en la zona de las Plataformas de Restauración Ambiental. En base a esto, y a criterio técnico, los 11 piezómetros han sido propuestos a fin de que cubran la información hidrogeológica que se requiere de todas las áreas operativas y las cuatro zonas de mayor riesgo derrame y de ese modo, evaluar a futuro un modelo hidrogeológico más completo, como se mencionó anteriormente.

A continuación, la Tabla 42 muestra la lista de los 11 piezómetros propuestos, junto con su ubicación geográfica en el sistema de coordenadas UTM WGS 84 Zona 17 Sur.



Tabla 42. Ubicación geográfica de los piezómetros de monitoreo de aguas subterráneas propuestos para el Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

TERMINAL DE PRODUCTOS LIMPIOS EL BEATERIO			
Piezómetros de monitoreo de aguas subterráneas propuestos			
PIEZÓMETRO	COORDENADAS UTM		Profundidad* (m)
	Este (X)	Norte (Y)	
PMB-5	773.629,9808	9.964.226,5725	40
PMB-6	773.796,0248	9.964.207,4506	40
PMB-7	773.920,0521	9.964.203,6567	40
PMB-8	773.683,7894	9.964.393,1188	40
PMB-9	773.845,4784	9.964.371,5542	40
PMB-10	773.962,4049	9.964.375,3982	40
PMB-11	773.631,562	9.964.510,3629	40
PMB-12	773.818,0665	9.964.487,3997	40
PMB-13	773.929,137	9.964.479,1619	40
PMB-14	773.734,0456	9.964.641,2323	40
PMB-15	773.970,0781	9.964.624,3929	40

Nota: \* Las profundidades de todos los piezómetros han sido estimadas de 40 metros debido a que, en base al perfil litoestratigráfico determinado por TERRAHIDRO, con esta profundidad se lograrían determinar las propiedades hidrogeológicas en los tres niveles expuestos en este estudio: acuífero superior, estrato medio confinante y acuífero inferior. No obstante, para determinar las profundidades exactas a perforar para cada uno de los piezómetros propuestos, es necesario realizar estudios de geofísica, como sondeos eléctricos verticales o perfiles geoeléctricos en 2D.

Tanto las profundidades, como la ubicación geográfica de los 11 piezómetros propuestos, pueden cambiar en base a estudios de geofísica, pues a partir de los mismos y su interpretación técnica, se puede determinar los parámetros hidrogeológicos, discontinuidades geológicas, anomalías geofísicas, entre otros. (TERRAHIDRO, 2016, p. 12).

A continuación, la Figura 53 muestra el mapa de la ubicación de los piezómetros propuestos, bajo las consideraciones previamente realizadas, junto con la ubicación de los piezómetros ya existentes y los pozos de remediación propuestos en las instalaciones del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

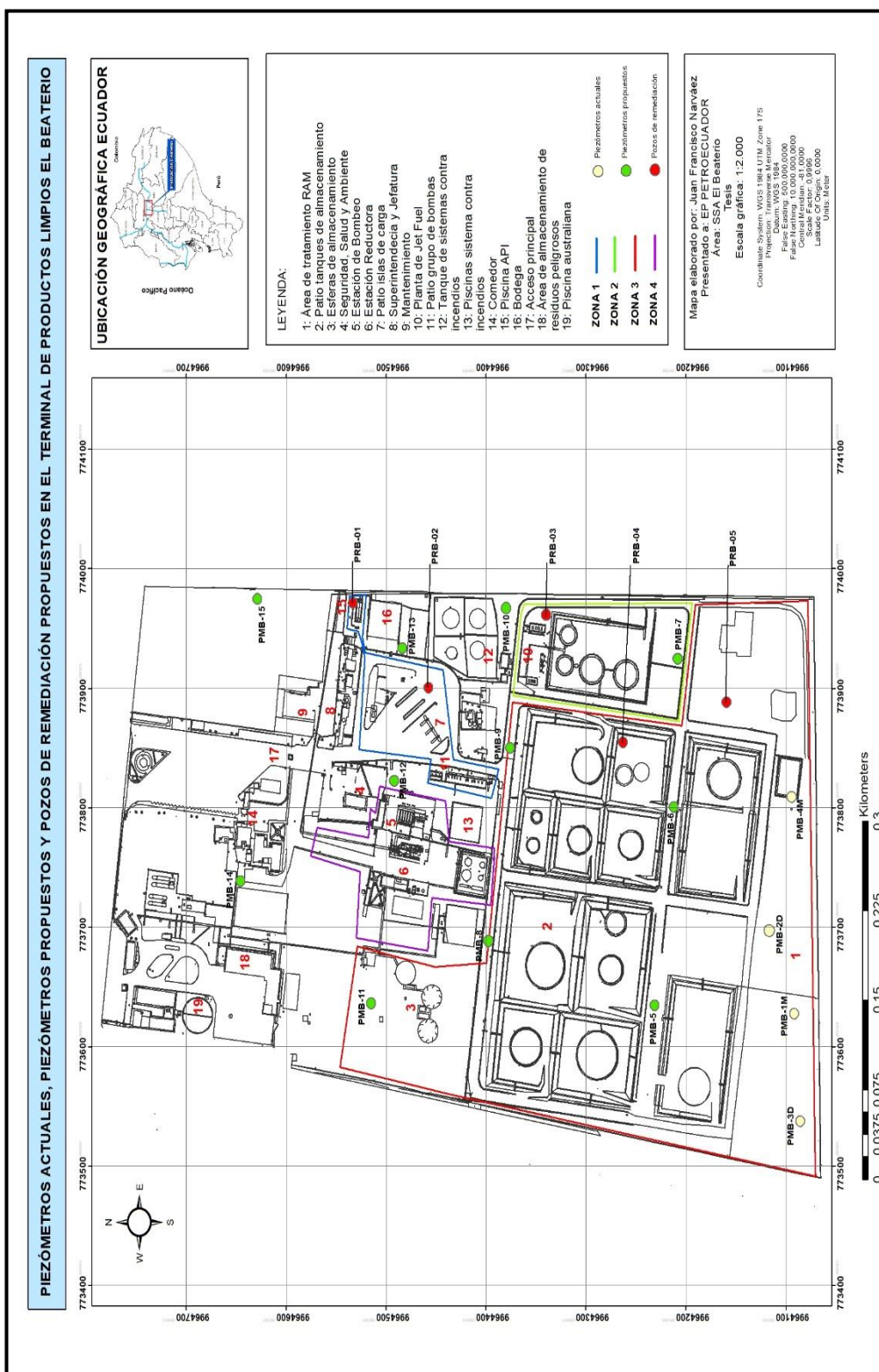


Figura 53. Mapa de la ubicación geográfica de los piezómetros actuales, piezómetros propuestos y pozos de remediación propuestos en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

La representación de la zona de estudio en un mapa georreferenciado mediante el Software QGIS Las Palmas 2.18.1, permitió establecer, en base a información secundaria y trabajos de campo, la ubicación de las diferentes áreas de interés con una escala gráfica de 1:2500, en concordancia con las necesidades del estudio. El área obtenida para las instalaciones del terminal fue de 283000 m<sup>2</sup>, mientras que el área del terminal representada en una imagen aérea del año 2016 proporcionada por EP PETROECUADOR es de 282000 m<sup>2</sup>, existiendo una diferencia de 1000 m<sup>2</sup> que no se considera significativa para los resultados obtenidos en este estudio, pues se comprobó que la discretización horizontal no es determinante para modificar los resultados predominantes de dirección de flujo, cargas hidráulicas y velocidades obtenidas en el modelo de Processing Modflow 5.3.

El modelo hidrogeológico conceptual que se generó para el Terminal de Productos Limpios El Beaterio permitió definir que existen dos niveles acuíferos, uno superior y otro inferior, además de un nivel que actúa como capa confinante ubicado entre los dos niveles acuíferos; resultados que concuerdan con la información secundaria consultada de la subcuenca del Sur de Quito.

El primer nivel corresponde al acuífero superior, conformado por capas de: materia orgánica, limo arenoso, turba y materiales arenosos. En el área de estudio, el nivel acuífero superior tiene un espesor medio de 23.60 metros y presenta una conductividad hidráulica horizontal en m/s, en sentido Oeste – Este de  $4.26 \times 10^{-5}$ ,  $4.11 \times 10^{-5}$ ,  $3.62 \times 10^{-5}$  y  $3.97 \times 10^{-5}$ . Por otro lado, los valores de conductividad hidráulica vertical, en m/s son:  $3.85 \times 10^{-6}$ ,  $3.41 \times 10^{-6}$ ,  $3.11 \times 10^{-6}$  y  $3.55 \times 10^{-6}$ . En cuanto a la porosidad efectiva, los valores obtenidos son: 0.41, 0.42, 0.43 y 0.43, en sentido Oeste – Este.

El nivel medio, denominado medio confinado, está conformado por una sola capa de limo plástico de un espesor general de 5 metros en todo el modelo del Terminal de Productos Limpios El Beaterio. La conductividad hidráulica horizontal de este nivel es de  $9.26 \times 10^{-7}$  m/s, mientras que la vertical es de  $9.26 \times 10^{-8}$  m/s y la porosidad efectiva de 0.46.

En cuanto al nivel inferior, denominado acuífero inferior, está conformado por una sola capa de arena limosa con granos gruesos. Los valores de conductividad hidráulica para este nivel son de  $5.2 \times 10^{-4}$  m/s y de  $5.2 \times 10^{-5}$  m/s, para la conductividad hidráulica horizontal y vertical respectivamente. La porosidad efectiva tiene un valor de 0.39. En base a estas características hidrogeológicas, se considera que este acuífero tiene mayor transmisividad y que el flujo y velocidad de aguas subterráneas en el mismo es mayor que en los dos niveles anteriores.

El modelo conceptual permitió representar gráficamente las dos condiciones de borde consideradas: el río de la “Quebrada Sin Nombre” y la zona de recarga del extremo Suroeste del Terminal, así como la discretización vertical del modelo en base a los niveles acuíferos.

La consideración de tomar al río de la “Quebrada Sin Nombre” como condición de borde, en base a su ubicación geográfica y a las características geológicas de las primeras capas del suelo, fue correcta toda vez que se comprobó, a través de inspecciones en campo, la coloración amarillenta y naranja del agua del río y del lecho del mismo, característico de las aguas subterráneas de este sector de la subcuenca del Sur de Quito por presentar alto contenido de hierro.

Así también, se concluye que la consideración de tomar al extremo Suroeste del Terminal como condición de borde de recarga es correcta en razón de que a través del estudio hidrogeológico de la consultora Terrahidro, se evidencia que el nivel piezométrico tiende a descender en sentido Oeste – Este, lo cual representa que las zonas de mayor carga hidráulica y de recarga están al Oeste, en las formaciones de los complejos geológicos Atacazo – Ninahuilca.

Acorde a la discretización vertical establecida en el modelo conceptual y a las condiciones de borde, se evaluó un modelo numérico en el software Processing Modflow 5.3 de flujo estacionario siguiendo un movimiento por advección. Se concluye que los resultados obtenidos en el modelo conceptual y numérico sí se asemejan a la realidad y guardan relación con lo que establece la información secundaria consultada, las observaciones de inspecciones en campo, resultados de estudios anteriores y al fundamento teórico que establece que la advección es el principal fenómeno que controla el movimiento de las aguas subterráneas en un medio poroso. En este sentido, el modelo numérico comprobó que el flujo de aguas subterráneas determinado en el modelo conceptual en dirección Este y Noreste es correcto y acorde a la hipótesis alternativa planteada.

Del modelo numérico, se concluye que la precipitación tiene un efecto directamente proporcional sobre la velocidad de flujo de las aguas subterráneas y también sobre las cargas hidráulicas. Esto demuestra que la precipitación produce un incremento en el gradiente hidráulico. En definitiva, estos efectos producen que, a mayor precipitación, menor tiempo de movimiento de posibles partículas de contaminación y a menor precipitación, mayor tiempo de movimiento de posibles partículas de contaminación en llegar a los diferentes puntos receptores.

Se concluye que, de existir presencia de partículas de contaminación en aguas subterráneas en áreas ubicadas al centro – oeste del Terminal, las mismas no llegan a la “Quebrada sin Nombre” en el horizonte de tiempo evaluado de un año y tienen como punto receptor la base del nivel acuífero superior, mientras que, de haber partículas de contaminación en áreas ubicadas al Este de El Beaterio, las mismas sí llegan a la “Quebrada Sin Nombre” en el horizonte de tiempo evaluado. Para ambos puntos receptores, el flujo es predominante hacia el Este y Noreste.

La característica de flujo mencionada anteriormente se cumple en las 4 zonas de riesgo evaluadas, no obstante, se concluye que bajo un escenario de lluvia máxima, en las zonas ubicadas al suroeste del Terminal los vectores de flujo se invierten debido a que la precipitación genera un incremento en la carga

hidráulica a valores superiores de los que se encuentran fijados como constantes en la zona de recarga.

Haciendo referencia a la “Quebrada Sin Nombre” como punto receptor, se concluye que las áreas en las que posibles partículas de contaminación tardan en llegar al río en menos de un año independientemente de las condiciones de precipitación son: Piscina API, área de la planta de Jet Fuel y tanques de almacenamiento TB 1018, TB 1019 y TB 1017.

Adicionalmente, se concluye que a este mismo punto receptor llegan posibles partículas de contaminación provenientes del tanque TB 1020 en menos de un año, únicamente bajo condiciones de precipitaciones máximas.

En cambio, se concluye que posibles partículas de contaminación de las áreas de islas de carga y tanques de almacenamiento TB 1014 y TB 1007 tardan más de un año en llegar al río de la “Quebrada Sin Nombre”, independientemente de las condiciones de precipitación.

Por otra parte, se concluye que únicamente bajo condiciones de máxima precipitación, posibles partículas de contaminación provenientes de los tanques de almacenamiento TB 1022, TB 1012, TB 1005, TB 1009, TB 1008, TB 1011, TB 1013, TB 1010, TB 1003, TB 1001, de las esferas de almacenamiento TB 1023, TB 1024 y TB 1025, de la Estación Reductora y sus tanque de almacenamiento; tardan menos de un año en llegar a la base del acuífero superior como punto receptor.

En cuanto a la Estación de Bombeo, se concluye que independientemente de la condición de lluvia evaluada, el tiempo en que posibles partículas de contaminación tardan en llegar a la base del nivel acuífero superior, es de más de un año.

En términos generales, sobre los doce escenarios de modelamiento evaluados, se concluye que los resultados de velocidad y tiempo movimiento de las aguas subterráneas pueden variar si se dispone de más información de entrada para el modelo, es decir, todos los datos hidrogeológicos requeridos para el modelo en

cada una de las cuatro zonas evaluadas y no únicamente en el área de Restauración Ambiental. No obstante, el presente modelo permitió llegar a la conclusión que independientemente del tipo de material geológico del suelo, la dirección predominante del flujo de agua subterránea no cambia y es gobernada por el gradiente hidráulico.

Por otro lado, del análisis estadístico realizado mediante la prueba de Shapiro – Wilk, es posible concluir que los parámetros cargas hidráulicas iniciales, conductividad hidráulica horizontal y cargas hidráulicas resultantes del modelo, siguen una distribución normal.

Adicionalmente, la prueba de correlación de Pearson's permitió aceptar la hipótesis alternativa que se planteó en este estudio, que dice que el agua subterránea se mueve de una zona de carga hidráulica mayor a una zona de carga hidráulica menor; pues demostró que aunque existe una correlación débil entre las cargas hidráulicas iniciales y las finales, la misma es estadísticamente significativa considerando un valor de p-value menor a 0.05. Esta correlación estadísticamente significativa no existió entre las conductividades hidráulicas horizontales y las cargas hidráulicas resultantes del modelo.

Por otra parte, se concluye que el modelo hidrogeológico evaluado es una herramienta útil de prevención ante emergencias de derrames, pues permite determinar posibles puntos receptores de partículas de contaminación y el tiempo de movimiento hasta llegar a los mismos.

Mediante el uso de esta herramienta es factible implementar medidas de prevención, tales como: mantenimiento a los diques de los tanques, esferas de almacenamiento, y canaletas de aguas lluvias del Terminal El Beaterio; reingeniería a las piscinas API y australiana y la ejecución del estudio de hidrogeología de los 11 piezómetros propuestos en las cuatro zonas de riesgo, mismo que permitirá incorporar más información hidrogeológica primaria al modelo evaluado en el presente trabajo, así como perfeccionar el mismo evaluando el movimiento de posibles o existentes partículas de contaminación (en el caso que los estudios muestren que las hay) por transporte y reacción y

comparar los resultados con los obtenidos en el presente trabajo que fueron determinados asumiendo un movimiento estacionario únicamente por advección.

Con base en el análisis de la implementación de pozos de remediación, se concluye que, para el caso de las áreas y tanques de almacenamiento que se encuentran en el extremo Este del Terminal: Piscina API, Islas de Carga, área de Jet incluido tanques, y los tanques de almacenamiento TB 1007, TB 1014 y TB 1020, el sistema de Bombeo y Tratamiento funciona de una manera eficaz, succionando las partículas simuladas de una posible contaminación en dirección Este y evitando que las mismas lleguen al río de la Quebrada Sin Nombre, mediante 5 pozos: PRB-01, PRB-02, PRB-03, PRB-04 y PRB 05, cada uno con un caudal de bombeo constante en litros por minuto de 4.9, 4.9, 14.7, 19.6 y 4.9, respectivamente.

## **6.2. Recomendaciones**

Es recomendable, para futuros escenarios de modelamiento del Terminal de Productos Limpios El Beaterio, realizar simulaciones considerando un flujo no estacionario y con transporte, a través del paquete de códigos de Modflow denominado MT3D, a fin de evaluar y comparar al mismo con el modelo presentado en el presente trabajo de flujo estacionario por advección y determinar si existe una diferencia en las cargas hidráulicas resultantes, vectores de velocidad y tiempos.

Se considera conveniente implementar el estudio hidrogeológico a través de pozos de monitoreo propuesto en el presente trabajo. Este estudio abarca todas las áreas operativas y las cuatro zonas de mayor riesgo de derrame del Terminal de Productos Limpios El Beaterio, resultando en implementar once pozos de monitoreo con el fin de, por un lado, tener información primaria de la hidrogeología del Terminal El Beaterio y corroborar los resultados de este estudio; y, por otro lado, implementar un programa de monitoreo constante de



aguas subterráneas, realizando análisis hidrogeológicos al menos de manera semestral.

Previo a la realización del estudio hidrogeológico anteriormente mencionado, se recomienda ejecutar estudios geofísicos a través de sondeos eléctricos verticales o perfiles geoeléctricos y correlacionar a los resultados de los mismos con la geología local, con el fin de definir con precisión, y de forma técnicamente sustentada, los sitios de perforación para cada uno de los piezómetros.

Además, se recomienda realizar un muestreo de suelos en todo el Terminal de Productos Limpios El Beaterio mediante un método de muestreo por malla en distribución sistemática regular. El muestreo debería ser realizado en una profundidad de hasta un metro en el extremo Oeste y de hasta 2 metros en el extremo Este, considerando los espesores de limo arenoso característicos de la primera capa del suelo en este lugar. El muestreo tendría como objetivo evaluar las condiciones actuales de la primera capa del suelo y a partir de los resultados, realizar un mapa representativo de contaminación, identificando las áreas sensibles más afectadas y relacionarlas con los resultados del presente trabajo de titulación, a fin de gestionar la implementación, en los casos que sea necesario, de medidas de remediación y tratamiento.

Con relación al punto anterior, se considera conveniente implementar el sistema de tratamiento Bombeo y Tratamiento planteado en este estudio, debido a que de ese modo se estaría actuando de una manera preventiva y correctiva. Preventiva, en el sentido de que los pozos podrían ser adecuados también como piezómetros de monitoreo; y correctiva en el sentido de que si de hecho se produce un derrame e infiltración de partículas de contaminación en el subsuelo, afectando a los niveles acuíferos, se pondrían en acción los pozos de remediación necesarios acorde al lugar del derrame.

Por otro lado, se recomienda realizar un estudio técnico de factibilidad y de ingeniería básica y de detalle para evaluar la eficiencia del método de barreras reactivas permeables y compararlo con el método de Bombeo y Tratamiento Planteado en este Estudio.

En cuanto a las recomendaciones de medidas de prevención ante posibles derrames que afecten a las aguas subterráneas del Terminal de Productos Limpios El Beaterio y con repercusiones a los barrios vecinos al mismo, se considera necesario realizar un mantenimiento total a los cubetos o diques de los tanques y esferas de almacenamiento mediante un reacondicionamiento y recubrimiento de los mismos con concreto de alta resistencia a fin de disminuir la probabilidad de infiltración de partículas de contaminación por grietas o ranuras que en la actualidad existen en absolutamente todos los tanques y esferas de almacenamiento. Además, es necesario mencionar que, en base a las inspecciones realizadas en cada una de las 4 zonas de riesgo, el tanque TB 1020 es el que presenta mayor deterioro en la estructura del dique de contención, mismo cuyo piso no está impermeabilizado, por lo que es importante tener mayor consideración al mantenimiento del dique de contención de este tanque de almacenamiento.

En este mismo sentido, como recomendación de carácter preventivo, se considera oportuno dar un mantenimiento adecuado y recubrimiento a todas las canaletas de aguas lluvias del Terminal de Productos Limpios El Beaterio, en especial las que se encuentran en las cuatro zonas de riesgo de derrame evaluadas.

Finalmente, también como método de prevención y remediación, se recomienda realizar una re-ingeniería a las piscinas API y Australiana, incrementando su capacidad de almacenamiento o en su defecto, diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales adecuado para la carga que produce diariamente el terminal en sus diferentes operaciones y considerando en el diseño eventos de lluvias máximas y mínimas, a fin de que el sistema de tratamiento funcione correctamente a lo largo de todo el año. El sistema de tratamiento que se recomienda, en este sentido, es un tratamiento primario de separación física tipo desbaste o desarenador, para evitar que elementos de gran tamaño intervengan en las siguientes fases de tratamiento. Posterior a esta fase, un tratamiento de separación física por densidades, seguido de un tratamiento secundario mediante reacción Fenton, que es un proceso de

oxidación fuerte a base de peróxido de hidrógeno y sulfato ferroso, y de un tratamiento final físico – químico de coagulación floculación mediante sulfato de aluminio y poliacrilamida, como floculante. Esta re-ingeniería tiene un efecto preventivo en el sentido de que se evitará posibles desbordamientos de las piscinas API y australiana debido a un caudal de entrada superior al del diseño inicial de estas facilidades.

## REFERENCIAS

- Álvarez, Y. (2009). *Suelos afectados por derrames de hidrocarburos: Alternativas de remediación en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio Petrocomercial*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Auditoría Ambiental, L. (2011). *Auditoría Ambiental de Cumplimiento y Actualización del PMA del Terminal de Productos Limpios El Beaterio*. Quito: EP PETROECUADIR.
- Collazo, M., & Montaña, J. (2012). *Manual de Agua Subterránea*. Montevideo: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
- EPA. (2012). *A Citizen's Guide to Pump and Treat*. (EPA, Ed.). Recuperado el 22 de Mayo de 2017 de Contaminated Site Clean-up Information (CLU-IN): [https://clu-in.org/download/Citizens/a\\_citizens\\_guide\\_to\\_pump\\_and\\_treat.pdf](https://clu-in.org/download/Citizens/a_citizens_guide_to_pump_and_treat.pdf)
- EPMAPS. (2016). *La Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento lidera proyecto interinstitucional para la protección de recursos hídricos subterráneos*. Quito. Recuperado el 10 de mayo de 2017 de [http://www.noticiasquito.gob.ec/index.php?module=Noticias&func=news\\_user\\_view&id=20297&umt=La%20EPMAPS%20lidera%20proyecto%20interinstitucional%20para%20la%20protecci%F3n%20de%20recursos%20h%EDdricos%20subterr%E1neos](http://www.noticiasquito.gob.ec/index.php?module=Noticias&func=news_user_view&id=20297&umt=La%20EPMAPS%20lidera%20proyecto%20interinstitucional%20para%20la%20protecci%F3n%20de%20recursos%20h%EDdricos%20subterr%E1neos)
- Espinel, L. (2012). *Estudio de los Efectos Troposféricos en la Precisión de Mediciones GPS en el Suroccidente Colombiano*. Recuperado el 01 de junio de 2017 de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7787/1/GPS.pdf>
- FAO. (2010). *Groundwater Governance: A Global Framework for Country Action*. Recuperado el 10 de abril de 2017 de [http://www.groundwatergovernance.org/fileadmin/user\\_upload/gwg/documents/GWG%20prodoc%20update%20\(4\).pdf](http://www.groundwatergovernance.org/fileadmin/user_upload/gwg/documents/GWG%20prodoc%20update%20(4).pdf)
- Ferrera-Cerato, R., Rojas-Avelizapa, N., Poggi-Varaldo, H., & Alarcón, A. &.-V. (2006). Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *Revista Latinoamericana Microbiol*, 179-187.

- Harbaugh, A., Banta, E., Hill, M., & Mc Donald, M. (2000). *Servicio Geológico de los Estados Unidos*. Obtenido de Modflow-2000, The US Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. Recuperado el 11 de marzo de 2017 de <https://pubs.usgs.gov/of/2000/0092/report.pdf>
- Harter, T. (2003). Basic Concepts of groundwater hydrology. *University of California Publication 8083*. Recuperado el 15 de abril de 2017 de <http://groundwater.ucdavis.edu/files/156562.pdf>
- INAMHI. (2010). *Información Estadística Meteorológica e Hidrológica*. Quito: INAMHI.
- KANTZAM. (2016). *Auditoría Ambiental de Cumplimiento del Terminal de Productos Limpios El Beaterio Periodo Febrero 2013 - Febrero 2015*. Quito: KANTZAM , Cía. Ltda.
- Silec. (2017). *Constitución de la República del Ecuador 2008*. Recuperado el 13 de marzo de 2017 de [http://www.silec.com.ec.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/WebTools/LexisFinder/DocumentVisualizer/DocumentVisualizer.aspx?id=PUBLICO-CONSTITUCION\\_DE\\_LA\\_REPUBLICA\\_DEL\\_ECUADOR&query=constituci%C3%B3n#l\\_DXDataRow0](http://www.silec.com.ec.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/WebTools/LexisFinder/DocumentVisualizer/DocumentVisualizer.aspx?id=PUBLICO-CONSTITUCION_DE_LA_REPUBLICA_DEL_ECUADOR&query=constituci%C3%B3n#l_DXDataRow0)
- Silec (2017). *Ley Orgánica de Recursos Hídricos Usos y Aprovechamiento del Agua*. Recuperado el 14 de marzo de 2017 de [http://www.silec.com.ec.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/WebTools/LexisFinder/DocumentVisualizer/DocumentVisualizer.aspx?id=AGROPEC-LEY\\_ORGANICA\\_DE\\_RECURSOS\\_HIDRICOS\\_USOS\\_Y\\_APROVECHAMIENTO\\_DEL\\_AGUA&query=Ley%20Org%C3%A1nica%20de%20Recursos%20H%C3%ADdricos%20Usos%20y%20Aprovechamiento%20del%20Agua#l\\_DXDataRow0](http://www.silec.com.ec.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/WebTools/LexisFinder/DocumentVisualizer/DocumentVisualizer.aspx?id=AGROPEC-LEY_ORGANICA_DE_RECURSOS_HIDRICOS_USOS_Y_APROVECHAMIENTO_DEL_AGUA&query=Ley%20Org%C3%A1nica%20de%20Recursos%20H%C3%ADdricos%20Usos%20y%20Aprovechamiento%20del%20Agua#l_DXDataRow0)
- Mordojovich, S. (2009). *Bombeo y Tratamiento como alternativa para la limpieza de acuíferos*. Recuperado el 25 de mayo de 2017 de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103444>
- OEA. (2004). *El recurso invisible Acuíferos transfronterizos: una oportunidad de cooperación internacional*. Recuperado el 15 de abril de 2017 de [https://www.oas.org/dsd/policy\\_series/3\\_spa.pdf](https://www.oas.org/dsd/policy_series/3_spa.pdf)
- Olea, R. (2009). *A practical Primer on Geostatistics*. USGS. Recuperado el 10 de junio de 2017 de <https://pubs.usgs.gov/of/2009/1103/ofr2009-1103-rev-jan2010.pdf>

- ONU. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Recuperado el 13 de marzo de 2017, de [www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/](http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/)
- Pascual, J., Sanz, J., & de Bustamante, I. (2013). *Modelos y bases de datos geospaciales para la evolución e inventario de los recursos hídricos*. Recuperado el 11 de abril de 2017 de [http://www.cpaisaje.org/geomatica\\_agua/Cuadernos%20de%20Geomatica\\_2.pdf](http://www.cpaisaje.org/geomatica_agua/Cuadernos%20de%20Geomatica_2.pdf)
- Peñafiel, L. (2009). *Geología y Análisis del Recurso Hídrico Subterráneo de la Subcuenca del Sur de Quito*. Escuela Politécnica Nacional.
- PETROECUADOR, E. (2016). *Fotografía Aérea*. Quito.
- PETROECUADOR, E. (2017). *Plan de Emergencia Terminal El Beaterio 2017*. Quito.
- Rivoirard, J. (2005). *Concepts and Methods of Geostatistics*. Recuperado el 10 de junio de 2017 de <https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiZzqXa5rzVAhWHNSYKHcGmAukQFggkMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.springer.com%2F%3FSGWID%3D4-102-45-166461-p52869799&usq=AFQjCNE9D5ckZNZDEF2kk3YFMk-j5kubCA>
- Sánchez, J. (2014). Ley de Darcy. Conductividad hidráulica. Recuperado el 10 de marzo de 2017 de [http://hidrologia.usal.es/temas/Ley\\_Darcy.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Ley_Darcy.pdf)
- Santiago, I. (2017). Tutorial Quantum GIS, 2.18 versión "Las Palmas de Gran Canaria". Recuperado el 30 de abril de 2017 de [https://www2.pr.gov/agencias/gis/seccioneducativa/Documents/Tutoriales/Tutorial\\_QGIS\\_2.18\\_Las\\_Palmas\\_de\\_Gran\\_Canaria\\_02\\_feb\\_2017.pdf](https://www2.pr.gov/agencias/gis/seccioneducativa/Documents/Tutoriales/Tutorial_QGIS_2.18_Las_Palmas_de_Gran_Canaria_02_feb_2017.pdf)
- Sanz, G. (2014). Modelo y simulación hidrogeológica para la sostenibilidad del acuífero libre de los montes torozos. (*Tesis Doctoral*). Recuperado el 10 de marzo de 2017 de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=42524>
- SENPLADES. (2013). *Cartografía temática, Distrito Metropolitano de Quito*. IEE, 2013. Quito: SENPLADES.
- SENPLADES. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Quito*. Quito: SENPLADES.
- SIMCORE. (2010). *Processing Modflow An Integrated Modeling Environment for the Simulation of Groundwater Flow, Transport and Reactive Processes*.

Recuperado el 15 de marzo de 2017 de <http://www.simcore.com/files/pm/v5/pm5.pdf>

TERRAHIDRO. (2016). *Implementación de Pozos de Monitoreo de Aguas Subterráneas en las Plataformas de Remediación. Contrato No.2016063-Cci-Zno-2016*. Quito: EP PETROECUADOR.

Todd, K. (2006). Groundwater Hydrology. *Groundwater Hydrology*. Michigan: Wiley, 1959.

Toro, I. (2012). *Servicio de Evaluación Ambiental*. Obtenido de Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA. Recuperado el 20 de febrero de 2017 de [http://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration\\_files/guias/Guia\\_uso\\_modelo\\_aguas\\_subterraneas\\_seia.pdf](http://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/guias/Guia_uso_modelo_aguas_subterraneas_seia.pdf)

UNESCO. (2016). *El agua subterránea en un medio ambiente cambiante*. Recuperado el 20 de febrero de 2017 de <http://es.unesco.org/themes/garantizar-suministro-agua/hidrologia/agua-subterranea>

USGS. (2009). Model Muse. Reston, Virginia. Recuperado el 25 de abril de 2017 de <https://pubs.usgs.gov/tm/tm6A29/tm6A29.pdf>

USGS. (2017). *Global Data Explorer*. Recuperado el 10 febrero de 2017 de <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>

Vélez, M. (1999). Hidráulica de Aguas Subterráneas. Recuperado el 13 de junio de 2017 de [http://www.bdigital.unal.edu.co/4993/1/Capitulos\\_1-5.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/4993/1/Capitulos_1-5.pdf)

## **ANEXOS**



## Anexo 1

### Glosario de términos

#### **Aguas subterráneas:**

Aguas que están situadas en el subsuelo de la tierra. Se encuentran distribuidas en todo el planeta y son un componente fundamental de los sistemas hidrogeológicos de una cuenca geográfica.

#### **Absorción:**

Disolución o mezcla de una sustancia en forma gaseosa, líquida o sólida, con el agua subterránea.

#### **Acuífero:**

Formación geológica permeable que es capaz de recibir, almacenar y transferir agua con facilidad. Ejemplo: Formaciones con alto contenido de arenas, gravas, granito u otra roca compacta con una fracturación importante.

#### **Acuífero anisotrópico:**

Medio poroso en el que las propiedades hidrogeológicas dependen de la dirección de flujo considerada.

#### **Acuífero confinado:**

Es aquel en que el agua alojada en el interior de la zona saturada se encuentra a una presión mayor que la atmosférica y se encuentra encerrado entre dos capas de material impermeable, como roca. A este tipo de acuíferos también se los conoce como acuíferos artesianos.

#### **Acuífero heterogéneo:**

Medio poroso que tiene distintas características físicas en diversas zonas de su extensión.

**Acuífero homogéneo:**

Medio poroso que tiene las mismas características físicas en toda su extensión.

**Acuífero isotrópico:**

Medio poroso en el que las propiedades hidrogeológicas son independientes de la dirección de flujo considerada.

**Acuífero libre:**

Es aquel en que el agua de la zona saturada se encuentra en contacto directo con la atmósfera a través de los espacios de la zona saturada.

**Acuitardo:** Corresponde a una formación geológica cuyos poros pueden recibir y contener agua, pero transmitirla muy lentamente. Estos materiales pueden significar un importante papel en la recarga vertical de los acuíferos y por lo general son limos.

**Adsorción:**

Adherencia de moléculas en solución a la superficie de cuerpos sólidos.

**Advección:**

Mecanismo de transporte de una sustancia por causa netamente del arrastre que genera el flujo en el que está contenida. En este tipo de transporte, el caudal no varía en función del tiempo.

**Almacenamiento específico:**

Volumen de agua liberado o almacenado por un acuífero de espesor y área unitaria por unidad de variación del nivel piezométrico.

**Capacidad de campo:**

Es el contenido de agua o humedad que es capaz de retener el suelo luego de una saturación y drenaje natural. Se obtiene a través de la razón entre el volumen

de agua retenido después del drenaje por gravedad y el volumen total de un suelo.

**Celda:**

Unidad de representación espacial (1D, 2D o 3D) de un modelo numérico, discreta y de propiedades homogéneas. Cada celda contiene un nodo, que es el elemento que representa numéricamente las propiedades hidrogeológicas de un modelo.

**Coefficiente de almacenamiento:**

Volumen de agua liberado o almacenado por un acuífero de determinado espesor y área unitaria por unidad de variación del nivel piezométrico.

**Condición de borde:**

Representación conceptual y numérica que especifica la variable dependiente (carga hidráulica) en los límites del dominio del modelo y permite la resolución de las ecuaciones gobernantes del sistema.

**Condiciones iniciales:**

Valores específicos para las variables dependientes (niveles piezométricos, conductividad hidráulica, carga hidráulica y porosidad) en todo el dominio al comienzo del período de simulación.

**Conductividad hidráulica:**

Capacidad de un medio poroso para transmitir agua. Depende de las características del medio, de la masa específica y viscosidad del agua. Está definida por la Ley de Darcy.

**Discretización:**

Proceso de subdivisión del modelo en segmentos discretos, celdas o elementos, sobre los cuales se aplican las ecuaciones gobernantes del sistema.

**Gradiente hidráulico:**

Variación en el nivel piezométrico por unidad longitud en una zona determinada y en dirección del flujo subterráneo.

**Grilla:**

Sistema de nodos conectados, distribuidos sobre el dominio de modelación, que forman celdas.

**Layer o capa:**

Representación en el modelo numérico de una superficie horizontal de un espesor variable. Generalmente está asociada a los niveles acuíferos definidos en el modelo conceptual.

**Ley de Darcy:**

Ecuación que describe el flujo a través de un medio poroso, relacionando el caudal con la pérdida de energía hidráulica entre dos secciones del escurrimiento a través de una constante de proporcionalidad (conductividad hidráulica).

**Método de las diferencias finitas:**

Técnica de discretización numérica para resolver ecuaciones diferenciales parciales, reemplazando el dominio continuo de interés por una grilla rectangular y expresando las derivadas como diferencias.

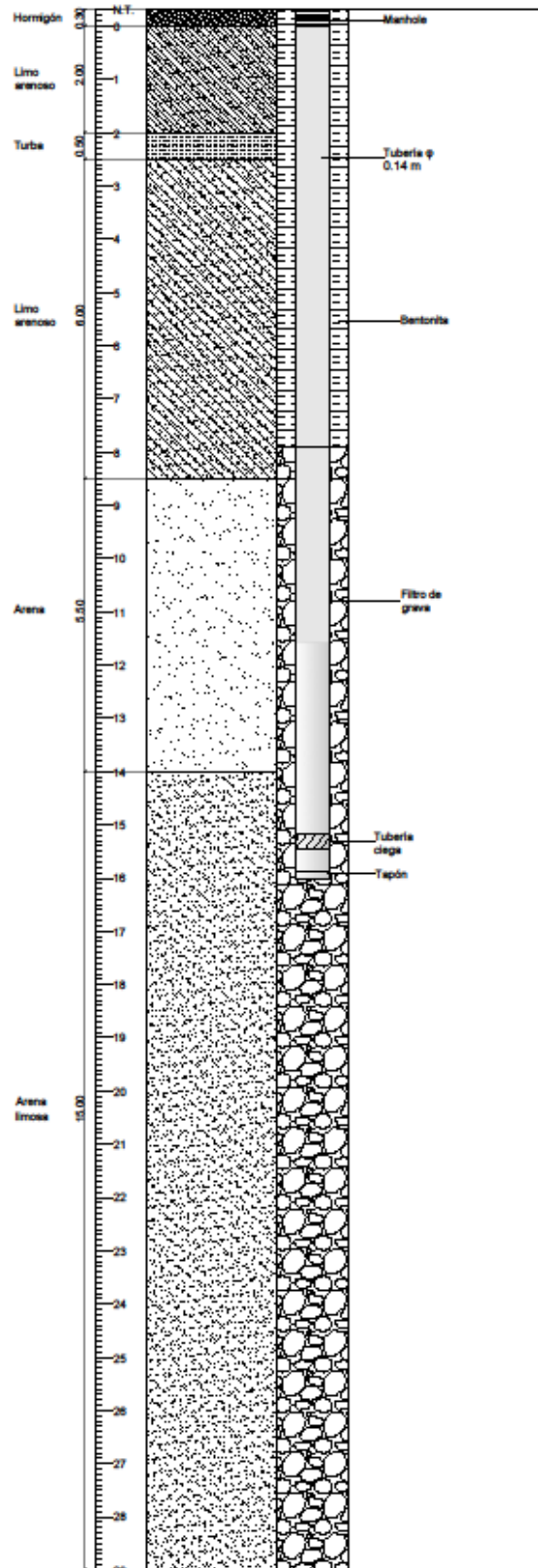
**Modelo:**

Instrumento que representa una aproximación a la realidad. Pueden ser físicos, análogos, analíticos o numéricos.

## Anexo 2

### Pozo de remediación PRB-01

### Terminal de Productos Limpios El Beaterio



Escala gráfica: 1:100

Unidades: metros

Elaborado por: Juan Narváez

Universidad de Las Américas

Facultad del Ingeniería y Ciencias  
Agropecuarias- FICA

Ingeniería Ambiental en Prevención y  
Remediación

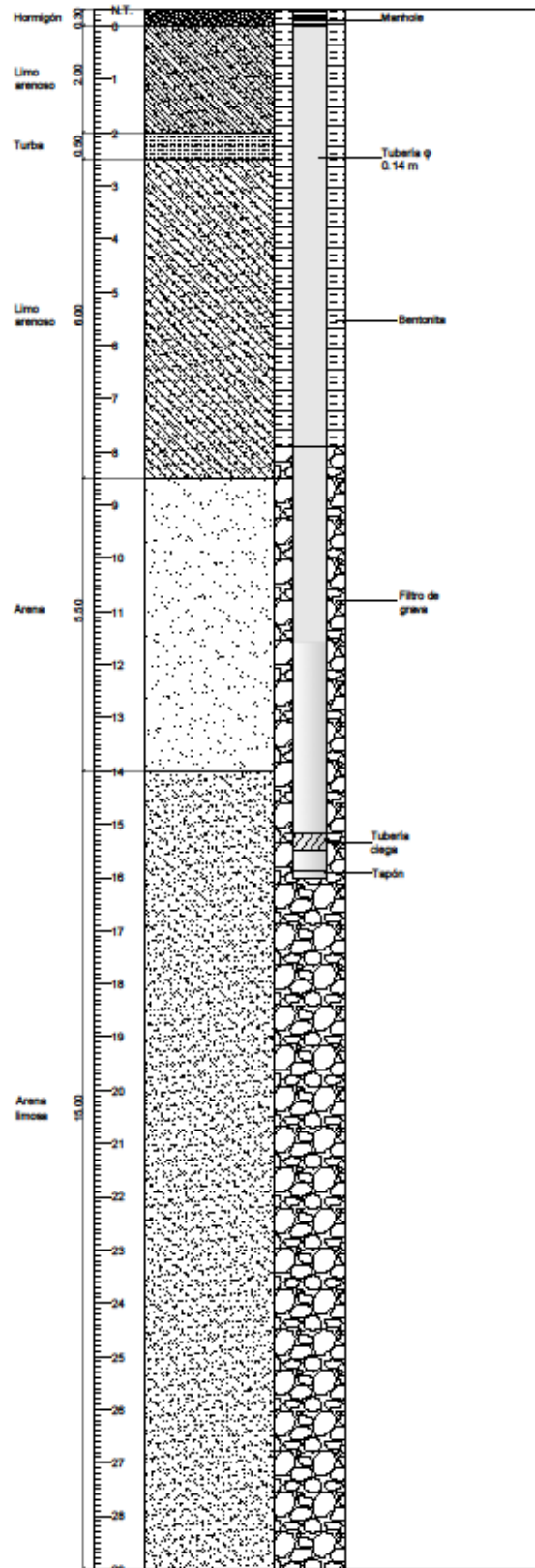
Tesis: Evaluación de un modelo  
hidrogeológico en una zona de  
almacenamiento de hidrocarburos.

Fecha: Mayo, 2017

### Anexo 3

#### Pozo de remediación PRB-02

#### Terminal de Productos Limpios El Beaterio



Escala gráfica: 1:100

Unidades: metros

Elaborado por: Juan Narváez

Universidad de Las Américas

Facultad del Ingeniería y Ciencias  
Agropecuarias- FICA

Ingeniería Ambiental en Prevención y  
Remediación

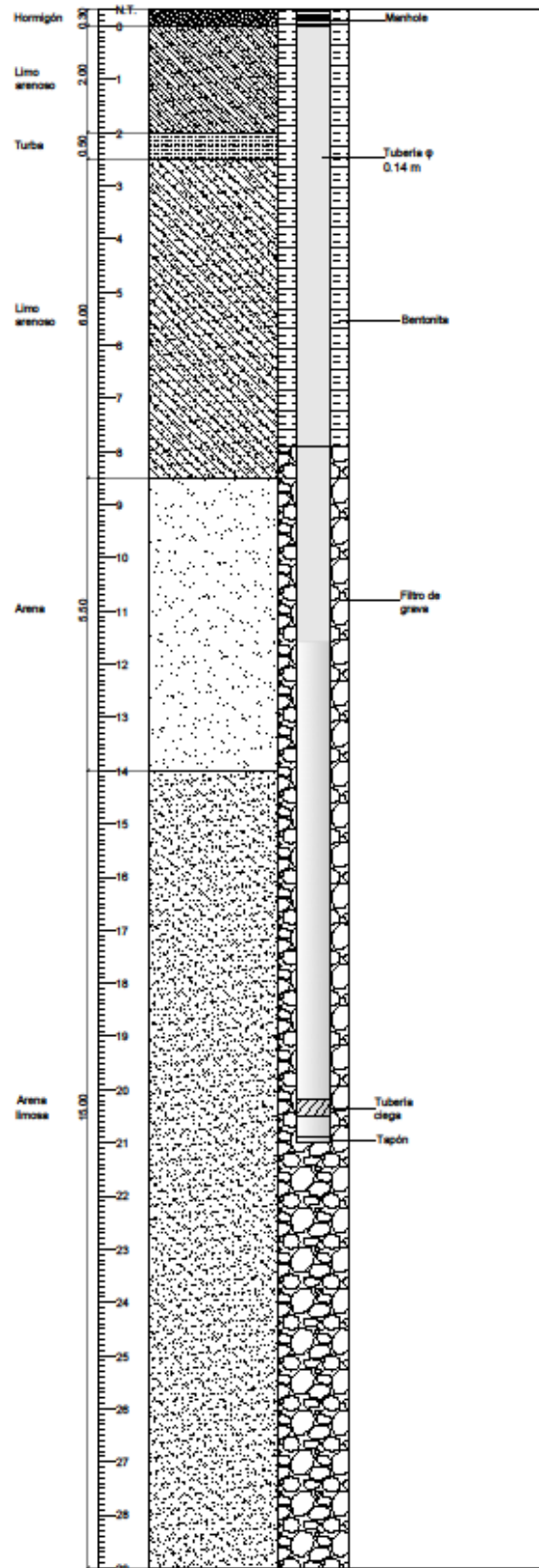
Tesis: Evaluación de un modelo  
hidrogeológico en una zona de  
almacenamiento de hidrocarburos.

Fecha: Mayo, 2017

## Anexo 4

### Pozo de remediación PRB-03

### Terminal de Productos Limpios El Beaterio



Escala gráfica: 1:100

Unidades: metros

Elaborado por: Juan Narváez

Universidad de Las Américas

Facultad del Ingeniería y Ciencias  
Agropecuarias- FICA

Ingeniería Ambiental en Prevención y  
Remediación

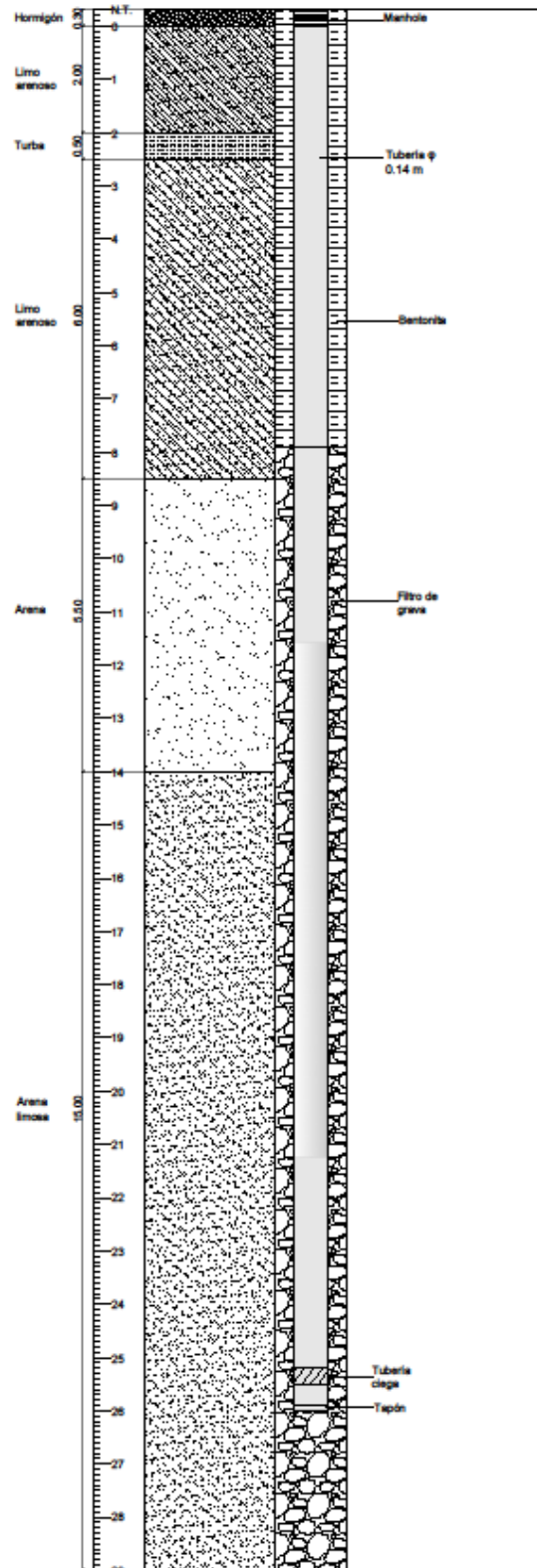
Tesis: Evaluación de un modelo  
hidrogeológico en una zona de  
almacenamiento de hidrocarburos.

Fecha: Mayo, 2017

## Anexo 5

### Pozo de remediación PRB-04

### Terminal de Productos Limpios El Beaterio



Escala gráfica: 1:100

Unidades: metros

Elaborado por: Juan Narváez

Universidad de Las Américas

Facultad del Ingeniería y Ciencias  
Agropecuarias- FICA

Ingeniería Ambiental en Prevención y  
Remediación

Tesis: Evaluación de un modelo  
hidrogeológico en una zona de  
almacenamiento de hidrocarburos.

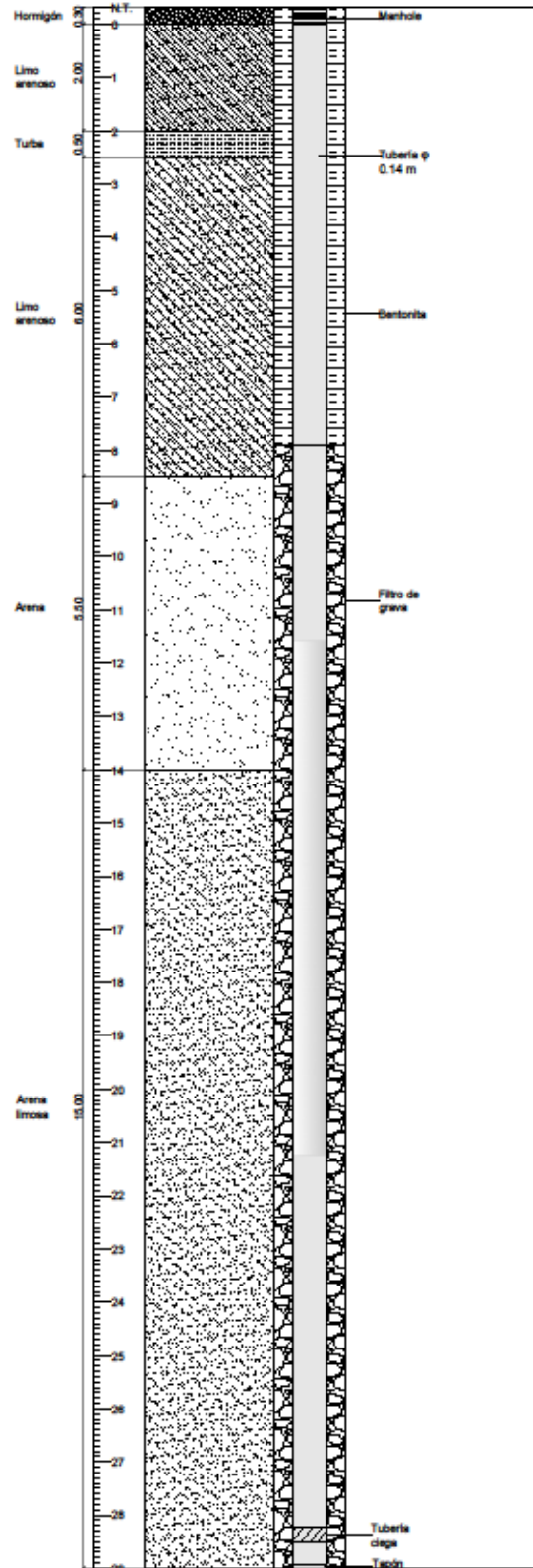
Fecha: Mayo, 2017



## Anexo 6

### Pozo de remediación PRB-05

### Terminal de Productos Limpios El Beaterio



Escala gráfica: 1:100

Unidades: metros

Elaborado por: Juan Narváez

Universidad de Las Américas

Facultad del Ingeniería y Ciencias  
Agropecuarias- FICA

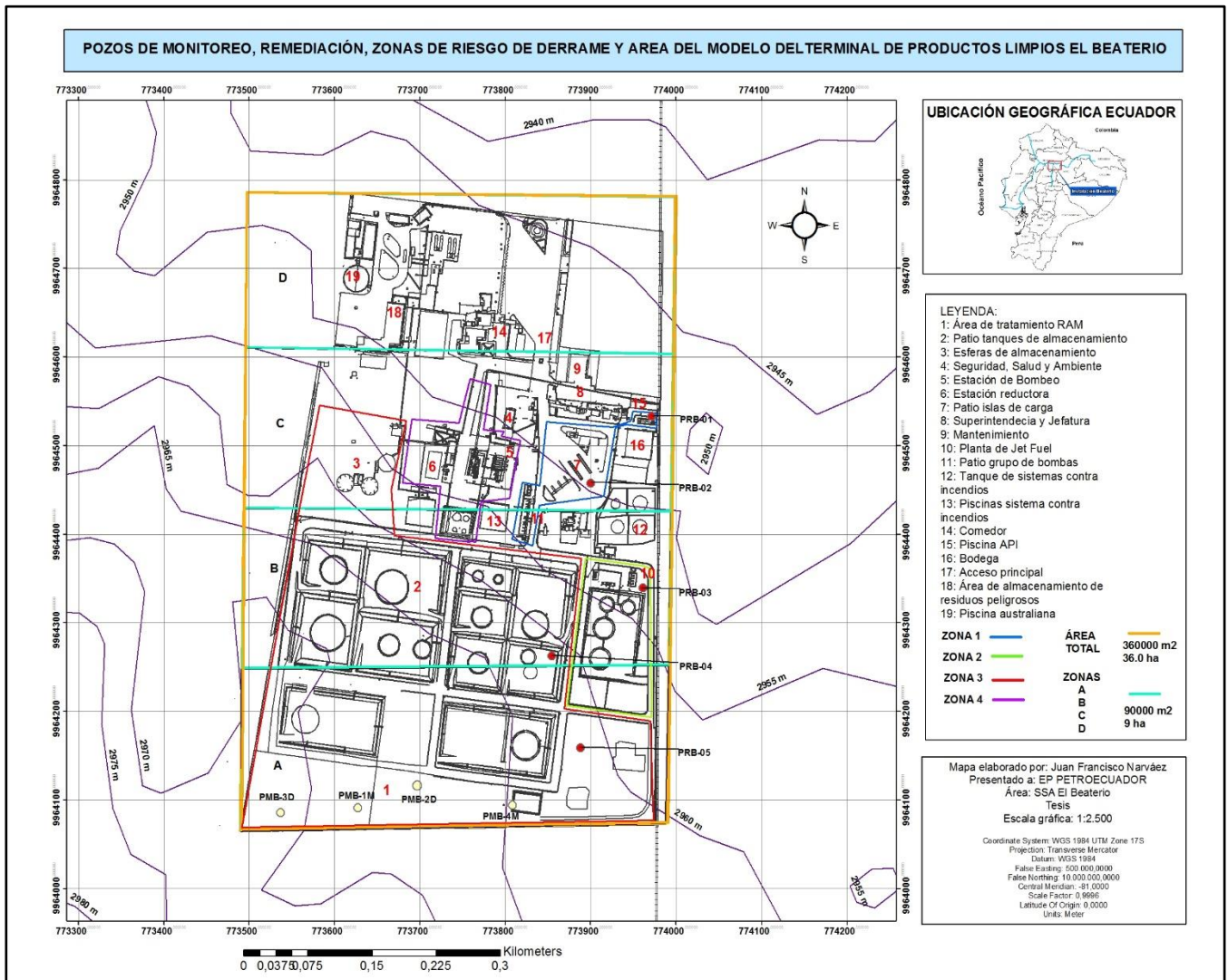
Ingeniería Ambiental en Prevención y  
Remediación

Tesis: Evaluación de un modelo  
hidrogeológico en una zona de  
almacenamiento de hidrocarburos.

Fecha: Mayo, 2017

# Anexo 7

## Mapa de georreferenciado de la ubicación de los pozos de remediación



## Anexo 8

Presupuesto referencial requerido para la implementación del sistema Tratamiento y Bombeo en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio

<b>Detalle presupuesto referencial requerido para la implementación del sistema Tratamiento y Bombeo en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio</b>					
Elaborado por:	Juan Francisco Narváez				
Fecha:	25/05/2017				
Tema de tesis	Evaluación de un modelo hidrogeológico en una zona de almacenamiento de hidrocarburos.				
<b>A. Costos Directos</b>					
<b>Rubro No.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario USD \$</b>	<b>Costo Parcial USD \$</b>
<b>1. Trabajos de perforación</b>					
<b>1.1</b>	<b>Perforación del suelo (incluye tuberías de PVC)</b>	<b>m</b>	<b>108</b>	<b>78.11</b>	<b>8435.88</b>
1.1.1	Perforación Pozo PRB-01	m	16	78.11	1249.76
1.1.2	Perforación Pozo PRB-02	m	16	78.11	1249.76
1.2.3	Perforación Pozo PRB-03	m	21	78.11	1640.31
1.1.4	Perforación Pozo PRB-04	m	26	78.11	2030.86
1.1.5	Perforación Pozo PRB-05	m	29	78.11	2265.19
<b>1.2</b>	<b>Emplazamiento de equipos de perforación dinámica en cada punto</b>	<b>und</b>	<b>5</b>	<b>52.79</b>	<b>263.95</b>
<b>1.3</b>	<b>Transporte de equipo de dinámica, personal y materiales a la zona de trabajo y retorno al finalizar el trabajo (distancia menor a 40 km)</b>	<b>und</b>	<b>10</b>	<b>163.47</b>	<b>1634.7</b>
<b>1.4</b>	<b>Instalación de piezómetros</b>	<b>m</b>	<b>108</b>	<b>150.00</b>	<b>16200.00</b>
1.4.1	Piezómetro en Pozo PRB-01	m	16	150.00	2400.00
1.4.2	Piezómetro en Pozo PRB-02	m	16	150.00	2400.00
1.4.3	Piezómetro en Pozo PRB-03	m	21	150.00	3150.00
1.4.4	Piezómetro en Pozo PRB-04	m	26	150.00	3900.00
1.4.5	Piezómetro en Pozo PRB-05	m	29	150.00	4350.00
<b>1.5</b>	<b>Casing y rotulación en pozos</b>	<b>u</b>	<b>5</b>	<b>130.00</b>	<b>650.00</b>

<b>1.6</b>	<b>Mano de obra directa</b>	<b>und</b>	<b>4</b>	<b>En base al SBU</b>	<b>1125.00</b>
1.6.1	Supervisor técnico del trabajo	und	1	562.50	562.5
1.6.2	Peones / Operadores	und	3	187.50	562.5
<b>Costo total trabajos de perforación</b>					<b>28309.53</b>
<b>2. Materiales</b>					
<b>2.1</b>	<b>Sacos de Bentonita</b>	<b>u</b>	<b>20</b>	<b>30.00</b>	<b>600.00</b>
<b>2.2</b>	<b>Grava para filtro de 1/8" a 1/4"</b>	<b>m3</b>	<b>8</b>	<b>1680.00</b>	<b>13440.00</b>
<b>2.3</b>	<b>Herramienta menor</b>	<b>%</b>	<b>2</b>	<b>18404.28</b>	<b>368.09</b>
<b>Costo total materiales</b>					<b>14408.09</b>
<b>Total costos directos (A)</b>					<b>42717.62</b>
<b>B. Costos Indirectos</b>					
Se asume un 18% de costos indirectos sobre el valor total de costos directos.					
<b>Total costos indirectos (B)</b>					<b>7689.17</b>
<b>Costo referencial total (A+B)</b>					<b>50406.79</b>

Nota: Las tuberías del rubro 1.1 Perforación del suelo se detallan a continuación:

ÍTEM	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario USD \$	Costo Parcial USD \$
<b>T-1</b>	<b>Tubería de de PVC de 110 mm de diámetro exterior para piezómetro de pozo, 3.5 mm de espesor y una presión nominal de 16 atm, según ISO 16422. Precio incrementado en 30% por accesorios.</b>	<b>m</b>	<b>108</b>	<b>16.94</b>	<b>1829.52</b>
T-1.1	Tubería de PVC para el pozo PRB-01	m	16	16.94	271.04
T-1.2	Tubería de PVC para el pozo PRB-02	m	16	16.94	271.04
T-1.3	Tubería de PVC para el pozo PRB-03	m	21	16.94	355.74
T-1.4	Tubería de PVC para el pozo PRB-04	m	26	16.94	440.44
T-1.5	Tubería de PVC para el pozo PRB-05	m	29	16.94	491.26
<b>T-2</b>	<b>Tubería de de PVC de 140 mm de diámetro exterior para recubrimiento de pozo, 3.5 mm de espesor y una presión nominal de 16 atm, según ISO 16422. Precio incrementado en 30% por accesorios.</b>	<b>m</b>	<b>108</b>	<b>23.47</b>	<b>2534.76</b>
T-2.1	Tubería de PVC para el pozo PRB-01	m	16	23.47	375.52
T-2.2	Tubería de PVC para el pozo PRB-02	m	16	23.47	375.52
T-2.3	Tubería de PVC para el pozo PRB-03	m	21	23.47	492.87
T-2.4	Tubería de PVC para el pozo PRB-04	m	26	23.47	610.22
T-2.5	Tubería de PVC para el pozo PRB-05	m	29	23.47	680.63

**Información secundaria relevante**

Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
<p><b>Plan de Emergencia Terminal de Productos Limpios El Beaterio 2015</b></p>	<p>EP PETROECUADO R</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antecedentes del terminal</li> <li>• Áreas del terminal</li> <li>• Zonas de riesgo del terminal</li> <li>• Marco legal institucional</li> </ul>	<p>A partir de esta fuente de información, se logró un primer acercamiento a las actividades del terminal, sus antecedentes en términos de tiempo de vida, área, localización, entre otros.</p> <p>Por otro lado, se obtuvo información de las zonas de riesgo del terminal, especial las que presentan un riesgo a derrames, que son: Zona 1: islas de carga, patio bombas, piscinas API, generadores de emergencia, Zona 2: Planta de Jet Fuel y Mezclas (incluye tanques), Zona 3: Área de tanques de almacenamiento (incluye las</p>	<p>(PETROECUADO R, 2017)</p>

Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
			<p>esferas de almacenamiento y piscina de lodos) y Zona 4: Estación de Bombeo y Estación Reductora (incluye tanques). Con esta información, es posible correlacionar a estas zonas con el modelo hidrogeológico, a fin de determinar hacia dónde se dirigiría una posible pluma de contaminación en las aguas subterráneas si se produce un derrame en alguna de estas zonas y el contaminante derramado se filtra por el suelo hacia las aguas subterráneas.</p> <p>Además, se obtuvo información sobre el marco institucional de la empresa EP PETROECUADOR, que rige a nivel nacional en todas sus instalaciones. Parte de este marco es la Política de Seguridad</p>	

Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
			y Salud de EP PETROECUADOR, en la cual se establecen los compromisos para asegurar acciones que protegen a sus colaboradores, al ambiente, sus instalaciones y a la comunidad.	
<b>Auditoría Ambiental de Cumplimiento de Terminal de Productos Limpios El Beaterio</b>	EP PETROECUADOR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antecedentes del terminal</li> <li>• Mapas del terminal en formato png.</li> <li>• Información SIG en formato shp.</li> <li>• Información cartográfica</li> </ul>	<p>A través del compendio de información en formato digital de esta auditoría realizada en el año 2011, fue posible recolectar más información sobre los antecedentes del terminal.</p> <p>Además, se realza la importancia de esta fuente de información secundaria en cuanto a mapas del terminal elaborados por la consultora Auditoría Ambiental Ltda; así como información geográfica digital en formato shp y cartográfica en formato</p>	(Auditoría Ambiental, 2011)

Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
		<p>en formato dwg.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Matriz de evaluación de impactos.</li> <li>• Listas de chequeo</li> <li>• Hallazgos de la auditoría</li> </ul>	<p>dwg. Esta información ha sido de gran utilidad para la elaboración de mapas temáticos en el software ArcGis 10.4 y para obtener información de entrada para el modelo: Como curvas de nivel, carga hidráulica, área a modelar.</p> <p>Por otra parte, también se obtuvo la matriz de evaluación de impactos, en la cual se detallan todos los aspectos ambientales evaluados, las actividades y los impactos ambientales derivados de las mismas. De este modo, es posible hacer hincapié a los impactos ambientales dirigidos hacia cuerpos hídricos y aguas subterráneas y correlacionar los mismos con el modelo hidrogeológico.</p>	



Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
			<p>En añadidura, esta fuente de información presenta el procedimiento completo de pre auditoría, auditoría y post auditoría; junto con listas de chequeo y hallazgos relevantes de la auditoría.</p>	
<p><b>Auditoría Ambiental de Cumplimiento Terminal de Productos Limpios El Beaterio Periodo Febrero 2013- Febrero 2015</b></p>	<p>EP PETROECUADOR</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Antecedentes del terminal</li> <li>• Marco legal e institucional aplicable</li> <li>• Áreas operativas y administrativas del Terminal</li> </ul>	<p>Por medio de esta fuente de información secundaria, fue posible completar datos de antecedentes de terminal, sobre todo en cuanto a áreas administrativas y operativas y sus funciones, junto con ciertas fotografías de las mismas.</p> <p>De este mismo modo, fue posible obtener más información sobre el marco legal e institucional aplicable.</p> <p>También, fue posible correlacionar la determinación de las áreas de influencia</p>	<p>(KANTZAM, 2016)</p>

Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Área de influencia directa e indirecta</li> </ul>	<p>del terminal, directa e indirecta, con la información geográfica obtenida de la fuente de información secundaria anteriormente citada (Auditoría Ambiental, 2011) y de este modo, generar mapas temáticos de las mismas, mismos que son también de utilidad para el desarrollo del modelo y el establecimiento del área del mismo en el momento de definir la discretización horizontal y vertical y el tamaño de las grillas.</p>	
<p><b>Implementación de Pozos de Monitoreo de Aguas Subterráneas en las</b></p>	<p>EP PETROECUADO R</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil litoestratigráfico de los pozos.</li> <li>• Características</li> </ul>	<p>A partir de esta fuente de información secundaria, se obtuvo las principales condiciones de borde y parámetros hidrogeológicos para el desarrollo del modelo, tal como: características de cada estrato del suelo, conductividad hidráulica,</p>	

Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
<p><b>Plataformas de Remediación. Contrato No. 2016063-CCI-ZNO-2016.</b></p>		<p>hidrogeológicas.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mapa de ubicación de los pozos, coordenadas y cotas.</li> <li>• Parámetros hidrogeológicos (Conductividad hidráulica, transmisividad,</li> </ul>	<p>cotas de cada piezómetro, nivel piezométrico, perfil litoestratigráfico, coordenadas de los pozos en sistema de coordenadas UTM, niveles de agua y caudales de aforo, mapa de isopiezas y perfil hidrogeológico.</p> <p>Esta información fue de utilidad para el desarrollo del modelo conceptual y numérico en Modflow, pues brinda un primer acercamiento del comportamiento del sistema hidrogeológico de los acuíferos del terminal, concluyendo que existen dos, uno superficial semiconfinado, con un espesor de 1 a 38 metros de profundidad, y otro acuífero profundo y confinado ubicado a 38 metros de profundidad, cuya capa confinante</p>	

Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
		<p>Capacidad Específica).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Niveles de agua y caudales de aforo.</li> <li>• Mapa de isopiezas.</li> <li>• Perfil hidrogeológico.</li> <li>• Resultados de análisis de suelos y agua en campo y laboratorio</li> </ul>	<p>inicia los 33 metros y termina a los 38 metros, es decir, un espesor de capa confinante de 5 metros.</p> <p>Además, el estudio brinda la hipótesis de que el flujo de agua subterránea es en dirección S0 a NE, teniendo en consideración todas las características hidrogeológicas antes mencionadas. A través del desarrollo del modelo hidrogeológico, se podrá comprobar esta hipótesis y además determinar cómo sería el movimiento de partículas de contaminación en cada una de las 4 zonas de riesgo de derrame en función a diferentes escenarios.</p>	

Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
<b>Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Quito.</b>	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Características socio-económicas</li> <li>• Características bióticas</li> <li>• Características abióticas</li> <li>• Demografía</li> </ul>	Esta fuente de información secundaria fue proporcionada por la SENPLADES. La relevancia de la misma recae en la veracidad de la información socio-económica del sector, de las características bióticas, de las características abióticas de demografía. Estos datos son de utilidad como parámetros a considerar en el desarrollo del modelo hidrogeológico.	(SENPLADES, Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Quito, 2015)
<b>Cartografía temática, Distrito Metropolitano de Quito, IEE 2013.</b>	Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartografía en formato shp de geología</li> <li>• Cartografía en formato</li> </ul>	La SENPLADES, en coordinación en el Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE), han generado cartografía temática del DMQ en el año 2013. Esta información fue facilitada por la SENPLADES y recae su utilidad para tener una macro visión de las	(SENPLADES, 2013)

Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
		shp de hidrología <ul style="list-style-type: none"> <li>• Cartografía en formato shp de uso de suelo</li> </ul>	características geológicas, hidrológicas y de suelos en el sector de El Beaterio.	
<b>Información Estadística Meteorológica e Hidrológica</b>	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrogeología	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estadística de valores máximos de temperatura máxima.</li> <li>• Estadística de valores diarios de humedad relativa.</li> </ul>	El INAMHI, como instituto a nivel nacional encargado de evaluar la meteorología e hidrogeología, ha facilitado información secundaria obtenida de la estación de monitorio meteorológico Izobamba, que es la más cercana al Terminal de Productos Limpios El Beaterio. Esta información estadística ha sido de utilidad a fin de definir ciertos parámetros para los escenarios de modelación en función a la precipitación, evaporación, temperatura,	(INAMHI, 2010)

Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estadística de valores diarios de precipitación.</li> <li>• Estadística de valores diarios de nubosidad.</li> <li>• Estadística de valores horarios y diarios de heliofanía efectiva.</li> <li>• Estadística de valores</li> </ul>	<p>heliofanía, caudales medios y anuarios meteorológico e hidrológico.</p>	

Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
		<p>mensuales de temperatura mínima.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Estadística de valores mensuales de evaporación potencial.</li><li>• Estadística de valores mensuales de heliofanía efectiva.</li></ul>		



<b>Título</b>	<b>Fuente</b>	<b>Información relevante</b>	<b>Análisis de la información</b>	<b>Cita</b>
		<ul style="list-style-type: none"><li>• Estadística de valores de caudales medios diarios.</li><li>• Estadística de valores mensuales de niveles medios.</li><li>• Anuarios Meteorológico.</li><li>• Estadística de valores diarios de</li></ul>		

<b>Título</b>	<b>Fuente</b>	<b>Información relevante</b>	<b>Análisis de la información</b>	<b>Cita</b>
		<p>temperatura mínima.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Estadística de valores mensuales de temperatura máxima.</li><li>• Estadística de valores mensuales de precipitación.</li><li>• Estadística de valores mensuales</li></ul>		

Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
		<p>de nubosidad</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estadística de valores mensuales de caudales medios.</li> <li>• Anuarios Hidrológico</li> </ul>		
<p><b>Geología y Análisis del Recurso Hídrico Subterráneo de la Subcuenca del Sur de Quito</b></p>	<p>Lilia Angélica Peñafiel Aguiar</p> <p>Proyecto previo a la obtención del Título de Ingeniera Geóloga</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidades litoestratigráficas de la Subcuenca del Sur de Quito.</li> <li>• Unidades acuíferas de</li> </ul>	<p>A partir de esta tesis publicada en el 2009, fue posible obtener información relevante sobre las características hidrogeológicas de la subcuenca del Sur de Quito, en la cual se encuentra el Terminal de Productos Limpios El Beaterio.</p> <p>Fue posible analizar información secundaria sobre perfiles</p>	<p>(Peñafiel, Geología y Análisis del Recurso Hídrico Subterráneo de la Subcuenca del Sur de Quito, 2009)</p>

Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
	Escuela Politécnica Nacional	<p>la Subcuenca del Sur de Quito.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Características hidrogeológicas de la Subcuenca del Sur de Quito.</li> <li>• Características hidroquímicas de la Subcuenca</li> </ul>	<p>litoestratigráficos, forma y área de la cuenca, infiltración de la cuenca e infiltración del sector El Beaterio, caudal de infiltración, recarga de la cuenca en función al porcentaje de la precipitación que corresponde a la infiltración, conductividad hidráulica.</p> <p>Además, a través de las conclusiones de este trabajo citado, fue posible correlacionar las mismas con las conclusiones del estudio hidrogeológico realizado en el Terminal de Productos Limpios El Beaterio (TERRAHIDRO, IMPLEMENTACIÓN DE POZOS DE MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS PLATAFORMAS DE REMEDIACIÓN,</p>	

Título	Fuente	Información relevante	Análisis de la información	Cita
		<p>del Sur de Quito.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo Conceptual del Acuífero</li> <li>• Modelación Numérica</li> </ul>	<p>2016) y determinar una conclusión general y común entre ambas que la dirección de flujo en el acuífero es hacia el N-NE.</p>	

## Anexo 9

Fotografías de los trabajos iniciales y de campo realizados en las instalaciones del Terminal de Productos Limpios El Beaterio.

### Fotografía 1

Toma de coordenadas mediante el GPS GARMIN Oregon 550 del pozo de monitoreo PMB-3D.





### Fotografía 2

Toma de coordenadas mediante el GPS GARMIN Oregon 550 del pozo de monitoreo PMB-1M.



### Fotografía 3

Toma de coordenadas mediante el GPS GARMIN Oregon 550 del pozo de monitoreo PMB-2D.





#### Fotografía 4

Toma de coordenadas mediante el GPS GARMIN Oregon 550 del pozo de monitoreo PMB-4M.



#### Fotografía 5

Toma de coordenadas mediante el GPS GARMIN Oregon 550 del río que cruza por la Quebrada Sin Nombre.





## Fotografías 6 y 7

Quebrada Sin Nombre.



