



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DETERMINACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE CONTAMINACIÓN DE
PAPALLACTA POR SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL

Autor

Erick Sebastián González Narvárez

Año
2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DETERMINACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE CONTAMINACIÓN DE
PAPALLACTA POR SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL

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

Profesor Guía

Msc. Santiago Daniel Piedra Burgos

Autor

Erick Sebastián González Narváez

Año

2018

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, Determinación del estado actual de contaminación de Papallacta por Sondeo Eléctrico Vertical, a través de reuniones periódicas con el estudiante Erick Sebastián González Narváez, en el semestre 2018 – 2, 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

CI: 1715384150

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Determinación de la situación actual de contaminación en Papallacta por Sondeo Eléctrico Vertical del estudiante Erick Sebastián González Narvárez en el semestre 2018-2, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Miguel Ángel Gualoto Oñate

Master en Ciencias Biológicas

CI: 1707429351

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”.

Erick Sebastián González Narváez

CI: 1724039050

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por el constante apoyo, su consejo y sobre todo por haber fomentado en mí valores y darme el impulso necesario para alcanzar mis metas.

Un profundo agradecimiento al Magíster Santiago Piedra por su inmenso apoyo durante todo este proceso, su paciencia, dedicación, criterio y aliento que ha hecho fácil lo que en un inicio fue difícil, me siento privilegiado de contar con su guía y ayuda

DEDICATORIA

A mis padres por todo el amor, apoyo y confianza inconmensurable e inigualable, y por haberme forjado como la persona que soy ahora, a su ejemplo y el de toda mi familia, a mis hermanos por ser mi fuerza e impulso de seguir adelante. También a mis amigos por ese apoyo sincero, idóneo y latente.

RESUMEN

En abril del 2003 en la parroquia de Papallacta ocurrió un incidente, en donde se rompió parte del oleoducto que transportaba crudo desde Shushufindi hacia Esmeraldas por el paso de maquinaria sobre la tubería de alta presión. Esto ocasionó el derrame de 13000 barriles de crudo en la zona que se encuentra dentro de la reserva Cayambe Coca. Por lo cual se determinará la situación actual de contaminación por sondeo eléctrico vertical, la cual es una metodología geofísica electrónica para obtener la resistividad de los objetos de medición, en este caso las capas de suelo. Se utilizó un arreglo Schlumberger con dos equipos para medir la resistividad, obteniendo datos en el lugar del derrame y en un lugar sin contaminación para poder comparar las mediciones. Se determinó que el lugar de estudio posee un pasivo ambiental a 40 metros de profundidad del suelo, en una capa de arcilla plástica compactada que posee una resistividad de 2000 ohm-m y, con ello, se realizó un modelo para representar el movimiento de las partículas en la zona por los estratos correspondientes. Es necesario mantener varias técnicas de prevención, así como remediación en este tipo de actividades, puesto que en caso de un accidente como el estudiado, el impacto ambiental es demasiado amplio y difícil de contrarrestar. Es por esto que la importancia de la tesis radica en la medición y determinación del pasivo ambiental dado por una mala remediación del derrame y la falta de medidas de prevención y mitigación.

ABSTRACT

In April 2003, an incident occurred in the parish of Papallacta, where part of the pipeline that carried crude oil from Shushufindi to Esmeraldas was broken by the passage of machinery over the high pressure pipe. This caused the spill of 13,000 barrels of crude oil in the area that is inside the Cayambe Coca reserve. Therefore, the current situation of contamination by vertical electric sounding will be determined, which is an electronic geophysical methodology to obtain the resistivity of the measurement objects, in this case, the soil layers. A Schlumberger arrangement with two equipments was used to measure the resistivity, obtaining data at the spill site and in a place without contamination in order to compare the measurements. It was determined that the study site has an environmental passive at 40 meters of soil depth, in a layer of compacted plastic clay that has a resistivity of 2000 ohm-m and with this a model was made to represent the movement of the particles in the zone by the corresponding strata. It is necessary to maintain several prevention techniques, as well as remediation in this type of activities, since in case of an accident such as the one studied, the environmental impact is too broad and difficult to counteract. That is why the importance of the thesis lies in the measurement and determination of the environmental liability given by a bad remediation of the spill and the lack of prevention and mitigation measures.

ÍNDICE

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Glosario de Términos	1
1.2 Antecedentes.....	4
1.3 Contaminación por hidrocarburos.....	6
1.4 Objetivos.....	7
1.5 Alcance.....	8
1.6 Justificación	8
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	9
2.1 Características de la Parroquia	9
2.2 Contaminación del Suelo	11
2.3 Remediación	11
2.4 Geofísica	12
2.4.1 Método Gravimétrico	12
2.4.2 Método Sísmico	13
2.4.3 Método Magnético	13
2.4.4 Métodos Eléctricos	13
2.5 Sondeo Eléctrico Vertical	14
2.5.1 Método Wenner	15
2.5.2 Método Schlumberger	15
2.6 Programas.....	16
2.6.1 ArcMap 10.5	16
2.6.2 VES 2000	17
2.6.3 EarthImager 2D.....	17
2.6.4 Global Mapper.....	17
2.6.5 Modflow	18
3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	18
3.1 Descripción del área de estudio.....	18
3.1.2 Estudios iniciales	20

3.2	Descripción de instrumento de medición (P.A.S.I.)	20
3.2.1	Arreglo electrónico utilizado	21
3.2.2	Segundo instrumento de medición	22
3.3	Modelo conceptual.....	23
3.3.1	Perfiles de suelo	25
3.3.2	Recarga.....	26
3.4	Modflow	26
3.4.1	Condiciones de Borde	27
3.4.2	Datos de diseño	27
3.4.3	Propiedades de las capas.....	29
3.4.4	Simulación del movimiento del flujo	30
3.5	Cálculo del tiempo de percolación del contaminante.....	31
4.	CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS	31
4.1	Datos de campo	31
4.2	Datos de resistividad	32
4.4	Mapa con líneas de medición.....	38
4.5	Modelo Conceptual	39
4.6	Dirección del flujo.....	41
4.7	Proyección del contaminante.....	43
4.8	Isolíneas de carga	46
4.9	Modelo realizado en Earthmager 2D	48
4.10	Tiempo de infiltración	49
4.11	Análisis de resultados	49
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
5.1	Conclusiones.....	51
5.2	Recomendaciones	53
	REFERENCIAS	55
	ANEXOS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del oleoducto y la rotura	7
Figura 2. Movilización del contaminante en el suelo.	11
Figura 3. Arreglo Wenner para Sondeo eléctrico vertical.	15
Figura 4. Arreglo Schlumberger.	16
Figura 5. Ubicación geográfica de Papallacta.	19
Figura 6. Ubicación geográfica de Papallacta	20
Figura 7. Resistivímetro P.A.S.I.	21
Figura 8. Resistivímetro Super Sting R8	23
Figura 9. Raster obtenido por el departamento de SIG Tierras del MAGAP	24
Figura 10. Curvas de nivel realizadas a partir de las orto fotos y el cuadrante de estudio.	25
Figura 11. Grilla de Modflow para diseño de modelos de acuíferos.	26
Figura 12. Datos de diseño del modelo hidrogeológico.	27
Figura 13. Grilla del modelo hidrogeológico.	28
Figura 14. Ubicación de las cargas hidráulicas en la segunda capa.	28
Figura 15. Cargas hidráulicas en la tercera capa	29
Figura 16. Datos del área sin contaminación ingresados en el software.	32
Figura 17. Curva generada en el área sin contaminación con perfiles creados por el software	33
Figura 18. Datos ingresados de la zona con contaminación.	34
Figura 19. Curva generada por el software con perfiles en el área con contaminación.	34
Figura 20. Ecuación utilizada para el arreglo Schlumberger en el software.	35
Figura 21. Área de estudio (rojo), mediciones de resistividad (azul) y SOTE (amarillo).	38
Figura 22. Área de estudio (Verde), líneas de medición de la muestra blanco (celeste).	39
Figura 23. Modelo conceptual del terreno con curvas de nivel.	40
Figura 24. Cuenca del río Sucuss (celeste), en la Parroquia de Papallacta (café).	41
Figura 25. Vectores de velocidad en la primera capa.	42
Figura 26. Vectores de velocidad en la segunda capa.	42
Figura 27. Vectores de velocidad en la tercera capa.	43
Figura 28. Partículas de contaminación en la primera capa del terreno.	44
Figura 29. Proyección del movimiento del contaminante en la primera capa del suelo	44
Figura 30. Proyección del contaminante en la segunda capa del terreno donde se tiene los cuerpos de agua.	45
Figura 31. Movimiento del contaminante en la tercera capa del terreno.	45
Figura 32. Isolíneas de Carga de la primera capa.	46
Figura 33. Isolíneas de Carga de la segunda capa.	47
Figura 34. Isolíneas de Carga de la tercera capa.	47

Figura 35. Modelo en 2D obtenido con el software EarthImager 2D. 48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Actividades Económicas de Papallacta	10
Tabla 2. Resistividad de algunos tipos de suelos.....	14
Tabla 3. Abertura de los electrodos.....	22
Tabla 4. Datos de elevación de las diferentes capas del modelo.....	29
Tabla 5. Propiedades físicas de los suelos determinados.....	30
Tabla 6. Coordenadas de los puntos de muestreo.....	31
Tabla 7. Valores obtenidos con el equipo P.A.S.I. en el primer muestreo en la zona libre de contaminación.	36
Tabla 8. Valores obtenidos con el equipo P.A.S.I. en el segundo muestreo en la zona libre de contaminación	36
Tabla 9. Valores obtenidos con el equipo P.A.S.I. en el tercer muestreo en la zona libre de contaminación.	36
Tabla 10. Valores obtenidos con el equipo P.A.S.I. en el primer muestreo en la zona con contaminación.	37
Tabla 11. Valores obtenidos con el equipo P.A.S.I. en el segundo muestreo en la zona con contaminación.	37
Tabla 12. Valores obtenidos con el equipo P.A.S.I. en el tercer muestreo en la zona con contaminación.	38
Tabla 13. Tiempo que demora el contaminante en pasar a través del suelo. ..	49

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Glosario de Términos

Agua de formación: Es el agua presente en los poros de la roca durante la formación de la misma, también se la conoce como agua fósil.

Biorremediación: Uso de microorganismos para restaurar las propiedades de ambientes contaminados.

Blanco: Muestra del objeto de estudio en su forma natural, sin alteraciones o intervenciones externas.

Boyas: Objeto flotante utilizado en el sector hidrocarburífero, que al estar tanto dentro del agua como fuera de ella, evita que, en un derrame petrolero, el contaminante se propague en el agua.

Capacidad de Intercambio Catiónico: Propiedad química del suelo para liberar y/o retener iones por el contenido de arcillas.

Conductividad eléctrica: Es la capacidad de un material para dejar pasar la corriente eléctrica.

Crudo: Petróleo sin refinar.

Cuerpo Hídrico: Masas o extensiones de agua en la superficie de la tierra o dentro de la misma.

Curvas de nivel: Líneas que muestran alturas de igual valor en un Dataset de Raster.

Densidad Aparente: Masa de suelo por unidad de volumen que describe la compactación del suelo, relaciona los sólidos con el espacio poroso.

Densidad Real: peso de las partículas de los diferentes tipos de suelo en relación con el espacio que ocupan en un volumen.

Electrodos: Es un conductor de corriente alterna que no tiene designado ánodo y cátodo, puesto que el flujo de los electrones tiende a cambiar.

Estrato: Capa horizontal de un espesor que tiende a ser uniforme, que comparten características y está separado por otras capas uniformes.

Flexómetro: Cinta enrollada, grabada con los sistemas de medición internacionales, cuya precisión es de hasta de 0.5 mm, y se encuentra dentro de una caja o medio que permite extenderlo in con facilidad.

Hidrocarburo: Compuesto orgánico cuya composición es carbono e hidrógeno.

Intemperización: Cambios ambientales a los que un suelo está expuesto, los cuales pueden ser temperatura, luz, precipitación, viento, entre otros.

Isolíneas de Carga: Son líneas imaginarias que indican la presión ejercida sobre los fluidos, debido a su fricción con capas de suelo

Landfarming: Técnica de biorremediación superficial para reducir la contaminación por hidrocarburos con microorganismos.

Lixiviado: Líquido resultante de la degradación de un compuesto que por su naturaleza y contenido de agua tiende a infiltrarse en el suelo.

Meteorización: descomposición de las rocas y de los minerales cuando entran en contacto con la superficie, cuerpos hídricos o biósfera.

Miscible: Propiedad de algunos químicos para mezclarse en la proporción que sea.

Modelo conceptual: Representación del Área de Estudio sin alteraciones o intervenciones que afecten el aspecto físico.

Nivel freático: Nivel superior del acuífero confinado dentro del suelo.

Oleoducto: Tubería que conduce petróleo desde un lugar a otro.

Orto fotos: representación fotográfica de la superficie terrestre a la misma escala, libre de deformaciones o errores, cuya validez es la misma en plano cartográfico.

Pasivo ambiental: Residuos de elementos que no fueron remediados adecuada y oportunamente, lo cual hace que sigan causando daños en el ambiente.

Percolación: Paso lento de un fluido por un material poroso

Pluma de contaminación: concentración de un contaminante en un sector determinado, cuya área puede expandirse, mantenerse o contraerse.

Polarización inducida: método para medir el paso de corriente por un objeto en el subsuelo por la permisividad al paso de electricidad de los materiales.

Refinería: Plataforma que destila petróleo y mediante varios procesos obtiene varios productos derivados.

Resistividad: Es lo contrario a la conductividad eléctrica, puesto que mide la capacidad de los objetos al paso de corriente.

Resistivímetro: Objeto que mide la resistividad.

SOTE: Sistema de Oleoducto Transecuatoriano

Vectores de velocidad: Son flechas que indican el movimiento y dirección de un fluido en un medio poroso saturado.

Zona de Recarga: Sector de la cuenca hidrográfica que, debido a las condiciones climatológicas, topográficas y geológicas, almacenan y recargan acuíferos con las precipitaciones que se infiltran en el suelo.

1.2 Antecedentes

Ecuador es un país cuya economía proviene principalmente de la actividad petrolera. Hace 40 años, en junio de 1972 se creó la Corporación Estatal Petrolera Ecuatoriana CEPE (Pachano, 1980) y con el transcurso del tiempo se fue transformando en Petroamazonas, una entidad que viene realizando varios trabajos por todo el territorio, como la construcción de oleoductos que atraviesan gran parte del país con 1.033 km de sistema de oleoducto transecuatoriano (SOTE). Una de las zonas por donde pasa el oleoducto, es la parroquia de Papallacta, el crudo que pasa por esta zona proviene de Shushufindi hacia Quito. Este crudo es transportado hacia la refinería de Esmeraldas, en donde después de los procesos necesarios es distribuido al país o exportado a otros países (EP Petroecuador, 2014).

El riesgo permanente de derrames en el sistema de oleoductos hace indispensable el disponer de planes de prevención y remediación en caso de derrames. Una medida para reducir las probabilidades de derrame en los oleoductos en que se ha diseñado para ser tendidos bajo tierra, para reducir la influencia de factores externos (climáticos) y antrópicos de afectación en forma permanente.

Los derrames producen cambios en la textura, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, densidad real, densidad aparente y porosidad del suelo (Martinez & López, 2001), por esta razón es necesario conocer las propiedades del terreno donde ocurrió el problema para realizar una proyección de la pluma de contaminación y saber si esta, va a afectar no solo al suelo sino también a los cuerpos hídricos aledaños (Serrano, Torrado, & Pérez, 2013). Los cambios generados en los componentes del suelo pueden ser evaluados con herramientas y modelos geofísicos, antes y después de un derrame y así conocer la movilidad del contaminante en el suelo y sus impactos.

Los métodos geofísicos permiten el análisis de los parámetros antes mencionados en el interior de la tierra, cuyos cambios son influenciados por las

propiedades físicas del suelo. El análisis de estas características y propiedades nos muestra las variaciones verticales y horizontales que se presentan en el interior de las capas terrestres (Kearey, Brooks, & Hill, 2002). La inyección de corriente continua genera contrastes en la medida de las resistividades del suelo y permite construir un modelo en donde se pueda diferenciar o evaluar las características que presentan en el espacio y tiempo (Auge, 2008)

En la industria petrolera se utilizan varias metodologías para determinar la profundidad, volumen y composición de los yacimientos del crudo, entre ellas el Sondeo Eléctrico Vertical (VES) que mide la resistividad del compuesto al paso de la corriente eléctrica inyectada. La resistividad en este caso puede optar por una amplia gama de valores desde 0.2 a 2000 ohm-m, que indica que, al tener una variación en las mediciones entre el blanco y el lugar de estudio, dentro de este rango, es señal de posible contaminación por hidrocarburos, cuya cantidad se refleja en el incremento de la resistividad y la naturaleza del hidrocarburo, esto se complementa con el estudio de campo donde se evidencie el derrame. En caso de la localización de un yacimiento de petróleo, es necesario hacer pruebas de resistividad del yacimiento, por cuanto, el hidrocarburo por ser orgánico, genera alta resistividad, mientras que, el agua de formación presenta alta baja resistividad. La existencia de minerales, cerca de los yacimientos de petróleo exigen ser cuidadosos al momento de interpretar los resultados, puesto que estos minerales cercanos pueden afectar el valor de resistividad y se puede generar confusiones para saber que pasa en este estrato (Oilfield Glossary, 2018).

Petroecuador lleva varios años utilizando el oleoducto Shushufindi – Quito, que pasa a través de la parroquia de Papallacta. En el 2003 ocurrió una ruptura en el sistema de oleoducto transecuatoriano (SOTE) en el sector San Juan Loma, en el kilómetro 199+400 cruzando el río Sucus. La ruptura, según varios informes se dio por el paso de una maquinaria cuyo fin era el de construir otro SOTE aledaño al anterior, y debido a que el sote se encontraba a 1,10 m de profundidad y en tierra suelta, tuvo contacto con la maquinaria y ocurrió esta tragedia en donde se derramó alrededor de 13.000 barriles de petróleo durante 9 horas de liberación del flujo. El derrame tomó el cauce del río Sucus y llegó

hasta la laguna de Papallacta, la cual se cubrió hasta la mitad de residuos hidrocarburíferos (Weemaels, <http://www.accionecologica.org>, 2003).

1.3 Contaminación por hidrocarburos

El transporte del crudo a través de Papallacta se realiza a través del SOTE bajo tierra que cruza toda la parroquia. El día martes 8 de abril de 2003 a la altura del kilómetro 199+400, en el sector Sucus – San Juan, dentro de la reserva Cayambe Coca como se ve en el gráfico 1, se estaban realizando trabajos para colocar otro oleoducto conductor de petróleo, por lo cual había maquinaria pesada en el sector del oleoducto, durante la remoción de la primera capa de tierra los tractores pasaron por un sector donde el oleoducto se encontraba a 1,10 m de profundidad de la tierra suelta, que ocasionó la ruptura del SOTE cerca de las 5:00 am. Las medidas de mitigación no se realizaron hasta las 2:00 pm. Se colocaron boyas en la laguna de Papallacta para retener el crudo que salió durante 9 horas consecutivas. El crudo derramado pasó directamente al río Sucus, dado que una alcantarilla puesta por Petroecuador dos años antes se había roto, de esta manera al ser contaminado el Río Sucus, siguió el curso del mismo y se mezclaba en el trayecto con los Ríos San Juan, Tambo y Cachilarca para desembocar en la laguna de Papallacta 4,3 km más abajo del lugar de incidente (Weemaels, Acción Ecológica, 2003).

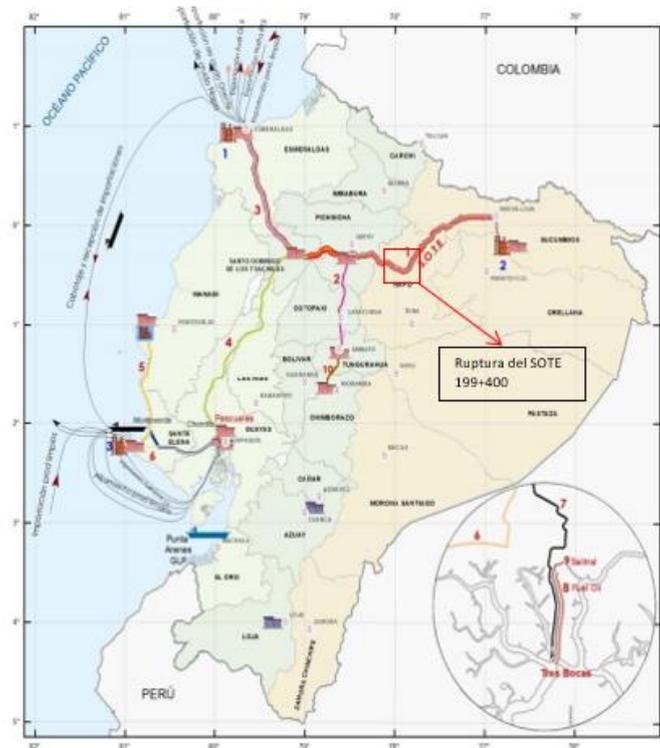


Figura 1. Ubicación del oleoducto y la rotura.

Adaptada de (EP Petroecuador, 2014)

El hidrocarburo en el suelo a más de generar cambios en sus propiedades (Martinez & López, 2001), produce alteraciones de intemperización y/o meteorización que, sumadas a la porosidad del suelo, facilitan la percolación que puede llegar al nivel freático dependiendo del tiempo y la conductividad del suelo, así como de otros factores propios de cada estrato (Alonso, 2012).

1.4 Objetivos

Objetivo General

Determinar la situación actual de contaminación en Papallacta por sondeo eléctrico vertical

Objetivos Específicos

- Levantar la línea base de la contaminación generada en el 2003

- Determinar la presencia y profundidad del contaminante

1.5 Alcance

El presente estudio pretende caracterizar el pasivo ambiental presente en la parroquia de Papallacta y la profundidad a la que se encuentra el contaminante, mediante el uso del Sondeo Eléctrico Vertical, interpretando la variable de resistividad, propia del sitio del derrame.

1.6 Justificación

Los pasivos ambientales formados en las capas internas del suelo, producen una gran afectación ambiental pudiendo contaminar grandes porciones de terreno, niveles freáticos o cuerpos hídricos superficiales, por el movimiento y dirección que toman en los diferentes estratos del suelo afectando sus múltiples funciones ambientales, como la provisión de alimento de plantas, filtro de agua, almacenamiento de nutrientes, ser hábitat de múltiples especies incluyendo al hombre; es un factor esencial para el desarrollo de los ecosistemas y por ende de la vida (Silva & Correa, 2009).

La investigación se justifica por la necesidad de obtener herramientas de monitoreo y evaluación de la calidad de sitios que han sido afectados por derrames de hidrocarburos, en especial los alto andinos, que son ecosistemas sensibles, productores de agua para centros poblados y sustento de una gran diversidad biológica.

En este contexto el empleo de técnicas geofísicas de Sonde Eléctrico Vertical constituyen una alternativa eficiente para estos objetivos.

Es importante el análisis de la capa de afectación del suelo debido a que de una u otra manera el pasivo ambiental saldrá a la superficie contaminando algún cuerpo hídrico o alguna zona topográfica más baja, de igual manera es

necesario conocer la profundidad y geología del lugar para tener una idea de cómo está viajando el contaminante a través del suelo y poder realizar las mediciones correspondientes en la zona afectada. Debido a que el petróleo no es miscible con el agua, podemos encontrarlo en una capa sobrenadante, con lo cual se propagará en dirección del agua confinada, o puede ser más pesado y por ende se propagará de manera ramificada mientras sigue descendiendo por el nivel freático (Alonso, 2012).

Socialmente se justifica, porque la disponibilidad de modelos de distribución de la contaminación de pasivos permite predecir su potencial de afectación a las actividades productivas de las comunidades aledañas reduciendo la conflictividad social.

Este trabajo incluye una verificación del nivel donde se encuentra el crudo y la dirección de movimiento del mismo, teniendo una idea de cómo viajará en relación al tiempo y al medio en el que se encuentre.

2 CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Características de la Parroquia

Papallacta es una parroquia perteneciente al cantón Quijos, en la Provincia de Napo y es conocida como la entrada a la Amazonía desde el DMQ. Se ubica en la cordillera oriental de los Andes, con una superficie de $312,9 \text{ Km}^2$ y está entre dos zonas protegidas, la Reserva Ecológica Antisana y el Parque Nacional Cayambe Coca. Limita al norte con la parroquia de Oyacachi, al sur con el cantón Archidona, al este con la parroquia de Cuyuja, y al oeste con el Distrito Metropolitano de Quito. La temperatura media está cerca de los 14 grados centígrados. Cuenta con varios cuerpos hídricos de los cuales el DMQ es beneficiado por la dotación de agua potable y también es un atractivo de la zona. Esta parroquia tiene una riqueza ecosistémica, como lo es el páramo, el cual abastece de agua local y regionalmente y constituye un 50 por ciento del

territorio. Papallacta tiene un flujo de turistas muy constante debido a sus famosas aguas termales y a la vez medicinales (Tituaña, Rosero, Ríos, Maila, & Simbaña, 2011).

Las principales actividades económicas de la zona según la Junta Parroquial de Papallacta es la siguiente:

Tabla 1.

Actividades Económicas de Papallacta.

Actividades Económicas	Casos	Porcentaje
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura	56	23,73%
Explotación de minas y canteras	1	0,42%
Industrias manufactureras	7	2,97 %
Suministros de agua electricidad y gas	13	5,51%
Construcción	11	4,66%
Comercio, hoteles y restaurantes	77	32,63%
Transporte, almacenamiento y comunicación	23	9,75%
Servicios comunales sociales y personales	48	20,34%
Total	2360	100,00%

Adaptado de: Junta Parroquial de Papallacta, 2009

2.2 Contaminación del Suelo

La textura, estructura, composición y demás características del tipo de suelo, son las que determinan la dirección y velocidad en la que el contaminante se va a propagar en suelo y la afectación a las plantas. Los hidrocarburos generan una gran cantidad de compuestos altamente tóxicos, los cuales pueden ser absorbidos por las plantas, al igual que genera un deterioro cada vez mayor en el suelo y repercute en la fertilidad del mismo, de manera que este suelo queda expuesto a lixiviación, erosión y meteorización (Velásquez, 2016). Papallacta es una zona muy rica en recursos, debido a que por condiciones geográficas se encuentra en la entrada a la Amazonía y cuenta con páramo y grandes capas de suelo orgánico, al igual que varias reservas de agua y las termas, que son el principal atractivo turístico de la zona (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2016). Si el crudo, llega a tener contacto con más superficies y lugares aledaños a la zona de derrame, comenzará a tener mayor afectación en las actividades económicas de la zona y se verá perjudicado el sector hasta que no se haga un plan para retirar este contaminante.

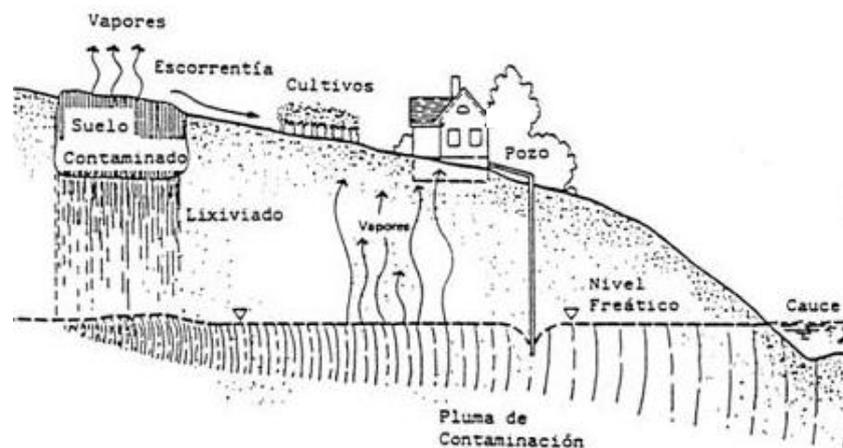


Figura 2. Movilización del contaminante en el suelo.

Adaptado de (Gestión Calidad Consulting, 2016)

2.3 Remediación

En noviembre del 2003 se realizó una remediación en la laguna de Papallacta por Prototek, quienes realizaron skimming, que consiste en la ubicación de colectores de hidrocarburos entre la interfase del agua y el crudo en sentido de la circulación para que colector pueda interceptar el contaminante (Montoya, 2013), de esta manera se remediaron alrededor de 7,2 hectáreas contaminadas con 22000 barriles de hidrocarburo, los suelos y ríos también fueron remediados por medio de succión del crudo para luego ser tratado por landfarming, de esta manera las concentraciones bajaron hasta los 1000 mg/L en los suelos contaminados por el derrame y a 0,5 mg/L en el agua de la laguna (Aveiga del Pino, Cabrera, Tapia, & Ponce, 2005). De igual manera el Dr. Miguel Gualoto utilizó microorganismos para realizar una biorremediación en el sector de la Laguna de Papallacta, sin embargo esta remediación se dio en una capa de 25 – 30 cm de suelo de manera superficial (Gualoto, 2011), por lo cual el pasivo ambiental está presente.

2.4 Geofísica

La ciencia de la Geofísica estudia las propiedades físicas del suelo, de tal manera que determina la estructura de la tierra a partir de sus propiedades y características del material o de los materiales que lo componen, sean de manera natural o artificial (Alvarez, 2003).

2.4.1 Método Gravimétrico

La gravimetría se basa en la determinación de una o varias perturbaciones en el campo gravitacional ocasionadas por cuerpos o masas livianas o pesadas en las capas internas del suelo, lo cual ocasiona un cambio en la dirección y la gravitación en los diferentes puntos de medición debido a la densidad de la capa localizada, por lo cual se evidencian comparando los valores obtenidos

con valores de gravedad conocidos, se debe tomar en cuenta la proximidad a diferentes elementos que puedan alterar este valor gravitatorio. Este método es medido con una balanza de torsión o gravímetro (Gella & Brüggén, 1930).

2.4.2 Método Sísmico

La sísmica evalúa la diferencia en la velocidad en que las rocas conducen las ondas elásticas ocasionadas por una fuente artificial, la cual puede ser un estallido o un fuerte golpe, la velocidad de las ondas tiende a aumentar en las capas de mayor densidad, y se mide con un sismógrafo (Gella & Brüggén, 1930).

2.4.3 Método Magnético

La magnetometría estudia la fuerza de atracción o disturbios de los campos magnéticos en los minerales que atraen hierro, sin tomar en cuenta la gravedad. Se evalúa la intensidad de atracción magnética característica de cada tipo de suelo o masas presentes en las capas internas de suelo (Castro, Delgado, & García, 2012).

2.4.4 Métodos Eléctricos

Los métodos geo-eléctricos analizan la conductividad de los minerales presentes en las capas internas del suelo, dado que todos los materiales tienen una oposición a la o resistencia al paso de la corriente eléctrica, lo cual permite distinguir entre variaciones que se ubican a distintas profundidades, localizando así minerales, cuerpos hídricos, combustibles fósiles, y recientemente plumas de contaminación (Gella & Brüggén, 1930).

2.5 Sondeo Eléctrico Vertical

El sondeo eléctrico vertical es una técnica geofísica eléctrica para determinar las diferencias entre las propiedades físicas de las formaciones geomorfológicas a distintas profundidades del suelo, evaluando la prospección eléctrica para obtener la resistividad aparente. El método consiste en la inyección de corriente por dos electrodos, los cuales se denominan A y B, generando una diferencia de potencial, la cual es medida por otros dos electrodos denominados M y N. La resistividad de los materiales varía desde 10^{-8} , hasta 10^{15} $\Omega\cdot m$, estos valores se determinan por la composición de los materiales, el contenido de agua, su porosidad efectiva, y las sales presentes en caso de que tenga agua (Sánchez, 2017).

Tabla 2.

Resistividad de algunos tipos de suelos.

Naturaleza del terreno	Resistividad $\Omega\cdot m$
Terrenos pantanosos	Máximo 30
Limo	20 – 100
Humus	10 – 150
Turba húmeda	5 – 100
Arcilla plástica	50 – 100
Marga y arcillas compactas	100 – 200
Margas del jurásico	30 – 40
Arena arcillosa	50 – 500
Arena silíceas	200 – 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 – 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 – 3000
Calizas blandas	100 – 300
Calizas compactas	1000 – 5000
Calizas agrietadas	500 – 1000
Pizarras	50 – 300
Granito y gres procedentes de alteraciones	1500 – 10000
Roca ígnea	5000 – 15000

Tomada de (Sanz, Duque, & Gómez, 2010)

2.5.1 Método Wenner

La metodología Wenner de diseño eléctrico consiste en la colocación de los cuatro electrodos de manera equidistante y en una línea recta de manera simétrica al punto de estudio o medición, la profundidad de medición es equivalente a la tercera o cuarta parte de la abertura de los electrodos AB, dependiendo del equipo (Orrego & Tabares, 2007). Este método se utiliza principalmente para capas planas.

El arreglo eléctrico Wenner se da de la siguiente manera donde $AM=MN=BN$, de tal manera que, si es necesario abrir los electrodos AB para alcanzar una mayor profundidad, se debe mover también los electrodos MN.

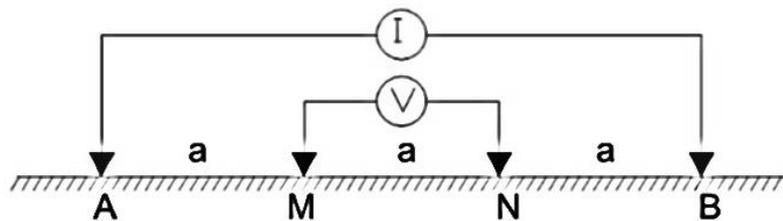


Figura 3. Arreglo Wenner para Sondeo eléctrico vertical.

Tomada de (Brantax, 2009)

La ecuación para calcular la resistividad viene dada en base a la apertura de los electrodos “a”, la constante “ π ”, el voltaje recibido “V” y la intensidad de voltaje enviada “I”.

$$K = 2\pi a \frac{V}{I}$$

Tomada de (Moreira, Lapola, & Carrara, 2015)

2.5.2 Método Schlumberger

La metodología Schlumberger es muy parecida a la Wenner, pero la diferencia radica en la apertura de los electrodos, la apertura de AB puede llegar a ser 10 veces más amplia que la apertura de MN y mínimo 3 veces más que MN.

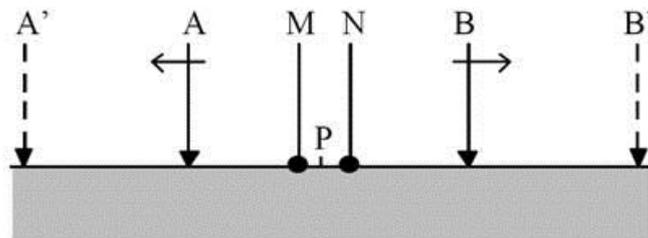


Figura 4. Arreglo Schlumberger.

Adaptada de (Auge, 2008)

La ecuación para calcular la resistividad se da en base a la apertura de los electrodos AB, y se utiliza para conocer valores a grandes profundidades (Orrego & Tabares, 2007).

$$K = \frac{\pi}{4MN} (AB^2 - MN^2)$$

Tomada de (Auge, 2008)

2.6 Programas

Para la realización de los modelos y obtener los datos necesarios para la realización de los mismos se utilizó varios softwares que facilitan el manejo de información y ayudan en su interpretación.

2.6.1 ArcMap 10.5

Este programa es el componente primario del software ArcGIS, es un sistema de información geográfica para la realización y manipulación de la cartografía

de manera digital y directa conjunto con análisis de los mismos. De igual manera posee varias aplicaciones para manejar archivos geoespaciales, creando coberturas, capas, metadatos y realizar operaciones de geoprocesamiento sobre varios temas (Hernández & Montaner, 2008).

2.6.2 VES 2000

El software está diseñado como una solución para la interpretación de los datos de resistividad obtenidos con la metodología Schlumberger en campo sin ninguna manipulación previa, brinda mediante un clic el grosor u resistividad de las capas del suelo de estudio y la curva teórica del mismo, también puede realizar el cálculo de la sucesión estratigráfica (P.A.S.I., s.f).

2.6.3 EarthImager 2D

Es un software de inversión y modelado en 2 dimensiones que genera a partir de datos colectados con el equipo SuperSting para una lectura de manera fácil. El software permite realizar corrección con respecto a la topografía del terreno y colocar condiciones de borde, permite borrar datos malos o que generen error por factores que alteren el envío de electricidad al suelo (ADVANCED GEOSCIENCES, 2018).

2.6.4 Global Mapper

Es un software de sistemas de información geográfica fácil de usar que brinda un sin número de aplicaciones y datos geo-espaciales orientado a expertos y gente sin experiencia en uso del software. Puede leer la mayoría de datos espaciales y tiene apertura para bases de datos de todo tipo, de esta manera se puede leer, analizar y trabajar con los datos obtenidos.

2.6.5 Modflow

Es un programa que utiliza modelos con flujo saturado en 3 dimensiones por multicapas diseñado por Servicio Geológico de Estados Unidos. Posee módulos que se enfocan en una característica específica que interviene o modifica el estado hidrológico que se desea simular. El software dispone de un total de once códigos para procesar los datos ingresados, los cuales se pueden ver de manera independiente o complementaria para realizar un modelo de escenarios, los cuales son: PEST, MODPATH, MOC3D, MT3D, MT3DMS, MT3D99, RT3D, PHT3D, SEAWAT, Water Budget Calculator, y PMPATH (Cruces de Abia, 2007).

El código PMPATH del programa Modflow se diseñó para realizar un modelo que represente el transporte por advección y calcular la dirección que toma el agua subterránea. PMPATH usa un método de reconocimiento de la trayectoria analítica en MODPATH para determinar el movimiento de las partículas y el tiempo, en el que lo hacen.

3 CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en la Parroquia de Papallacta, en el cantón Quijos. La parroquia se encuentra a 3300 msnm a 67 kilómetros de Quito, se encuentra cerca de dos áreas protegidas, El Antisana y la reserva Cayambe – Coca (Ver figura 5), está rodeado de páramos que llegan hasta los 5790 msnm, que son albergue de varias especies tanto de flora como de fauna (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2016). El clima es determinado como ecuatorial frío, la temperatura promedio en la parroquia varía de 8 a 12 °C, la precipitación anual media que supera los 1000 mm. El estrato de páramo ocupa casi el 80 % del territorio y su temperatura baja hasta los 2 °C, el suelo en su mayoría se

caracteriza por ser franco limoso de origen volcánico e inundables (Tituaña, Rosero, Ríos, Maila, & Simbaña, 2011).

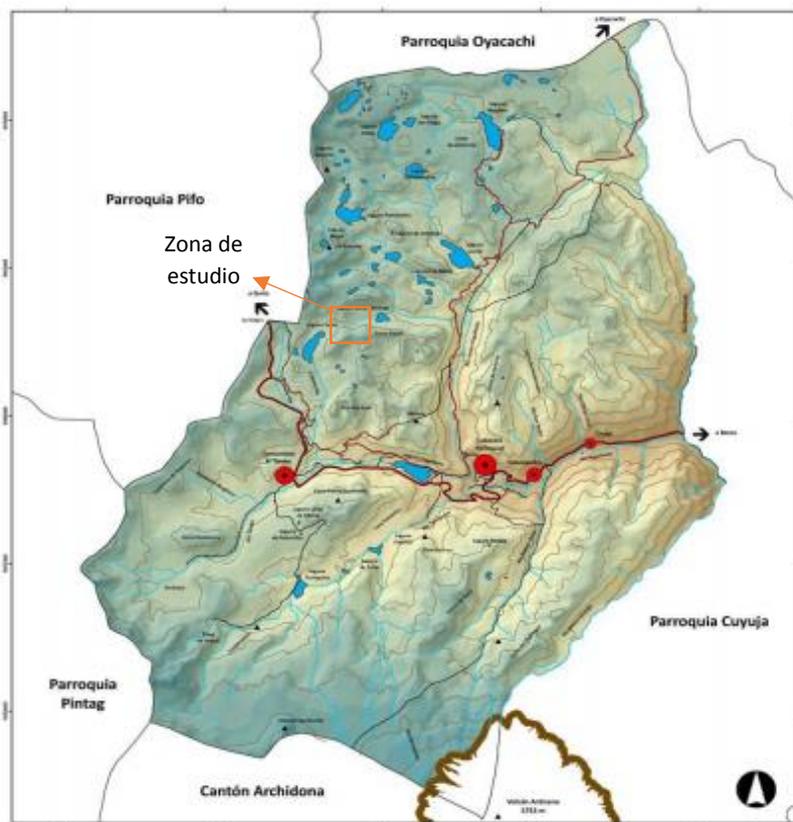


Figura 5. Ubicación geográfica de Papallacta.

Adaptada de (Tituaña, Rosero, Ríos, Maila, & Simbaña, 2011)

El punto de muestreo fue tomado a los 3827 msnm en las coordenadas $S00^{\circ}21'21.8''$ $W078^{\circ}11'30.3''$ donde ocurrió el derrame, en abril del 2003, se derramó 13000 barriles de petróleo. El crudo desembocó en la laguna de Papallacta, y en los ríos Sucus, San Juan, Tambo y Cachilarca. Sin embargo, en el área donde se quebró el sote, que fue en el kilómetro 199+400, se realizó una biorremediación en el terreno afectado, el cual disminuyó la concentración de hidrocarburo a límites máximos permisibles en los 30 cm de capa de suelo superficial, no obstante, la mayoría del petróleo sufrió percolación y debido a la porosidad y conductividad del suelo el pasivo ambiental se encuentra presente en las capas internas del lugar donde ocurrió el incidente. En la siguiente imagen podemos observar el terreno y las curvas de nivel del mismo, el cuadro

dibujado representa el área de estudio y del proyecto realizado en el presente trabajo.

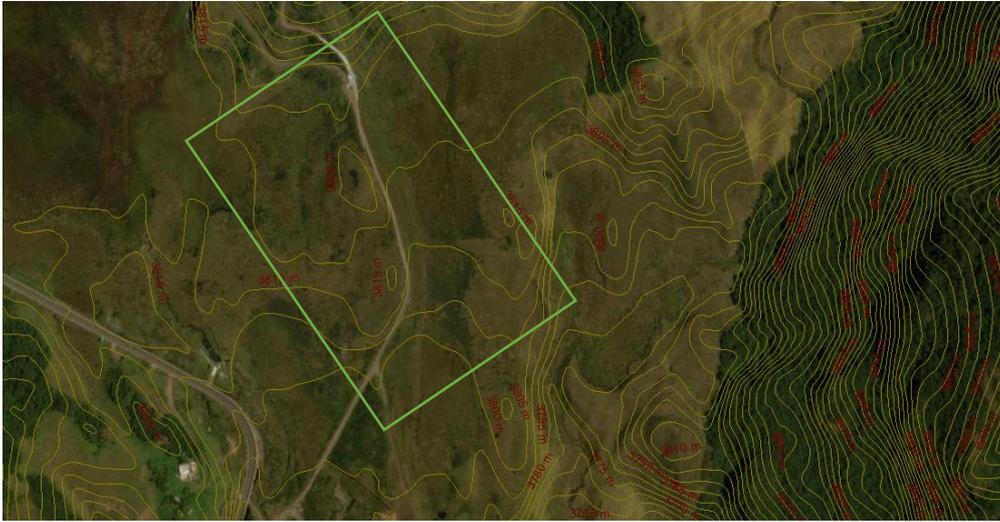


Figura 6. Ubicación geográfica de Papallacta

3.1.2 Estudios iniciales

El levantamiento de información del derrame se realizó a partir de reportes y noticias del problema, artículos científicos realizados por la remediación dada en el sector y con testimonios de los implicados en el incidente. De igual manera, al acudir a la zona del derrame se confirmó las aseveraciones realizadas anteriormente y se validó los datos comprobando la credibilidad de los documentos al ser reconocidos o aceptados por entidades reguladoras y de control.

3.2 Descripción de instrumento de medición (P.A.S.I.)

El equipo utilizado para realizar las mediciones de resistividad en campo es un P.A.S.I., un resistivímetro de marca P.A.S.I. que dispone de 2 baterías externas para poder llegar a 1280 V a 1 Amperio de intensidad, además dispone de una memoria la cual puede almacenar hasta 18000 datos los mismos que pueden

ser descargados y procesados a través de la interfaz del programa que viene junto con el equipo. El equipo cuenta con el resistivímetro, 4 bobinas de cables para los electrodos, 4 electrodos A, B, M, N los cuales son de dos de plata y dos de cobre respectivamente, 4 pinzas que conecta cada bobina a cada electrodo que corresponda y dependiendo del medio, de la profundidad, de la saturación del suelo, entre otros factores, se puede configurar para determinar el tiempo que se envía electricidad, se puede conectar las baterías para aumentar la electricidad emitida y cambiar los parámetros de medida según corresponda y sea necesario (P.A.S.I., 2010).



Figura 7. Resistivímetro P.A.S.I.

Tomada de (P.A.S.I., 2010)

3.2.1 Arreglo electródico utilizado

Para la determinación de la resistividad de las diferentes capas se utilizó la metodología Schlumberger mencionada en el punto 2.5.2 la cual consiste en un arreglo en línea recta donde los electrodos AB están mucho más espaciados que MN, de esta manera se pueden llegar a capas más profundas de suelo. La apertura de los electrodos se dio de la siguiente manera para obtener los datos de resistividad a diferentes profundidades (Djadia, y otros, 2010).

Tabla 3.

Abertura de los electrodos

AB (m)	MN (m)
40	20
60	30
80	30
100	30
120	30

Las mediciones se dieron en tramos perpendiculares a la dirección del SOTE en el área donde ocurrió el derrame y en un área no afectada por el derrame, utilizando una batería extra al resistivímetro, un GPS para lograr una línea recta en el arreglo de los electrodos y tres flexómetros para medir la distancia exacta a la que se debe poner los electrodos.

3.2.2 Segundo instrumento de medición

Se utilizó un segundo equipo de medición en el área para corroborar los datos obtenidos con el resistivímetro P.A.S.I., este equipo es el Resistivímetro AGI, modelo SUPER STING R8, el cual no solo mide resistividad sino también utiliza polarización inducida, se utilizó cables pasivos con electrodos de corriente y potencial y los insumos necesarios para colocar todo el arreglo.

El equipo se colocó en un tramo de 245 metros y llegó a una profundidad de 70 metros para visualizar las resistividades del perfil de suelo.

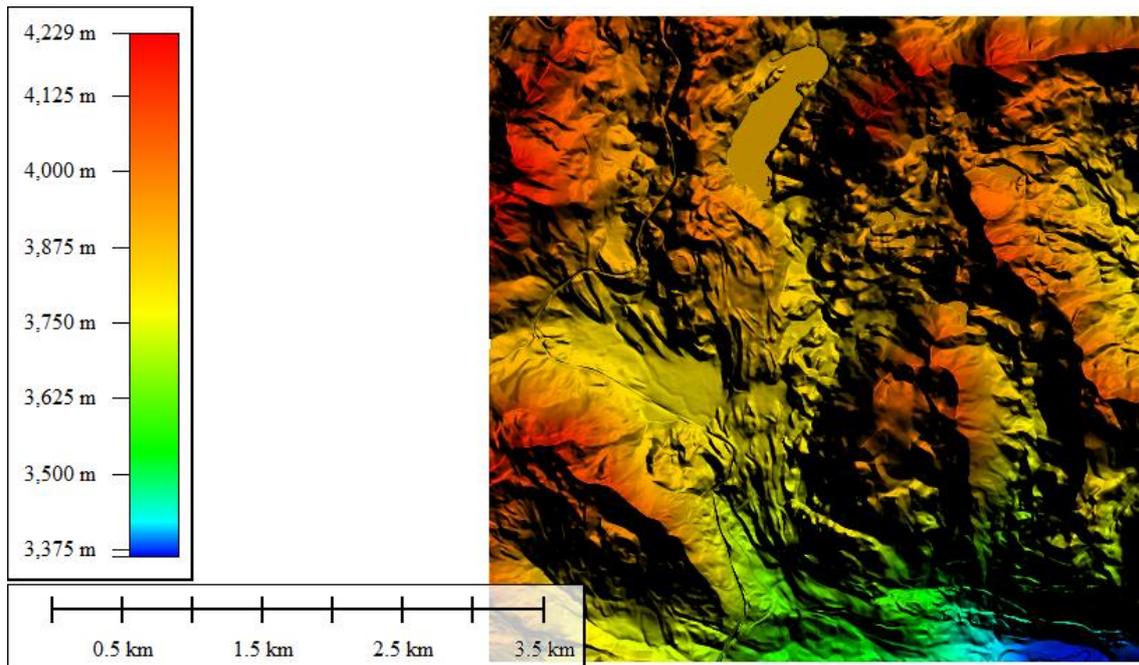


Figura 8. Resistímetro Super Sting R8

Tomada de (AGI Advanced Geosciences, 2014)

3.3 Modelo conceptual

Mediante una solicitud al MAGAP, al departamento de SIG Tierras, se obtuvieron las orto fotos de Papallacta, con las cuales se pudo obtener las curvas de nivel y el modelo en 3D. Los datos obtenidos estaban en formato MDT, un tipo de plantilla de base de datos geoespaciales.



*Figura 9.*Raster obtenido por el departamento de SIG Tierras del MAGAP

Las curvas de nivel se obtuvieron en el programa Global Mapper 18, al cargar las orto fotos y mediante el comando “Contours” se determinaron las curvas de nivel cada 5 m de diferencia y con las coordenadas del GPS se localizó el punto exacto donde se realizaron las mediciones en el terreno y la línea de 245 m de medición con el segundo equipo. De igual manera se identificó la cuenca y la dirección del flujo de corriente. Con estos datos se desarrolló el modelo conceptual (Ver figura 10).

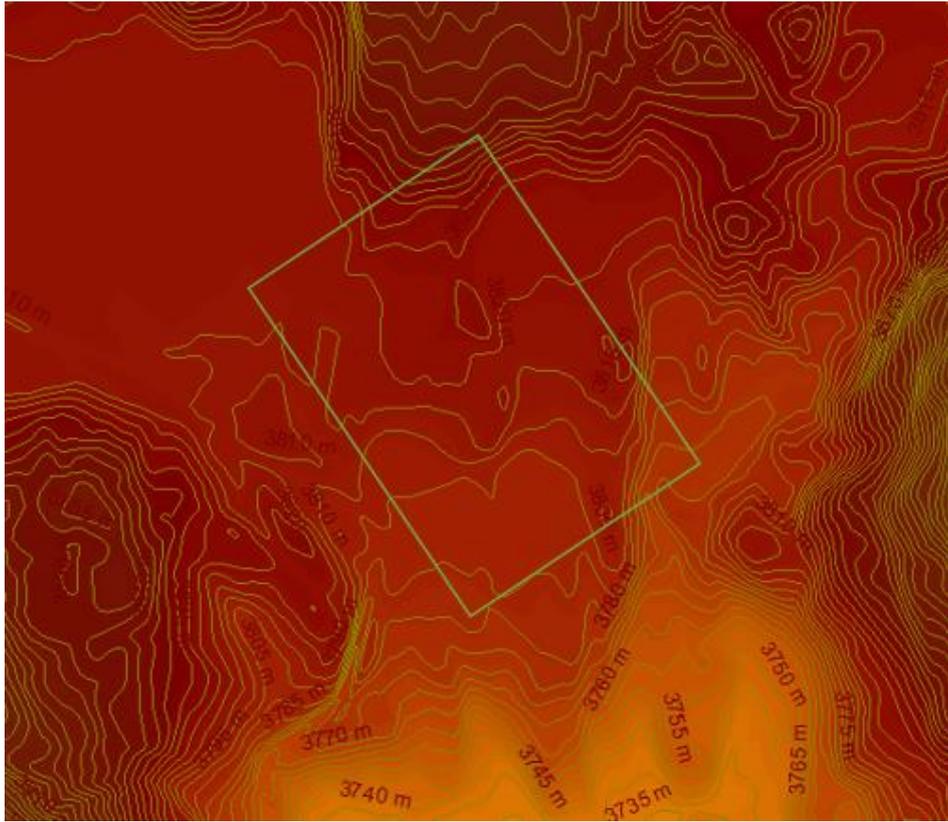


Figura 10. Curvas de nivel realizadas a partir de las orto fotos y el cuadrante de estudio.

3.3.1 Perfiles de suelo

La determinación de los perfiles de suelo se dieron gracias a los datos obtenidos con los resistivímetros y la comparación con la carta geológica de la zona (Ver Anexo 1), así como la validación con datos de la proveniencia del tipo de suelo cercano a volcanes.

3.3.2 Propiedades del suelo

Al determinar los 3 perfiles de suelo localizados en la zona, se procedió a realizar el modelo, por ende, mediante bibliografía se obtuvo los datos de

porosidad, conductividad hidráulica horizontal, conductividad hidráulica vertical, la altitud y las cargas hidráulicas.

3.3.3 Recarga

Para determinar la precipitación de la zona se recurrió a los registros de precipitación de Papallacta en el INAMHI desde 2003 hasta presente año, haciendo un promedio anual y determinando después la precipitación en mm/s teniendo un valor medio de 128,21 mm/mes.

3.4 Modflow

Para hacer una representación del derrame se utilizó el programa Modflow el cual realiza modelos de agua subterránea y su interacción con cuerpos hídricos superficiales, así como modelar partículas de contaminación y ver el flujo de las mismas hacia los niveles freáticos o hacia el suelo en general (USGS, 2018).

Con el software se creó 3 capas en un cuadrante predeterminado como se presenta en el Figura 11, este cuadrante fue realizado en Modflow en una grilla de 40 x 40 celdas con 3 capas de profundidad, representando un área de 18 ha, y un total de 60 m de profundidad.

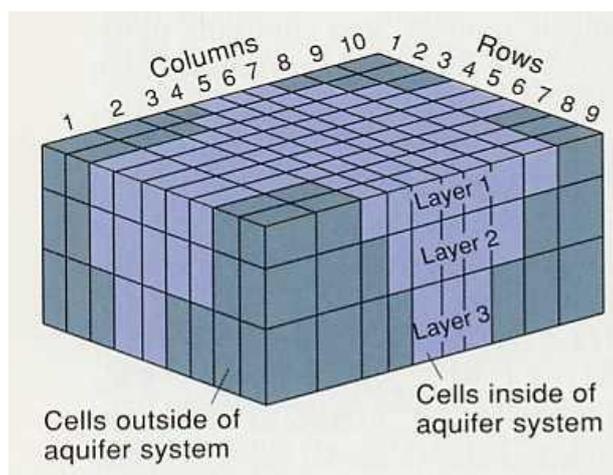


Figura 11. Grilla de Modflow para diseño de modelos de acuíferos.

Tomada de (USGS , 2007)

3.4.1 Condiciones de Borde

Para realizar el modelo en Modflow se recurrió al modelo conceptual para determinar las características y condiciones de borde de la zona, teniendo así una ladera que funciona como zona de recarga, en la parte izquierda se presenta una ladera pequeña, en la parte derecha podemos observar la continuación de la zona de recarga, y en la parte sur está la quebrada que llega hasta el río Sucus.

3.4.2 Datos de diseño

Se diseñó una grilla con los siguientes parámetros para representan el perfil del suelo predeterminado para el estudio como se muestra en el Gráfico 10.

Figura 12. Datos de diseño del modelo hidrogeológico.

Se utilizó la mayor cantidad de celdas posibles debido a que el programa solo logra diseñar 5000 celdas, por ende, se utilizó un modelo de 40 x 40 x 3 que da un total de 4800 celdas. Con los parámetros propuestos se determinó un rectángulo cuya longitud duplica el ancho por lo cual tenemos un área de 180000 m^2 , es decir, 18 ha (Ver figura 13).

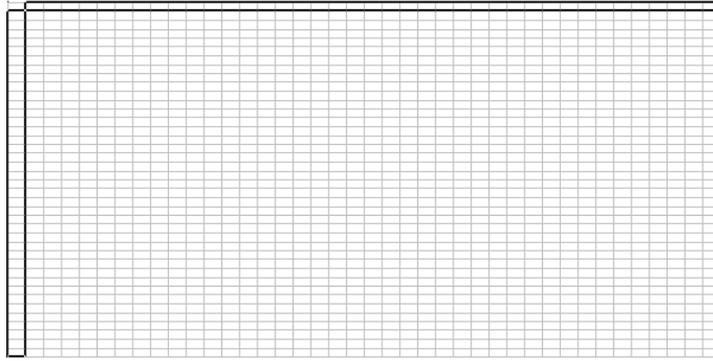


Figura 13. Grilla del modelo hidrogeológico.

Los cuerpos hídricos de la zona son determinados en las condiciones de borde con la ayuda de la opción IBOUND donde se puede seleccionar 1 o -1 si el suelo presenta o no una carga hidráulica, pintando de color azul los cuadros que tengan carga hidráulica. Debido a que no había cuerpos hídricos superficiales en la zona solo se le agregó elevaciones en el terreno, sin embargo, en la segunda capa si se presentan cargas hidráulicas (Ver figura 14).

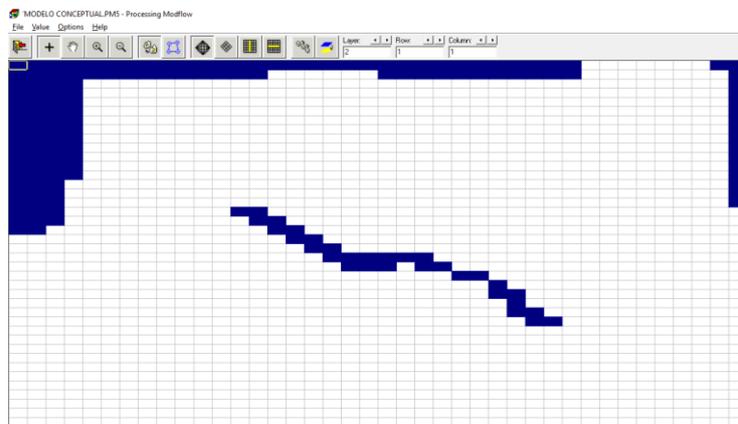


Figura 14. Ubicación de las cargas hidráulicas en la segunda capa.

Para obtener las cargas hidráulicas se utilizó un método matemático en el que se determinaba la mayor y menor altitud en la grilla, con ello, a medida que se descendía, el valor de altitud lo hacía en función del valor real al utilizado en la tabla 4. De esta manera cada cuadro en la grilla tiene un valor diferente, puesto que la topografía varía en toda la zona en la capa 1. Se tomó en cuenta que la primera capa es uniforme y por ende la segunda capa comienza con los

mismos valores que la primera, pero con 20 unidades menos en su máximo, esto se debe a que las capas subterráneas no tienen tanta variación de altitud. Finalmente, en la última capa, se tiene la roca la cual tiene una leve inclinación (Ver figura 15).

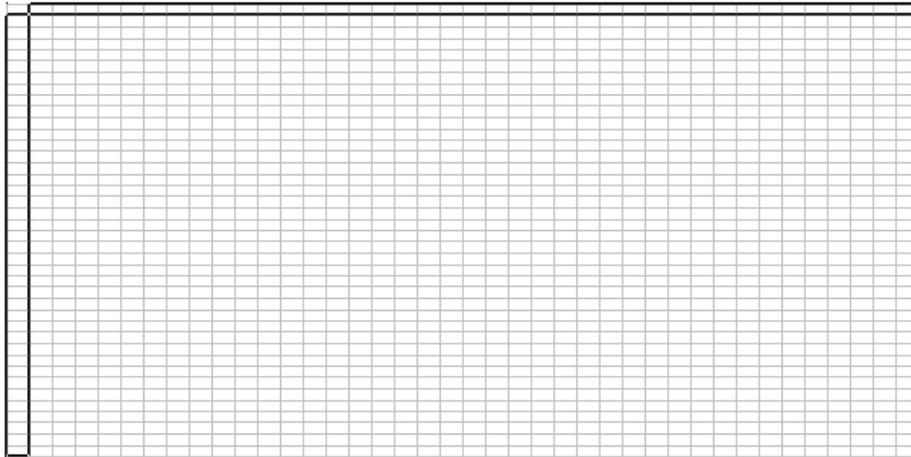


Figura 15. Cargas hidráulicas en la tercera capa

3.4.3 Propiedades de las capas

Las 3 capas del modelo son diferentes por lo cual cada capa tiene diferentes parámetros físicos, las elevaciones se hicieron en base a la diferencia entre las altitudes teniendo los siguientes datos:

Tabla 4.

Datos de elevación de las diferentes capas del modelo.

Cargas hidráulicas			
Cotas (msnm)	Capa 1	Capa 2	Capa 3
3850	90	70	2
3840	80	55	2
3825	65	45	2
3820	60	40	2
3815	55	25	0

3800	40	15	0
3780	20	0	0

Para los datos de conductividad hidráulica y porosidad se recurrió a revisión bibliográfica después de determinar cada tipo de suelo, tomando en cuenta la granulometría y compactación de los suelos según la capa, teniendo así los siguientes valores:

Tabla 5.

Propiedades físicas de los suelos determinados.

Capa	Tipo de suelo	Porosidad efectiva (%)	Conductividad hidráulica horizontal (m/s)	Conductividad hidráulica vertical (m/s)
1	Franco Limoso	0.35	0.006	0.0006
2	Arcilla plástica	0.25	0.0007	0.00007
3	Roca	0.1	2E-13	2E-14

Datos obtenidos de: (Todd & Mays, 2005)

3.4.4 Simulación del movimiento del flujo

A través del parámetro para procesar los datos PMPATH del software Modflow, se puede generar una simulación del movimiento de las partículas en cada capa y a la vez se puede colocar las partículas de contaminación y como estas se van a transportar a través del terreno, así como la dirección del flujo en cada capa tomando en cuenta todos los parámetros antes mencionados y colocados en el software de modelamiento en 2D.

3.5 Cálculo del tiempo de percolación del contaminante

Debido a la naturaleza de los fluidos y del suelo, la percolación es algo inminente cuando hay un fluido sobre un terreno, debido a ello se puede determinar la velocidad y tiempo con el cual este puede llegar a niveles freáticos o sectores sensibles teniendo un impacto ambiental mayor que el superficial.

El software antes mencionado de modelamiento de flujos “Modflow” utiliza la siguiente ecuación para determinar el tiempo en el cual se filtran los fluidos basándose en las conductividades y las alturas de los estratos del caso de estudio.

$$V = k \frac{\Delta L}{L}$$

k= conductividad hidráulica en m/s

L= Variación de la carga hidráulica en m

ΔL = la distancia entre las secciones en m

Los datos se calculan en función de ambas conductividades

4 CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Datos de campo

Los datos de campo levantados fueron: coordenadas de los puntos de muestreo de resistividades en los lugares con contaminación y sin ella tal como se muestran en la tabla 6.

Tabla 6.

Coordenadas de los puntos de muestreo.

Puntos de Muestreo	Coordenadas UTM
---------------------------	------------------------

	Este X	Norte Y
Sin contaminación		
1	812715	9960385
2	812782	9960253
3	812809	9960106
Con contaminación		
1	812697	9960099
2	812700	9960185
3	812692	9960260

4.2 Datos de resistividad

Con los datos obtenidos de resistividad se determinaron los perfiles con el software VES 2000, que evaluó las aperturas de AB, MN, la intensidad, potencial de salida y voltaje emitido por el equipo estos datos se presentan en la tabla 16.

Vertical Electrical Soundings - Data Elaboration

Data n.	AB/2 m	MN/2 m			I mA	DV mV	Ps mV	K	ρ_a ohm*m
1	20	10			534	230.0	16.0	47.1	21
2	30	15			533.0	235	23.1	70.6	31.1
3	40	15			533.0	504.3	22.6	143.9	157.6
4	50	15			533.0	584.2	23	238.2	260.7
5	60	15			533.7	200.7	20.1	353.4	132.9
6									
7									
8									
9									
10									

Immission

Generality

Elaboration

Archive

Clear

K Value

Page 1

Page 2

Page 3

Page 4

Figura 16. Datos del área sin contaminación ingresados en el software.

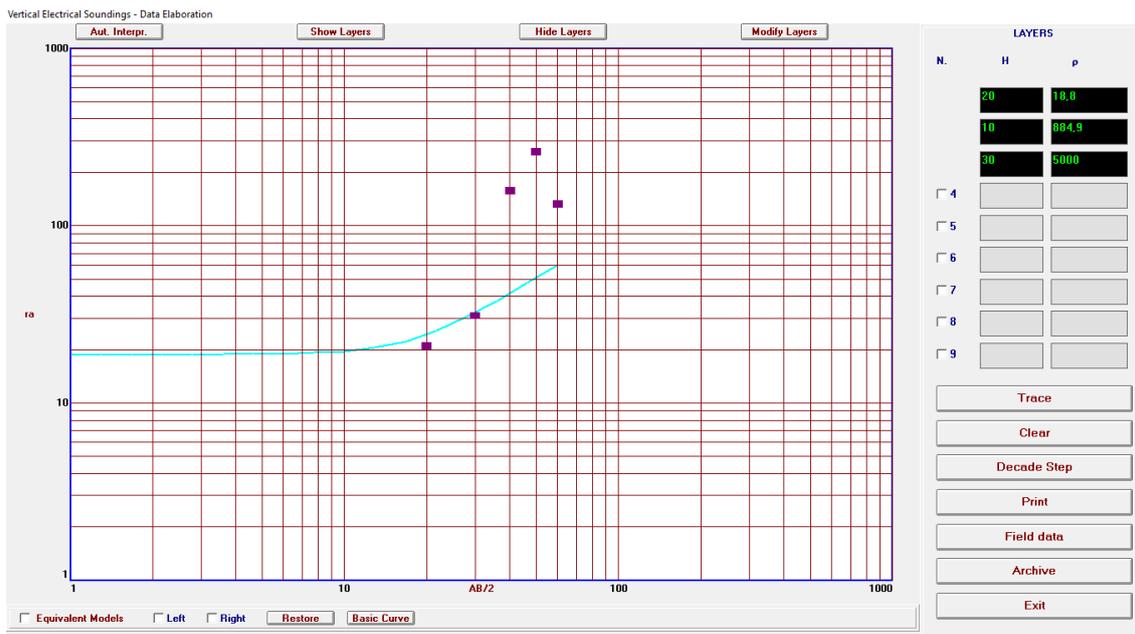


Figura 17. Curva generada en el área sin contaminación con perfiles creados por el software

En la tabla 17 se muestran los datos generados por el software, para un área sin contaminación, con tres capas diferentes de suelo, donde la primera tiene una resistividad de 18,8 ohm-m, propio de un suelo franco limoso, seguida de una resistividad de 884,9 ohm-m, propio de un suelo con arcilla plástica compactada y la última que tiene un valor de 5000 ohm-m, característico de roca proveniente de material piroclástico.

En el área con contaminación (tablas 18 y 19), los datos generados por el software presentan las mismas profundidades que en las gráficas anteriores, sin embargo, los valores de resistividad cambian a 87,3 ohm-m, propio de un suelo franco limoso saturado debido a que el agua es conductor natural de electricidad, seguido de 2052 ohm-m, valor que presuntamente corresponde al contaminante en la capa de arcilla plástica y la última se mantiene en 5000 ohm-m, lo cual muestra que el contaminante no ha ingresado ni ha afectado la roca madre.

Vertical Electrical Sounding - Data Elaboration - DATOS

Data n.	AB/2 m	MN/2 m		I mA	DV mV	Ps mV	K	ρ_a ohm·m
☒ 1	20	10		534	1100	16,8	47,1	97
☒ 2	30	15		533,0	1100	23,2	70,6	145,6
☒ 3	40	15		533,0	798,0	22,0	143,9	215,4
☒ 4	50	15		533,0	504,2	23	238,2	225
☒ 5	60	15		533,7	413,8	20,1	353,4	274
☐ 6								
☐ 7								
☐ 8								
☐ 9								
☐ 10								
☐ 11								
☐ 12								

Elaborated Data Immission

Immission

Generality

Elaboration

Archive

Clear

K Value

Page 1

Page 2

Page 3

Page 4

Print

Exit

Figura 18. Datos ingresados de la zona con contaminación.

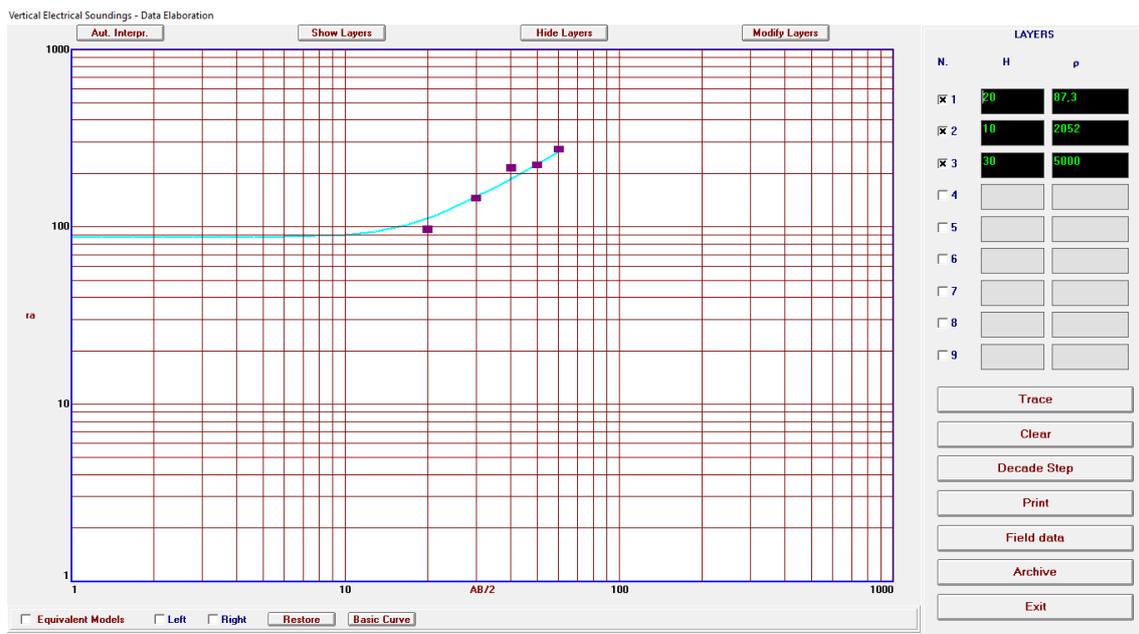


Figura 19. Curva generada por el software con perfiles en el área con contaminación.

Como se puede observar en la figura 20, los valores de las dos primeras profundidades varían debido a la saturación del contaminante en el sector, ambos sectores tienen las mismas profundidades de capas, y las resistividades se elevan donde presuntamente hay un pasivo ambiental.

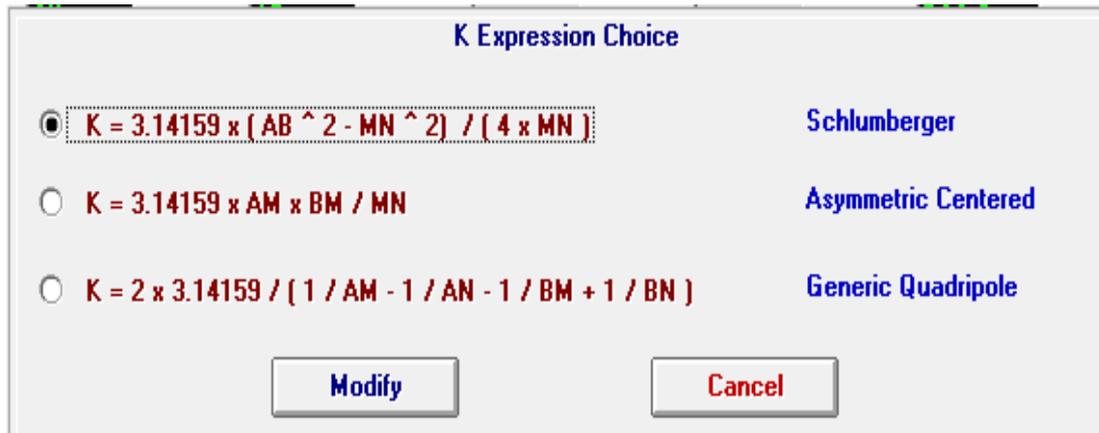


Figura 20. Ecuación utilizada para el arreglo Schlumberger en el software.

Los datos adquiridos por el Resistivímetro Super Sting R8 se procesaron a través del programa Earthmager 2D, el cual utiliza las elevaciones del terreno para tener un perfil edáfico más exacto. El primer punto se encontraba a una elevación de 3793 msnm y el punto más alto llegó a los 3820 msnm. Los datos adquiridos por el Resistivímetro P.A.S.I. fueron procesados en el programa VES 2000 en donde al utilizar todos los datos adquiridos, como $AB/2$, $MN/2$, potencial de salida, intensidad de corriente, y voltaje, muestra la profundidad y las resistividades de los perfiles que genere el programa, así como una curva de resistividad.

4.3 Datos Obtenidos con el equipo P.A.S.I.

En las tablas 8, 9, 10, 11 y 12 se muestran los datos obtenidos en el sector sin contaminación y con contaminación para lograr evidenciar las diferencias entre resistividades de la zona limpia y la zona contaminada.

Tabla 7.

Valores obtenidos con el equipo P.A.S.I. en el primer muestreo en la zona libre de contaminación.

AB (m)	MN (m)	Voltaje (mV)	Resistencia (mΩ)	Potencial de salida (mV)	Intensidad (mA)
120	30	200,7	775,8	20,1	533,7
100	30	584,2	1100	23	533,8
80	30	584,3	1500	22,6	533,8
60	30	235	2000	23,1	533,8
40	20	238,8	2000	16,8	534

Tabla 8.

Valores obtenidos con el equipo P.A.S.I. en el segundo muestreo en la zona libre de contaminación.

AB (m)	MN (m)	Voltaje (mV)	Resistencia (mΩ)	Potencial de salida (mV)	Intensidad (mA)
120	30	201,6	775,3	19,5	533,7
100	30	580,8	1100	23	533,8
80	30	584,3	1500	22,8	533,8
60	30	235	2000	23,2	533,8
40	20	238,8	2000	17,1	534

Tabla 9.

Valores obtenidos con el equipo P.A.S.I. en el tercer muestreo en la zona libre de contaminación.

AB (m)	MN (m)	Voltaje (mV)	Resistencia (mΩ)	Potencial de salida (mV)	Intensidad (mA)
---------------	---------------	---------------------	-------------------------	---------------------------------	------------------------

120	30	201,2	775,1	20,4	533,7
100	30	556,8	1100	22,9	533,8
80	30	584,1	1500	22,9	533,8
60	30	235	2000	23,3	533,8
40	20	238,8	2000	17,3	534

Tabla 10.

Valores obtenidos con el equipo P.A.S.I. en el primer muestreo en la zona con contaminación.

AB (m)	MN (m)	Voltaje (mV)	Resistencia (mΩ)	Potencial de salida (mV)	Intensidad (mA)
120	30	414	775,8	19,5	533,7
100	30	584,2	1100	23	533,8
80	30	799	1500	22,6	533,8
60	30	1100	2000	23,1	533,8
40	20	1100	2000	16,8	534

Tabla 11.

Valores obtenidos con el equipo P.A.S.I. en el segundo muestreo en la zona con contaminación.

AB (m)	MN (m)	Voltaje (mV)	Resistencia (mΩ)	Potencial de salida (mV)	Intensidad (mA)
120	30	413,8	775,3	20,1	533,7
100	30	504,2	1100	23	533,8
80	30	798,8	1500	22,8	533,8
60	30	1100	2000	23,2	533,8
40	20	1100	2000	17,1	534

Tabla 12.

Valores obtenidos con el equipo P.A.S.I. en el tercer muestreo en la zona con contaminación.

AB (m)	MN (m)	Voltaje (mV)	Resistencia (mΩ)	Potencial de salida (mV)	Intensidad (mA)
120	30	413,7	775,1	20,4	533,7
100	30	504,3	1100	22,9	533,8
80	30	798,8	1500	22,9	533,8
60	30	1100	2000	23,3	533,8
40	20	1100	2000	17,3	534

4.4 Mapa con líneas de medición

A partir de las coordenadas dadas en el punto anterior, los electrodos se abrieron de manera perpendicular a la dirección del sote como se presenta en la Figura 21 para determinar las resistividades en las zonas donde se pudo derramar el crudo por posición topográfica y condiciones del terreno.



Figura 21. Área de estudio (rojo), mediciones de resistividad (azul) y SOTE (amarillo).

Tomando en cuenta las coordenadas del área de muestreos del blanco (figura 22), se definió un cuadrante aledaño al sitio de contaminación que no tiene evidencia visual de contaminación en la superficie, datos que se confirmaron con los obtenidos con el equipo en las profundidades seleccionadas.



Figura 22. Área de estudio (Verde), líneas de medición de la muestra blanco (celeste).

4.5 Modelo Conceptual

Gracias a los datos adquiridos por el SIG Tierras, se pudo elaborar un modelo conceptual del terreno para tener una mejor visualización de la zona en 3 dimensiones, en la figura 23, se explica cómo está distribuida la zona, así como, los puntos de muestreo en el lugar con contaminación.

Hay que tener en cuenta que en la visita de campo se pudo observar un material aceitoso en la superficie mientras se hacían las mediciones como se evidencia en el anexo 9.

En las Figuras 21 y 23 se puede apreciar que la línea del 3er muestreo es de mayor longitud, debido a que está incluido el arreglo realizado con el equipo SUPER STING R8, que se ejecutó con casi con el doble de abertura en comparación al modelo P.A.S.I. gracias a las facilidades que este brindaba para dicha actividad.

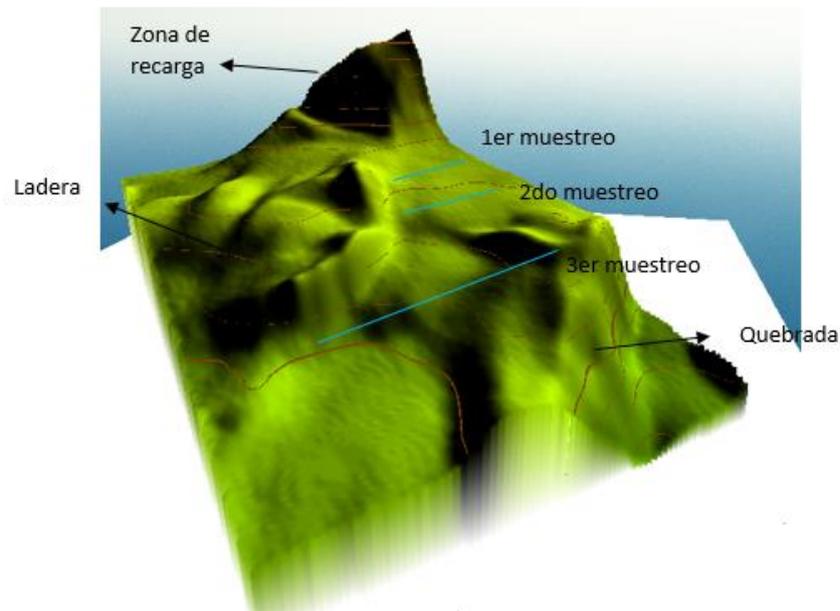


Figura 23. Modelo conceptual del terreno con curvas de nivel.

Como se puede apreciar en la figura 23, la zona de recarga se encuentra en la cota 3850 siendo el punto más alto y el que alimenta a los cuerpos hídricos confinados, de igual manera entre el muestreo 1 y 2 hay zonas más que contribuyen a la recarga del acuífero creando una especie de valle, una zona plana donde se pudo realizar las mediciones pertinentes. Cerca del tercer muestreo están las zonas más problemáticas debido a la existencia de una quebrada, a través de la cual es probable que el derrame haya caído colina abajo llegando al río Sucus que alimenta a la laguna de Papallacta. Es a través de este río que el derrame llegó hasta este cuerpo hídrico, sin embargo, en una especie de valle el crudo se mantuvo retenido algún tiempo, y por percolación, se infiltró al interior del suelo dejando secuelas a su paso.

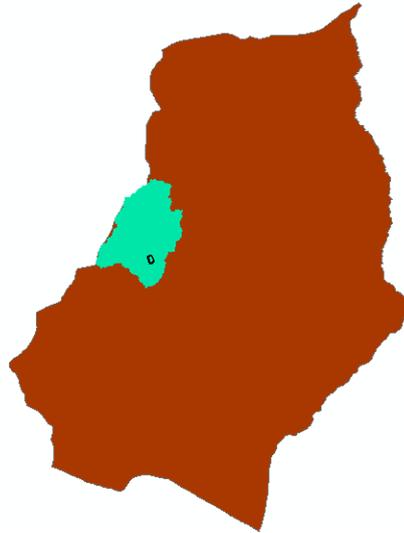


Figura 24. Cuenca del río Sucus (celeste), en la Parroquia de Papallacta (café). Cuenca del Río Sucus, río por el cual se movilizó el contaminante durante el derrame, hasta llegar a la laguna de Papallacta.

4.6 Dirección del flujo

Con el Software “Modflow” se pueden visualizar los vectores de velocidad en las capas establecidas, así como la dirección en la que se mueve el flujo.

Las condiciones de borde son tomadas del modelo conceptual del gráfico 21, en donde se visualiza la zona de recarga y la quebrada donde se ubica el río. Hay que tener en cuenta la recarga, la cual es la precipitación media de la zona obtenida del INAMHI, así como las características del modelo, puesto que el programa toma en cuenta todo el medio diseñado como saturado. Los vectores de velocidad muestran la dirección que toma el flujo en todo el modelo y las Isolíneas de carga muestran la variación de la elevación de la superficie líquida tal como se puede ver en la figura 25.

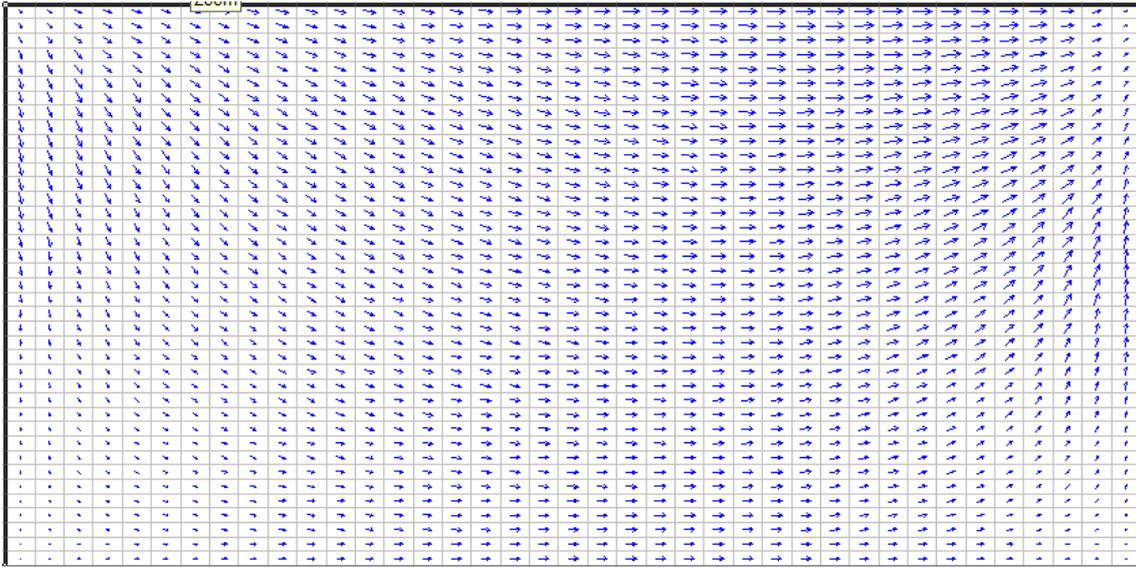


Figura 25. Vectores de velocidad en la primera capa.

Como se puede observar en la primera capa (figura 25) los vectores de velocidad apuntan a la esquina superior derecha, lo que en la figura 23 se muestra, es la quebrada donde se encuentra el río que alimenta la laguna de Papallacta, por otro lado, en el sector del muestreo 1 y 2 los vectores de velocidad se mueven hacia los cuerpos de agua ubicados en las laderas.

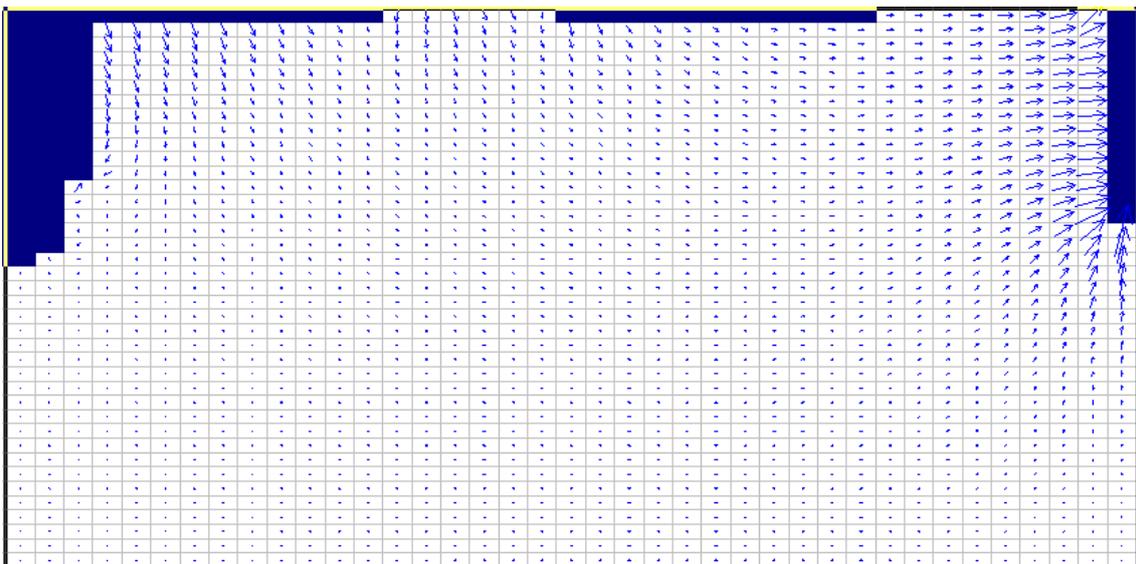


Figura 26. . Vectores de velocidad en la segunda capa.

En la segunda capa (figura 26) se puede observar los cuerpos hídricos y como los vectores de velocidad apuntan en su dirección, sin embargo, al igual que en la gráfica anterior el flujo tiene mayor prominencia en la parte superior derecha que es donde la quebrada es muy pronunciada.

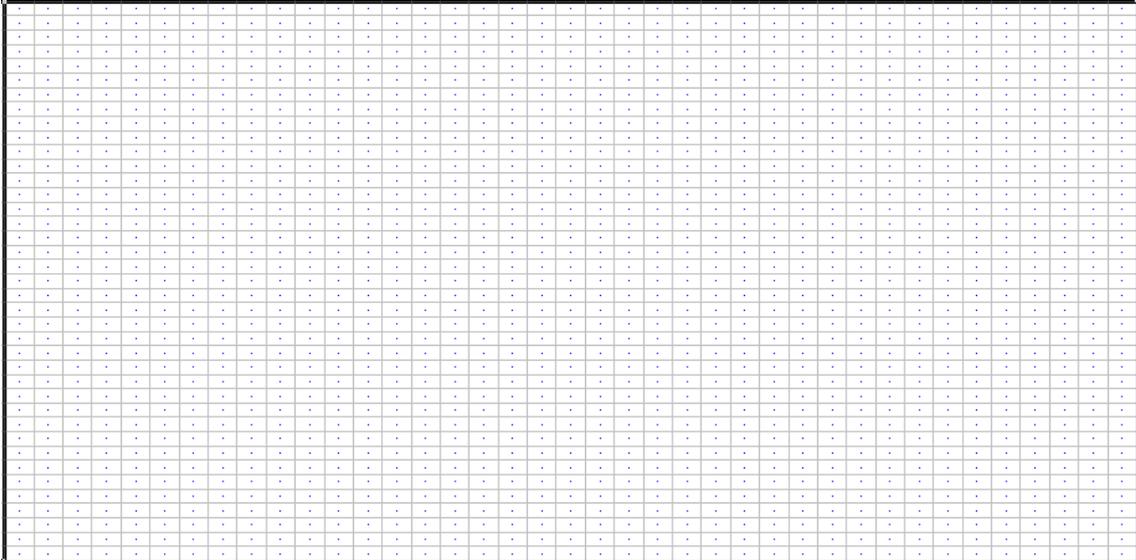


Figura 27. Vectores de velocidad en la tercera capa.

En la tercera capa (figura 27), es evidente que los vectores de velocidad son muy pequeños y no se los puede apreciar bien, lo cual se debe al tipo de suelo, por cuanto la conductividad y la porosidad de la roca no deja que el fluido pase por lo cual toma el curso de la pendiente o del nivel freático en caso de que se localizara a esta profundidad del suelo.

De manera general el movimiento del fluido se da de izquierda a derecha en el modelo, lo cual sería de Noroeste a Sureste en el mapa, por la pendiente y las condiciones topográficas del terreno.

4.7 Proyección del contaminante

Con el software Modflow se puede insertar partículas para simular contaminación (figura 28) y de esta manera ver la dirección en la que se

moverá el contaminante hacia el interior del suelo (figura 29, 30, 31), debido a que el oleoducto estaba 1,10 metros de la superficie cuando ocurrió la rotura, se puede decir que estaba en la primera capa de suelo.

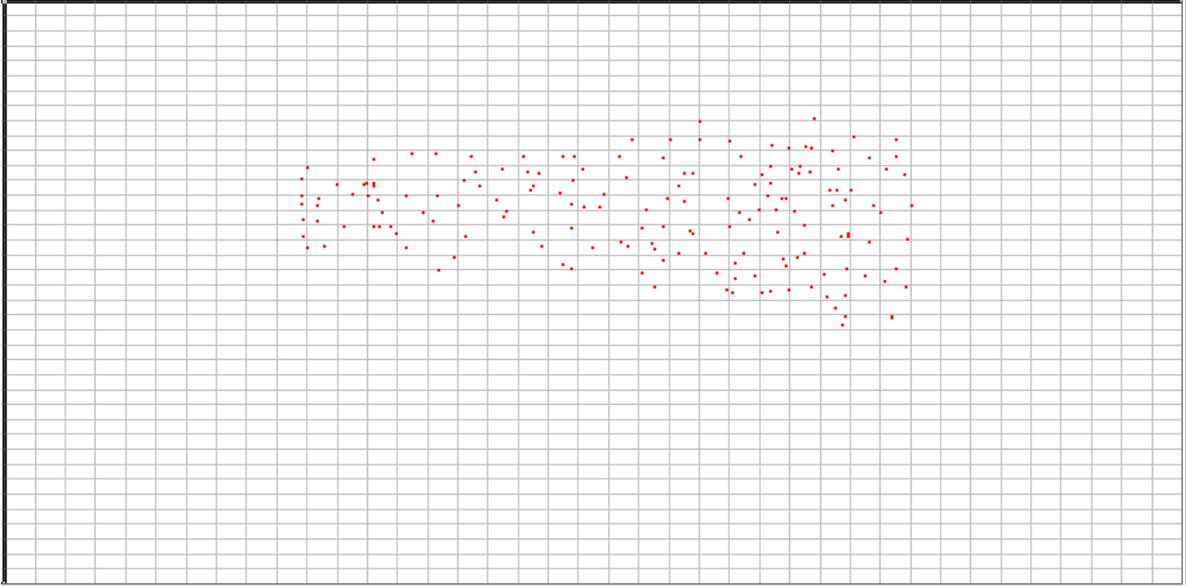


Figura 28. Partículas de contaminación en la primera capa del terreno.

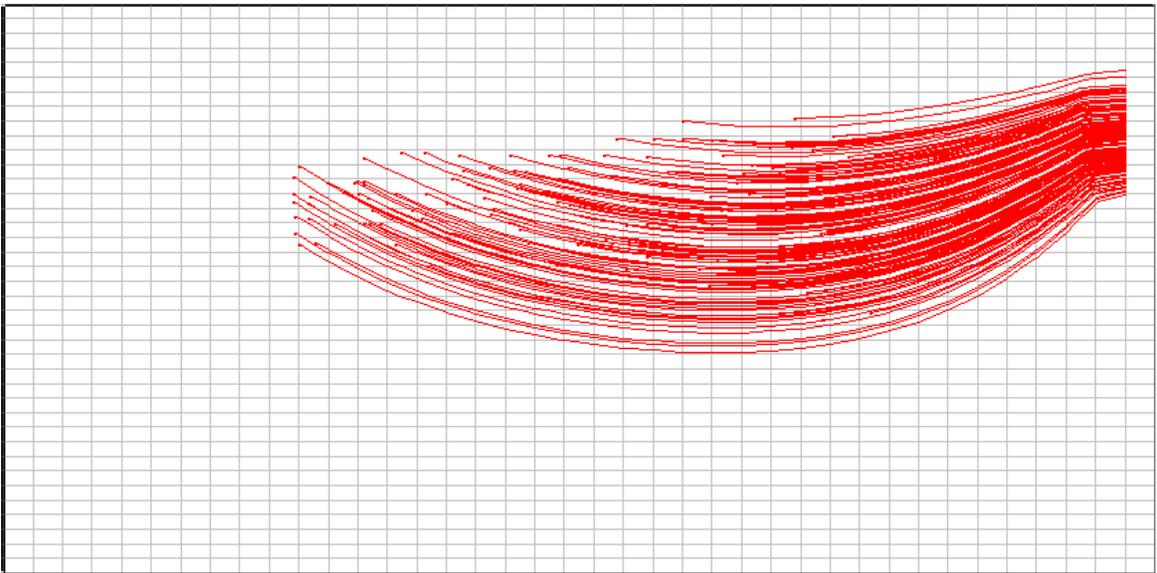


Figura 29. Proyección del movimiento del contaminante en la primera capa del suelo

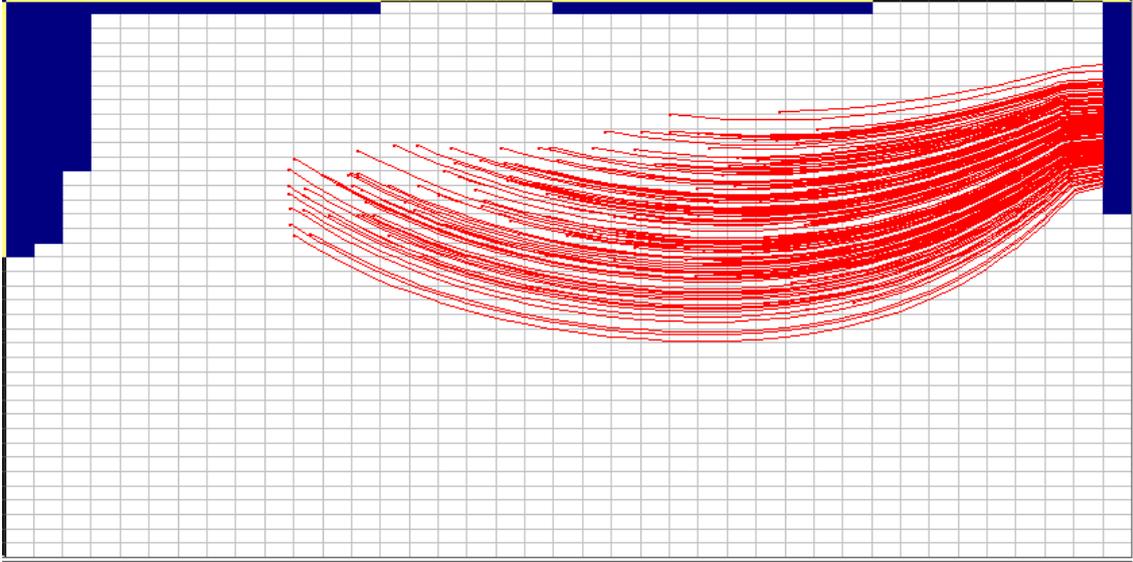


Figura 30. Proyección del contaminante en la segunda capa del terreno donde se tiene los cuerpos de agua.

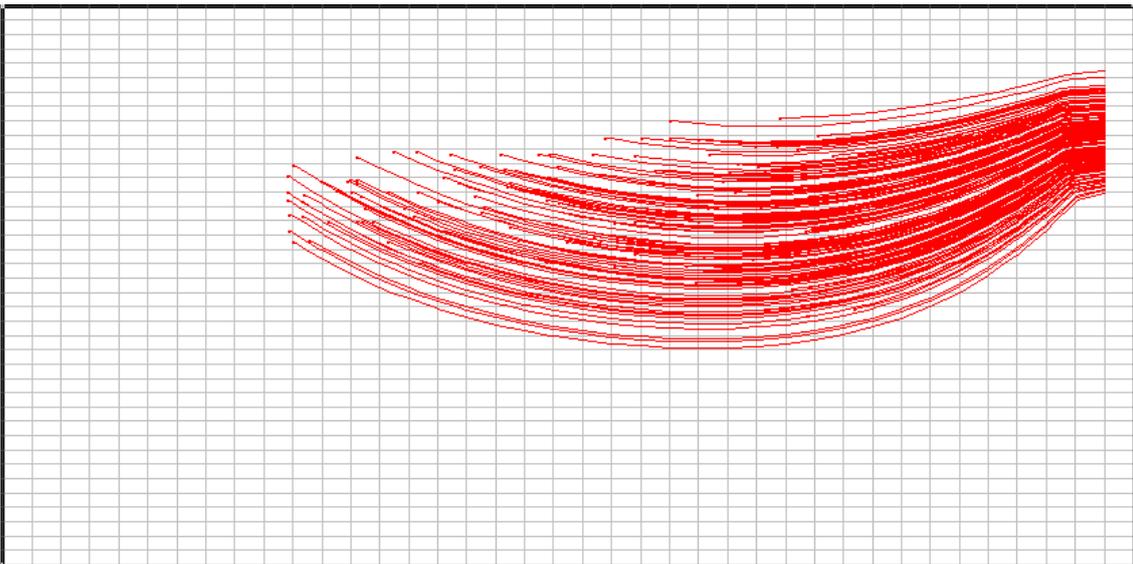


Figura 31. Movimiento del contaminante en la tercera capa del terreno.

Con los modelos antes proporcionados podemos visualizar que la contaminación toma el rumbo esperado debido a la pendiente y las condiciones de las capas del área de estudio adentrándose cada vez más en el suelo y dirigiéndose a los cuerpos hídricos.

4.8 Isolíneas de carga

Las líneas de carga muestran la presión que se ejerce sobre un cuerpo hídrico, por lo cual, tomando en cuenta que el modelo se realizó en un perfil saturado las líneas de carga muestran donde hay mayor presión por lo cual el flujo tenderá a moverse donde hay menos presión (figura 32).

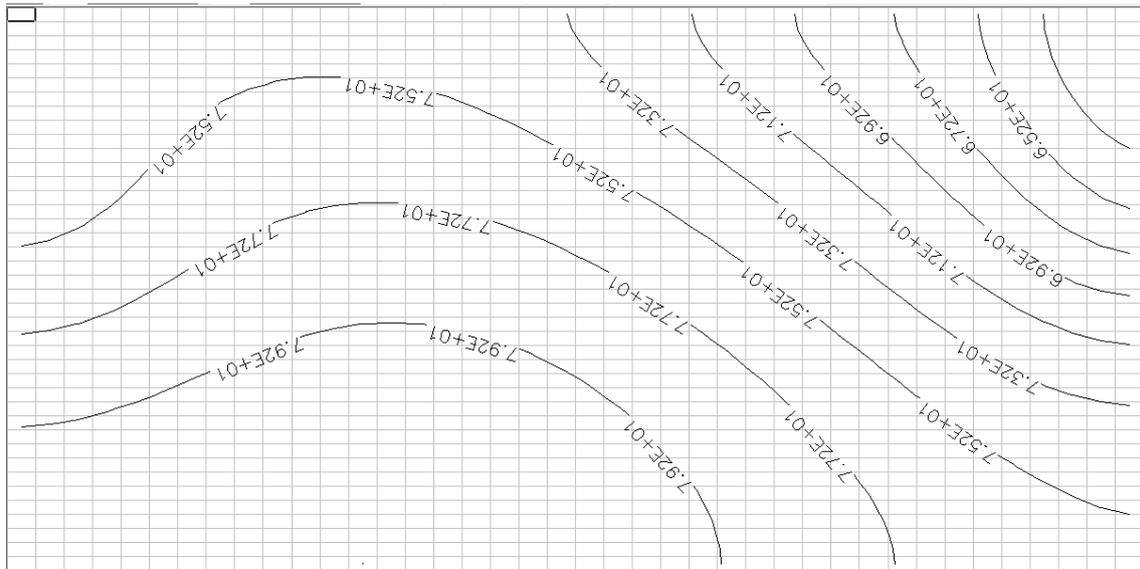


Figura 32. Isolíneas de Carga de la primera capa.

En la figura 33 las líneas de carga muestran que la presión va disminuyendo en sentido Noroeste a Sureste, indicando que el movimiento del flujo se dará en este sentido.

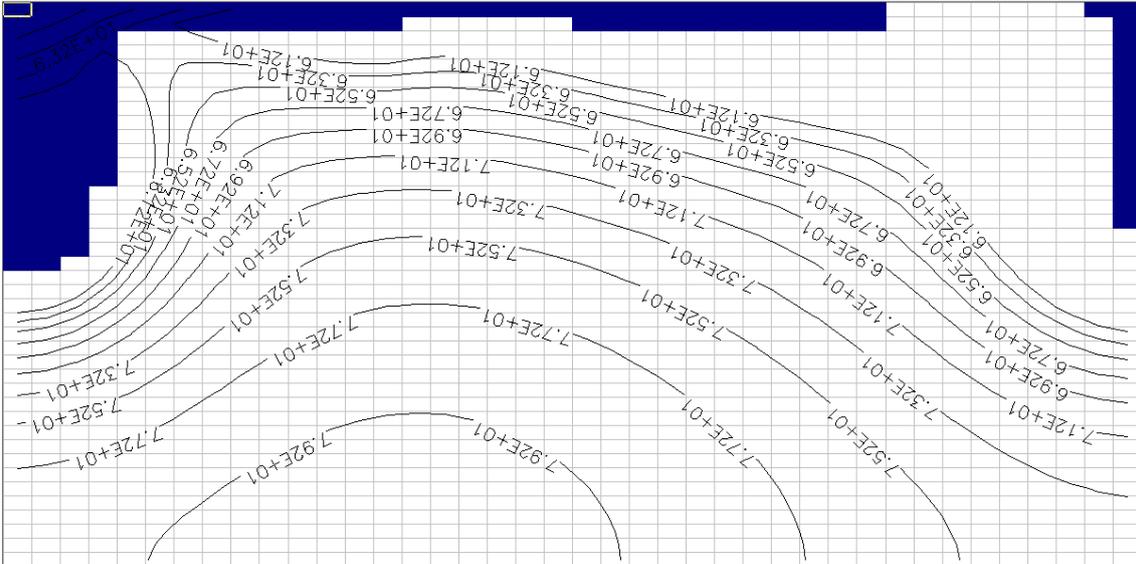


Figura 33. Isolíneas de Carga de la segunda capa.

Las líneas de carga muestran que la presión va disminuyendo en sentido Noroeste a Sureste, indicando que el movimiento del flujo se dará en este sentido, en este caso entramos los cuerpos hídricos de recarga.

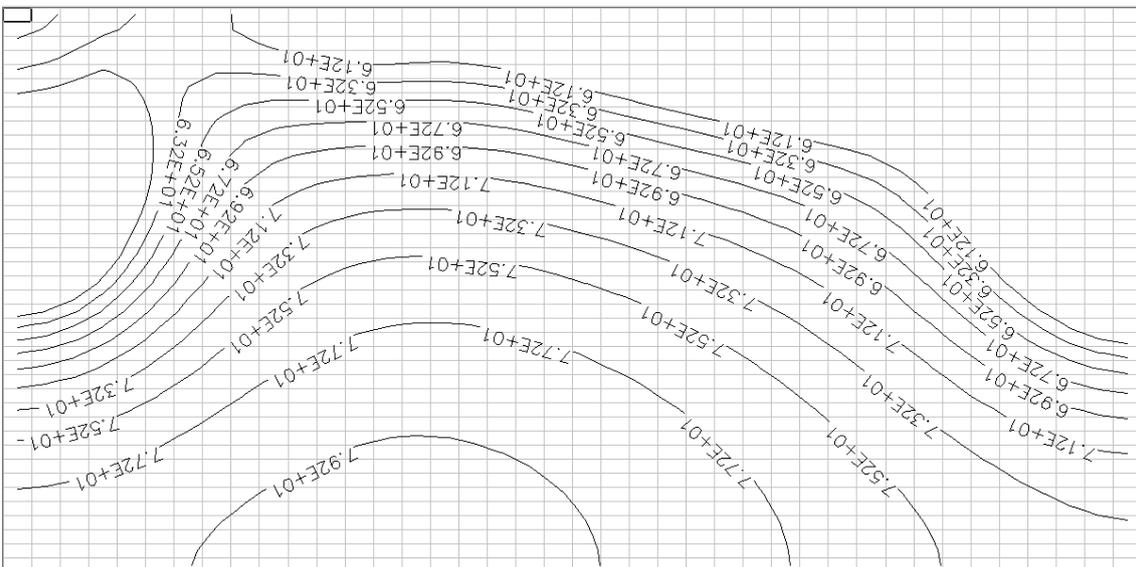


Figura 34. Isolíneas de Carga de la tercera capa.

Las líneas de carga muestran que la presión va disminuyendo en menor intensidad que en las capas anteriores lo cual se debe a que el estrato que se

visualiza en la Figura 34, es roca, y no tiene una gran pendiente como las capas anteriores.

4.9 Modelo realizado en Earthmager 2D

Con el software Earthmager 2D se introdujeron los datos directamente desde el resistivímetro SUPER STING R8, y colocando las elevaciones correspondientes lanza un modelo en 2 dimensiones donde se puede apreciar por colores la variación de resistividad a lo ancho y profundo del terreno del área de estudio.

La longitud de apertura de los electrodos llegó hasta los 275m por condiciones del terreno, lo cual logró dar un perfil con profundidad hasta 72 metros.

De esta manera podemos visualizar de mejor manera el perfil con sus respectivas resistividades, lo cual indica que el contaminante está presente y se ha tenido una movilizad, alterando las propiedades del suelo, como se muestra desde el metro 130 hasta el 275 en la figura 35, ubicándose en un estrato donde las resistividades normales deberían estar en un rango de 300 a 900 ohm-m. sin embargo debido a la potencia emitida por el equipo no alcanza a obtener el valor de la roca que si presenta el resistivímetro P.A.S.I.

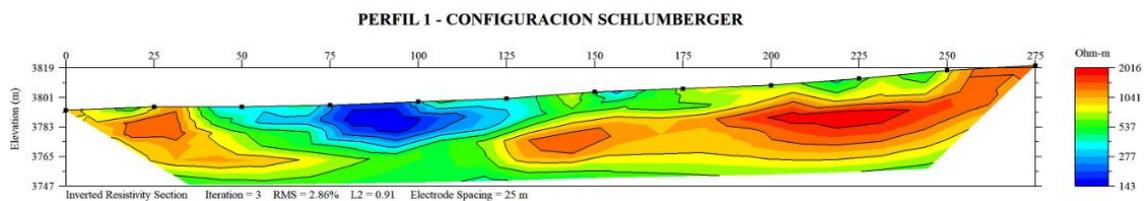


Figura 35. Modelo en 2D obtenido con el software Earthmager 2D.

Como se muestra en el presente perfil el contaminante está situado desde los 20 metros hasta los 50 metros de profundidad en el sector derecho de la imagen. Debido a que el petróleo no es un conductor de electricidad, la resistividad resulta ser alta por lo cual es notorio el cambio de coloración en el gráfico.

4.10 Tiempo de infiltración

Con los valores de carga y la velocidad de infiltración (tabla 13), se puede determinar el tiempo en el cual el contaminante se filtró, debido a que no hay valores diferentes en la tercera capa se evalúan solo las dos primeras capas

Tabla 13.

Tiempo que demora el contaminante en pasar a través del suelo.

Capa	L (m)	V (m/s)	t (s)	t (d)	T (a)
1	20	1.83E-07	109289617.5	1264.93	3.46
2	20	6,21E-08	322061191.6	3727.56	10.21
Total	40	2.451E-07	431350809.1	4992.49	13.67

El tiempo que demora el contaminante al pasar a través de los suelos es de 13,67 años según los cálculos, sin embargo, con las mediciones realizadas, ya se encuentra en la segunda capa del terreno y han pasado 15 años, por lo cual, hay que tener en cuenta las condiciones del fluido como viscosidad, retención en las diferentes capas, la climatología del lugar, así como movimientos de masa, temporadas con baja precipitación y demás. Sin embargo, esta medición no está fuera de lo normal debido a que el fluido se encuentra filtrando aún en el suelo.

4.11 Análisis de resultados

Los datos obtenidos con el resistímetro P.A.S.I., y con el SUPER STING R8, coinciden en cuanto a los datos de las capas de suelo, con leves diferencias debido a la capacidad de medición de los equipos. La resistividad del petróleo oscila entre los 0,2 a 2000 ohm-m (Oilfield Glossary, 2018), y en el presente documento se puede evidenciar que la resistividad marcada con el software VES 2000 está en 2052 ohm-m, mientras que en el EarthImager 2D brinda un rango de valores entre 1500 y 2016 ohm-m, esta variación puede ser la capa

donde se encuentra el contaminante, puesto que no se encuentra como un cuerpo confinado, sino que está esparcido en la capa 2 del suelo como se visualiza en el gráfico 29, a medida que la concentración del contaminante aumenta, la resistividad es mayor, y en las capas donde se esparce este fluido también cambia la resistividad.

El uso de la metodología de los Sondeos Eléctricos Verticales, se emplea para localizar fuentes de agua, dulce, salada y geotermales, razón por la que los datos de resistividad son muy cambiantes, por ejemplo, realizando un análisis de resistividad para aguas termales en Hammam Sayala, Tunisia, los valores de las aguas termales oscilaban entre 0.2 y 5 ohm-m (Chabaane, Redhaounia, & Gabtni, 2017), en tanto que las fuentes de agua dulce tienen valores de resistividad alrededor de 100 ohm-s, debido a que el agua es un conductor de electricidad natural (Poddar, 1998), en cuanto al agua salada, la conductividad es alta por la cantidad de sales que contiene y por ende la resistividad es casi nula y oscila entre valores de 0 a 3 ohm-m (Moreira, Lapola, & Carrara, 2015). Para fuentes de contaminación como percolados y lixiviados los valores de resistividad son menores a 10 ohm-m, debido al alto contenido de iones de metales pesados que incrementa la conductividad (Kuriakose, Ramanathan, Sankar, Rawat, & Sahoo, 2016). En comparación con estos datos se puede afirmar que el petróleo al tener un valor tan alto de resistividad, no conduce electricidad por su naturaleza orgánica y degradada por miles de años y bajo contenido de sales (Gella & Brügggen, 1930).

El movimiento de las partículas de contaminación, tiene relación con la topografía del lugar, el contaminante se mueve desde la superficie filtrándose en el suelo y con dirección a la quebrada que indica que el pasivo ambiental está latente, por lo cual es aconsejable realizar un pozo para sacar todo este material contaminante antes de que contamine más terreno o llegue a otros cuerpos hídricos. Debido a que Papallacta posee una gran cantidad de fuentes de agua que dotan de servicio de agua potable a la capital, este asunto no puede ser dejado de lado, más bien debe tener prioridad en el manejo de zonas alto andinas.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La situación actual de contaminación en la parroquia de Papallacta es crítica debido al pasivo ambiental presente en el sector, tomando en cuenta que está en un sector alto andino, el cual es el estrato de mayor recarga de acuíferos de la zona, la contaminación estimada en la zona está a 40 m de profundidad en un estrato de arcilla plástica compactada, sin embargo, esto se puede percolar a estratos inferiores y contaminar fuentes hídricas y recursos de sustento de los pobladores.

A partir de la recopilación de datos, con la visita de campo y determinación de coordenadas del derrame, se pudo establecer el área de estudio y los transeptos a medir, lo cual se realizó gracias al software Global Mapper 18, con el cual se cargaron los archivos DMT proporcionados por el departamento SIG Tierras, en el cual se levantaron los datos topográficos y las curvas de nivel cada 5 m de altura. En el mapa se señaló el oleoducto en el cuadrante de mayor incidencia de derrame y donde se realizaron las mediciones correspondientes para el presente trabajo, la revisión bibliográfica, declaraciones de las entidades de control y los partícipes de la gestión del lugar, al igual que los afectados por el derrame, fueron puntos de gran importancia para establecer exactitud en la ubicación del lugar y en la obtención de datos, por lo cual el establecimiento de una línea base adecuada fue primordial para el estudio realizado.

La metodología utilizada fue la apropiada debido a la función que cumple, la misma que se utilizó debido a que la señal que emite es muy fuerte y mejor que los otros arreglos, esto se debe a que la señal emitida no se da de manera lineal en 2D, los electrodos emiten corriente al suelo formando un cilindro por lo cual varios elementos pueden generar ruido en la medición, hay q tener en cuenta este inconveniente y determinar bien la geología del lugar, dado que, los electrolitos disueltos, la porosidad, la temperatura y los diferentes tipos de

materiales pueden generar malas mediciones. Es por esto que el método Schlumberger es mejor analizando estratos profundos, el arreglo puede evitar que haya mayor ruido que los otros (Costall, Harris, & Pigois, 2018).

El modelo conceptual hidrogeológico fue creado gracias al mapa de la zona y la elevación del terreno, también se dio junto con la interpretación de los datos de resistividad obtenidos con ambos equipos de medición y la información de las capas de suelo del sector, también se tomaron en cuenta los factores climáticos y las propiedades de cada estrato, así como las alturas correspondientes de los mismos. El resultado fue un modelo en el cual se representan tres capas diferentes de suelo con cuerpos de agua en la capa intermedia, lo cual coincide con los datos de resistividad obtenidos y con la revisión bibliográfica de la zona.

La primera capa constituye un suelo franco limoso cuya resistividad es de 18,8 ohm-m característico de la zona, cuyas propiedades son una porosidad efectiva del 35%, conductividad hidráulica horizontal de 0.006 m/s y una conductividad hidráulica vertical de 0.0006 m/s, en un estrato de 20 m de profundidad; la segunda capa es un suelo de arcilla plástica compactada cuya resistividad es de 884,9 ohm-m, cuyas propiedades son una porosidad efectiva del 25%, conductividad hidráulica horizontal de 0.0007 m/s y una conductividad hidráulica vertical de 0.00007 m/s, en un estrato con 20 metros de profundidad; y finalmente la tercera capa de suelo conformado por roca proveniente de materiales piroclásticos con una resistividad de 5000 ohm-m, cuyas propiedades son una porosidad efectiva del 10%, conductividad hidráulica horizontal de $2E-13$ m/s y una conductividad hidráulica vertical de $2E-14$ m/s, a la cual aún no llega el contaminante, sin embargo debido a su baja porosidad y conductividad es muy poco probable que se adentre en este estrato.

Las condiciones de borde del terreno son en el norte, una montaña donde yace la zona de recarga, al este está una ladera con una montaña que forma una cuenca en el sector, al oeste tenemos otra ladera y en el sur se encuentra una quebrada pronunciada que desemboca en un río, el cual va hacia la laguna de Papallacta.

Los datos en comparación de la zona del derrame con el blanco, difieren bastante en la segunda capa, puesto que la resistividad aumenta, esto se debe a que el hidrocarburo tiene características resistivas al paso de la corriente (Gella & Brügggen, 1930).

Con el modelo conceptual realizado se obtuvo un modelo del flujo de contaminación en las capas de suelo simulando un área de 18 hectáreas, con una profundidad de 60 metros determinando así que el flujo de la contaminación se dirige de Noroeste a sureste, al igual que las partículas de contaminación tienen en mismo curso. Este modelo tiene una gran versatilidad para la identificación, no solo de contaminantes, si no de cuerpos hídricos, estratos vegetales y anomalías en el terreno.

En la zona de derrame, se comprobó la ubicación del contaminante de manera matemática, para comparar con el modelo realizado con los equipos de resistividad, obteniendo una similitud de resultados, de forma matemática la contaminación debía estar pasando el segundo estrato a los 13,7 años, en el modelo que se realizó con datos actuales se dan después de pasar 15 años del derrame por lo cual hay 1,3 años de diferencia lo cual se puede adjudicar a factores climáticos, propiedades del fluido, entre otras cosas.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda tomar en cuenta las propiedades del terreno antes de realizar las mediciones de resistividad, debido a que, si hay mucha resistencia de contacto, la electricidad irá directo a la parte superior del suelo y no logrará el fin del muestreo, lo cual generará ruido en las mediciones y una mala interpretación de los datos, por lo cual es necesario utilizar medidas para evitar estas situaciones como lanzar agua salada alrededor de los electrodos al momento de ser clavados.

Se recomienda realizar más estudios en la zona, por cuanto los resultados obtenidos muestran una recuperación solo superficial (40 cm) para evidenciar la percolación del fluido, se requieren mediciones a gran escala.

Es recomendable realizar un pozo para sacar este contaminante, debido a la peligrosidad del mismo y, como se menciona en el punto anterior, puede llegar a generar un problema cuyo control será muy complicado, debido a las condiciones de la zona y a las constantes lluvias y pendientes, el movimiento del fluido será cada vez más prolongado y al no ser miscible con el agua, tomara su curso y las partículas serán transportadas a todo el sector aledaño.

El pozo recomendado a realizar debe estar en el metro 130 en el gráfico 29, en la coordenada 17 M 812687 E 9960104 S, el cual puede retirar el pasivo ambiental antes de que este logre alterar todo el ecosistema, tomando en cuenta que se encuentra en una zona protegida, la contaminación no puede seguir expandiéndose puesto que es una zona sensible y muy valorada por albergar un sin número de especies tanto de flora como de fauna (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2016).

También se recomienda implementar los planes de prevención, monitoreo y control ambiental existente; con la participación de la comunidad y organismos interesados para evitar los problemas de contaminación observados en la zona de estudio.

REFERENCIAS

- Advanced geosciences. (2018). *Agi earthimager 2d advanced geosciences*. Recuperado el 3 de Junio de 2018 de: <https://www.agiusa.com/es/agi-earthimager-2d>
- Agi advanced geosciences. (2014). *SuperSting R8 IP*. Recuperado el 3 de mayo del 2018 de: <http://advancedgeosciences.com/supersting.sp.shtml>
- Alonso, R. (2012). Proyecto de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. Universidad Autónoma de Barcelona. Recuperado el 5 de junio de: http://www.jaravalencia.com/docu/PFC_RaquelAlonso.pdf
- Alvarez, A. (2003). Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. Sanfandila: secretaría de comunicaciones y transporte. Recuperado el 3 de junio del 2018 de: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt229.pdf>
- Auge, M. (2008). Métodos geoelectrónicos para la prospección de agua subterránea. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. Recuperado el 19 de mayo de: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/ProspeccGeoelec.pdf>
- Aveiga del Pino, I., Cabrera, I., Tapia, I., & Ponce, P. (2005). Remediación de los impactos causados por el derrame de petróleo en la laguna de papallacta en ecuador-sur america1 tiempo de ejecución: noviembre 2003-mayo 2004. *International oil spill*, 2005 (1), 1035-1038. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-1035>
- Brantax. (2009). *Geophysical prospection*. Recuperado el 4 de junio del 2018 de: <http://www.brantax.com/brantax-services/services/geophysics/geophysical-methods/geoelectric/used-configurations/wenner/>
- Castro, T., Delgado, L., & García, J. (2012). Geología y magnetometría del complejo máfico-ultramáfico puerto nuevo en el área de San Miguel, península de Vizcaíno, Baja California Sur. *Geos* 21 (1), 3-21. Recuperado el 5 de junio del 2018 de: <https://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos01-1/Castro-Leyva01-1.pdf>
- Cedex. (s.f). Técnicas geofísicas . Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y medio rural y marino. Recuperado el 2 de junio del 2018 de: https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/Revistas/pdf_M_ARM/MARM_2008.pdf

- Chabaane, A., Redhaounia, B., & Gabtni, H. (2017). *Combined application of vertical electrical sounding and 2d electrical resistivity imaging for geothermal groundwater characterization: Hammam Sayala hot spring case study (New Tunisia)*. *Journal of african earth sciences*, 292-298. Recuperado el 28 de mayo del 2018 de: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.07.003>
- Costall, A., Harris, B., & Pigois, J. (2018). *Electrical resistivity imaging and the saline water interface in high-quality coastal aquifers*. *Surveys in geophysics*, 753–816. Recuperado el 2 junio del 2018 de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-018-9468-0>
- Cruces de Abia, J. (2007). *Modelo modflow*. Madrid: Escuela de organización industrial. Recuperado el 20 de mayo del 2018 de: <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/20090/modelo-modflow>
- Djadia, L., Machane, D., Chatelain, J., Abtout, A., Bensalem, R., Amine, M., Oubaiche, E.-H. (2010). *Evidence for an underground runoff and soil permeability at the ouled fayet (algiers, algeria) subsurface landfill pilot project from geophysical investigations*. *Environ earth sci*, 1149–1158. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0105-6>
- EP Petroecuador. (2014). <http://www4.eppetroecuador.ec>. Recuperado el 12 de junio del 2018 de: http://www4.eppetroecuador.ec/lotaip/pdfs/vigente/rendicion_de_cuentas_2013.pdf
- Gella, N., & Brüggén, J. (1930). *La exploración geofísica del subsuelo*. Santiago de Chile: Universo. Recuperado el 4 de mayo del 2018 de: http://www.academia.edu/27960886/LA_EXPLORACION_GEOFISICA_DEL_SUBSUELO
- Gestión Calidad Consulting. (2016). *Explicación de Suelos Contaminados*. Recuperado 12 de junio del 2018 de: <http://gestioncalidad.com/suelos-contaminados>
- Gualoto, M. (2011). *Biorremediación de hidrocarburos utilizando cepas antárticas*. Ecuador en la antártida: historia, perspectivas y proyecciones. Recuperado el 28 de mayo del 2018 de: https://www.researchgate.net/publication/291334590_BIORREMEDIACION_DE_HIDROCARBUROS_UTILIZANDO_CEPAS_ANTARTICAS
- Hernández, J., & Montaner, D. (2008). *Manual arcgis 9.2*. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Recuperado el 2 de Junio del 2018 de: http://www.gep.uchile.cl/Publicaciones/Libro-_Tutorial_de_ArcGis_9.2.pdf
- Kearey, P., Brooks, M., & Hill, I. (2002). *An Introduction to geophysical exploration*. Oxford: Blackwell science ltd. 10.1046/j.1365-246X.2003.01868.

- Kuriakose, T., Ramanathan, A., Sankar, K., Rawat, M., & Sahoo, M. (2016). *457 Characterizing waste dump effects on ground water through electrical resistivity sounding around Okhla Landfillsite, New Delhi, India*. *Journal of applied geochemistry*, 457-463. Recuperado el 29 de mayo del 2018 de: <http://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor%3Ajag&volume=18&issue=4&article=007>
- Martinez, V., & López, F. (2001). *Effects of hydrocarbon pullutants on the physical and chemical properties of clay soil*. *Terra*, 9-17. Recuperado el 1 de junio del 2018 de: <http://www.electrochemsci.org/papers/vol6/6051250.pdf>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2016). Pifo, Papallacta. Recuperado el 1 de junio de 2018 de: <https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/01/especial-pifo-papallacta.pdf>
- Montoya, S. (2013). *Proceos de remediación de agua*. Recuperado el 2 de Junio del 2018 de: <http://gidahatari.com/ih-es/procesos-remediacion-aguas-subterranas-ambientes-baja-permeabilidad>
- Moreira, C., Lapola, M., & Carrara, a. (2015). *Comparative analyzes among electrical resistivity tomography arrays in the characterization of flow structure in free aquifer*. *Geofísica internacional*. Recuperado el 1 de junio del 2018 de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0016-71692016000200119
- Oilfield Glossary. (2018). *Resisiidad del petróleo*. Recuperado el 2 de Junio del 2018 de: http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/r/resistivity_log.aspx
- Orrego, K., & Tabares, L. (2007). *Análisis de la metodología box cox para medir la resistividad del terreno*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Recuperado el 2 de Junio del 2018 de: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1118/621317O758.pdf;sequence=1>
- P.A.S.I. (2010). *Earth resitivity meter user manual*. Italia: P.A.S.I.
- P.A.S.I. (s.f). *User´s handbook*. Turín: P.A.S.I. s.r.l.
- Poddar, M. (1998). *The theoretical study of a possible high resolution resistivity sounding technique for groundwater exploration in hard rocks*. *Deep electromagnetic exploration*, 566-574. 10.1007/s12040-014-0408-1
- Sánchez, J. (2017). *Prospección Geofísica: Sondeos eléctricos verticales*. *Hidrología superficial y subterránea*, 1-12. Recuperado el 2 de junio del 2018 de. <http://hidrologia.usal.es/temas/SEV.pdf>

- Sanz, J., Duque, E., & Gómez, S. (2010). La resistividad del suelo en función de la frecuencia. *Scientia et Technica*, 1-6. Recuperado el 26 de mayo del 2018 de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84917316001>
- Serrano, M. F., Torrado, L., & Pérez, D. (2013). Impacto de los derrames de crudo en las propiedades mecánicas de suelos arenosos. *General José María Córdova*, 55 (2) 233-244. Recuperado el 3 de junio del 2018 de: <http://www.scielo.org.co/pdf/recig/v11n12/v11n12a12.pdf>
- Silva, S., & Correa, F. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: Revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. Universidad de Medellín. Recuperado el 8 de junio del 2018 de: <http://www.scielo.org.co/pdf/seec/v12n23/v12n23a2.pdf>
- Tituaña, M., Rosero, P., Ríos, R., Maila, L., & Simbaña, M. (2011). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial Papallacta 2020. Papallacta: gobierno parroquial de Papallacta.
- Todd, D., & Mays, L. (2005). *Groundwater hidrology*. New Jersey: Jhon Wiley & Sons Inc. Recuperado el 15 de mayo del 2018 de: <https://www.wiley.com/en-ec/Groundwater+Hydrology,+3rd+Edition-p-9780471059370>
- USGS . (2007). *Modeling ground-water flow with modflow*. Recuperado el 28 de mayo del 2018 de : https://wi.water.usgs.gov/glpf/cs_set_model.html
- USGS. (2018). *Modflow and related programs*. Recuperado el 29 de Abril del 2018 de: <https://water.usgs.gov/ogw/modflow/>
- Velásquez, J. (2016). Contaminación de suelos y cuerpos de agua por hidrocarburos en Colombia, fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. Casanare: Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Recuperado el 2 de junio del 2018 de: <http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1846/2065>
- Weemaels, N. (2003). Derrame sote en papallacta. Recuperado el 19 de abril del 2018 de: http://www.accionecologica.org/index.php?option=com_content&task=view&id=181
- Weemaels, N. (2003). Derramen en Papallacta afecta agua en Quito. Recuperado el 24 de abril del 2018 de: <http://www.accionecologica.org/petroleo/crudos-pesados/ocp/48-derrame-en-papallacta-afecta-agua-en-quito>

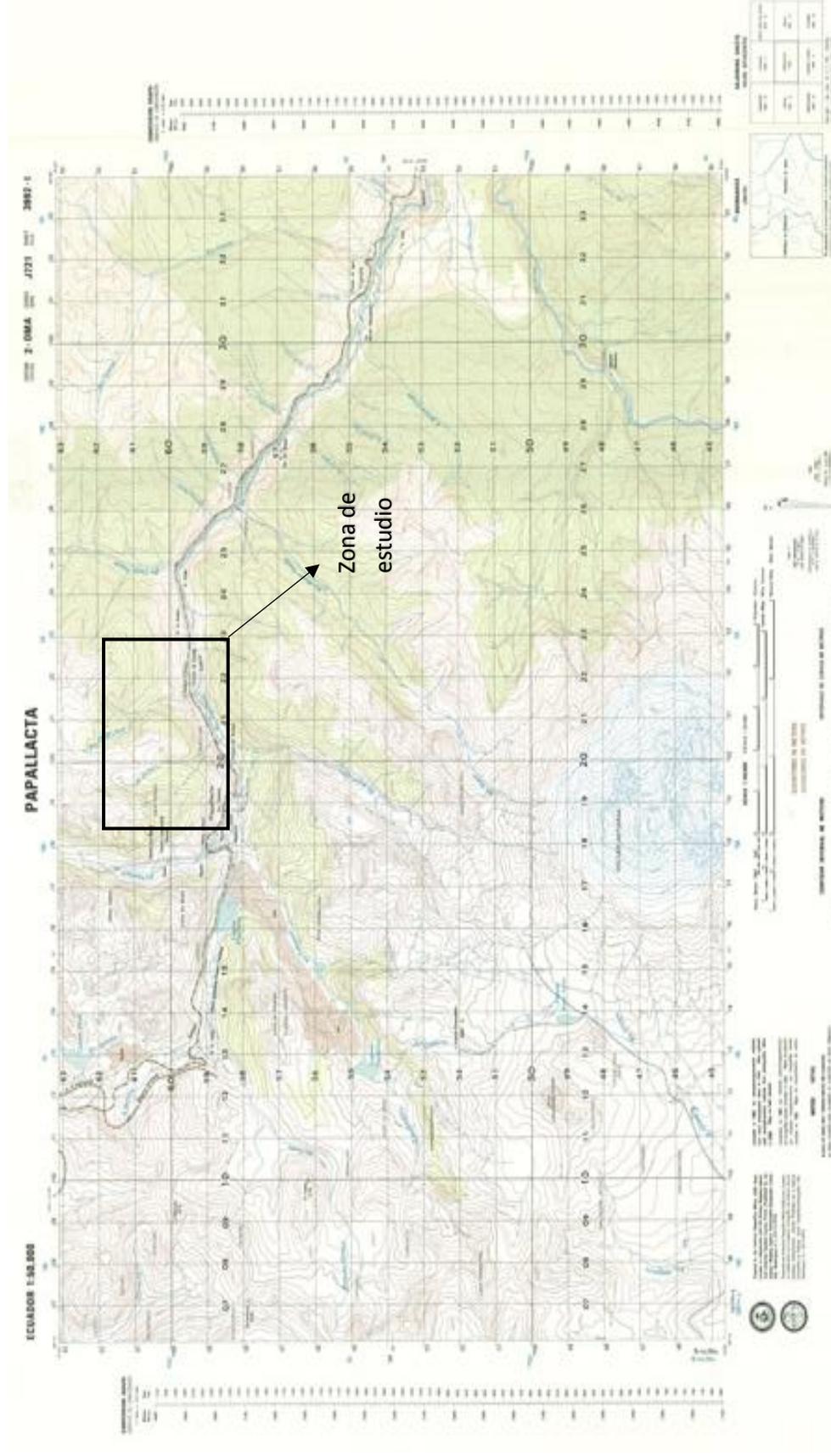
ANEXOS

Carta geológica de Pintag donde se encuentra la parroquia de Papallacta en versión 1:100.000



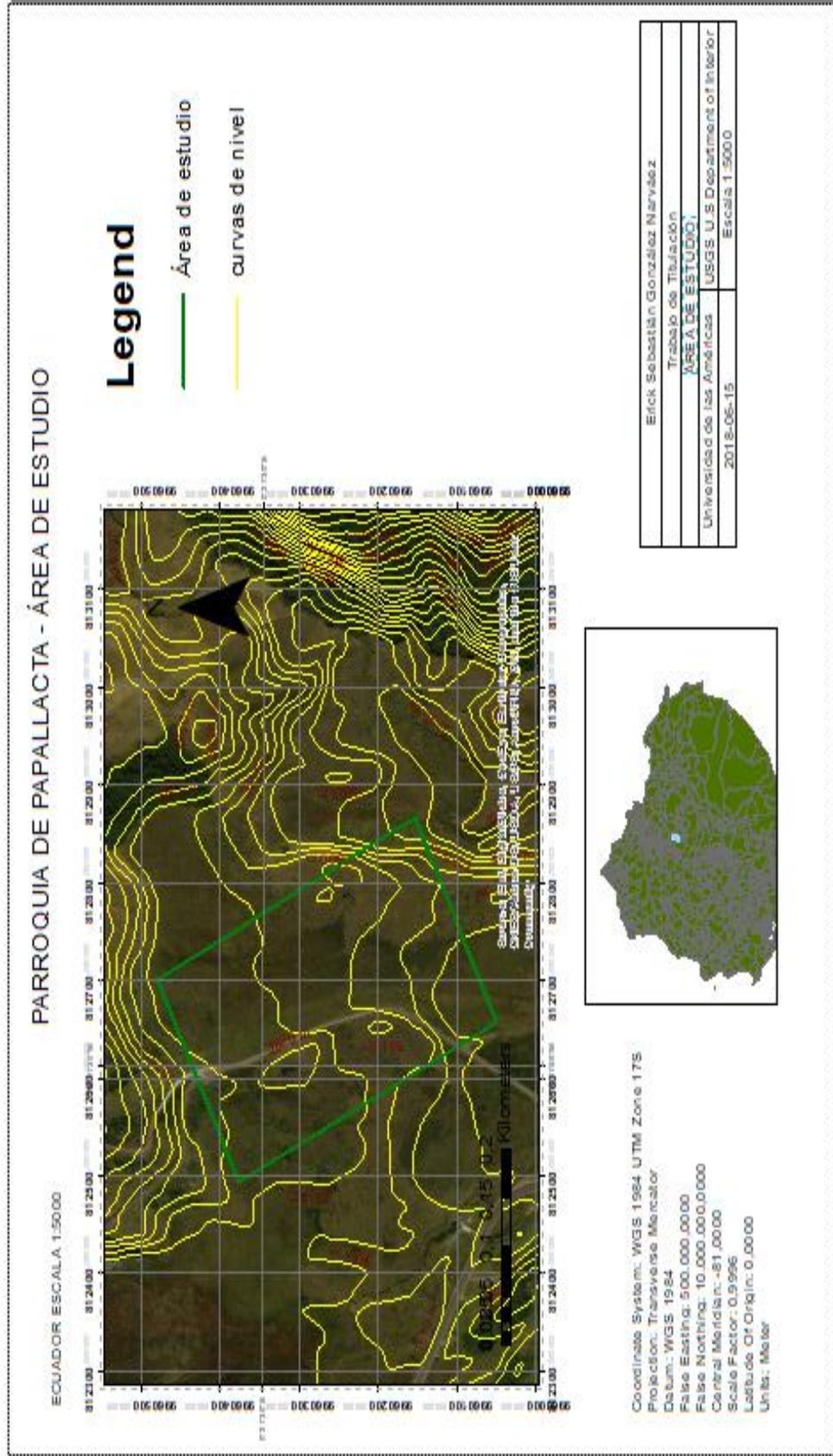
Anexo 1. Carta Geológica del Pintag.

Carta topográfica de Papallacta a escala 1:50.000



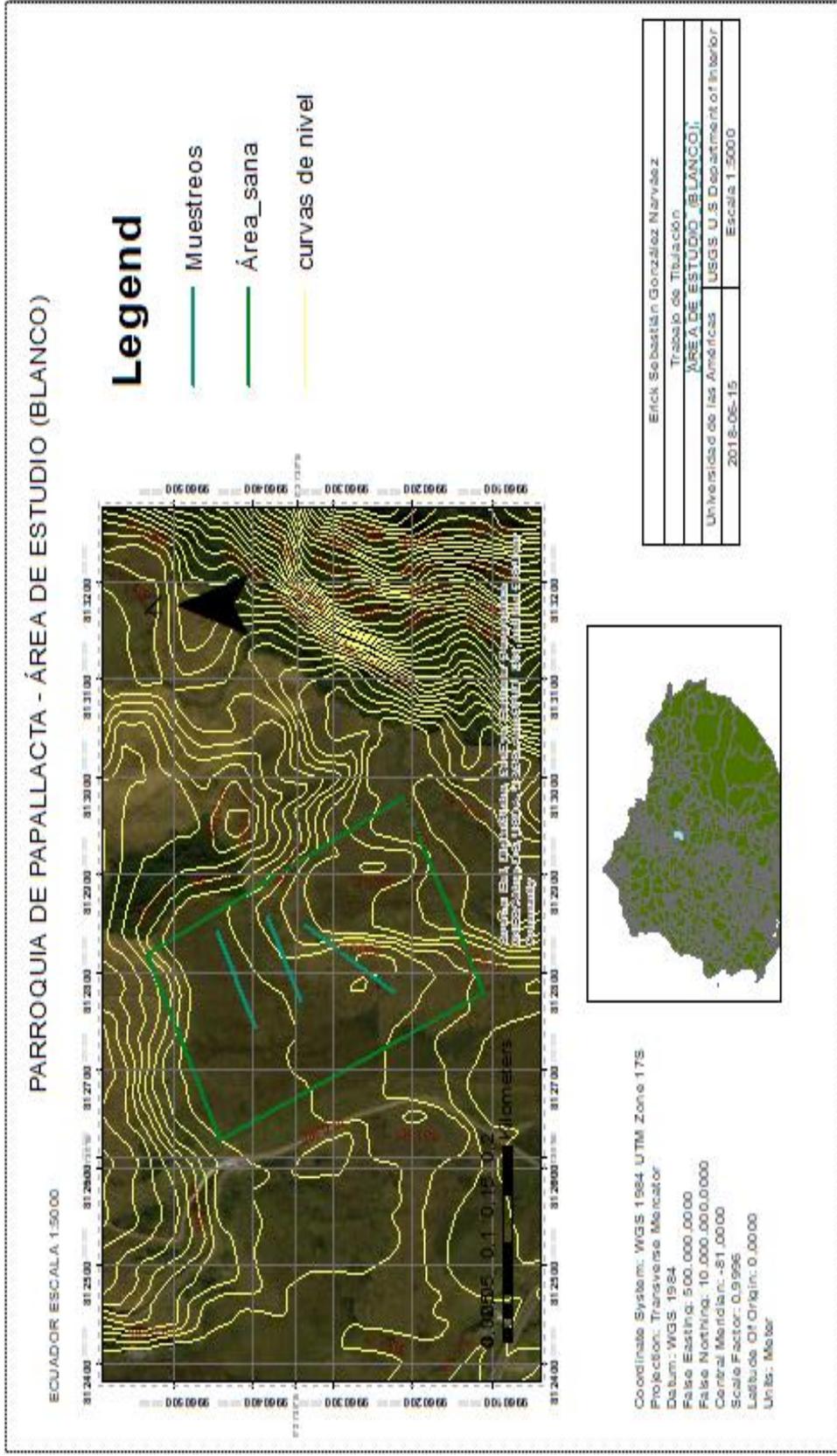
Anexo 3. Carta topográfica de Papallacta

Mapa de Papallacta a escala 1: 5000 delimitando el área de estudio con contaminación



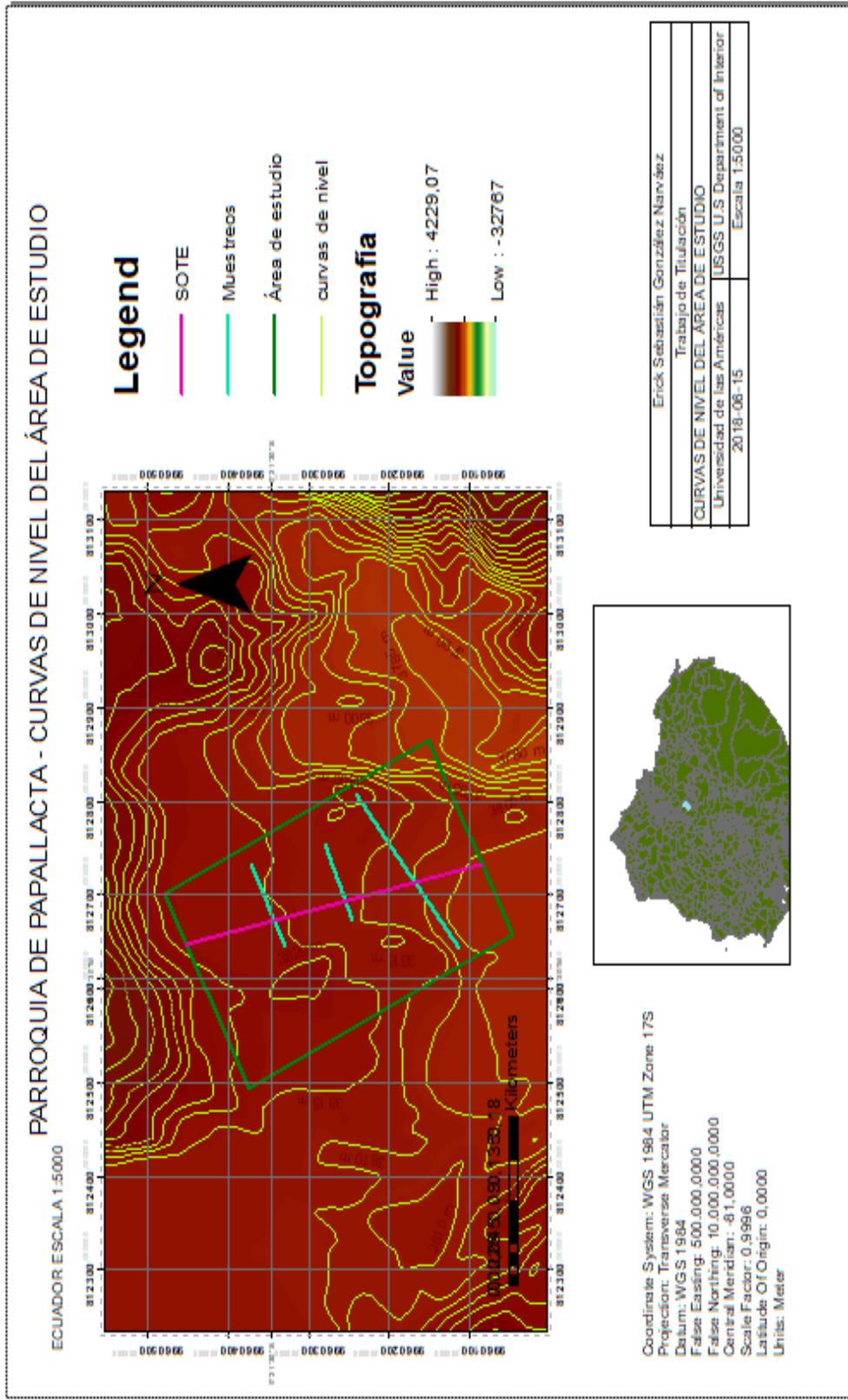
Anexo 4. Mapa del área de estudio

Mapa del área de muestreo de Blancos



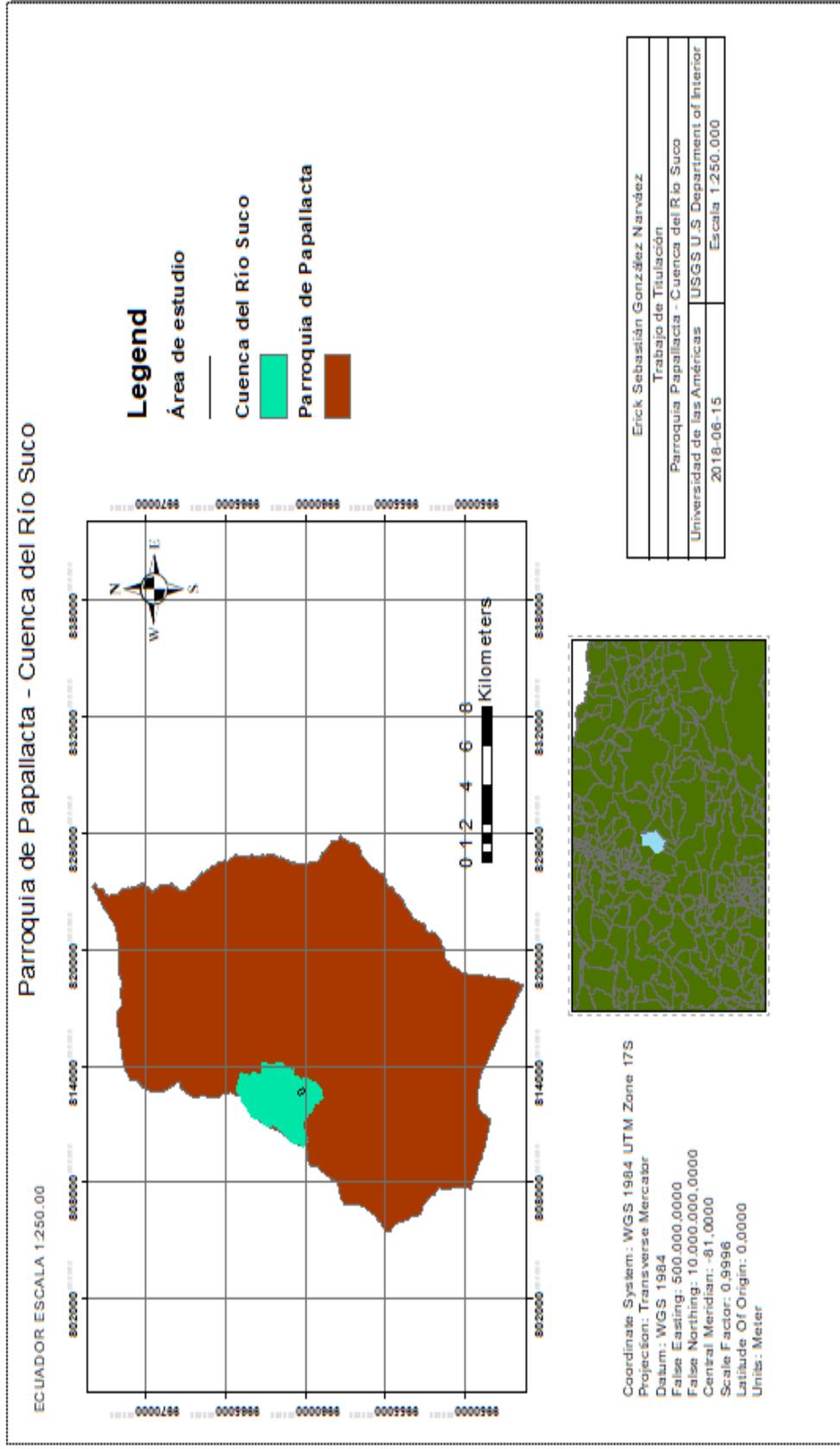
Anexo 5. Mapa de muestreo de Blancos

Mapa de Muestreo de zonas contaminadas con curvas de nivel



Anexo 6. Curvas de nivel del área de estudio y zona de muestreos

Cuenca hidrográfica del Río Sucus, el cual condujo el contaminante a la laguna de Papallacta



Anexo 7. Cuenca del Río Sucus

Fotografía del lugar de muestreo con contaminación



Anexo 8. Área de estudio con contaminación

Lugar de muestreo sin contaminación



Anexo 9. Área de muestreo sin contaminación.

Presencia de líquido aceitoso y viscoso en la superficie del terreno, en el área de estudio con contaminación



Anexo 10. Presencia de fluidos en las capas superficiales del terreno.

