

**PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS FÍSICO-QUÍMICAS PARA
REMEDIACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA Y SUELOS CONTAMINADOS CON
HIDROCARBUROS APOYADOS EN LA APLICACIÓN DE SOFTWARE VISUAL
MODFLOW PARA UN ÁREA DE INTERÉS DE ECOPETROL S.A.**

MARÍA CAROLINA LEAL CASTELLANOS

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELAS DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2011

**PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS FÍSICO-QUÍMICAS PARA
REMEDIACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA Y SUELOS CONTAMINADOS CON
HIDROCARBUROS APOYADOS EN LA APLICACIÓN DE SOFTWARE VISUAL
MODFLOW PARA UN ÁREA DE INTERÉS DE ECOPETROL S.A.**

MARÍA CAROLINA LEAL CASTELLANOS

Trabajo de grado para aspirar al título de Ingeniera Ambiental

Director

Ing. Maria Kopytko Msc.

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELAS DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2011

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Piedecuesta, _____ de 2011

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser mi guía espiritual y permitirme culminar con éxito este proyecto.

A mis padres Manuel Leal y Rosario Castellanos, mis hermanos Fabian Leal y Jenny Leal, a su esposo Jorge Luis y mi sobrina Laura Sofía, por las enseñanzas brindadas durante mi trayecto, por la paciencia, apoyo incondicional, comprensión e impulso que me llevaron hoy a ser una profesional en el campo ambiental.

A la Universidad Pontificia Bolivariana, a su cuerpo docente y administrativo, especialmente a la Facultad de Ingeniería Ambiental por haberme brindado una educación de calidad.

A mi Directora de Tesis, María Kopytko, por su apoyo, dedicación y conocimientos brindados durante todo el transcurso de mi carrera, motivándome siempre a seguir adelante y luchar por mis sueños.

A los ingenieros Mauricio Cardeñosa, Adriana Serrano y Adriana Obregón, por haber depositado su confianza en mí, para la realización de esta tesis de grado, además de brindarme su enriquecedora y constante asesoría.

A mis compañeros de universidad y amigos más cercanos, quienes me apoyaron incondicionalmente, durante mi carrera y el desarrollo de este proyecto, especialmente a Mónica Niño, Sonia Rangel, Fernanda Carvajal y Bryam Acmed.

Finalmente a Oscar Córdoba, por darme su mano al final de este trayecto, por las palabras de aliento, la paciencia, la comprensión y por impulsarme a seguir soñando.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. OBJETIVOS	21
1.1 OBJETIVO GENERAL	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2. ANTECEDENTES EN LA ESTACIÓN 1 Y PREDIO ALEDAÑO DE CAMPO PALAGUA – ECOPELROL S.A.	22
3. JUSTIFICACIÓN	224
4. MARCO TEÓRICO	26
4.1 GENERALIDADES.....	26
4.2 CLASIFICACION DE LOS SUELOS	27
4.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS.....	28
4.3.1 Estructura.....	28
4.3.2 Textura.....	30
4.3.3 Porosidad.....	31
4.3.4 Humedad o Contenido de agua.	31
4.3.5 Densidad.....	31
4.3.6 Permeabilidad e Infiltración.....	32
4.3.7 pH.	32
4.3.8 Capacidad de Intercambio Catiónico.	33
4.3.9 Carbono y Materia Orgánica.	33
4.4 CONTAMINACIÓN DE SUELOS EN EXPLOTACIONES PETROLERAS	334
4.4.1 Transporte de contaminantes en el suelo.	334
4.4.2 Efectos de la contaminación de suelos por hidrocarburos en animales y plantas.....	36
4.5 TECNICAS FISICO QUIMICAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS.....	37
4.5.1 Bombeo, tratamiento y reinyección.	38
4.5.2 Oxidación química.....	38
4.5.3 Air sparging.....	39
4.5.4 Soil vapor extraction.....	400
4.5.5 Bioventilación.....	411

4.5.6	Atenuación natural controlada (MNA, Monitored Natural Attenuation).....	411
4.5.7	Barreras reactivas permeables (BRP).....	422
4.5.8	Flushing in situ (lavado del suelo).....	433
4.5.9	Stripping por aire.....	433
4.5.10	Adsorción por carbón activo.....	444
4.6	SOFTWARE VISUAL MODFLOW	444
4.7	LEGISLACIÓN	466
5.	METODOLOGIA	488
5.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	52
5.1.1	Ensayos in situ de agua subterránea.....	554
5.1.1.1	Oxígeno disuelto.....	554
5.1.1.2	pH.....	554
5.1.2	Ensayos físico químicos de agua subterránea realizados en laboratorio.....	554
5.1.2.1	Conductividad.....	554
5.1.2.2	Alcalinidad, carbonatos y bicarbonatos.....	554
5.1.2.3	Compuestos fenólicos.....	55
5.1.2.4	Grasas y aceites.....	55
5.1.2.5	Hidrocarburos no polares.....	55
5.1.2.6	Sólidos disueltos.....	55
5.1.2.7	Cloruros, nitritos, nitratos.....	55
5.1.2.8	Sulfatos.....	55
5.1.2.9	Hidrocarburos poliaromáticos (PAH's).....	56
5.1.2.10	Metales.....	56
5.1.2.11	Metales (Calcio).....	56
5.1.2.12	Metales (Mercurio).....	56
5.2	CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS	56
5.2.1	Ensayos in situ.....	61
5.2.1.1	Permeabilidad e infiltración.....	62
5.2.1.2	Densidad aparente.....	63
5.2.1.3	Temperatura.....	664
5.2.1.4	Estructura.....	664
5.2.2	Ensayos físico químicos de suelos realizados en el laboratorio.....	664
5.2.2.1	Textura.....	65
5.2.2.2	Porosidad.....	67
5.2.2.3	Densidad real.....	68
5.2.2.4	pH.....	68
5.2.2.5	Humedad gravimétrica.....	70

5.2.2.6	Humedad volumétrica.	70
5.2.2.7	Capacidad de intercambio catiónico (CIC).	71
5.2.2.8	Carbono orgánico y materia orgánica.	72
5.2.2.9	Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH).	774
5.3	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y TRAYECTORIA DE LA PLUMA CONTAMINANTE, DETERMINADO POR MEDIO DEL SOFTWARE VISUAL MODFLOW.7575	
5.3.1	Interpolación curvas de nivel por medio de Surfer.	76
5.3.2	Simulación en Visual Modflow para flujo de agua subterránea y trayectoria de la pluma contaminante.	76
5.3.2.1	Discretización del modelo.	77
5.3.2.2	Topografía.	77
5.3.2.3	Parámetros hidráulicos.	77
5.3.2.4	Condiciones iniciales.	78
5.3.2.5	Limites de flujo.	78
5.3.2.6	Aplicación de PATHLINES y MODPAHT para evaluación de la trayectoria de partículas.	78
5.4	ANÁLISIS COSTO BENEFICIO DE ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN FÍSICO QUÍMICAS PARA SUELOS Y AGUA SUBTERRÁNEA CONTAMINADA CON HIDROCARBUROS.	79
6.	DATOS Y ANALISIS	80
6.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	80
6.1.1	Ensayos in situ.	80
6.1.1.1	Oxígeno disuelto.	81
6.1.1.2	pH.	81
6.1.2	Ensayos físico químicos realizados en Laboratorio.	81
6.1.2.1	Conductividad.	81
6.1.2.2	Alcalinidad, carbonatos y bicarbonatos.	82
6.1.2.3	Compuestos fenólicos.	82
6.1.2.4	Grasas y aceites.	82
6.1.2.5	Hidrocarburos no polares.	82
6.1.2.6	Sólidos disueltos.	83
6.1.2.7	Cloruros, nitratos y nitritos.	83
6.1.2.8	Sulfatos.	83
6.1.2.9	Hidrocarburos poliaromáticos (PAH's).	83
6.1.2.10	Metales.	884
6.1.2.11	Metales (Calcio).	85
6.1.2.12	Metales (Mercurio).	85

6.2	CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS	86
6.2.1	Ensayos in situ.....	86
6.2.1.1	Permeabilidad e infiltración.....	86
6.2.1.2	Densidad aparente.....	87
6.2.1.3	Temperatura.....	89
6.2.1.4	Estructura.....	89
6.2.1.5	Textura.....	89
6.2.2	Ensayos físico químicos realizados en el laboratorio.....	96
6.2.2.1	Porosidad.....	97
6.2.2.2	Densidad real.....	98
6.2.2.3	pH.....	99
6.2.2.4	Humedad gravimétrica.....	100
6.2.2.5	Humedad volumétrica (HV).....	101
6.2.2.6	Capacidad de Intercambio Catiónico.....	102
6.2.2.7	Materia Orgánica.....	103
6.2.2.8	Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH).....	105
6.3	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y LA TRAYECTORIA DE LA PLUMA CONTAMINANTE, DETERMINADO POR MEDIO DEL SOFTWARE VISUAL MODFLOW... ..	107
6.3.1	Interpolación de curvas de nivel por medio de Surfer.....	107
6.3.2	Simulación en Visual Modflow para flujo de agua subterránea y trayectoria de la pluma contaminante.....	109
6.3.2.1	Discretización del modelo.....	109
6.3.2.2	Topografía.....	111
6.3.2.3	Parámetros hidráulicos.....	112
6.3.2.4	Condiciones iniciales.....	113
6.3.2.5	Limites de flujo.....	113
6.3.2.6	Aplicación de PATHLINES y MODPAHT para evaluación de la trayectoria de partículas.....	118
6.4	ANÁLISIS COSTO BENEFICIO DE ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN FÍSICO QUÍMICAS PARA AGUA SUBTERRÁNEA Y SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS	122
6.4.1	Bombeo, tratamiento y reinyección.....	122
6.4.2	Oxidación química.....	12124
6.4.3	Air sparging.....	126
6.4.4	Soil vapor extraction (SVE).....	128
6.4.5	Bioventilación.....	130
6.4.6	Atenuación natural monitoreada.....	132

6.4.7	Barreras reactivas permeables (BRP).....	13134
6.4.8	Flushing in situ (lavado del suelo).....	136
6.4.9	Stripping por aire.....	138
6.4.10	Adsorción por carbón activado.....	11400
7.	CONCLUSIONES	11422
8.	RECOMENDACIONES	14144
9.	BIBLIOGRAFÍA	11455
	ANEXOS	151

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1. Principales tipos estructurales de suelos	29
Imagen 2. Suelo carente de estructura	29
Imagen 3. Triángulo textural.	30
Imagen 4. Área de modelación Campo Palagua.....	75
Imagen 5. Representación gráfica de la topografía de la Estación 1 y predio aledaño	108
Imagen 6. Malla planteada para simulación.....	110
Imagen 7. Topografía del terreno.....	111
Imagen 8. Limites asignados al dominio del modelo.....	11114
Imagen 9. Modelo de flujo subterráneo de la Estación 1 de Campo Palagua.....	115
Imagen 10. Modelo de dirección de flujo año 2009.....	116
Imagen 11. Calibración del modelo.....	117
Imagen 12. Trayectoria de partículas en un año.....	119
Imagen 13. Trayectoria de partículas en dos años	120
Imagen 14. Trayectoria de partículas en tres años	121

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Procesos naturales que afectan el movimiento de los contaminantes.	35
Tabla 2. Clasificación de los resultados de infiltración	63
Tabla 3. Relación entre la porosidad y la densidad aparente.	664
Tabla 4. Correcciones correspondientes para el hidrómetro a diferentes temperaturas.....	65
Tabla 5. Agrupación general de las clases texturales.....	66
Tabla 6. Clasificación de suelos de acuerdo a pH obtenido.	69
Tabla 7. Influencia de la materia orgánica con respecto a otras propiedades del suelo.....	73
Tabla 8. Permeabilidad e Infiltración en Predio Aledaño	87
Tabla 9. Permeabilidad e infiltración en Estación 1 de Campo Palagua	87
Tabla 10. Determinación de densidad aparente	88
Tabla 11. Datos textura suelo predio aledaño por método Bouyoucus.....	91
Tabla 12. Datos textura suelo Estación 1 por método Bouyoucus.....	91
Tabla 13. Resultados textura suelo predio aledaño.	91
Tabla 14. Resultados textura Estación 1.....	92
Tabla 15. Determinación de la textura en predio aledaño.....	93
Tabla 16. Determinación de la textura a la Estación 1	95
Tabla 17. Determinación de la porosidad total en las muestras de suelo.	97
Tabla 18. Determinación de la densidad real en las muestras de suelo.....	98
Tabla 19. Determinación de pH	100
Tabla 20. Determinación de la humedad gravimétrica.....	101
Tabla 21. Determinación de humedad volumétrica (HV)	102
Tabla 22. Determinación de intercambio catiónico	103
Tabla 23. Determinación de materia orgánica	105
Tabla 24. Clasificación de la cantidad de materia orgánica con respecto al clima...	105
Tabla 25. Resultados análisis TPH en predio aledaño (PM-14).....	106
Tabla 26. Conductividad hidráulica de pozos de monitoreo.....	112
Tabla 27. Parámetros de evaluación de Bombeo, tratamiento y reinyección.....	123
Tabla 28. Parámetros de evaluación para oxidación química.....	12124
Tabla 29. Parámetros de evaluación para Air Sparging.....	126

Tabla 30. Parámetros de evaluación para soil vapor extraction.....	128
Tabla 31. Parámetros de evaluación para Bioventilación	130
Tabla 32. Parámetros de evaluación de Atenuación Natural Monitoreada	132
Tabla 33. Parámetros de evaluación de BRP	13134
Tabla 34. Parámetros para evaluación de lavado del suelo	136
Tabla 35. Parámetros de evaluación de Stripping por aire	138
Tabla 36. Parámetros de evaluación de adsorción por carbón activado.....	11400

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Predio Aledaño a Estación 1 de Campo Palagua.....	52
Fotografía 2. Medición de niveles estáticos.....	53
Fotografía 3. Toma de muestra de agua subterránea para análisis físico químico....	53
Fotografía 4. Aspecto de suelo en predio aledaño a la Estación 1.....	58
Fotografía 5. Limpieza del punto de muestreo.....	59
Fotografía 6. Marcación con barreno para excavación.....	59
Fotografía 7. Profundidad para toma de muestras.....	60
Fotografía 8. Toma de muestra.....	60
Fotografía 9. Preservación de la muestra.....	61
Fotografía 10. Prueba de permeabilidad e infiltración in situ.....	62
Fotografía 11. Determinación de densidad real.....	68
Fotografía 12. Determinación de pH.....	69
Fotografía 13. Determinación de Capacidad de Intercambio Catiónico.....	72
Fotografía 14. Estructura suelo predio aledaño a Estación 1.....	89

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metodología	488
Figura 2. Localización Puerto Boyacá.....	499
Figura 3. Estación 1 y predio aledaño, Campo Palagua.	51
Figura 4. Muestreo de suelos en Estación 1 Predio Aledaño de Campo Palagua.....	57
Figura 5. Curva de textura predio aledaño.....	994
Figura 6. Curva de textura Estación 1.....	96

GLOSARIO

CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO: Representa el total de cationes que pueden ser retenidos por una cierta cantidad de suelo, o el total de miliequivalentes que pueden ser adsorbidos por 100g de suelo.

CARBONO ORGÁNICO Y MATERIA ORGÁNICA: Constituida por desechos de origen animal y vegetal, los cuales contienen diferentes sustancias químicas que ayudan a mejorar la composición del suelo. Los componentes de la materia orgánica del suelo se pueden clasificar en dos grupos: sustancias no húmicas y sustancias húmicas.

DENSIDAD APARENTE: Se define como la relación existente entre el peso de un volumen dado de suelo a la estufa (105° - 110°C) incluyendo su arreglo estructural (sin disturbar) y el volumen de agua desalojado por el mismo.

DENSIDAD REAL: Hace referencia al peso de las partículas sólidas de los suelos, por lo que puede definirse como la relación entre el peso de las partículas solidas y secas a la estufa entre 105 y 110°C sobre el volumen de agua desalojado por ellas. Se expresa en gr/cm^3 .

ESTRUCTURA: La estructura es la disposición y la organización de las partículas de un suelo, se constituye como una propiedad cualitativa del mismo, antes que una propiedad cuantitativa. Puede clasificarse como granular (esferas porosas, imperfectas, de tamaño pequeño y superficies irregulares), bloques (ejes horizontales y verticales de dimensiones similares de manera que son equidimensionales), prismática (son comunes en zonas áridas y semiáridas, de suelos maduros, en donde existe un elevado nivel de arcillas) y esferoidal (tienen una cara redondeada por la

alta concentración de Sodio, provocando desmoronamiento de la parte superior del agregado).

HUMEDAD GRAVIMÉTRICA: Definida como la proporción de agua por unidad de suelo seco, utilizada para conocer la humedad volumétrica del agua y la cantidad de agua disponible para las plantas.

HUMEDAD VOLUMÉTRICA: Calculada a partir de la densidad aparente y de la humedad gravimétrica.

PERMEABILIDAD: Se considera como la capacidad del suelo para transmitir aire y agua a través de él mismo.

pH: Considerada como la medida del grado de acidez o basicidad de un medio acuoso. La concentración de iones H^+ en la solución acuosa del suelo origina acidez, y la de los hidroxilos OH^- , la basicidad.

POROSIDAD: Se mide como la relación del volumen de vacíos o poros por unidad de volumen de suelo.

SUSTANCIAS NO HÚMICAS: Corresponden a residuos inalterados de tejidos vegetales y animales que son materia prima asimilada por las plantas gracias a la descomposición que realizan los microorganismos.

SUSTANCIAS HÚMICAS: Es el resultado de la degradación de las sustancias húmicas.

RESUMEN

TITULO: PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS FÍSICO-QUÍMICAS PARA REMEDIACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA Y SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS APOYADOS EN LA APLICACIÓN DE SOFTWARE VISUAL MODFLOW PARA UN ÁREA DE INTERÉS DE ECOPETROL S.A.

AUTOR(ES): María Carolina Leal Castellanos

FACULTAD: Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: María Kopytko

RESUMEN

Este trabajo planteó alternativas físico-químicas para remediación de agua subterránea y suelos contaminados con hidrocarburos en Estación 1 y predio aledaño de Campo Palagua como primera fase de proyecto cual plantea la recuperación de esta zona. Inicialmente se realizó la caracterización físico-química de las aguas freáticas y suelos contaminados con hidrocarburos. El agua subterránea en los puntos de monitoreo de la Estación 1 y predio aledaño contenía fenoles y metales como el Bario, Plomo, Arsénico, Cromo hexavalente y Cadmio que superaron el límite permitido por la norma colombiana vigente en varios puntos de muestreo. Se encontró gran diferencia en valores de conductividad eléctrica, sólidos disueltos y cloruros presentes en aguas subterráneas entre los pozos de la Estación 1 (PM-10) y el predio aledaño (PM-18 y PM-19) como resultado del desplazamiento del agua hacia las partes bajas del terreno, correspondiente a la propiedad adjunta y la actividad ganadera que se establece en esta zona. Caracterización de los suelos de la Estación 1 y predio aledaño señalaron propiedades semejantes de los dos, clasificándolos como arenosos, lo cual coincide con la alta permeabilidad y rápida infiltración observada, junto con baja densidad relativa y baja retención de humedad. Además ambos presentan una capacidad de intercambio catiónico entre 11,6-15,8 meq/100g y estructura granular. La modelación del flujo de aguas subterráneas y la trayectoria de la pluma contaminante simularon un comportamiento esperado, al igual que los modelos realizados en los años 2008 y 2009, con la dirección de flujo Noroeste a Suroeste coincidiendo con la topografía del área de estudio. Se determinó en el mismo Software la trayectoria de partículas contaminantes en dirección Suroeste, pero con la velocidad del desplazamiento de flujo mucho mayor que en modelos anteriores. La alternativa planteada para la remediación de agua subterránea y suelo contaminado con hidrocarburo del predio aledaño a la Estación 1 de Campo Palagua, fue el lavado inicial del suelo con una solución de surfactante, seguido por la bioremediación por medio los microorganismos nativos.

PALABRAS CLAVE: modelación en MODFLOW, aguas subterráneas, suelos afectados con hidrocarburos.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF DEGREE

TITLE: ALTERNATIVE APPROACH TO PHYSICAL-CHEMICAL REMEDIATION OF GROUND WATER AND SOIL CONTAMINATED WITH OIL SUPPORTED IN THE SOFTWARE VISUAL MODFLOW FOR AN AREA OF INTEREST ECOPETROL SA

AUTHORS: María Carolina Leal Castellanos

FACULTY: Environmental Engineering

DIRECTOR: Maria Kopytko

ABSTRACT

This work proposed physicochemical alternatives for the remediation of groundwater and soils contaminated with hydrocarbons in the Station 1 and adjacent property of the Oil Field "Palagua". This constitutes the first stage of the site's proposed remediation project. Initially, a physicochemical characterization of the hydrocarbon contaminated soil and groundwater was performed. Groundwater in the monitoring wells of the Station 1 and adjacent property contained phenols and metals such as Barium, Lead, Arsenic, hexavalent Chromium and Cadmium which exceed, in several observation points, the limits established by the current Colombian regulations. Big differences in values of electrical conductivity, dissolved solids and chlorides present in groundwater were found between the Station 1 (PM-10) and adjacent property (PM-18 and 19) wells as a result of the water displacement towards the lower parts of the area and the cattle raising activity that is established in this zone. Characterization of the soils of Station 1 and adjacent property indicated similar properties. Soils were classified as sandy, which coincides with the observed high permeability and rapid infiltration, as well as the low relative density and low moisture retention. Also, both soils showed a cation exchange capacity between 11,6 – 15,8 meq/100 g and granular structure.

The results of groundwater flow and contaminant particles modeling in Modflow were concurrent with modeling performed in 2008 and 2009; the direction of flow is Northwest to Southwest, coinciding with the topography of the area of study. The contaminant particles pathways were observed to be South-west but the speed of the flow displacement was greater than in previous models.

The proposed alternative for the remediation of groundwater and soil contaminated with hydrocarbons at the adjacent property to the Station 1 of Field Palagua consists of an initial soil wash with a solution of a surfactant and the later bioremediation with native microorganisms.

KEYWORDS: modelling in MODFLOW, ground water, soils affected with hydrocarbons

INTRODUCCIÓN

La continua y creciente demanda de energía a través de la historia ha impulsado la expansión de la industria energética y en especial las de explotación petrolera, ya que hasta el momento el petróleo y sus derivados resultan ser la mayor y más eficiente fuente de energía de uso popular, sin embargo, esta industria a su vez puede conducir al deterioro gradual del medio ambiente, puesto que la contaminación causada por el petróleo o sus derivados, se genera por su liberación accidental en el ambiente. Involucrando las operaciones relacionadas con la explotación, deshidratación y transporte de hidrocarburos, provocando efectos adversos directos e indirectos sobre el hombre o sobre el medio.

Ecopetrol S. A. es la principal empresa petrolera en Colombia. Está ubicada dentro de las 39 empresas más grandes del mundo y entre las cinco principales de Latinoamérica. La Empresa Colombiana del Petróleo (Ecopetrol S.A.) cuenta con campos de extracción de hidrocarburos en el centro, sur, oriente y norte de Colombia, dos refinerías, puertos de exportación e importación y producción de combustibles y crudos, al igual que una red de 8.500 km de oleoductos y poliductos a lo largo del país.

El Instituto Colombiano del Petróleo y la Universidad Pontificia Bolivariana han desarrollado un convenio interinstitucional en el cual se pretende llevar a cabo diferentes trabajos de investigación y tesis de grado enfocados a brindar soluciones ambientalmente sostenibles al impacto generado por derrames accidentales de petróleo en áreas específicas donde se llevan a cabo los diferentes procesos de extracción, producción y refinamiento de hidrocarburos. El presente trabajo de grado pretende dar paso a una serie de proyectos que conlleven a la solución total de la problemática mencionada, por medio del planteamiento de alternativas físico-químicas de remediación de suelos y agua subterránea contaminadas con hidrocarburos.

El área de interés elegida por la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol S.A.) para la ejecución de este proyecto fue la Estación de producción 1 de Campo Palagua, se encuentra ubicada en la zona rural del departamento de Boyacá al Nororiente del municipio de Puerto Boyacá. El interés que la empresa tuvo en este sitio fue la presencia de hidrocarburos en el suelo del predio aledaño a la Estación 1, como resultado de un incidente que ocasionó un derrame en 1997 de petróleo almacenado, el cual se fue extendiendo formando una pluma contaminante a nivel subterráneo afectando el agua subterránea y suelo en un área aproximada de 800m².

El proyecto realizado propone una solución adecuada para la contaminación por petróleo en suelos y aguas subterráneas, en el área de interés de Ecopetrol S.A., teniendo como base las características físicas y químicas del suelo y el agua subterránea, además de proporcionar un modelo de flujo de agua subterránea y trayectoria de la pluma contaminante.

En este trabajo, inicialmente se realizó una revisión bibliográfica, con énfasis en propiedades físicas y químicas del suelo y agua subterránea, como también tratamientos de remediación para suelos y aguas contaminadas con hidrocarburos, lo cual conllevó a establecer una metodología en la cual se tuvo en cuenta la caracterización físico química del agua subterránea y el suelo del predio aledaño y de la Estación 1 de Campo Palagua, el análisis del comportamiento del flujo de agua subterránea y la dirección de la pluma contaminante, así como el planteamiento de alternativas más viables de tratamiento para esta zona específica teniendo en cuenta las actividades realizadas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Plantear alternativas físico-químicas para la remediación del agua subterránea y los suelos contaminados con hidrocarburos apoyados en el uso del Software Visual Modflow.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar físico-químicamente el agua subterránea y el suelo contaminado con hidrocarburos en un área de interés de Ecopetrol S.A.
- Analizar el comportamiento del flujo de agua subterránea y la trayectoria de la pluma contaminante en esta misma área de interés de Ecopetrol S.A., utilizando el Software Visual Modflow.
- Plantear las alternativas de remediación del agua subterránea y del subsuelo contaminado con hidrocarburos en el área de estudio.

2. ANTECEDENTES EN LA ESTACIÓN 1 Y PREDIO ALEDAÑO DE CAMPO PALAGUA – ECOPETROL S.A.

En el año 1997 se presentó un incidente en la Estación 1 de Campo Palagua (ver imagen 3, en sección 5) provocando un derrame de crudo y posteriormente incendio en el área de la Estación y el predio aledaño. Como medida de contención se controló el evento mediante confinamiento y relleno con material de construcción, gravas y escombros en el área afectada.

En el año 2000 se dio inicio al seguimiento del comportamiento de las aguas subterráneas mediante la construcción de siete pozos de monitoreo (del PM-1 al PM-7) realizando actividades de nivelación, localización topográfica y pruebas de conductividad hidráulica. Con estos datos se simuló por primera vez la dirección del flujo del agua subterránea en el área mediante el software Visual Modflow.

En el año 2006, se llevó a cabo un estudio hidrogeológico detallado de la zona impregnada con hidrocarburo, en la Estación 1 y el predio aledaño, con el fin de determinar la extensión de una posible pluma contaminante en el área, instalando una red de pozos de monitoreo (PM-17, PM-18 y PM-19) ubicados en el predio, y así continuar con los monitoreos para poder realizar extracción del hidrocarburo existente (ver Figura 3, en sección 5). Con estos datos se estimó que la pluma contaminante se desplazaría en dirección del pozo de monitoreo PM-14 al PM-18, y que en un tiempo de 2.5 años la pluma llegaría al PM-19 afectando un área de 1500 m².

En septiembre del año 2008 se continuó con el monitoreo a los pozos encontrándose que la pluma contaminante se había desplazado en la dirección Norte a Sur (N-S), con un área contaminada de 336 m² aproximadamente y se estimó que el PM-14 presentaría acumulación local de hidrocarburo sin moverse. Posteriormente se realizó otra visita técnica en el mismo año y se corroboró la presencia de crudo en el

área de estudio, en dirección Suroeste (SW), cerca a la malla, que delimita el área de la Estación 1, planteando la construcción de una zanja de interceptación para extracción de producto libre, como sistema de recuperación de agua subterránea.

En los años 2008 y 2009 se elaboró nuevamente un modelo matemático incluyendo la aplicación “Pathline” en MODFLOW para determinar la trayectoria de contaminantes potenciales en la Estación 1 y predio aledaño de Campo Palagua, con el fin de revisar la dirección de flujo subterráneo en el área y predecir la trayectoria de la pluma de hidrocarburo encontrada y monitoreada anteriormente. La dirección de flujo subterránea obtenida fue similar a la presentada en el año 2000 y los resultados presentados por el modelo fueron consistentes con los monitoreos de seguimiento realizados en campo¹.

Finalmente en el año 2010, se continuó con el seguimiento a los niveles estáticos de los pozos de monitoreo, al igual que el control de presencia de hidrocarburo en estos, por medio de monitoreos frecuentes en el área de estudio. De igual manera se realizó un nuevo modelo de flujo subterráneo, en donde se obtuvo una dirección de flujo similar a la encontrada en modelos anteriores. Adicionalmente se realizó un estudio físico químico de las características del suelo y agua subterránea, con el fin de realizar un bosquejo de las posibles alternativas de remediación que se ajusten a las condiciones encontradas en el área de estudio.

¹ OBREGON Farfán; Adriana Milena; Informe de Actividades de Recuperación de Aguas Subterráneas en Campo Palagua; Instituto Colombiano del Petróleo (ICP); 2009; pág.: 3 - 5

3. JUSTIFICACIÓN

Los derrames de petróleo conllevan a una severa contaminación de los suelos, las aguas subterráneas y los cuerpos de agua superficiales. Los componentes de petróleo son altamente tóxicos para el ecosistema y muchos de ellos presentan características mutagénicas y carcinogénicas para los seres vivos². La contaminación por petróleo se caracteriza por su persistencia en el ecosistema, a pesar de los procesos de biodegradación natural. Aunque el problema de contaminación de aguas subterráneas y suelos por hidrocarburos en la industria petrolera es de una magnitud e importancia considerable, este resulta ser escasamente estudiado. Por esta razón es necesario conocer y evaluar el impacto generado por la industria del petróleo en el subsuelo.

Existen diferentes tratamientos físico-químicos que apuntan hacia la separación y/o la transformación de los hidrocarburos en los medios contaminados como: lavado del suelo con surfactantes, Biorremediación, oxidación química, entre otros. Con el fin de categorizarlos en función costo-beneficio y adquirir el criterio en su posterior aplicación es necesario estudiar sus características. Estos tratamientos pueden modificar los compuestos contaminantes a fin minimizar su impacto al medio. Además pueden reducir la cantidad del material contaminado presente en un lugar, retirar el componente de los desechos, que los hace peligrosos o inmovilizar el contaminante en los residuos.

Para esto es importante tener en cuenta el desplazamiento del contaminante, su ubicación, espesor, compuestos solubles y posible transformación de sus

² BARCELONA, Michael; ROBBINS, Gary; Soil and Groundwater Pollution, Encyclopedia of Physical Science and Technology, Third Edition, pp. 49 – 62, Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>

compuestos. Aprovechando que existen programas de modelación del flujo de agua subterránea y trayectoria de partículas contaminantes como Visual Modflow, que proporciona información del movimiento de la pluma de contaminación, se puede establecer zonas donde se presenta la mayor contaminación. De esta manera es posible establecer puntos específicos de posterior muestreo y plantear sistemas de contención con la información sobre la cantidad y característica del contaminante, y con base en ello, se establecen alternativas de tratamiento para la remediación, permitiendo contribuir al mejoramiento de la calidad de ecosistema y llegar a restablecer las condiciones naturales de la zona de influencia.

Ecopetrol S.A. de acuerdo a su política de responsabilidad ambiental empresarial ha desarrollado trabajos de investigación en cuanto a la recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos, provenientes de las actividades de la cadena productiva (extracción del crudo, tratamiento primario, refinación, transporte), así como continuas mejoras en sus procesos. Debido a que son diversas las áreas de suelos contaminados se buscó desarrollar un proyecto que permitiera evaluar el impacto que generan estas actividades en las áreas de interés de Ecopetrol S.A y abrir las puertas para posteriores estudios dentro del mismo ámbito en convenio con la UPB.

Este proyecto exploró nuevas temáticas de investigación en suelos, eficientes ajustadas a la realidad regional, en un proceso continuo de recuperación y protección de los recursos en el sector de la industria petrolera.

4. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan la temática de interés relacionada con el proyecto, en donde inicialmente se mencionarán las generalidades del suelo y demás conceptos básicos necesarios para el desarrollo de la metodología empleada en la ejecución de este proyecto. De igual manera se menciona la normativa vigente relacionada con protección de recursos naturales en Colombia e información general del software Visual ModFlow versión 4.3.

4.1 GENERALIDADES

Se define suelo como la superficie emergida de la tierra o la parte de la litósfera que de alguna forma está sometida a la acción de cambios climáticos, biológicos y antropogénicos³.

El suelo está constituido por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida a su vez compuesta por la fracción mineral y la orgánica, mientras que la gaseosa ocupa el espacio que la fase líquida deja libre y la porosidad presente en el suelo. Como consecuencia de estas tres fases, el suelo presenta determinadas propiedades que dependen de su composición. La fase líquida constituye el medio ideal que facilita la reacción entre las tres fases, pero también se producen reacciones dentro de cada una de ellas.

El suelo suministra un soporte para crecimiento de plantas y microorganismos en cuanto a la parte física como nutricional, en los agregados se producen la mayoría de

³ SEOÁNEZ Calvo, Mariano; Contaminación del Suelo: Estudios, Tratamiento y Gestión; 1999 p. 53

las reacciones bioquímicas del ciclo de la materia orgánica, nitrógeno y demás minerales, además de formar el lugar para la meteorización de las rocas⁴.

4.2 CLASIFICACION DE LOS SUELOS

Un suelo se puede clasificar como cohesivo o no cohesivo, grueso o de grano muy fino, sin embargo, esta clasificación se hace muy general, por lo que se ha adoptado de forma más práctica, la indicada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), en donde un suelo se clasifica de forma general, de acuerdo al tamaño de sus partículas, teniendo arenas (muy gruesas de 2.0mm a muy finas de 0.05 mm), limos (0.05mm a 0.002mm) y arcillas (0.002mm).

Una de las técnicas más usadas para clasificar el suelo de acuerdo al tamaño de sus partículas es usando el triangulo textural (ver Imagen 4 sección 4.3.2) en donde se muestran proporciones entre arena, limo y arcilla, que posteriormente definen la clase textural a la que pertenece una muestra de suelo.

El área específica de cada tipo de partícula puede influir en las propiedades físicas, químicas y biológicas de un suelo, por ejemplo las arcillas son buenos absorbentes de agua, iones y gases, las arenas se asocian más a propiedades como la porosidad y por ende al movimiento del aire y agua a través de estos poros, sin embargo, no afectan en gran medida las propiedades químicas del suelo⁵.

⁴ EWEIS, Juana; ERGAS, Sarina; CHANG, Daniel; SCHROEDER, Edward; Principios de Biorrecuperación Tratamientos para la Descontaminación y Regeneración de Suelos y Aguas Subterráneas Mediante Procesos Biológicos y Físico-Químicos, p 27; 1999

⁵ Ibíd., p29

4.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS

Las propiedades físicas y químicas de los suelos influyen en características como aireación, disponibilidad de nutrientes y retención de agua, así como también en la actividad biológica. Las propiedades más importantes que se encuentran dentro de estos grupos son el tamaño de partícula, la porosidad, la humedad, el estado de aireación, la composición química, la fracción de arcilla, la capacidad de intercambio de cationes y la fracción orgánica.

El tamaño de las partículas afecta el tamaño de los poros y las reacciones químicas en la superficie del suelo. A su vez la cantidad de poros depende de la textura, la estructura y el contenido de materia orgánica del suelo. Teniendo en cuenta la textura, cuando se tienen suelos en donde predomina el porcentaje de arena los poros son de mayor tamaño y en menor cantidad, mientras que en suelos arcillosos, prevalecen los tamaños de poro más pequeños⁶.

4.3.1 Estructura.

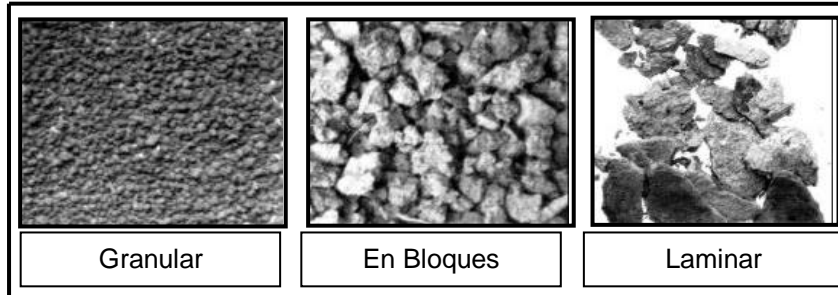
La estructura del suelo depende de la porosidad total de un volumen de suelo, de la forma y la distribución general del tamaño de los poros. Afecta a las propiedades mecánicas del suelo, especialmente al movimiento de fluidos, incluida la infiltración, la retención de agua y la aireación⁷.

La imagen 1 muestra los diferentes tipos estructurales que puede presentar un suelo.

⁶ MUSKUS, María Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga; 2001; pág.: 27.

⁷ *Ibíd.*, p.32

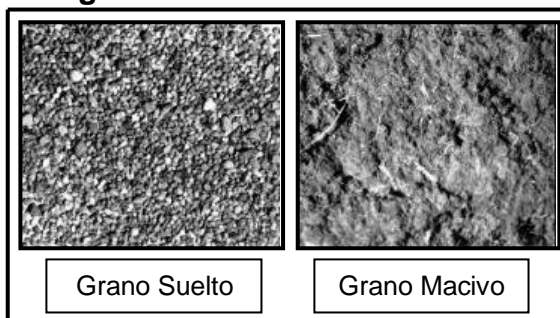
Imagen 1. Principales tipos estructurales de suelos



Fuente: United States Department of Agriculture (USDA); Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo [en línea] <http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/KitSpanish.pdf>; [Citado: 10 de febrero de 2010]

Cuando no se tiene presencia de agregados definidos, se dice que el suelo no tiene estructura, lo cual es indicado si se tiene un aspecto de granos sueltos o muy macizo (ver Imagen 2).

Imagen 2. Suelo carente de estructura



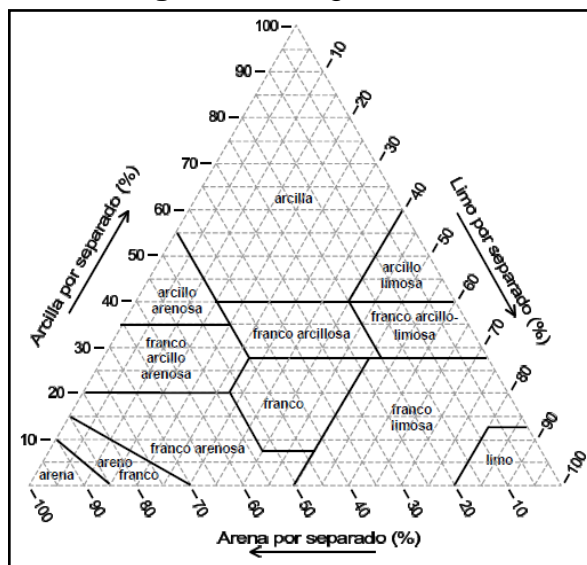
Fuente: United States Department of Agriculture (USDA); Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo; [en línea] <http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/KitSpanish.pdf>; [Citado: 10 de febrero de 2010]

4.3.2 Textura

El suelo está compuesto de partículas con diferentes tamaños, en orden descendente gravas, arenas, limos y arcillas. Para la clasificación del suelo de acuerdo al tamaño de partícula se han establecido diferentes métodos, entre los que se encuentran dos clasificaciones más conocidas como son la de Atterberg o Internacional y la americana del United States Department of Agriculture (USDA).

También se puede emplear el método de Bouyoucus en laboratorio, el cual puede determinar la textura de un suelo, empleando el triángulo textural (ver Imagen 3), en donde cada termino textural corresponde con una determinada composición porcentual de arena, limo y arcilla.

Imagen 3. Triángulo textural.



Fuente: United States Department of Agriculture (USDA); Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo; [en línea]; <http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/KitSpanish.pdf>; [Citado: 10 de febrero de 2010]

4.3.3 Porosidad.

Se puede dividir en varias clases como: residual, efectiva, eficaz y capilar los valores más típicos de porosidad son aquellos comprendidos entre 0.20 y 0.95, en un rango entre 0 y 1 de ocupación del espacio poroso por agua⁸

La circulación del agua a través de los poros puede modificar en algunas ocasiones las condiciones del suelo como consecuencia del movimiento de la misma, o también si se tienen productos disueltos que puedan arrastrar a partículas, ocasionado finalmente la pérdida de estructura del suelo⁹.

4.3.4 Humedad o Contenido de agua.

Medida que relaciona peso a peso la proporción de agua por unidad de suelo seco, que puede afectar la textura y estructura del suelo, en donde un suelo en el que predomine el contenido de arcillas puede retener mayores cantidades de agua. Existen dos clases de humedad, humedad gravimétrica y humedad volumétrica (ver glosario)¹⁰

4.3.5 Densidad.

La densidad definida como la proporción en masa por unidad de volumen del suelo, se puede ver influenciada por la porosidad en cuanto aporte que hacen en volumen, los espacios entre las partículas y los agregados que conforman los sistemas de

⁸ POLANCO DE HURTADO, Margarita; Mecánica de Suelos; Popayan; Universidad del Cauca; 1998; Pág.: 31

⁹ SEOÁNEZ Calvo, Mariano; Contaminación del Suelo: Estudios, Tratamiento y Gestión; pág.: 93; 1999

¹⁰ MUSKUS, María Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga; 2001; Pág.: 28

poros del suelo. Existen dos tipos de medición para la densidad: real y aparente (ver glosario) que varían generalmente entre 2.6 gr/cm^3 - 2.75 gr/cm^3 y 1.0 - 1.8 gr/cm^3 , respectivamente¹¹.

4.3.6 Permeabilidad e Infiltración.

La permeabilidad se considera directamente proporcional a la porosidad, es decir, un suelo con espacios porosos mas grandes proporcionan mayor facilidad de movilidad de agua y aire y por tanto mayor permeabilidad. Por otro lado la infiltración se mide como la velocidad a la cual el agua entra en el suelo, dependiendo del tipo de suelo, estructura y del contenido de agua en el suelo.

El régimen de infiltración es sensible a condiciones cercanas a la superficie, y está sometido a un cambio significativo debido al uso del suelo. Está afectado por el desarrollo de raíces, presencia de lombrices, agregación del suelo y por un incremento general de materia orgánica estable. Si el suelo está saturado, no se produce infiltración. La textura también afecta el régimen de infiltración, haciendo ésta más rápida o más lenta¹².

4.3.7 pH.

El pH es una de las propiedades químicas más importantes de los suelos, puesto que puede influir sobre algunos aspectos como: disponibilidad y solubilidad de nutrientes para las plantas, actúa sobre la mineralización de la materia orgánica y puede regular concentración de iones tóxicos en el suelo¹³.

¹¹ MUSKUS, María Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga; 2001; Pág.: 28

¹² Ibíd., pág.: 36

¹³ Ibíd., pág.: 39

El suelo normalmente debe mantener un pH en un intervalo de 4 a 8.5, en regiones húmedas se pueden tener valores entre 5 y 7 y en suelos áridos los valores de pH pueden encontrarse entre 7 y 9¹⁴.

4.3.8 Capacidad de Intercambio Catiónico.

Para interpretar los valores de capacidad de intercambio catiónico se tienen en cuenta los porcentajes de arcilla y de materia orgánica de la muestra, ya que son los principales responsables de la retención de cationes. La materia orgánica del suelo posee una capacidad muy alta de intercambio catiónico, entre 300 y 400 miliequivalentes por cada 100 gramos de suelo. La capacidad de intercambio de las arcillas es, por lo general, más baja y varía con el tipo de arcilla¹⁵.

4.3.9 Carbono y Materia Orgánica.

El carbono total en el suelo está representado por el conjunto de todas las formas en que se puede encontrar el carbono en él y puede influenciar en algunas propiedades físicas y químicas como en la reducción de la escorrentía superficial y la erosión, favorece la agregación del suelo, mejora la capacidad de retención de humedad, ayuda a solubilizar los nutrientes y mejora la capacidad de intercambio catiónico.

En suelos de orgánicos el contenido de materia orgánica puede llegar a ser superior al 20%, mientras que en suelos minerales puede ser inferior al 20%¹⁶.

¹⁴ HARRISON, Roy M; El Medio Ambiente: Introducción a la Química Medioambiental y a la Contaminación; España; Editorial Acribia S.A.; 2003

¹⁵ Instituto Tecnológico Geominero de España; Contaminación y Depuración de Suelos; 1995; pág.: 126

¹⁶ MUSKUS, María Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; 2001; Pág.: 71

4.4 CONTAMINACIÓN DE SUELOS EN EXPLOTACIONES PETROLERAS

La contaminación de suelos y aguas subterráneas con constituyentes orgánicos, e inorgánicos se ha producido durante mucho tiempo, debido a posibles manejos inadecuados de los materiales de desecho, derrame de tuberías corroídas entre otros, que pueden llegar a ocasionar un impacto al suelo, agua y aire.

Al presentarse un evento de contaminación de suelos con hidrocarburos, sus componentes pueden llegar a aguas subterráneas por infiltración y aguas superficiales por escorrentía, igualmente sus componentes volátiles pueden llegar al aire si es el caso de hidrocarburos livianos.

La contaminación química de los suelos superficiales y las aguas subterráneas por petroquímicas y otros contaminantes comerciales, se muestra como un gran riesgo para la salud humana y del medio ambiente, debido al uso de la tierra y del agua¹⁷.

4.4.1 Transporte de contaminantes en el suelo.

Existen diferentes procesos mecánicos, químicos y biológicos que afectan el movimiento de contaminantes en el suelo. Algunos contribuyen a que su movimiento sea lento y otros podrían ocasionar su aceleración. A continuación en la Tabla 1 se muestran los procesos naturales que afectan al transporte de sustancias contaminantes.

¹⁷ BARCELONA, Michael y ROBBINS, Gary; Soil and Groundwater Pollution; [Consulta: 30/10/09]; [En Línea]; <http://www.sciencedirect.com/>

Tabla 1. Procesos naturales que afectan el movimiento de los contaminantes.

TIPO DE PROCESO	PROCESO
Procesos Mecánicos (físicos)	Advección Dispersión Difusión Flujo de fluidos en fase no acuosa Flujo medio fracturado
Procesos químicos	Reacciones de oxidación y reducción Intercambio de iones Precipitación y Sorción
Procesos biológicos	Degradación aeróbica Degradación anaeróbica Absorción biológica

Fuente: LAGREGA, Michael; BUCKINGHAM, Phillip; EVANS, Jeffrey; Gestión de Residuos Tóxicos: Tratamiento, Eliminación y Recuperación de Suelos; Volumen I; McGraw Hill; 1996; Pág.: 208

Además de los procesos mencionados en la Tabla 1, existen otros procesos que pueden ser de origen tanto químico como biológico y que afectan el destino de las sustancias contaminantes en el subsuelo, los cuales pueden contribuir al frenado (originado por procesos que impiden el movimiento de la sustancias contaminantes en el suelo) al traslado o a la atenuación de su concentración.¹⁸.

Los hidrocarburos se pueden esparcir desde la superficie del suelo hacia el interior del mismo hasta alcanzar niveles freáticos de aguas subterráneas. Al infiltrarse en el suelo se pueden adherir a partículas de suelo modificando su movilidad, sin embargo, los compuestos de alto peso molecular tienen menor movilidad y permanecen cerca de la fuente, y los más livianos pueden migran hacia las partes más profundas del perfil por su solubilidad en agua¹⁹.

¹⁸ LAGREGA, Michael; BUCKINGHAM, Phillip; EVANS, Jeffrey; Gestión de Residuos Tóxicos: Tratamiento, Eliminación y Recuperación de Suelos; Pág.: 208, 209; 1996

¹⁹ PELLINI, Leandro; Biorremediación Estimulada por Efluentes Cloacales Tratados de Suelos Contaminados con Hidrocarburos; [Consulta: 29/01/10]; Disponible en internet: <http://www.tesis.bioetica.org/lp.htm>

4.4.2 Efectos de la contaminación de suelos por hidrocarburos en animales y plantas.

A una concentración igual o menor al 1 - 5% (p/p) de hidrocarburos, se espera que la reducción en la producción de las plantas sea muy baja o nula. Cuando la concentración de hidrocarburos excede el 5% (p/p), estos son capaces de disolver los tejidos vegetales, ocasionando una reducción de la transpiración y aumento de la respiración, que finalmente lleva a la sofocación de la planta. En los animales, la inhalación de los hidrocarburos más volátiles puede generar irritación de las vías respiratorias, ocasionando incluso hemorragias. La ingestión de derivados del petróleo produce en primera instancia irritación y posteriormente destrucción de los epitelios del esófago, estómago e intestinos, siendo la consecuencia más grave la aparición de gastroenteritis hemorrágica. La impregnación total de la piel de los animales con crudo, puede generar en ellos fenómenos de alteraciones en su regulación térmica al imposibilitar el intercambio térmico corporal con el ambiente, ocasionando hipotermia, al no poder retener su calor corporal o hipertermia, al no poder eliminarlo. El simple contacto con los ojos puede causar desde irritaciones y conjuntivitis, hasta úlceras corneales. En los seres humanos la inhalación o contacto directo con hidrocarburos tienen las mismas consecuencias que para los animales, además pueden presentarse alteraciones temporales o permanentes del sistema nervioso central, por la exposición prolongada a compuestos volátiles²⁰.

²⁰ Ibíd; Disponible en Internet: <http://www.tesis.bioetica.org/lp.htm>

4.5 TECNICAS FISICO QUIMICAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS

Un suelo se considera contaminado cuando sus características físicas, químicas o biológicas se han modificado y han alcanzado altas concentraciones de sustancias químicas que podrían ocasionar riesgos a los ecosistemas²¹.

Generalmente cuando sustancias contaminantes entran en contacto con los suelos, éstos actúan como filtros protectores, puesto que los degradan, inmovilizan e impiden la manifestación de efectos adversos inmediatos. Esto se debe a las características del suelo y se lo denomina poder de amortiguación. Sin embargo, cuando la concentración de las sustancias contaminantes supera el límite del poder amortiguador, el suelo pierde la capacidad de comportarse como sumidero ocasionando problemas al medio.

El término remediación se ha tomado de la lengua inglesa, haciendo referencia al proceso de remoción o limpieza de contaminantes que pueden causar afectaciones a la salud humana o al medio ambiente²².

Existen diversas técnicas para la remediación de suelos contaminados por hidrocarburos, que básicamente consisten en la remoción de las sustancias contaminantes, mediante el empleo de métodos físicos, químicos y biológicos.

Para efectos de este proyecto se tendrán en cuenta solo las técnicas físicas y químicas, entre los cuales se encuentran:

²¹ HERNÁNDEZ, Diana; PLAZA, Cesar; POLO, Alfredo; Consideraciones Generales Sobre la Contaminación y Restauración de Suelos; Revista Residuos; Año XII, No. 67; Julio – Agosto 2002; Pág.: 126 - 134

²² BOHÓRQUEZ Saval, Susana; La Reparación del Daño. Aspectos Técnicos: Remediación y Restauración; [Consulta : 30/04/09]; [En Línea]; 1997; Pág.: 123 – 137; <http://www.bibliojuridica.org/libros/1/141/9.pdf>

4.5.1 Bombeo, tratamiento y reinyección.

Es un tratamiento para el agua subterránea, que consiste en combinar el bombeo in situ con un tratamiento de recuperación ex situ, el cual podría ser biológico como Biorrecuperación o in situ con inyección de nutrientes y oxígeno directamente al pozo de remediación.

El tratamiento de bombeo, tratamiento y reinyección consiste en extraer el agua contaminada de los pozos de monitoreo, posteriormente es tratada ex situ y puede ser vertida a una fuente de agua, dependiendo del cumplimiento de porcentajes de remoción. Idealmente el agua tratada, sería reinyectada en los pozos de monitoreo después de su tratamiento, sin embargo, no se podría llevar a cabo si se trata de un agua residual.

Si el tratamiento se realiza in situ, es decir inyectando nutrientes y oxígeno en la zona contaminada, se facilita el desarrollo de una biodegradación en el área tratada y a su vez el aumento en la velocidad de recuperación del acuífero. Combinando el bombeo y tratamiento con la inyección de oxígeno y nutrientes se obtiene como resultado el desarrollo de una zona de reacción en el acuífero²³.

4.5.2 Oxidación química.

Este proceso consiste en la detoxificación in situ de los contaminantes, al transformar sus componentes en compuestos inocuos generalmente encontrados en la naturaleza, por medio de la adición de un agente oxidante. Entre las sustancias más utilizadas para tratar suelos contaminados por combustibles y solventes se tienen: ozono, peróxido de hidrógeno, permanganato de potasio y cloro. Si se requiere

²³ EWEIS, Juana; ERGAS, Sarina; CHANG, Daniel; SCHROEDER, Edward; Principios de Biorrecuperación Tratamientos para la Descontaminación y Regeneración de Suelos y Aguas Subterráneas Mediante procesos Biológicos y Físico-Químicos, p 151 – 160; 1999

acelerar la oxidación de los COV (Carbono Orgánico Volátil) se incorpora luz ultravioleta (UV) con ozono y/o peróxido de hidrógeno.

Los agentes oxidantes son introducidos al terreno a través de pozos a diversas alturas, sin necesidad de bombear los productos de la oxidación, sin embargo, se obtiene mayor efectividad en el tratamiento si se establece un sistema cerrado, reinyectando lo obtenido por el pozo de extracción, y de esta forma contribuyendo a una mejor mezcla del oxidante con los productos que integran la contaminación.

La oxidación química facilita la degradación de moléculas orgánicas como: COV, clorados, mercaptanos y fenoles; y moléculas inorgánicas como el cianuro²⁴.

4.5.3 Air sparging.

Tecnología de remediación primaria, de aplicación in situ, que consiste en remover contaminantes orgánicos volátiles (COV's) o compuestos orgánicos biodegradables por medio de la inyección de aire en el subsuelo, por debajo del nivel freático, y bombeando a la superficie a través de pozos de extracción; la inyección de aire al suelo beneficia el desarrollo de microorganismos bacterianos, además de estimular que la masa del contaminante se transforme a la fase gaseosa, mientras el oxígeno se disuelve en la fase acuosa²⁵.

²⁴ LAGREGA, Michael; BUCKINGHAM, Phillip; EVANS, Jeffrey; Gestión de Residuos Tóxicos: Tratamiento, Eliminación y Recuperación de Suelos; Pág.: 588, 589; 1996

²⁵ COLE, Mattney G; Assessment and Remediation of Petroleum Contaminated Sites; Lewis Publishers; 1994; by CRC Press, Inc.

Esta técnica permite la remediación de un suelo contaminado, por medio de dos vías ya sea disolviendo el contaminante en el gas inyectado o proporcionando barreras que ayudan a la migración del contaminante disuelto de la zona afectada²⁶.

Air Sparging puede recombinar dos métodos: el aire forzado hasta el interior del acuífero y la elevación del agua a la zona superficial del pozo por acción del aire succionado. A través de esta técnica se espera el movimiento de los contaminantes volátiles, por lo que es necesario instalar un sistema de muestreo para determinar el destino de estos, puesto que los compuestos volátiles tienden a pasar a estado gaseoso durante la operación, y por eso en algunos casos se ha combinado el air sparging con la extracción de vapores del suelo²⁷.

4.5.4 Soil vapor extraction.

Técnica de aplicación in situ para remover compuestos orgánicos volátiles (COV) y semivolátiles de la zona vadosa del suelo, mediante la inyección y extracción vertical de vapor por medio de la perforación de pozos por encima del nivel freático, en los que se debe generar un vacío, para permitir la remoción de hidrocarburos.

El número de pozos de inyección y de extracción para un área contaminada puede variar en función de la trayectoria del contaminante, y las características del área: tipo de suelo, contaminante, entre otros. Los gases extraídos son recogidos y tratados, y así se separan los contaminantes y se almacenan en condiciones de seguridad para

²⁶ HINCHER, Robert E; MILLER, Ross N; JHONSON, Paul C; In Situ Aireation Air Sparging, Bioventing and Related Remediation Processes; Battelle Memorial Institute; 1995

²⁷ EWEIS, Juana; ERGAS, Sarina; CHANG, Daniel; SCHROEDER, Edward; Principios de Biorrecuperación Tratamientos para la Descontaminación y Regeneración de Suelos y Aguas Subterráneas Mediante procesos Biológicos y Físico-Químicos, p 161, 162

su posterior tratamiento. Esta técnica debe ser monitoreada cualitativa y cuantitativamente analizando los vapores del hidrocarburo²⁸.

4.5.5 Bioventilación.

Utilizado para tratamientos de contaminantes menos volátiles en la zona vadosa, en donde la transformación y degradación de los contaminantes se llevan a cabo en el punto de contaminación. El sistema se asemeja al usado en Soil Vapor Extraction, sin embargo, el caudal de aire se limita para contribuir a la biodegradación.

Los factores limitantes para aplicar efectivamente el proceso de bioventilación incluye pérdida de nutrientes necesarios para mantener la vida microbiana, bajo contenido de humedad del suelo, dificultad en lograr que pase el caudal de aire a través de la zona contaminada y mantener el contenido de humedad cercano a la capacidad de campo, sin embargo, se pueden controlar manteniendo un muestreo regular del suelo.

Algunos de los factores más importantes para la elección del método son las características físicas del suelo como la profundidad de la zona contaminada y el potencial para transportar contaminantes fuera de la zona²⁹.

4.5.6 Atenuación natural controlada (MNA, Monitored Natural Attenuation).

Consiste en aprovechar y potencializar los procesos naturales para reducir o llegar a eliminar la contaminación en los suelos y las aguas subterráneas por derrames de gasolina o petróleo.

²⁸ PEDERSON, Tom A; CURTIS Jaimes, T; Soil Vapor Extraction Technology; Cambridge Massachusetts; Noyes Data Corporation; 1991

²⁹ EWEIS, Juana; ERGAS, Sarina; CHANG, Daniel; SCHROEDER, Edward; Principios de Biorrecuperación Tratamientos para la Descontaminación y Regeneración de Suelos y Aguas Subterráneas Mediante procesos Biológicos y Físico-Químicos, p 169.

La MNA se puede aplicar con mayor eficacia en los sitios donde previamente se ha eliminado la fuente de contaminación, para que los procesos naturales posteriormente se deshagan de pequeñas cantidades de contaminación que quede en el suelo y aguas subterráneas, los cuales deben ser monitoreados regularmente para garantizar que el proceso haya tenido éxito.

Para la aplicación de esta técnica no se hace necesario excavar ni construir, por lo que no hay que eliminar desechos enterrándolos, afectando menos al medio. Otro beneficio de la MNA son los bajos costos, ya que requiere menos equipos y trabajo que otras técnicas, a pesar de requerir monitoreos con mayor frecuencia³⁰.

4.5.7 Barreras reactivas permeables (BRP).

Las BRP son una técnica usada para la depuración de aguas subterráneas contaminadas, estas barreras se construyen cavando zanjas largas y estrechas teniendo en cuenta el flujo de las aguas, donde se emplea un material reactivo capaz de eliminar las sustancias químicas dañinas al medio ambiente.

Algunos de los materiales reactivos empleados pueden ser el hierro, la caliza y el carbono activado o no activado. Estos materiales a su vez pueden ser mezclados con arena para facilitar el flujo de agua a través de las barreras, por lo tanto esta técnica es más efectiva en suelos donde predomine el contenido de arenas³¹.

³⁰ HIGUERAS, Pablo; OYARZUN, Roberto; Restauración y Remediación de Suelos III: Suelos y Aguas Subterráneas; Curso de Minería y Medio Ambiente; [Consulta: 13-07-09]; [En Línea]; <http://www.uclm.es/users/higueras/mam/MMAM10.htm>

³¹ *Ibíd.*

4.5.8 Flushing in situ (lavado del suelo)

Esta técnica se basa en la inyección de compuestos químicos como surfactantes y alcoholes que reaccionan con el contaminante, disolviéndolo, para posteriormente bombear a superficie a través de pozos de extracción³².

El objetivo de realizar un lavado a un terreno contaminado es poder separar las partículas finas con alto grado de contaminación de las partículas gruesas con menor grado de contaminación.

El lavado de suelo es una técnica que se podría aplicar de manera más eficiente en suelos arenosos y de grano grueso, ya que al presentar mayor infiltración se puede recuperar un mayor volumen de terreno, en comparación con los suelos arcillosos. Esta técnica se puede utilizar para remover contaminantes más o menos densos que el agua como los Non-Aqueous Phase Liquid (NAPL) o los Dense Non-Aqueous Phase Liquid (DNAPL), inmiscibles con agua, lo cual puede llevar a una variación en el proceso, como la inclusión de surfactantes que permitan la desorción y disolución de compuestos hidrófobos. También es posible añadir ácidos para remover metales e hidróxidos para remover ácidos orgánicos³³.

4.5.9 Stripping por aire.

El proceso consiste en formar un flujo a contracorriente del agua y aire a través de un material de empaquetamiento (pueden ser estructuras de plástico, con relación superficie/volumen alta), que proporciona un área superficial alta para la transferencia

³² EWEIS, Juana; ERGAS, Sarina; CHANG, Daniel; SCHROEDER, Edward; Principios de Biorrecuperación Tratamientos para la Descontaminación y Regeneración de Suelos y Aguas Subterráneas Mediante procesos Biológicos y Físico-Químicos, p 237

³³ *Ibíd.*; 238

de los compuestos orgánicos volátiles (especialmente para bajas concentraciones menores a 200 mg/l) desde la fase líquida a la de aire.

El stripping por aire se puede llevar a cabo usando torres de empaquetamiento (para aguas subterráneas), torres de bandeja, sistemas en spray, aireación difusa o mecánica. El movimiento de los COV desde el agua hasta el aire se rige por la teoría de las dos películas, la cual engloba la transferencia desde la masa líquida a la película líquida, de ahí hacia la película de aire y de ésta hacia la masa de aire³⁴.

4.5.10 Adsorción por carbón activo.

Los sistemas de adsorción por carbón son columnas de flujo continuo dispuestas en serie, por lo que la columna final tiene un efecto de unidad de refinado, usando el carbón activo como adsorbente para eliminar del agua, contaminantes solubles por contacto con la superficie sólida.

Esta técnica es capaz de eliminar eficazmente un amplio rango de compuestos orgánicos solubles, además de producir un efluente de muy alta calidad, por lo que es usado tanto en sistemas de agua potable, como en el control de contaminación³⁵.

4.6 SOFTWARE VISUAL MODFLOW

Es un software para modelar la dirección del flujo del agua subterránea y la trayectoria de posibles plumas de contaminación, con aplicaciones prácticas en tres dimensiones

³⁴ LAGREGA, Michael; BUCKINGHAM, Phillip; EVANS, Jeffrey; Gestión de Residuos Tóxicos: Tratamiento, Eliminación y Recuperación de Suelos; Pág.: 523, 524; 1996

³⁵ Ibid.; Pág.: 555 - 558; 1996

y transporte de contaminantes. Este software permite dimensionar fácilmente los límites del terreno a modelar, ejecutar simulaciones, y visualizarlas mediante gráficos en dos o tres dimensiones.

Visual MODFLOW es una herramienta bastante completa en cuanto a modelación en tres dimensiones de simulaciones de flujo de aguas subterráneas y de transporte de contaminantes. Este paquete integrado combina MODFLOW, MODFLOWSURFACT, Modpath, ZoneBudget, MT3Dxx/RT3D, MGO, y WinPEST con la interfaz gráfica más intuitiva y poderosa disponible. La estructura del menú lógica y herramientas gráficas permiten:

- Seleccionar unidades y dimensionar el dominio del modelo
- Asignar las propiedades del modelo y las condiciones de frontera.
- Ejecutar las simulaciones del modelo
- Calibrar el modelo usando técnicas manuales o automáticas
- Optimizar las tasas de bombeo de los pozos
- Visualizar los resultados utilizando los gráficos 2D o 3D

Los parámetros del modelo de entrada y los resultados pueden ser visualizados en dos dimensiones (sección transversal y un plan de vista) o en tres dimensiones, en cualquier momento durante el desarrollo del modelo, o la exhibición de los resultados.

VMODFLOW 4.3 se ha probado bajo diferentes escenarios dando resultados muy confiables. Este programa consta básicamente de dos (2) grandes secciones: la primera corresponde a un pre-procesador mejorado basado en el método desarrollado por el USGS y la segunda a un post-procesador, que permite de manera fácil y amigable la entrada de datos y la visualización de resultados. El Software Visual MODFLOW utiliza el método matemático de diferencias finitas de malla centrada para el planteamiento de la red de flujo de aguas subterráneas.

Los datos de salida que entrega el programa Visual MODFLOW son: balance hídrico, cotas, velocidades y direcciones de flujo. Es así como se puede observar el comportamiento del flujo de las aguas subterráneas y el transporte de los contaminantes del subsuelo³⁶.

4.7 LEGISLACIÓN

En Colombia actualmente no existe normatividad específica concerniente a la contaminación de suelos y sus respectivos niveles permisibles, por lo tanto se hará referencia a disposiciones nacionales de protección del medio ambiente y recuperación de medios afectados por contaminación en general.

El decreto 2811 de 1974 que estableció el Código Nacional de Recursos Naturales (CNRN) y La ley 99 de 1993 que definió el Sistema Nacional Ambiental contemplan en diferentes acápite la preservación del recurso suelo, tanto en su uso superficial, como en sus aspectos de calidad para su utilización.

A continuación se mostraran algunos artículos del Código Nacional de Recursos Naturales en donde se hace referencia a preservación del medio ambiente y restauración de daños ocasionados por explotación y/o utilización.

Art. 35: “se prohíbe descargar sin autorización los residuos, basuras y desperdicios, y en general, de desechos que deterioren los suelos o, causen daños o molestias a individuos o núcleos humanos”.

Art. 179: El aprovechamiento de los suelos deberá efectuarse en forma de mantener su integridad física y su capacidad productora. En la utilización de los suelos se

³⁶ Schlumberger Water Service; Visual ModFlow Premium Demo Tutorial.

aplicarán normas técnicas de manejo para evitar su pérdida o degradación, lograr su recuperación y asegurar su conservación.

Art. 180: "... las personas que realicen actividades agrícolas, pecuarias, forestales o de infraestructura, que afecten o puedan afectar los suelos, están obligadas a llevar a cabo las practicas de conservación y recuperación que se determinen de acuerdo con las características regionales"

Art. 183: Los proyectos de adecuación o restauración de suelos deberán fundamentarse en estudios técnicos de los cuales se induzca que no hay deterioro para los ecosistemas. Dichos proyectos requerirán aprobación³⁷.

Como se mencionó anteriormente, debido a la ausencia de legislación que regule los niveles máximos permisibles de TPH en suelos y aguas subterráneas, se toma como valor base el recomendado por el Instituto Americano de Petróleo – API, de un 1% P/P (10.000ppm), basado en la toxicidad para las plantas y movilidad de hidrocarburos hacia aguas subterráneas, sin embargo, también se puede tomar como referencia la norma Louisiana 29B, en la que se establecen como valores máximos permisibles de TPHs un 3% p/p³⁸.

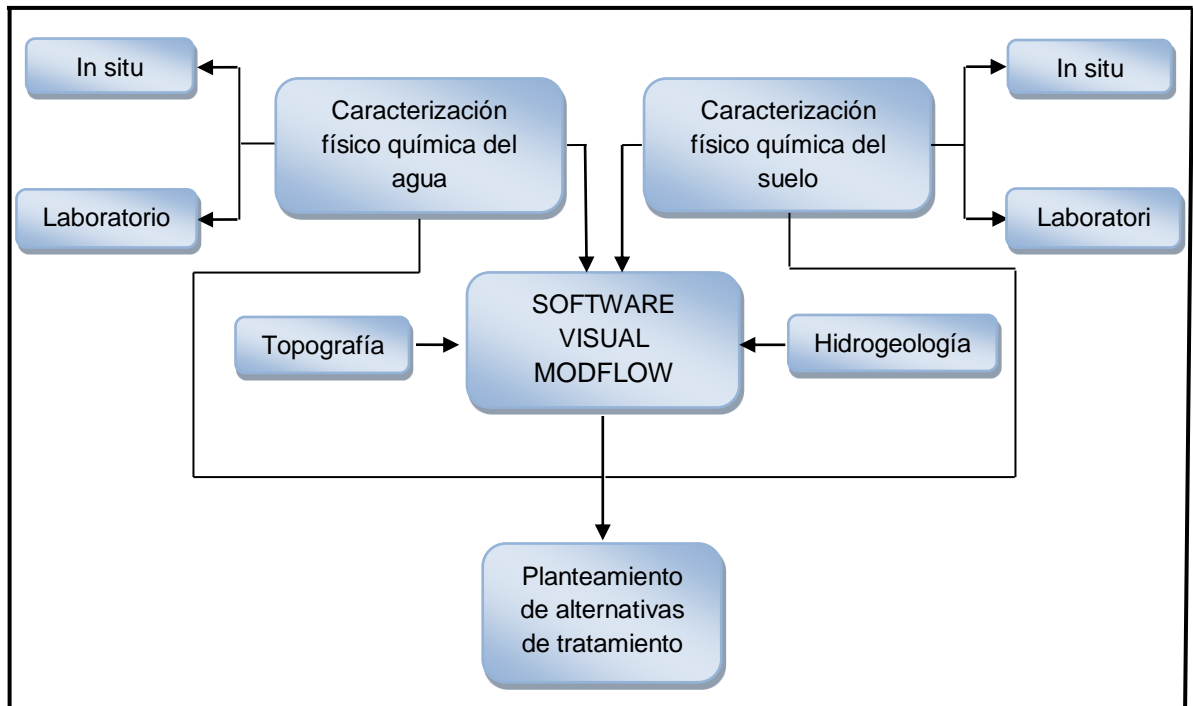
³⁷ ESCALLON Ortiz, Miguel Ángel (compilador); Código Nacional de Recursos Naturales - Anotado; Editorial Leyer; Edición 20; 2010.

³⁸ IBARRA, Diana; Evaluación del Potencial de Biodegradación de Hidrocarburos Totales en Suelos Contaminados Procedentes de PetroSantander (Colombia) INC. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga. Facultad de Ingeniería Ambiental, 2008; 51 – 53p.

5. METODOLOGIA

Para el planteamiento de alternativas físico químicas de remediación de suelos y aguas subterráneas contaminadas con hidrocarburos, se planteó la metodología descrita en la Figura 1.

Figura 1. Metodología



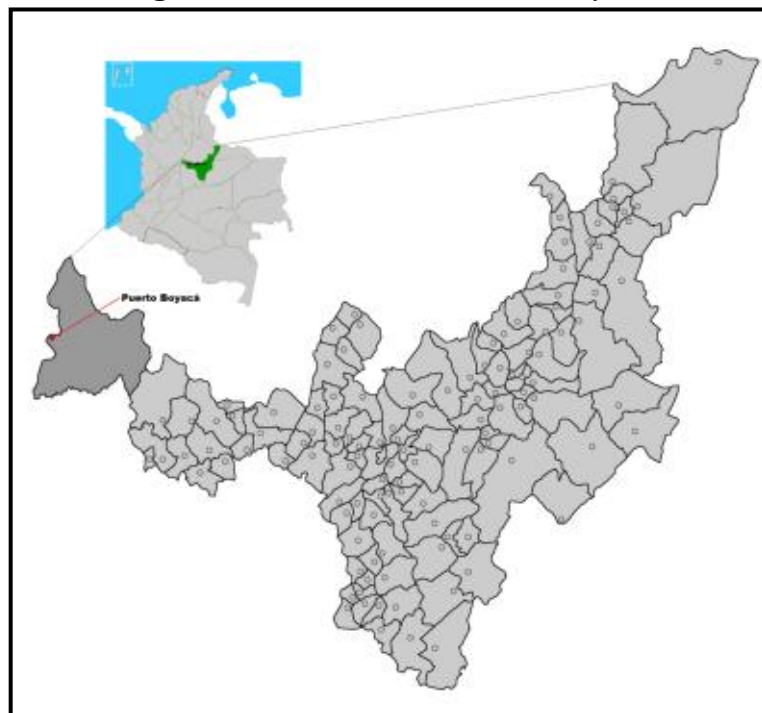
Fuente: Autor

Inicialmente se efectuó la caracterización físico química del agua subterránea y suelo, parte realizada in situ y otra en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana e instalaciones del Instituto Colombiano del Petróleo Ecopetrol S.A. (ICP). Posteriormente se empleó el software Visual ModFlow para la determinación de la velocidad y dirección del flujo de agua subterránea así como simulación de la trayectoria partículas contaminantes. Finalmente con ayuda de los resultados

obtenidos anteriormente, se planteó las alternativas de remediación más viables para el agua subterránea y el suelo contaminado con hidrocarburos en el área de estudio.

El área de interés que la Empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol S.A.) asignó para ejecutar el proyecto, fue la Estación de producción 1 de Campo Palagua, ubicada en la zona rural del departamento de Boyacá al Nororiente del municipio de Puerto Boyacá (ver Figura 2 y Fotografía 1). El interés que la empresa tuvo en este sitio fue la presencia de hidrocarburos en el suelo del predio aledaño a la Estación, debido a un derrame accidental en 1997 de petróleo almacenado, el cual se fue extendiendo y formó una pluma contaminante a través de suelo y agua subterránea, logrando afectar un área superior a 800 m².

Figura 2. Localización Puerto Boyacá



Fuente: Información General Puerto Boyacá; [En Línea];

http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:MunsBoyaca_Puerto_Boyaca.png#filehistory

La Estación 1 cuenta con cuatro tanques de almacenamiento de crudo provenientes de las estaciones 2 y 3 de Campo Palagua, que reciben el crudo de los pozos de producción. Los tanques de almacenamiento se distribuyen de la siguiente forma: tres de 10000 BLS y uno de 12000 BLS; y un tanque de 10000 BLS en la zona de bombas. El crudo luego de ser tratado en la Estación 1, es transportado a través de bombas y líneas de flujo a la Estación Central de crudos Vasconia.

En la Estación se encuentran tres pozos de monitoreo y en el predio aledaño cuatro pozos, distribuidos de la siguiente forma (ver Figura 3):

PM-1, ubicado en el Sur de la Estación 1. Detrás de los tanques de almacenamiento.

PM-10, ubicado en el Noreste de la Estación 1. Al lado de los tratadores.

PM-15, ubicado en el Norte de la Estación 1. Diagonal al laboratorio de pruebas.

PM-17, ubicado fuera de la Estación, en el predio aledaño.

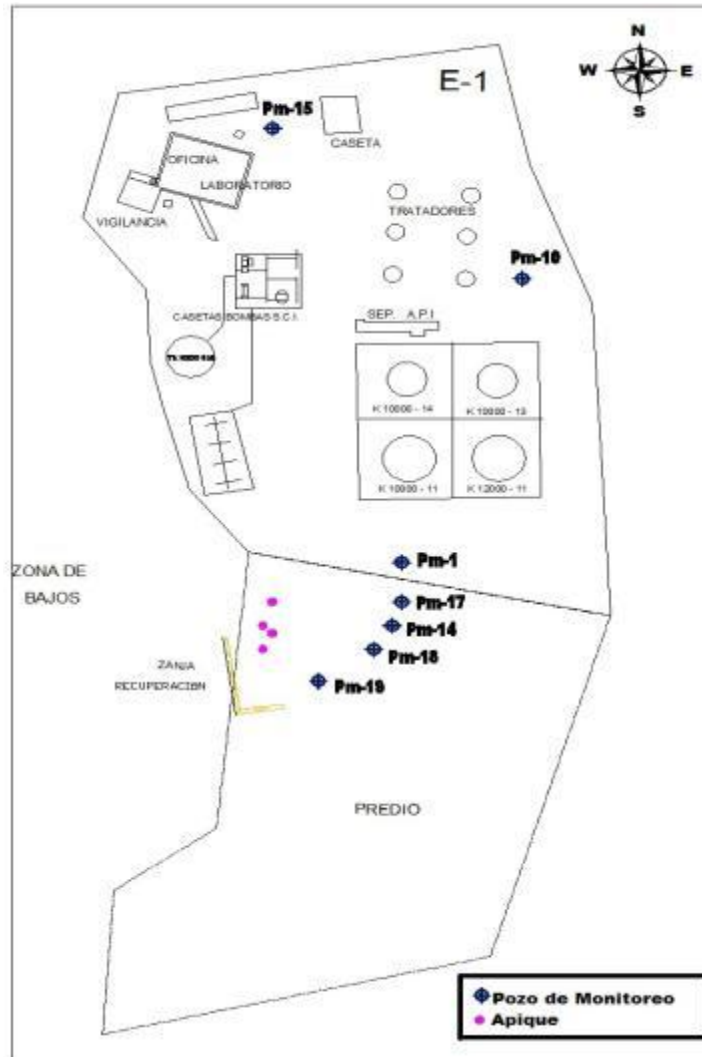
PM-14, ubicado al Sur del PM-17 en el predio aledaño.

PM-18, ubicado al Sur del PM-14 en el predio aledaño.

PM-19, ubicado al Sur del PM-18 en el predio aledaño.

En la siguiente figura se presenta el esquema de la Estación y el predio aledaño afectado junto con los pozos de monitoreo y control (apiques).

Figura 3. Estación 1 y predio aledaño, Campo Palagua.



Fuente: OBREGON Farfán; Adriana Milena; Informe de Actividades de Recuperación de Aguas Subterráneas en Campo Palagua; Instituto Colombiano del Petróleo (ICP); 2009; pág.: 3 - 5

Fotografía 1. Predio Aledaño a Estación 1 de Campo Palagua. En donde se puede observar la cercanía de los tanques de almacenamiento de hidrocarburo al predio aledaño.



Fuente: Autor

A continuación se especifican las actividades que se llevaron a cabo para el cumplimiento de los objetivos propuestos en este proyecto.

5.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE AGUA SUBTERRÁNEA

Para la caracterización físico química del agua subterránea se realizó un monitoreo en el cual se tomaron las diferentes muestras para analizar y se realizaron mediciones de niveles estáticos en los pozos de monitoreo que han presentado trazas de hidrocarburos durante el seguimiento realizado en los últimos tres años por parte del ICP, los cuales se encuentran en la Estación 1 (PM-10) y predio aledaño (PM-17, PM-18 y PM-19), los pozos que sin presencia de hidrocarburos (PM-1, PM-14 y PM-15) en el momento del monitoreo no fueron muestreados en este análisis específico. (Ver Figura 3 en sección 5).

La metodología aplicada fue suministrada por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), la cual consiste en la medición de los niveles estáticos con ayuda de una sonda de nivel en los pozos de agua, seguida por la extracción de agua subterránea por medio de un bailer que es un tubo de PVC con una válvula de entrada de agua (ver Fotografías 2 y 3). Todas las muestras tomadas se analizaron en laboratorio del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).

Fotografía 2. Medición de niveles estáticos. Se observa la sonda para mediciones de niveles estáticos.



Fuente: Autor

Fotografía 3. Toma de muestra de agua subterránea para análisis físico químico.



Fuente: Autor

A continuación se indican los métodos aplicados para el análisis físico químico de agua subterránea.

5.1.1 Ensayos in situ de agua subterránea.

Los siguientes ensayos fueron realizados in situ

5.1.1.1 Oxígeno disuelto.

Este parámetro se determinó mediante método Winkler in situ, utilizando el Kit Merck.

5.1.1.2 pH.

Se determinó mediante uso del pH-Metro Hach HQ 11d y el pH-Metro Schott 0721 calibrado con 3 soluciones buffer de pH (4.0, 7.0 y 10).

5.1.2 Ensayos físico químicos de agua subterránea realizados en laboratorio.

Los ensayos físico químicos especificados a continuación fueron realizados en el laboratorio del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). A continuación se indica la metodología aplicada para cada parámetro:

5.1.2.1 Conductividad.

Su determinación se realizó usando el conductímetro Horiba DS-12 calibrado con solución de KCl para rango alto (1412 micromhos/cm) y rango bajo (146.9 micromhos/cm).

5.1.2.2 Alcalinidad, carbonatos y bicarbonatos.

Método potenciométrico a pH=4.5, pH=8.3 y pH= 4.5 respectivamente.

5.1.2.3 Compuestos fenólicos.

Los compuestos fenólicos fueron analizados por la técnica cromatográfica de gases (GC) mediante un detector de ionización de llama (FID).

5.1.2.4 Grasas y aceites.

Método gravimétrico, con extracción de las grasas y aceites usando como solvente n-hexano.

5.1.2.5 Hidrocarburos no polares.

Método gravimétrico por redisolución del extracto de grasas y aceites con solvente n-Hexano, usando una columna de sílica gel, donde se retienen compuestos polares y se recoge posteriormente el solvente con los hidrocarburos para cuantificar por gravimetría.

5.1.2.6 Sólidos disueltos.

Se determinó como la fracción de sólidos presentes en una muestra y que pasan a través de un filtro de fibra de vidrio de 1.5 micras, secos a 180°C hasta peso constante.

5.1.2.7 Cloruros, nitritos, nitratos.

Fueron determinados mediante cromatografía iónica; las concentraciones de cloruros fueron calculadas mediante lecturas del detector de conductividad mientras que con el detector UV a 210 nm se calculó la concentración de nitratos y nitritos.

5.1.2.8 Sulfatos.

Se aplicó método turbidimétrico por reacción con cloruro de bario y lectura espectrométrica a 510 nm.

5.1.2.9 Hidrocarburos poliaromáticos (PAH's).

Los compuestos de Hidrocarburos Poliaromáticos fueron analizados por la técnica de cromatográfica de gases empleando un detector de ionización de llama (FID).

5.1.2.10 Metales.

Los metales Magnesio, Sodio, Potasio, Hierro, Aluminio, Manganeso, Boro, Cromo, Cobre, Cadmio, Zinc, Plomo, Bario, Níquel, Vanadio, Molibdeno, Cobalto, Plata, Berilio, Selenio, Arsénico, Litio, y Silicio se determinaron mediante la técnica de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS).

5.1.2.11 Metales (Calcio).

La determinación de calcio se realizó por espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

5.1.2.12 Metales (Mercurio).

La determinación de mercurio se realizó por absorción atómica mediante técnica de vapor frío.

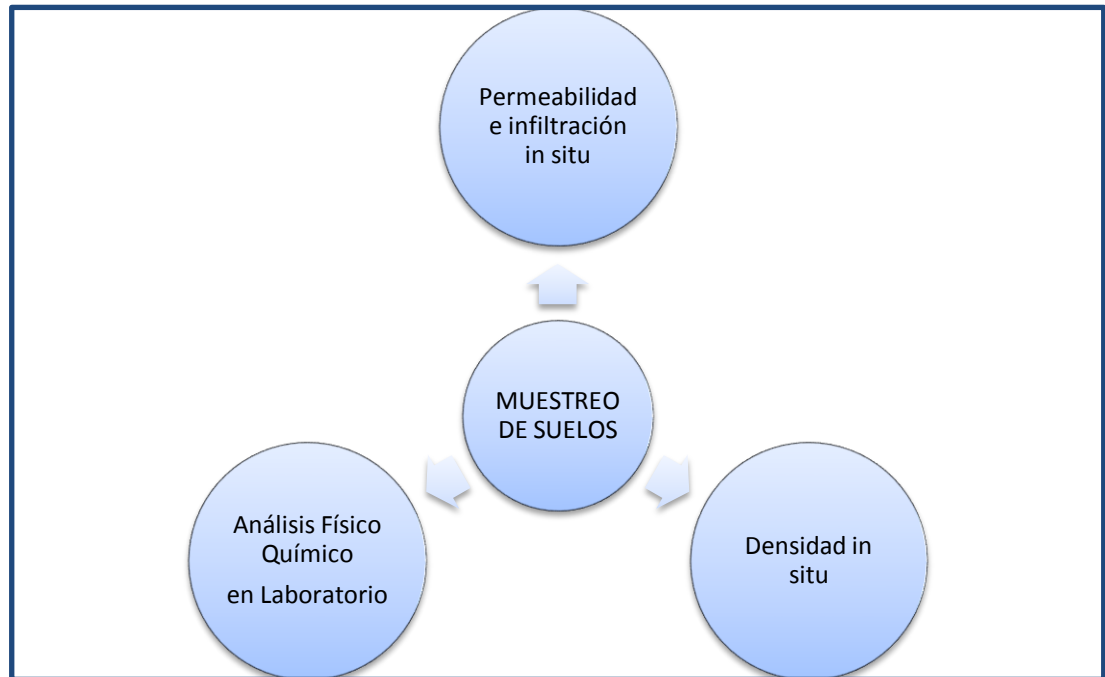
5.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

Considerando el historial de monitoreo de la zona se mantuvo la distribución del muestreo de área de manera sistemática o regular, cual a diferencia con otros métodos tiene en cuenta el criterio establecido por el responsable del análisis.

Dos de los análisis de suelos se realizaron in situ y el resto de análisis físico químicos de suelo en laboratorio, ver Figura 4.

Figura 4. Muestreo de

suelos en Estación 1



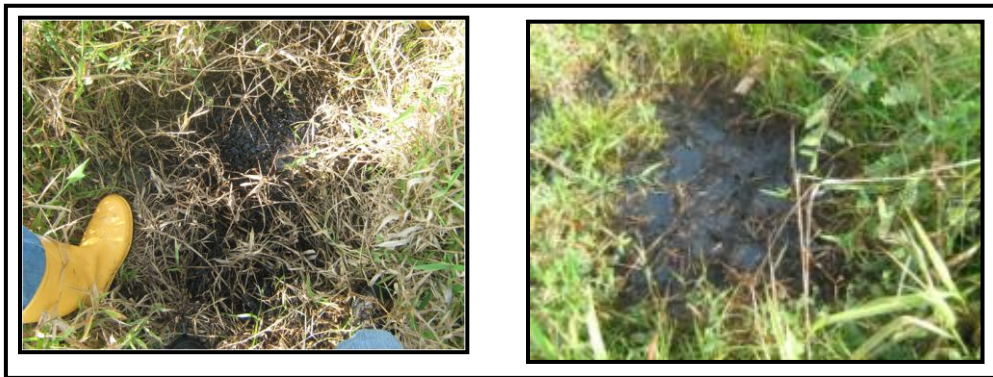
Predio Aledaño de Campo Palagua

Fuente: Autor

De las doce (12) muestras de suelo tomadas en campo, cuatro fueron tomadas en la Estación y el resto en el predio aledaño. Cada una fue extraída a cada lado de los pozos de monitoreo a una distancia aproximada de 5 m y a 30cm de profundidad. De igual manera se realizaron las pruebas in situ de permeabilidad e infiltración.

Para la toma de muestras de suelo inicialmente se seleccionaron diferentes puntos teniendo el criterio del sitio del derrame y su posible desplazamiento, indicado por el aspecto visual del suelo (ver Fotografía 4).

Fotografía 4. Aspecto de suelo en predio aledaño a la Estación 1. Se puede observar la presencia superficial de hidrocarburo en algunas zonas del predio aledaño



Fuente: Autor

A continuación en las Imágenes 5 al 9 se ilustra el procedimiento de muestreo que se llevó a cabo, en donde se inició con la limpieza de vegetación en el punto específico a muestrear, posteriormente se marcó y excavó el punto con ayuda de un barreno, teniendo siempre presente la profundidad a la cual se iba a tomar la muestra de suelo. Finalmente se tomó la muestra y se guardó en una bolsa plástica con cierre hermético para la preservación de la misma y se etiquetó adecuadamente indicando el punto del muestreo y los análisis a realizar.

Fotografía 5. Limpieza del punto de muestreo. Se observa la remoción de material vegetal en el punto exacto en donde se realizó la toma de la muestra de suelo.



Fuente: Autor

Fotografía 6. Marcación con barreno para excavación. Se observa la delimitación del área a excavar.



Fuente: Autor

Fotografía 7. Profundidad para toma de muestras.



Fuente: Autor

Fotografía 8. Toma de muestra. En donde se puede ver la forma como se tomó la muestra de suelo, por medio de un tubo de PVC



Fuente: Autor

Fotografía 9. Preservación de la muestra. Se observa la forma en que se preservó y etiquetó la muestra hasta llegar al laboratorio para su respectivo análisis.



Fuente: Autor

A las muestras de suelo tomadas se realizaron las pruebas físicas y químicas que incluyeron: textura, estructura, infiltración, permeabilidad, temperatura, porosidad, densidad real y aparente, pH, humedad gravimétrica y volumétrica, intercambio catiónico y materia orgánica para identificar las condiciones de suelo, además se determinó el contenido de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) para conocer la concentración de la contaminación en el sitio de interés.

5.2.1 Ensayos in situ.

Según la metodología establecida la permeabilidad e infiltración junto con la densidad, temperatura y estructura se deben realizar in situ, por lo siguiente se aplicó estos ensayos en campo.

5.2.1.1 Permeabilidad e infiltración.

Estos parámetros fueron determinados de acuerdo a las especificaciones estándar donde se realizó el enterramiento de un tubo de PVC de 6” de diámetro hasta la mitad de su altura (6” de altura total), quedando así 3 pulgadas libres de tubo sobre el nivel del suelo (ver Fotografía 10). Posteriormente se cubrió la superficie de suelo dentro del tubo de PVC con una película plástica, sobre el cual se vertieron 444 ml de agua destilada (equivale al volumen de una lámina de agua de 1 pulgada), finalmente se retiró la película plástica y se tomó el tiempo en que el agua tardó en infiltrarse en el suelo, teniendo como referencia el momento en que la capa de suelo al interior del tubo se tornara brillante.

Fotografía 10. Prueba de permeabilidad e infiltración in situ. Se observa el procedimiento que se llevó a cabo para realizar in situ el ensayo de permeabilidad e infiltración



Fuente: Autor

Los resultados obtenidos se compararon con los estándares para la interpretación de la infiltración (ver Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de los resultados de infiltración

VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (cm/H)	VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (mm/H)	PERMEABILIDAD	CLASE DE INFILTRACIÓN
<0.1	<1	Muy lenta	Ar
0.1 – 0.5	1 – 5	Lenta	Ar, ArL
0.5 – 2	5 – 20	Moderadamente lenta	FAr, FArL
2 – 6.3	20 – 63	Moderada	FArA
6.3 – 12.7	63 – 127	Moderadamente rápida	FA
12.7 – 25.4	127 – 254	Rápida	AF
>25.4	>254	Muy rápida	AF, A

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; 2001; Pág.:37

5.2.1.2 Densidad aparente.

Se determinó por medio de la extracción de las muestras de suelo (dos muestras para el Predio aldeaño y dos muestras para la Estación 1) con ayuda de un cilindro de PVC de 3” de diámetro y 15 cm de alto, con un extremo biselado, teniendo cuidado para conservar la muestra sin pérdidas hasta llevarlas al laboratorio, en donde se pesó y posteriormente se sometió a secado en el horno a 105°C por 24 horas, y así poder tomar un segundo peso del suelo seco.

Se utilizó la siguiente ecuación para el cálculo:

Ecuación 1. Determinación de densidad aparente

$$Da = \frac{\text{Peso muestra seca (gr)}}{\text{Volumen(cc)}} \quad Da = \text{Densidad aparente (gr/cc)}$$

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; Universidad Pontificia Bolivariana; 2001; Pág.: 30.

El resultado obtenido se comparó con la siguiente Tabla 3 de referencia entre la porosidad y la densidad aparente.

Tabla 3. Relación entre la porosidad y la densidad aparente.

DENSIDAD APARENTE (g/cc)	POROSIDAD TOTAL %	CARACTERISTICAS
< 1.0	> 63	Suelos disgregables con alta materia orgánica
1.0 – 1.2	55 – 62	
1.3 – 1.4	47 – 54	
1.5 – 1.6	40 – 46	Suelos compactos con baja materia orgánica
1.6 – 1.8	32 – 39	
> 1.8	< 31	

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; 2001; Pág.:33

5.2.1.3 Temperatura.

La temperatura se midió al interior del suelo introduciendo un termómetro aproximadamente a 5cm de profundidad, en cada punto de muestreo, para obtener un valor promedio.

5.2.1.4 Estructura.

Se observó y comparó el suelo de la zona de estudio con los tipos estructurales normalmente establecidos en la literatura.

5.2.2 Ensayos físico químicos de suelos realizados en el laboratorio.

Todas las muestras de suelos tomadas en campo fueron analizadas en el laboratorio determinando los siguientes parámetros: porosidad, pH, densidad real y aparente, humedad gravimétrica y volumétrica, intercambio catiónico, materia orgánica y TPH.

5.2.2.1 Textura.

Este parámetro se determinó por medio del método de Bouyoucus y granulometría. Para empelar el método de Bouyoucus, se necesitaron 50gr de la muestra de suelo, a los cuales se agregó 100ml de agua corriente y 10ml de agente dispersante (Hexametáfosfato de Sodio y Carbonato de Sodio anhidro), se agitó durante 10 minutos y se trasvasó a un cilindro graduado de 1000ml completando el volumen con agua corriente sumergiendo el hidrómetro en la mezcla. Posteriormente se agitó la mezcla contenida en el cilindro graduado, e inmediatamente se tomó el valor para hallar el porcentaje de arena y después de dos horas se tomó valor nuevamente para hallar porcentaje de arcilla.

Para cada valor de temperatura se buscó una corrección correspondiente del hidrómetro en la siguiente Tabla 4:

Tabla 4. Correcciones correspondientes para el hidrómetro a diferentes temperaturas

°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
15	-1.6	-1.56	-1.53	-1.49	-1.46	-1.42	-1.38	-1.35	-1.31	-1.28
16	-1.24	-1.20	-1.17	-1.13	-1.10	-1.06	-1.02	-0.99	-0.95	-0.92
17	-0.88	-0.84	-0.81	-0.77	-0.74	-0.70	-0.66	-0.63	-0.59	-0.56
18	-0.52	-0.48	-0.45	-0.41	-0.38	-0.34	-0.30	-0.27	-0.23	-0.20
19	-0.16	-0.12	-0.09	-0.05	-0.02	-0.02	0.06	0.09	0.13	0.16
20	0.2	0.24	0.27	0.31	0.34	0.38	0.42	0.45	0.49	0.52
21	0.56	0.60	0.63	0.67	0.70	0.74	0.78	0.81	0.85	0.88
22	0.92	0.96	0.99	1.03	1.06	1.10	1.14	1.17	1.21	1.24
23	1.28	1.32	1.35	1.39	1.42	1.46	1.50	1.53	1.57	1.60
24	1.64	1.68	1.71	1.75	1.78	1.82	1.86	1.89	1.93	1.96
25	2.00	2.04	2.07	2.11	2.14	2.18	2.22	2.25	2.29	2.32
26	2.36	2.40	2.43	2.47	2.50	2.54	2.58	2.61	2.65	2.68
27	2.72	2.76	2.79	2.83	2.86	2.90	2.94	2.97	3.01	3.04
28	3.08	3.12	3.15	3.19	3.22	3.26	3.30	3.33	3.37	3.40
29	3.44	3.48	3.51	3.55	3.58	3.62	3.66	3.69	3.73	3.76

30	3.8	3.84	3.87	3.91	3.94	3.98	4.02	4.05	4.09	4.12
31	4.16	4.20	4.23	4.27	4.30	4.34	4.38	4.41	4.45	4.48
32	4.52	4.56	4.59	4.63	4.66	4.70	4.74	4.77	4.81	4.84
33	4.88	4.92	4.95	4.99	5.02	5.06	5.10	5.13	5.17	5.20

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos;2001; pág.:23

Los porcentajes correspondientes se calcularon usando las siguientes formulas:

Ecuación 2. Determinación de % de arena en una muestra de suelo.

$$\% \text{Arena} = 100 - \frac{\text{Primera lectura a } 40'' \times 100}{\text{pm}}$$

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; 2001; pág.:24

Ecuación 3. Determinación de % de arcilla en una muestra de suelo.

$$\% \text{Arcilla} = \frac{\text{Segunda lectura a 2 Horas} \times 100}{\text{pm}}$$

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; 2001; pág.:24

Ecuación 4. Determinación de % de limo en una muestra de suelo.

$$\% \text{Limo} = 100 - (\% \text{Arena} + \% \text{Arcilla})$$

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; 2001; pág.:24

Finalmente, se ubicaron los porcentajes calculados en el triángulo de texturas (Imagen 3, sección 4) y se especificó la información obtenida de acuerdo a la Tabla 5.

Tabla 5. Agrupación general de las clases texturales

GRUPO DE TEXTURAS	TIPO DE SUELOS	SIMBOLOS
-------------------	----------------	----------

Gruesas	Suelos arenosos	A, AF
Moderadamente gruesas	Suelos francos con dominio de arena.	FA
Medias	Suelos francos	F, FL, L
Moderadamente finas	Suelos francos con dominio de arcilla	FArA, FArL, FAr
Finas	Suelos arcillosos	ArA, ArL, Ar

Fuente: Manual de Laboratorios de Análisis de Suelos, UPB; 2001; Pág.: 25

Para la prueba de granulometría como prueba complementaria de textura, se realizó inicialmente un lavado del suelo con detergente con el fin de retirar residuos de hidrocarburo del suelo para evitar la formación de masas que podrían alterar los resultados. Luego se pasó la muestra por un tamiz 200 para eliminar material fino o arcilloso y evitando la pérdida de material grueso.

La muestra de suelo anteriormente lavada, se sometió a secado en horno por 24 horas a 105°C y posteriormente se pasó por tamices número ¾”, ½”, 3/8”, 4, 10, 20, 40, 60, 80, 100, y 200 para finalmente pesar el suelo retenido en cada tamiz y elaborar una curva de textura.

5.2.2.2 Porosidad.

La determinación de la porosidad del suelo se realizó mediante el análisis de la relación entre la densidad aparente y la densidad real del suelo, usando la siguiente expresión:

Ecuación 5. Determinación de porosidad total en una muestra de suelo

$$\%Pt = \left[1 - \left(\frac{Da}{Dr} \right) \right] \times 100$$

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; 2001; pág.:32

Donde:

Pt= porosidad total

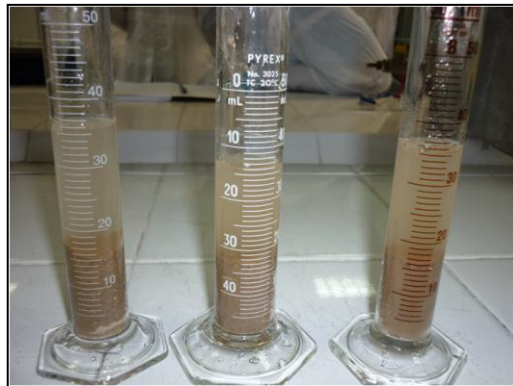
Da= Densidad aparente

Dr= Densidad real

5.2.2.3 Densidad real.

Se determinó por medio del principio de Arquímedes, utilizando tres probetas con 20 gramos de suelo secado previamente a 105°C por 24 horas en cada una de ellas y un volumen conocido de agua (25ml), finalmente se promedió los tres resultados obtenidos. (Ver Fotografía 11)

Fotografía 11. Determinación de densidad real



Fuente: Autor

5.2.2.4 pH.

La determinación de este parámetro se realizó mediante el método 1:1 de suelo y agua (ver Fotografía 12), en donde se pesaron 30gr de suelo y se adicionaron 30ml de agua destilada, agitando durante 5 minutos con una varilla agitadora, posteriormente se dejó la mezcla en suspensión por una hora para poder leer valor en

el potenciómetro. Adicionalmente se realizó el mismo procedimiento pero con KCl 1N en lugar de agua destilada y finalmente se aplicó la siguiente fórmula:

Ecuación 6. Determinación de pH para una muestra de suelo.

$$\Delta\text{pH} = \text{pH en KCl} - \text{pH en agua}$$

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; 2001; pág.:41

Fotografía 12. Determinación de pH



Fuente: Autor

Los resultados de pH se compararon con la siguiente Tabla 6, con el fin de clasificar el suelo analizado.

Tabla 6. Clasificación de suelos de acuerdo a pH obtenido.

pH DETERMINADO EN AGUA 1:1		pH DETERMINADO EN KCl 1:1	
VALOR	CLASIFICACIÓN	VALOR	CLASIFICACIÓN
< 3.5	Ultra ácido	< 4	Extremadamente ácido
3.5 – 4.4	Extremadamente ácido	4.0 – 4.9	Fuertemente ácido
4.5 – 5.0	Muy fuertemente ácido	5.0 – 5.9	Moderadamente ácido
5.1 – 5.5	Fuertemente ácido	6.0 – 6.9	Ligeramente ácido
5.6 – 6.0	Moderadamente ácido	7.0	Neutro
6.1 – 6.5	Ligeramente ácido	7.1 – 8.0	Ligeramente alcalino
6.6 – 7.3	Neutro	8.1 – 9.0	Moderadamente alcalino
7.4 – 7.8	Ligeramente alcalino	9.1 – 10.0	Fuertemente alcalino
7.9 – 8.4	Moderadamente alcalino	> 10.0	Extremadamente alcalino
8.5 – 9.0	Fuertemente alcalino		
> 9.0	Muy fuertemente alcalino		

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; 2001; pág.:43

5.2.2.5 Humedad gravimétrica.

Se determinó con una muestra de suelo tomada en campo, que se llevó a una estufa a 105°C por 24 horas. Esta muestra se pesó antes y después de someter a proceso de secado. El porcentaje de humedad se calculó por medio de la siguiente fórmula:

Ecuación 7. Determinación de % de Humedad Gravimétrica en una muestra de suelo.

$$\%HG = \frac{\text{Peso de muestra húmeda} - \text{Peso de muestra seca}}{\text{Peso de muestra seca}} \times 100$$

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; 2001; pág.:28

5.2.2.6 Humedad volumétrica.

Se calculó a partir del valor de densidad aparente y de humedad gravimétrica, por medio de la siguiente fórmula:

Ecuación 8. Determinación de % de Humedad Volumétrica en una muestra de suelo.

$$\%HV = \%HG \times Da$$

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; 2001; pág.:30

5.2.2.7 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).

La determinación del CIC en las muestras de suelo se realizó mediante titulación con hidróxido de sodio 0.1N (ver Fotografía 13), teniendo en cuenta una preparación previa de la muestra con acetato de amonio, el cual se agregó y dejó reposar por una noche, para su posterior filtración y lavado del exceso de sal amónica con porciones de alcohol etílico al 95%. Después de esto se filtró nuevamente y se realizó el último lavado con Cloruro de sodio al 10%. Finalmente se agregó formaldehído al filtrado y se procedió a titular como se mencionó inicialmente. Para el cálculo de la capacidad de intercambio catiónico se utilizó la siguiente fórmula:

Ecuación 9. Determinación de Capacidad de Intercambio Catiónico en una muestra de suelo.

$$CIC \left(\frac{\text{meq}}{100\text{gr}} \right) = 2(V - B)Soda$$

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; 2001; pág.:51

Donde:

V=Volumen de soda gastada en la muestra

B=Volumen de soda gastada en el blanco

Fotografía 13. Determinación de Capacidad de Intercambio Catiónico



Fuente: Autor

El estimativo de la cantidad de cationes intercambiables en el suelo se puede clasificar en baja (menor de 10), media (de 10 a 20) y alta (mayor de 20), de acuerdo a la concentración en mili equivalentes por 100 gramos de suelo.

5.2.2.8 Carbono orgánico y materia orgánica.

La cuantificación de estos parámetros se realizó mediante la titulación con sulfato ferroso 0.5N. Previamente la muestra de suelo se secó en la estufa a 45°C por 24 horas, a la cual se le añadió dicromato de potasio 1N y ácido sulfúrico concentrado y debido al calentamiento de la mezcla se dejó reposar durante media hora y se le adicionó ácido fosfórico al 85% y difenilamina como indicador para detectar el cambio de color azul a verde brillante en la titulación. Para el cálculo se utilizaron las siguientes fórmulas:

Ecuación 10. Determinación de % de Carbono y Materia Orgánica

$$N \text{ de solución ferrosa} = \frac{\text{Volumen } K_2Cr_2O_7 \times \text{Normalidad de } K_2Cr_2O_7}{\text{Volumen de solución ferrosa}}$$

$$\%C = \frac{(B - M) \times N \times 0.003 \times 1.3 \times 100}{P_m}$$

$$\%MO = \%C \times 1.724$$

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; 2001; pág.:73

Donde:

N= Normalidad de la solución ferrosa

C= Carbono

B= Volumen de solución ferrosa gastada en el blanco

M= Volumen de solución ferrosa gastada en la muestra

1.3= Eficiencia de la reacción, la cual es de 77%

P_m= Peso de la muestra en gramos.

MO= Materia orgánica

De acuerdo al contenido de materia orgánica en el suelo, se pueden explicar algunas de las características del suelo como se indica en la siguiente Tabla 7.

Tabla 7. Influencia de la materia orgánica con respecto a otras propiedades del suelo.

PROPIEDAD	EFECTO AL AUMENTAR EL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA
Estructura	Favorece su formación, aumenta el tamaño y estabilidad de los agregados.
Porosidad	Aumenta la cantidad de macroporos
Aireación	Aumenta el volumen de aireación y mejora la circulación del aire.
Infiltración	Aumenta su velocidad
Drenaje	Aumenta la velocidad de circulación del agua dentro del suelo.

Humedad	Aumenta la capacidad de retener agua.
Consistencia	Aumenta la friabilidad, disminuye la pegajosidad, la plasticidad y el encostramiento superficial; con esto se facilita el laboreo.
Erodabilidad	Disminuye la susceptibilidad del suelo a la erosión
Color	Oscurece el suelo facilitando su calentamiento, con lo cual mejora la germinación de las semillas, el desarrollo radicular y, en general, la nutrición de las plantas.
CIC	Incrementa su valor.
pH	Disminuye
Contaminación	La materia orgánica almacena compuestos y/o elementos tóxicos como algunos ingredientes activos no degradables e agroquímicos o metales pesados (Pb, Ni, entre otros), que llegan al suelo, dificultando su eliminación de este medio.

Fuente: MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorios de Análisis de Suelos, UPB; 2001; Pág.: 74

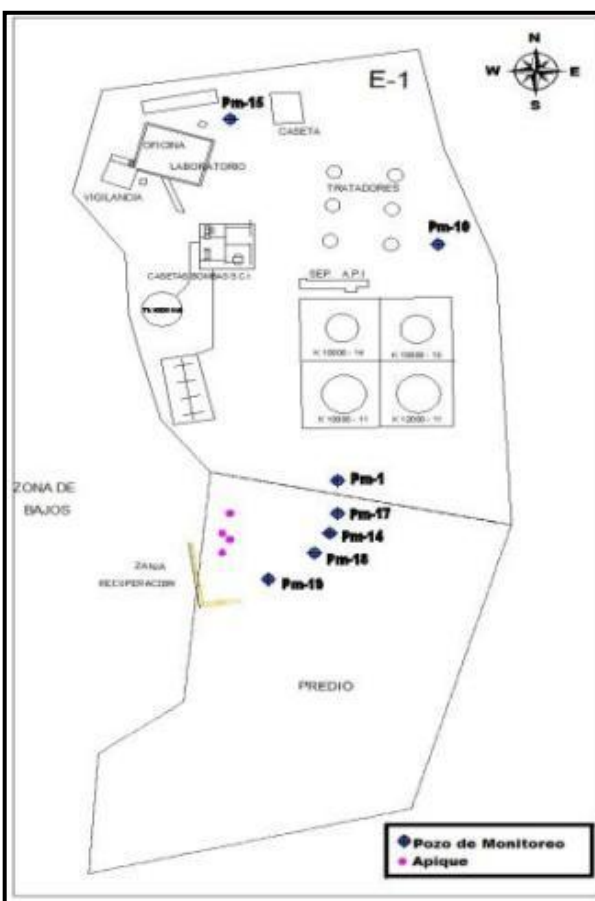
5.2.2.9 Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH).

La determinación de TPH's se realizó en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), el cual cuenta con laboratorios acreditados por autoridades ambientales, aplicando el método estandarizado para los hidrocarburos no polares numero EPA 9071A- 94

5.3 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y TRAYECTORIA DE LA PLUMA CONTAMINANTE, DETERMINADO POR MEDIO DEL SOFTWARE VISUAL MODFLOW.

La modelación de flujo de agua subterránea y la trayectoria de la pluma contaminante se realizó en el predio aledaño a la Estación 1 de Campo Palagua, debido a que en los pozos de monitoreo de la Estación no se evidenció la presencia del contaminante. El área de la modelación de campo Palagua se ilustra en la Imagen 4.

Imagen 4. Área de modelación Campo Palagua



Fuente: Archivo ICP.

Para elaborar el modelo de flujo de agua subterránea de Campo Palagua, se hizo necesario el uso de tres software: Autocad 2D, Surfer y Visual ModFlow (VMODFLOW). Autocad se utilizó para delimitar el área de interés y obtener coordenadas, Surfer fue necesario para la interpolación de las curvas de nivel del terreno, teniendo en cuenta la topografía por nivelación realizada con ayuda de un nivel de precisión, una mira metálica y un GPS viajero. La nivelación fue de tipo cerrada, es decir, formando un polígono de manera que se finalizaba en el mismo punto en donde se dio inicio.

A continuación se especifican los pasos aplicados para el desarrollo de proceso de modelación.

5.3.1 Interpolación curvas de nivel por medio de Surfer.

La interpolación de las curvas de nivel y topografía del terreno necesarios como datos iniciales para simular el flujo de agua subterránea se realizó por medio del software Surfer, en donde se introdujeron los datos georeferenciados de la nivelación topográfica realizada en campo y un valor de z correspondiente a la cota del terreno. Con los datos obtenidos se conformó una grilla limitada por coordenadas mínimas 1163378N – 952859E y máximas 1163788N – 953093E determinadas en AutoCAD, los cuales se representan como un mapa de contornos usando el sistema de interpolación Krigging de software Surfer, ya que es el método que permite el óptimo acercamiento a las condiciones del entorno visualizado en campo.

5.3.2 Simulación en Visual Modflow para flujo de agua subterránea y trayectoria de la pluma contaminante.

Con el fin de obtener información acertada acerca de la trayectoria y dirección de la pluma contaminante se hizo necesario el uso del software ModFlow, el cual requirió

además de la información suministrada por los software mencionados anteriormente, los siguientes datos:

- Número de pozos de monitoreo y recuperación (zanja de intercepción) y seguimiento de la información obtenida en cada uno de estos.
- Niveles estáticos actuales y cotas de pozos de monitoreo.
- Elección de modelación en estado estacionario o permanente, puesto que no se tienen intervenciones en el acuífero (bombeo).
- Asignación de una capa de modelación que admita la posibilidad de tener un acuífero libre o confinado.

5.3.2.1 Discretización del modelo.

Se utilizó una malla general de 20 filas por 20 columnas, refinando por cuatro (4), la zona en donde se encuentran ubicados los pozos de monitoreo PM1, PM14 y Pm17 a PM19, en donde se tuvo una malla final de 5X5.

5.3.2.2 Topografía.

La topografía realizada en campo se definió por nivelación, cual se introdujo en el modelo para interpolar los valores obtenidos de coordenadas y cotas por método de krigging y de esta manera tener una mejor distribución de las mismas en toda el área de interés. (Los datos topográficos tomados en campo se ilustran en los anexos 2 y 3).

La topografía a nivel subterráneo se asumió igual a la topografía superficial, con una diferencia de 10 m, ya que es la profundidad máxima de los pozos de monitoreo.

5.3.2.3 Parámetros hidráulicos.

Se determinó la conductividad hidráulica por medio de las pruebas slug realizadas a cada uno de los pozos de monitoreo, asignando un mismo valor para las direcciones X y Y, mientras que para la dirección Z se tomó la decima parte del valor anterior. Con

los valores obtenidos, el programa realizó una interpolación por medio de krigging (método validado anteriormente puesto que permite un acercamiento más acertado a las condiciones visualizadas en campo) para distribuir el valor de conductividad en toda la zona de interés.

5.3.2.4 Condiciones iniciales.

El modelo se corrió para estado estacionario, utilizando un valor de cabeza constante de 154m, cual fue resultado de promediar valores de cotas piezométricas de cada pozo. (Los valores correspondientes a las cotas piezométricas medidas en los diferentes monitoreos se ilustran en anexo 4).

5.3.2.5 Limites de flujo.

Como limites de flujo del agua subterránea se asignó valores de cabezas constantes para el área de interés de acuerdo a la recopilación de datos desde el año 2008 a 2010 tomados en campo (ver anexo 4). Para esto se consideró las cotas de terreno y los niveles estáticos cuales se restaron para tener el valor de cota piezométrica en cada pozo. Posteriormente estos valores se asignaron con denominación de cabeza constante al sur del predio aldeaño entre 152 m a 154 m en dirección a la Ciénaga Palagua y otra definida hacia la Estación 1 (NE del predio aldeaño) entre 154.5 m a 156 m.

Una vez introducidos los datos de los parámetros señalados anteriormente, se obtuvo el modelo el cual determinó la dirección del flujo de agua subterránea.

5.3.2.6 Aplicación de PATHLINES y MODPAHT para evaluación de la trayectoria de partículas.

La simulación de la trayectoria de la pluma contaminante en el predio aldeaño se realizó por medio PATHLINES y MODPAHT (sistemas integrados en MODFLOW). Estos dos sistemas permiten agregar partículas al modelo para proyectar el recorrido que tendrán en un tiempo estimado, dependiendo de las condiciones de flujo del agua

subterránea. Se proyectaron partículas radiales alrededor de los pozos de monitoreo que presentan actualmente trazas de hidrocarburo para tiempos de 1, 2 y 3 años después de los cuales se proyectó un tratamiento de recuperación.

5.4 ANÁLISIS COSTO BENEFICIO DE ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN FÍSICO QUÍMICAS PARA SUELOS Y AGUA SUBTERRÁNEA CONTAMINADA CON HIDROCARBUROS.

El planteamiento de diez (10) alternativas físico químicas para remediación de agua subterránea y suelo contaminado con hidrocarburos se desarrolló teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la caracterización físico y química del agua y del suelo, además de la dirección de flujo del agua subterránea y trayectoria de la pluma contaminante obtenidos en la modelación con el software Visual Modflow.

Conjuntamente con los resultados obtenidos se siguió la metodología descrita en la guía para la realización de investigaciones de remediación y estudios de factibilidad bajo los lineamientos de Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act of 1980 (CERCLA), en donde se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de evaluación:

- Efectividad y permanencia a largo y corto plazo.
- Implementabilidad.
- Costos
- Limitaciones.
- Aceptación gubernamental.³⁹

Los costos de los tratamientos se tomaron de Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide (FRTR), Version 4.0⁴⁰

³⁹ United States Environmental Protection Agency (EPA); Guidance for Conducting Remedial Investigations and Feasibility Studies Under CERCLA; EPA 540/G-89/004; [En Línea]; <http://www.epa.gov/superfund/policy/remedy/pdfs/540g-89004-s.pdf>

⁴⁰ Federal Remediation Technologies Roundtable; Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide (FRTR), Version 4.0; [En Línea]; <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-46.html>

6. DATOS Y ANALISIS

Las muestras de suelo y agua subterránea se obtuvieron de la Estación 1 y predio aledaño de Campo Palagua, ubicado en la vereda Palagua del municipio de Puerto Boyacá en el Departamento de Boyacá, el cual pertenece a Ecopetrol S.A. Este campo se encuentra aproximadamente a 130 msnm con precipitaciones promedio de 2190 mm anuales y temperatura media que oscila entre 27°C y 32°C⁴¹ (Ver Figura 2 Localización Puerto Boyacá, Sección 5).

6.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE AGUA SUBTERRÁNEA

Los resultados de los análisis realizados en los laboratorios del ICP para el agua subterránea, se muestran en el Anexo 1, en donde se indican parámetros como oxígeno disuelto, pH, conductividad, sólidos disueltos, cloruros, metales, hidrocarburos totales de petróleo, entre otros.

A continuación se analizan los parámetros de mayor importancia para el desarrollo de este proyecto.

6.1.1 Ensayos in situ.

A continuación se analizarán algunos de los parámetros físico químicos de mayor importancia realizados insitu:

⁴¹ Alcaldía de Puerto Boyacá; Información general del Municipio; [en línea]; <http://www.puertoboyaca-boyaca.gov.co/>

6.1.1.1 Oxígeno disuelto.

Las aguas subterráneas en los pozos de monitoreo no tenían oxígeno disuelto, lo cual se debe a alto contenido de las grasas y aceites, hidrocarburos totales y minerales oxidables.

6.1.1.2 pH.

El pH de las aguas subterráneas monitoreadas se reportó conjuntamente con la temperatura medida y se encontró este parámetro en un rango cercano a la neutralidad teniendo en cuenta que el pH de agua neutra a la temperatura cual oscila entre 33°C a 36.2°C se logra en un intervalo entre 6.87 a 6.82 respectivamente.

6.1.2 Ensayos físico químicos realizados en Laboratorio.

A continuación se analizan los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros especificados.

6.1.2.1 Conductividad.

Las medidas de conductividad para el agua subterránea en los pozos de monitoreo se reportaron conjuntamente con la temperatura, cual varió entre 21.7 y 22.1°C y representan valores excesivamente altos en algunos puntos, lo cual se puede relacionar con igual elevados resultados de los sólidos disueltos, como responsables por el proceso de transporte de la carga en esta medida. Comparando los resultados registrados para diferentes pozos se nota gran diferencia entre ellos; como ejemplo en el PM-10 se registró un valor de 487 micromhos/cm y en el PM-18 de 13630 micromhos/cm. Relacionando esto con la topografía del terreno y la gran heterogeneidad del subsuelo, hallada durante la construcción de los pozos en los cuales se tomó la muestra, se puede suponer que el agua en los puntos que se encuentran más abajo (PM-18) se enriquece en iones disueltos. Además hay un gran aporte de los cloruros provenientes de explotación ganadera en la zona.

6.1.2.2 Alcalinidad, carbonatos y bicarbonatos.

Los valores de alcalinidad encontrados para el agua subterránea están en un rango esperado (entre 100 y 300mg CaCO₃/L), donde el valor más bajo se registró en el PM-18 (177mg CaCO₃/L) y el más alto en el PM-10 (236 mg CaCO₃/L). Relacionando la alcalinidad con la concentración de los bicarbonatos se encuentran resultados semejantes que corroboran el resultado de este análisis. El menor valor de la alcalinidad en los pozos del predio aledaño comparados con los pozos de la Estación 1 se puede relacionar con un viable proceso de la biodegradación anaerobia que posiblemente se está generando en este sitio donde se encuentra el hidrocarburo desplazado.

6.1.2.3 Compuestos fenólicos.

En todos los pozos de monitoreo los valores de fenoles son menores de 0.030mg/L. Sin embargo, la norma (Decreto 1594 de 1984) estipula el valor límite de 0.002mg/L lo cual no se cumple y se relaciona claramente con la contaminación por hidrocarburos en la zona, dejando una preocupación, especialmente por su alta toxicidad y su presencia en los pozos del predio aledaño.

6.1.2.4 Grasas y aceites.

La concentración de grasas y aceites en los pozos de monitoreo va incrementando desde un valor de 1.84mg/L en el PM-10 hasta un máximo valor de 828mg/L en el PM-19, lo cual presenta una correlación con los resultados de hidrocarburos totales de petróleo, encontrados en estos puntos.

6.1.2.5 Hidrocarburos no polares.

Los hidrocarburos no polares denominados frecuentemente como totales presentan una tendencia creciente desde un valor menor de 1.07mg/L en el PM-10 hasta un máximo valor de 251mg/L en el PM-19, indicando de esta manera la presencia del contaminante en predio aledaño, lo cual fue verificado durante la visita de campo.

6.1.2.6 Sólidos disueltos.

Los valores de sólidos disueltos registrados se encuentran entre un valor mínimo de 347mg/L en el PM-10 y un valor máximo de 6871mg/L en el PM-18. Se puede ver que estos valores tienen la misma tendencia que presentan los cloruros y la conductividad como parámetros correlacionados.

6.1.2.7 Cloruros, nitratos y nitritos.

La presencia de nitritos y nitratos en todos los puntos de muestreo se encuentra por debajo del valor establecido por la norma (Decreto 1594 de 1984). Sin embargo en el PM-19 en predio aledaño, se encontró 2.48 mgNO₃/L que es el valor de nitratos más alto que en otros; para comparar en el PM-10 se halló 0.71 mgNO₃/L. Esta diferencia en la concentración de los nitratos se puede relacionar con el aporte por la actividad ganadera que se realiza en el predio aledaño. De la misma manera los cloruros en el predio aledaño presentan mayor concentración, especialmente en PM-18 y PM-19 (4706 mg/L y 1237 mg/L respectivamente) lo cual se puede relacionar con la presencia de ganado en la zona.

6.1.2.8 Sulfatos.

La presencia de los sulfatos en el agua subterránea monitoreada es escasa tanto que en los pozos PM-17 y PM-18 el valor encontrado es menor de 1mgSO₄²⁻. Siendo un valor máximo establecido por la norma (Decreto 1594 de 1984) de 400 mgSO₄²⁻.

6.1.2.9 Hidrocarburos poliaromáticos (PAH's).

Los hidrocarburos poliaromáticos encontrados en todos los pozos de monitoreo representan valores pequeños, donde el mayor de los resultados encontrados es del orden de 10⁻² para los pozos PM-17, PM-18 y PM-19 debido a la presencia de fluoreno y fenantreno junto con TPH.

6.1.2.10 Metales.

El resultado del monitoreo de aguas subterráneas demuestra importante presencia de metales peligrosos como Bario, Cadmio, Cromo hexavalente, Plomo y Arsénico. En cuanto a la presencia de Bario, los valores encontrados superan el límite máximo del Decreto 1594 de 1984 (1000microgramo/L). La presencia de Bario en aguas subterráneas se debe a contaminación por hidrocarburos, los cuales se relacionan con este metal en la etapa de extracción y su posterior almacenamiento en la zona de monitoreo. Especial preocupación por la presencia de Bario se debe a reconocidos efectos tóxicos que presenta este metal como: bloqueo del sistema nervioso, alteraciones musculares, cardiovasculares y daños renales que genera. Los valores encontrados en el predio aledaño son 1338microg/L, 13110microg/L y 2772microg/L para PM-17, PM-18 y PM-19 respectivamente.

La presencia de Cadmio en el agua subterránea monitoreada se encuentra en niveles por debajo del Decreto 1594 de 1984 (10micro.g/L) a excepción del PM-10 cual se ubica cerca de los tanques de almacenamiento de hidrocarburos y en el cual se registró una concentración de 33.1micro.g/L. Se relaciona este metal con los procesos catalíticos en la industria petrolera, su presencia en agua representa un riesgo a la salud, ya que puede llegar a causar hipertensión, fragilidad ósea y enfermedad de "Itai-Itai".

La concentración de cromo hexavalente y plomo excede el valor permitido en el pozo PM-10 (154micro.g/L y 77.8microg/L respectivamente) cual se encuentra cercano al tanque de almacenamiento de hidrocarburo en la Estación 1. Estos dos metales son utilizados por la industria petrolera en procesos de craking y aumento de octanaje en la producción de gasolina comercial respectivamente. Se debe tener en cuenta que el plomo es un metal bioacumulativo en el sistema óseo, puede causar anemia, pérdida de apetito y parálisis de músculos especialmente en los brazos. Por otro lado el cromo hexavalente puede ocasionar sensibilización de la piel, lesión hepática y daños en el

riñón. Además es un metal cancerígeno para el hombre con implicaciones broncopulmonares y en los senos paranasales.

En cuanto al Arsénico, este metal presenta valores por debajo del Decreto 1594 de 1984 (50micro.g/L), sin embargo, es de vital importancia mantener su seguimiento ya que es cancerígeno y teratogénico, como también puede causar úlceras en contacto físico en las manos y pies con un posible desarrollo de tumores, efectos cardiovasculares, gastrointestinales, renales, además de alterar sistema nervioso central.

6.1.2.11 Metales (Calcio).

Debido a que el Calcio no representa efectos nocivos en la salud humana, el Decreto 1594 de 1984 no especifica valores límites para este metal. Su presencia en aguas subterráneas se debe a la disolución de la roca caliza y las infiltraciones en el suelo y su importancia se debe a la participación en el balance iónico. El máximo valor registrado para los puntos de monitoreo fue de 661mg/L para el PM-10.

6.1.2.12 Metales (Mercurio).

El Mercurio se relaciona con los yacimientos naturales de petróleo y siendo un elemento bioacumulativo y de alta toxicidad el Decreto 1594 de 1984 limita la concentración permisible a un valor de 2micro.g/L. En todos los pozos de monitoreo la presencia de Mercurio representa valores por debajo de la norma.

6.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

A continuación se relacionan los resultados obtenidos en la caracterización físico química de suelos contaminados con hidrocarburos tomados de la Estación 1 y predio aledaño de Campo Palagua.

6.2.1 Ensayos in situ.

A continuación se reportan los resultados de las pruebas realizadas in situ.

6.2.1.1 Permeabilidad e infiltración.

Este ensayo se realizó tomando dos medidas en dos puntos diferentes, el primero se realizó en el predio aledaño a la Estación (ver tabla 8), y el segundo ensayo se realizó dentro de la Estación 1 de Campo Palagua (ver tabla 9). La primera medición de la permeabilidad e infiltración en ambos puntos resultó demasiado alta (130.30cm/h y 256.13 cm/h respectivamente) lo cual se puede explicar por el bajo contenido inicial de agua en el subsuelo, además que proporciona humedad al suelo para poder obtener una medición más acertada. Por lo anterior fue necesario realizar otra prueba para obtener un resultado representativo. Este valor para el predio aledaño y la Estación 1 (20.55cm/h y 19.98cm/h respectivamente) clasifica ambos suelos como franco arenoso de alta permeabilidad (ver tabla 2, sección 5.2.1.1) con una implicación de baja retención de humedad, erodabilidad por agua y fertilidad natural del suelo.

Tabla 8. Permeabilidad e Infiltración en Predio Aledaño

ENSAYO	VOLUMEN DE UNA PULGADA DE AGUA (2.54cm=444ml)	TIEMPO (min)	VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (cm/h)	CLASE DE INFILTRACIÓN	CLASE DE PERMEABILIDAD
1	444ml	1.1696	130.30	AF, A	Muy Rápida
2	444ml	7.4162	20.55	AF	Rápida

Fuente: Autor

Tabla 9. Permeabilidad e infiltración en Estación 1 de Campo Palagua

ENSAYO	VOLUMEN DE UNA PULGADA DE AGUA (2.54cm=444ml)	TIEMPO (min)	VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (cm/h)	CLASE DE INFILTRACIÓN	CLASE DE PERMEABILIDAD
1	444ml	0.595	256.13	AF, A	Muy Rápida
2	444ml	7.625	19.98	AF	Rápida

Fuente: Autor

6.2.1.2 Densidad aparente.

De acuerdo a los resultados obtenidos (ver tabla 10) el valor promedio de densidad aparente para el suelo de la Estación fue 1.49 g/cm^3 y para el suelo de predio aledaño fue 1.41 g/cm^3 . Además, teniendo en cuenta las variaciones de la densidad aparente que indica la literatura⁴² para los suelos en condiciones normales, que generalmente están entre 1.0 y 1.8 g/cm^3 , se puede observar un comportamiento esperado para esta medición.

⁴² MUSKUS, Angélica; Manual de Laboratorio de Suelos; UPB; 2001; Pág.:28

- **Calculo tipo para densidad aparente**

Se tomó el peso del suelo seca en el horno y se relacionó con el volumen del cilindro en donde se extrajo la muestra (ver tabla 10, muestra 1 Estación), aplicando estos valores en la siguiente ecuación:

$$Da = \frac{\text{Peso muestra seca (gr)}}{\text{Volumen (cm}^3\text{)}}$$

$$Da = \frac{463.8 \text{ gr}}{306.05 \text{ cm}^3} \rightarrow Da = 1.52 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

De igual manera se realizaron los otros cálculos de este tipo.

Tabla 10. Determinación de densidad aparente

PARÁMETRO	MUESTRA 1 (PREDIO)	MUESTRA 2 (PREDIO)	MUESTRA 1 (ESTACION)	MUESTRA 2 (ESTACION)
Peso del cilindro (gr)	117.6	120.3	118.2	117.5
Peso cilindro + muestra húmeda (gr)	580.9	547.4	592.2	576.9
Peso cilindro + muestra seca (gr)	570.8	538.0	582	567.3
Peso muestra seca (gr)	453.2	417.7	463.8	449.8
Diámetro cilindro (cm)	5.08	5.08	5.08	5.08
Longitud cilindro (cm)	15.3	15.2	15.1	15.2
Volumen cilindro (cc)	310.10	308.08	306.05	308.08
Densidad aparente (g/cc)	1.46	1.36	1.52	1.46
Densidad aparente promedio (g/cc)	1.41		1.49	

Fuente: Autor.

6.2.1.3 Temperatura.

La temperatura al interior en ambos suelos fue de aproximadamente 28°C, encontrándose ésta dentro del rango representativo para ésta zona.

6.2.1.4 Estructura.

En la Fotografía 14 se puede ver la estructura del suelo procedente del predio aledaño y la Estación 1 de Campo Palagua, en donde se aprecia (a pesar de las rocas presentes) un suelo granular, caracterizado por la formación de esferas imperfectas de tamaño similar a la arena, lo que confirma una velocidad de infiltración relativamente alta, conllevando a la vez a una baja retención de humedad.

Fotografía 14. Estructura suelo predio aledaño a Estación 1



Fuente: Autor

6.2.1.5 Textura.

La determinación de la textura del suelo se desarrolló por medio de dos métodos: Bouyoucos y granulometría. A continuación se presentan las mediciones y cálculos correspondientes para hallar los porcentajes de arena, limo y arcilla, los cuales se reportan en la tabla 11 y 12 conllevando a la clasificación del suelo, y en las tablas 13 y 14 se reportan los resultados de textura para predio aledaño y Estación 1 respectivamente.

- **Calculo tipo para textura por método de Bouyoucos**

Primero se ajustó el valor de la temperatura, según la siguiente fórmula, donde °t es la temperatura corregida en la tabla 4, sección 5.2.2.1 en metodología.

$$t(^{\circ}\text{C}) = (t^{\circ} \times 0.36) - 7$$

Posteriormente se ajusta la lectura del hidrómetro así: (ver tabla 11, muestra 1)

$$\text{Hidrómetro corregido} = (t^{\circ}\text{C}) + \text{Lectura hidrómetro}$$

$$\text{Hidrómetro corregido} = [(28.54 \times 0.36) - 7] + 0.50$$

$$\text{Hidrómetro corregido} = 3.77$$

Para el porcentaje de arcilla se tomó la lectura a las 2 horas y se aplicó la siguiente ecuación, donde pm es el peso de la muestra.

$$\% \text{Arcilla} = \frac{2^{\text{a}} \text{lectura corregida} \times 100}{\text{pm}}$$

$$\% \text{Arcilla} = \frac{3.00 \times 100}{50}$$

$$\% \text{Arcilla} = 6.0\%$$

Finalmente se calculó el porcentaje de limo según la siguiente fórmula (ver tabla 13, muestra 1):

$$\% \text{Limo} = 100 - (\% \text{Arena} + \% \text{Arcilla})$$

$$\% \text{Limo} = 100 - (92.5\% + 6.0\%)$$

$$\% \text{Limo} = 1.5\%$$

De igual manera se realizaron los otros cálculos de éste tipo para otras muestras.

Tabla 11. Datos textura suelo predio aledaño por método Bouyoucus

MUESTRA	LECTURA A LOS 40 SEG.			LECTURA A LAS 2H.		
	HIDROMETRO	(°C)	HIDROMETRO CORREGIDO	HIDROMETRO	(°C)	HIDROMETRO CORREGIDO
1	0.50	26.00	3.77	0.25	25.00	3.00
		28.54			27.07	
2	0.60	26.00	3.89	0.40	26.00	3.66
		28.58			28.50	
3	0.70	28.00	4.98	0.30	26.00	3.55
		31.33			28.47	

Fuente: Autor

Tabla 12. Datos textura suelo Estación 1 por método Bouyoucus

MUESTRA	LECTURA A LOS 40 SEG.			LECTURA A LAS 2H.		
	HIDROMETRO	(°C)	HIDROMETRO CORREGIDO	HIDROMETRO	(°C)	HIDROMETRO CORREGIDO
1	0.60	27.00	4.38	0.30	26.00	3.55
		29.94			28.47	
2	0.60	27.00	4.38	0.40	27.00	4.15
		29.94			29.86	
3	0.70	26.00	4.00	0.30	26.00	3.68
		28.61			28.83	

Fuente: Autor

Tabla 13. Resultados textura suelo predio aledaño.

Muestra	% arena	% arcilla	% limo
1	92.5	6.0	1.5
2	92.2	7.3	0.5
3	90.0	7.1	2.9

Fuente: Autor

Tabla 14. Resultados textura Estación 1

Muestra	% arena	% arcilla	% limo
1	91.2	7.1	1.7
2	91.2	8.3	0.5
3	92.0	7.4	0.6

Fuente: Autor

Ubicando los resultados obtenidos en el triangulo textural, se clasificaron ambos suelos como arenosos, lo cual coincide con la alta permeabilidad y rápida infiltración, junto con baja densidad relativa y baja retención de humedad.

Al iniciar el ensayo de granulometría al suelo del predio aledaño se realizó un lavado previo buscando eliminar trazas de hidrocarburo y la mayor cantidad de material más fino al pasar la muestra por un tamiz 200 en donde se presentó gran cantidad de estos (191g), lo cual permite explicar la baja capacidad de retención de agua.

Los resultados del ensayo de textura para el predio aledaño, por el método de granulometría se muestran en la tabla 15 y en la figura 5 y para la Estación 1 en la tabla 16 y figura 6.

Cuadro 1. Pesos iniciales para granulometría

Peso antes de lavado	1113.6g
Peso después de lavado	922.0g
Peso de suelo que pasa por tamiz No. 200	191.6g

Fuente: Autor.

Tabla 15. Determinación de la textura en predio aledaño

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	%Retenido	%Pasa total
3/4	19.05	0	0	100
1/2	12.7	82	7.36	92.636
3/8	9.52	69.2	6.21	86.422
4	4.75	128.4	11.53	74.892
10	2	78.6	7.06	67.834
20	0.85	57.4	5.15	62.680
40	0.42	123.6	11.10	51.580
60	0.25	189	16.97	34.608
80	0.18	74.6	6.70	27.909
100	1.15	33.8	3.04	24.874
200	0.074	74.8	6.72	18.157
FONDO		10.6	0.95	17.205
TOTAL		922		

Fuente: Autor.

- Calculo tipo para textura por método gravimétrico

Para calcular el porcentaje de gravas se tomó el porcentaje de suelo que pasa a través del tamiz No. 4 (ver datos en tabla 15).

Gravas: $100\% - \% \text{pasa tamiz No. 4}$

Gravas: $100\% - 74.892\%$

Gravas: 25.108%

Seguido se utilizó el resultado para gravas y el porcentaje de suelo que pasa el tamiz No. 200 para el cálculo de arenas.

Arena: $100\% - \text{grava} - \% \text{pasa tamiz 200}$

Arena: $100\% - 25.108\% - 18.157\%$

Arena: 56.735%

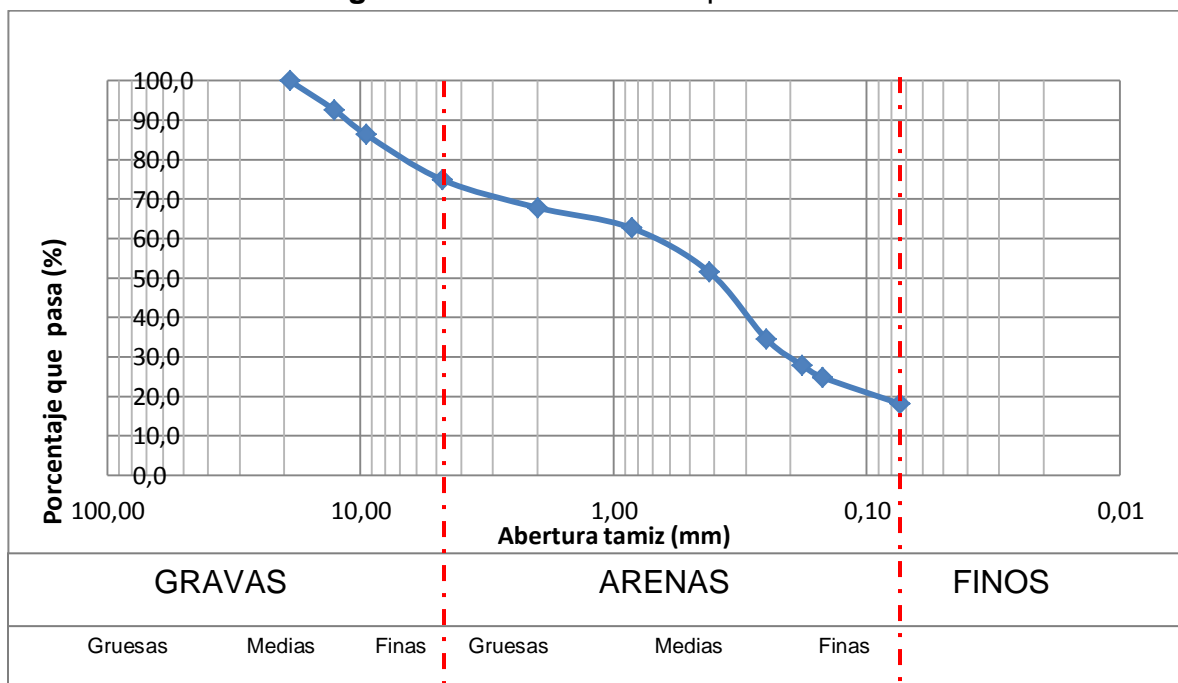
Finalmente el porcentaje de limos se tomó como el porcentaje de suelos que pasa el tamiz No. 200.

Finos: pasa tamiz 200

Finos: 18.157%

De igual manera se analizó los porcentajes de cada material en otras muestras.

Figura 5. Curva de textura predio aldeaño



Fuente: Autor.

Se clasificó el suelo dependiendo de la abertura de los tamices y el porcentaje de suelo retenido en cada uno de estos, por lo que se tuvo presencia de gravas finas de los tamices $\frac{3}{4}$ al 10, arenas gruesas y medias de tamices 10 al 100 y el tamiz 200 estaría en el orden de finos que comprende arenas finas, limo y arcillas, de acuerdo a lo anterior, se tiene que para la muestra de suelo del predio aldeaño, el porcentaje de arenas medias y gruesas (56.735%) representó mayor proporción lo cual corresponde a la clasificación previamente realizada por el método de Bouyoucus para este suelo

como arenoso, corroborando a su vez con los resultados obtenidos en la prueba de permeabilidad e infiltración in situ.

A la muestra de suelo procedente de la Estación 1 también se le realizó un lavado previo buscando mayor uniformidad de la muestra, al pasarla por el tamiz 200 de donde se eliminó 187.5 g del peso inicial correspondiente al material más fino.

Peso antes de lavado= 1110.4 g

Peso después de lavado=922.9 g

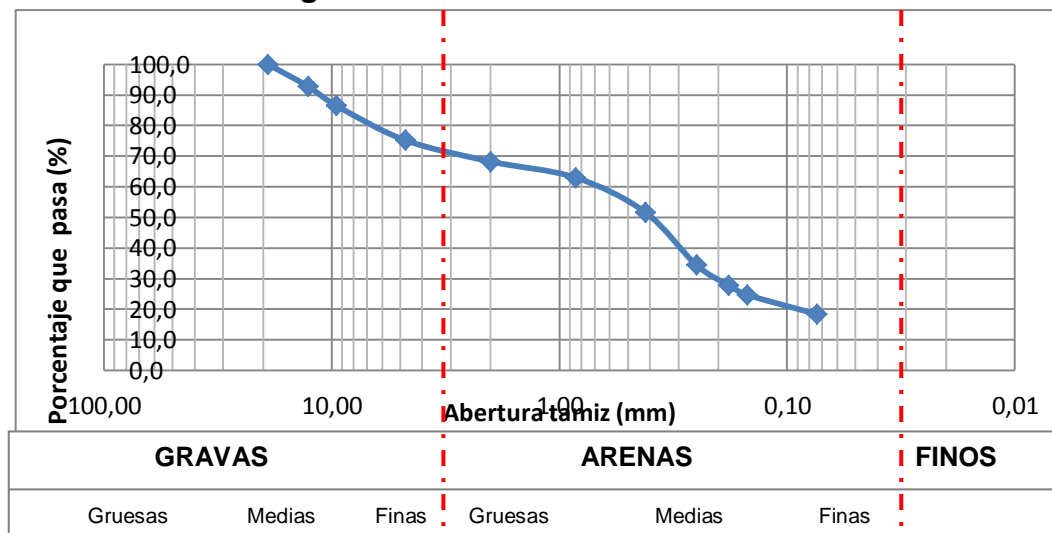
Peso de suelo que pasa por tamiz No. 200= 187.5 g

Tabla 16. Determinación de la textura a la Estación 1

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido	%Retenido	%Pasa total
¾	19.05	0	0.0	100.0
½	12.7	80	7.2	92.8
3/8	9.52	70	6.3	86.5
4	4.75	125.3	11.3	75.2
10	2	77.4	7.0	68.2
20	0.85	58.1	5.2	63.0
40	0.42	125.2	11.3	51.7
60	0.25	192	17.3	34.4
80	0.18	73.5	6.6	27.8
100	1.15	36.3	3.3	24.6
200	0.074	70.2	6.3	18.4
FONDO		14.9	1.3	17.1
TOTAL		922.9		

Fuente: Autor

Figura 6. Curva de textura Estación 1



Fuente: Autor

De acuerdo a los valores obtenidos en la tabla 16 se tuvo para el suelo de la Estación 1 los siguientes porcentajes correspondientes:

Gravas: 24.8%

Arena: 56.8%

Finos: 18.4%

El porcentaje de arenas medias y gruesas (56.8%) fue semejante al obtenido para la muestra de suelo del predio aledaño dejando la misma clasificación de suelo arenoso.

6.2.2 Ensayos físico químicos realizados en el laboratorio.

A continuación se reportan los resultados de las pruebas realizadas en laboratorio, correspondientes a la medición de porosidad, pH, densidad real y aparente, humedad gravimétrica y volumétrica, intercambio catiónico, materia orgánica y TPH.

6.2.2.1 Porosidad.

La determinación de la porosidad total de las muestras de suelo se calculó de acuerdo a la ecuación descrita en la metodología. A continuación se reportan los resultados obtenidos en la tabla 17.

- **Calculo tipo para porosidad total (Pt)**

El porcentaje de porosidad total relaciona los valores obtenidos en los ensayos de densidad aparente (Da) y densidad real (Dr) (ver tabla 17, muestra 1 Estación).

$$\%Pt = \left[1 - \left(\frac{Da}{Dr} \right) \right] \times 100$$

$$\%Pt = \left[1 - \left(\frac{1.52}{0.98} \right) \right] \times 100 \quad \rightarrow \quad \%Pt = 54.48\%$$

De igual manera se realizaron los cálculos del mismo tipo para las otras muestras.

Tabla 17. Determinación de la porosidad total en las muestras de suelo.

PARÁMETRO	MUESTRA 1 (PREDIO)	MUESTRA 2 (PREDIO)	MUESTRA 1 (ESTACION)	MUESTRA 2 (ESTACION)
Densidad aparente	1.46	1.36	1.52	1.46
Densidad real	0.98	0.90	0.98	0.99
Porosidad total	49.81%	50.98%	54.48%	46.82%
Porosidad promedio	50.4%		50.65%	

Fuente: Autor.

Los resultados obtenidos en la prueba de porosidad tanto para el suelo de la Estación 1 como para el del predio aledaño, clasifican a éstos como suelos disgregables con alta materia orgánica (ver tabla 3 de metodología). Los valores encontrados de porosidad total son acordes con la textura arenosa de las dos muestras de suelo.

6.2.2.2 Densidad real.

Según la literatura⁴³, la densidad real de los suelos varía generalmente entre 2.6 y 2.75 gr/cm³. Los resultados obtenidos en laboratorio son muy bajos lo cual probablemente se debe a un alto contenido de minerales, además de la proporción de materia orgánica presente en el suelo.

- **Calculo tipo para densidad real**

La densidad real se halló relacionando el peso de la muestra de suelo (M) y el volumen de liquido desplazado en la probeta (V) (ver datos de la tabla 18, muestra 1 Estación).

$$D = \frac{M}{V} \rightarrow D = \frac{19.62g}{20mL} \rightarrow D = 0.98 \frac{g}{mL}$$

De igual manera se calculó otras densidades reales para las muestras analizadas.

Tabla 18. Determinación de la densidad real en las muestras de suelo

MEDIDAS REALIZADAS	MUESTRA 1 (PREDIO)	MUESTRA 2 (PREDIO)	MUESTRA 3 (PREDIO)
Peso Probeta (gr)	71.2	71.3	85.4
Peso Probeta + muestra de suelo (gr)	88.76	89.26	104.15
Peso de la muestra de suelo (gr)	17.56	17.96	18.75
Volumen liquido desplazado (ml)	18	20	19
Densidad real de cada muestra (gr/ml)	0.98	0.90	0.99
Densidad real promedio (gr/mL)	0.95		

⁴³ MUSKUS, A. M; Manual de Laboratorio de Suelos; Pag:27; Edición UPB; Bucaramanga.

Tabla 18. Continuación

MEDIDAS REALIZADAS	MUESTRA 1 (ESTACION)	MUESTRA 2 (ESTACION)	MUESTRA 3 (ESTACION)
Peso Probeta (gr)	69.8	72.3	87.3
Peso Probeta + muestra de suelo (gr)	89.42	90.2	105.31
Peso de la muestra de suelo (gr)	19.62	17.9	18.01
Volumen liquido desplazado (ml)	20	18	19
Densidad real de cada muestra (gr/ml)	0.98	0.99	0.95
Densidad real promedio (gr/ml)	0.97		

Fuente: Autor

6.2.2.3 pH.

De acuerdo a los resultados obtenidos de pH en las muestras de suelo, tanto para el suelo de la Estación 1 como el del predio aledaño, se tiene un pH de suelo medido en agua neutro (ver tabla 19), en cuanto al pH en KCl las dos muestras de suelo presentan un pH de moderado a ligeramente ácido. Sin embargo, al restar el resultado de la primera prueba el pH de la segunda, con el fin de determinar el tipo de carga predominante, este resulta ser negativo, denominando de esta manera el suelo como intercambiador catiónico.

Teniendo en cuenta que los suelos se pueden clasificar de acuerdo al valor de pH encontrado se puede agregar, que ambos suelos presentan adecuada disponibilidad de nutrientes.

- **Calculo tipo para Δ pH**

El Δ pH se determinó hallando la diferencia entre el pH encontrado en el ensayo con KCl y el ensayo con agua en una misma muestra de suelo. (ver datos en la tabla 19, muestra Estación 1)

$$\Delta\text{pH} = \text{pH en KCl} - \text{pH en agua}$$

$$\Delta\text{pH} = 5.24 - 7.12 \quad \rightarrow \quad \Delta\text{pH} = -1.88$$

De la misma manera se calculó el ΔpH para otras muestras de suelo analizado.

Tabla 19. Determinación de pH

MUESTRA	VALOR DE pH H ₂ O	VALOR DE pH KCL 1N	Δ pH	PROMEDIO
PREDIO 1	7.28	6.46	-0.82	-0.79
PREDIO 2	7.31	6.55	-0.76	
ESTACION 1	7.12	5.24	-1.88	-1.885
ESTACION 2	7.20	5.31	-1.89	

Fuente: Autor

6.2.2.4 Humedad gravimétrica.

La humedad gravimétrica en las muestras de suelo procedentes del predio aledaño fue de 4.74%, y para el suelo de la Estación fue de 3.32%, indicando bajos valores en la relación de la masa de agua contenida en los poros de los suelos analizados. Teniendo en cuenta que ambos suelos se clasificaron como arenosos los valores de humedad gravimétrica hallados fueron esperados (Ver tabla 20).

- **Calculo tipo para humedad gravimétrica (HG)**

El porcentaje de humedad gravimétrica se determinó relacionando la diferencia de peso de la muestra húmeda de suelo con el peso de la muestra seca. (Ver datos tabla 20, muestra predio 1)

$$\%HG = \frac{\text{Peso muestra húmeda} - \text{peso muestra seca}}{\text{Peso muestra seca}} \times 100$$

$$\%HG = \frac{100.039\text{g} - 95.508\text{g}}{95.508\text{g}} \times 100$$

$$\%HG = 4.744\%$$

De la misma manera se efectuó el cálculo de la humedad gravimétrica de otras muestras.

Tabla 20. Determinación de la humedad gravimétrica

MUESTRA	PREDIO 1	PREDIO 2	ESTACION 1	ESTACION 2
Peso del plato	126.802	127.012	128.090	127.382
Peso del plato + muestra húmeda	226.841	227.034	228.102	227.472
Peso de muestra húmeda	100.039	100.022	100.012	100.09
Peso del plato + muestra seca	222.31	222.508	224.980	224.162
Peso de muestra seca	95.508	95.496	96.89	96.78
%Humedad Gravimétrica	4.744%	4.74%	3.22%	3.42%

Fuente: Autor

6.2.2.5 Humedad volumétrica (HV).

La humedad volumétrica promedio para el suelo procedente del predio aledaño fue de 6.7% y para el suelo procedente de la Estación fue de 4.94%, indicando baja cantidad de agua que almacena el suelo a 15 cm de profundidad aproximadamente (ver tabla 21).

A continuación se indica el cálculo que se realizó para este parámetro.

- **Calculo tipo para humedad volumétrica (HV)**

El cálculo de humedad gravimétrica se determinó con los valores obtenidos para humedad gravimétrica (HG) y densidad aparente (Da). (ver tabla 21, muestra Predio 1)

$$\%HV = \%HG \times Da \quad \rightarrow \quad \%HV = 4.744\% \times 1.46 \quad \rightarrow \quad \%HV = 6.93\%$$

Para el cálculo de humedad volumétrica de otras muestras se aplicó el mismo procedimiento.

Tabla 21. Determinación de humedad volumétrica (HV)

MUESTRA	PREDIO 1	PREDIO 2	ESTACION 1	ESTACION 2
Humedad gravimétrica	4.74%	4.74%	3.22%	3.42%
Densidad aparente	1.46	1.36	1.52	1.46
Humedad Volumétrica	6.93%	6.44%	4.89%	4.99%
HV promedio	6.7%		4.94%	

Fuente: Autor

6.2.2.6 Capacidad de Intercambio Catiónico.

De acuerdo a los resultados obtenidos y a los valores estimativos encontrados en literatura (ver sección 5.2.2.7), la cantidad de cationes intercambiables para las dos muestras de suelo se encuentran ubicados en un rango medio, indicando moderadas reservas de calcio, magnesio, potasio y sodio y por lo tanto una fertilidad media (ver tabla 22).

- **Calculo tipo para capacidad de intercambio catiónico**

El valor de capacidad de intercambio catiónico se halló teniendo en cuenta la diferencia entre el volumen de soda gastada en la muestra (V) y el volumen de soda gastado en el blanco (B) (ver datos de tabla 22, muestra 1)

$$\text{CIC} \left(\frac{\text{meq}}{100\text{g}} \right) = 2(V - B)\text{Soda}$$

$$\text{CIC} \left(\frac{\text{meq}}{100\text{g}} \right) = 2(6.6\text{mL} - 0.3\text{mL}) \rightarrow \text{CIC} \left(\frac{\text{meq}}{100\text{g}} \right) = 12.6$$

Para las otras muestras se aplicó el mismo cálculo para hallar este parámetro.

Tabla 22. Determinación de intercambio catiónico

PARÁMETRO	MUESTRA 1 (PREDIO)	MUESTRA 2 (PREDIO)	MUESTRA 1 (ESTACION)	MUESTRA 2 (ESTACION)
Volumen de soda gastada en la muestra	6.6 ml	6.1 ml	8.2 ml	7.8 ml
Volumen de soda gastada en el blanco	0.3 ml			
Normalidad de la soda	0.1	0.1	0.1	0.1
CIC	12.6	11.6	15.8	15

Fuente: Autor

6.2.2.7 Materia Orgánica.

A continuación se presenta el cálculo realizado para el contenido de la materia orgánica donde los resultados se resumen en la tabla 23.

- **Calculo tipo para materia orgánica**

Inicialmente se calculó la normalidad de la solución ferrosa utilizada en la titulación (ver tabla 23, muestra predio).

$$\text{Normalidad solución ferrosa} = \frac{VK_2Cr_2O_7 \times N.K_2Cr_2O_7}{\text{Volumen solución ferrosa}}$$

$$\text{Normalidad solución ferrosa} = \frac{5\text{mL} \times 1\text{N}}{5\text{mL}} = 1\text{N}$$

Luego se halló el porcentaje de carbono orgánico, teniendo en cuenta el volumen de la solución ferrosa gastada en la muestra (M), el volumen de la solución ferrosa gastada en el blanco (B), la normalidad de la solución ferrosa determinada anteriormente y el peso de la muestra de suelo en gramos.

$$\%C = \frac{(M-B) \times 1\text{N} \times 0.003 \times 1.3 \times 100}{\text{pm}}$$

$$\%C = \frac{(1.2\text{ml} - 5\text{ml}) \times 1\text{N} \times 0.003 \times 1.3 \times 100}{0.30\text{g}} \rightarrow \%C = 4.94\%$$

Finalmente se calculó el porcentaje de materia orgánica (MO)

$$\%MO = \%C \times 1.724$$

$$\%MO = 4.94\% \times 1.724$$

$$\%MO = 8.52$$

De la misma manera se calculó el %MO para las otras muestras.

Tabla 23. Determinación de materia orgánica

MUESTRA	Normalidad solución Ferrosa	% C	% MO
PREDIO 1	1N	4.94	8.52
PREDIO 2		3.77	6.50
ESTACION 1		9.36	16.14
ESTACION 2		8.32	14.34

Fuente: Autor

Tabla 24. Clasificación de la cantidad de materia orgánica con respecto al clima

CLIMA	INTERPRETACIÓN DEL PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA		
	Mineral Bajo	Mineral Medio	Mineral Alto
Frío	Menos de 5	5 – 10	Mayor de 10
Templado	Menos de 3	3 – 5	Mayor de 5
Cálido	Menos de 2	2 – 3	Mayor de 3

Fuente: MUSKUS, María Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga; 2001; pág.: 74

Teniendo en cuenta la Tabla 24, donde se relaciona el contenido de materia orgánica respecto al clima, se encuentra que ambos suelos pueden ser clasificados como suelos de mineral alto, puesto que el contenido de materia orgánica es inferior al 20%, además de ser procedente de una locación que presenta clima cálido, sin embargo, es importante tener en cuenta las diferentes propiedades del suelo (ver tabla 7, sección 5.2.2.8) que se pueden ver afectadas si ocurre un aumento en el porcentaje de materia orgánica presente en el suelo, como el aumento de agregados del suelo, aumento de macroporos y por lo tanto de la infiltración y drenaje del agua a través del suelo, entre otros.

6.2.2.8 Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH).

El contenido de TPH de las muestras de suelo se resume en la tabla 25, donde se muestra un valor para un suelo no contaminado o de referencia y dos muestras de suelo que presentan contaminación, tomadas a 5 metros de distancia horizontal del PM-14 hacia el este (E) y oeste (W) del mismo. Debido al aspecto del suelo,

impregnado con hidrocarburo en el predio aledaño se tomaron en éste sitio dos muestras para análisis de TPH's, en cambio en la Estación 1 no se encontraron trazas, ni olor característico de hidrocarburo a 1 metro de profundidad en los pozos, por eso solo se tomó esta como referencia.

Tabla 25. Resultados análisis TPH en predio aledaño (PM-14)

Muestra	Bario (mg/kg)	TPH (%p/p)	TPH (mg/kg)
Referencia (Estación 1)	89.16	0.02	200
2	335.36	0.174	1740
3	318.6	0.061	610

Fuente: Laboratorio ICP.

La muestra de suelo 2 tomada al oeste del PM-14 es la que presenta un mayor valor de TPH y Bario, seguida por la muestra 3 y la de referencia, sin embargo, ninguna de las tres muestras se encuentra por encima del límite establecido por el Instituto Americano del Petróleo (1%p/p) y de la norma Louisiana 29B, en la que se establecen como valores máximos permisibles de TPHs un 3%p/p. La presencia de TPH's encontrada en predio aledaño supera en su concentración la muestra de suelo de referencia (Estación 1) lo cual se puede explicar por la topografía del terreno, donde la cota de la estación 1 es superior a la del predio aledaño. Por lo siguiente hay un desplazamiento del contaminante a este predio.

Teniendo en cuenta los valores de límites genéricos basados en riesgo, contenidos en el Manual técnico para la Ejecución de Análisis de Riesgos para sitios de Distribución de Derivados de Hidrocarburos⁴⁴, se tiene que para un suelo de uso agrícola la concentración permitida para compuestos livianos (gasolina orgánica) se encuentra en un rango de 5,9E+02 mg/kg y 2,6E+03 mg/kg si se encuentra en contacto directo o si tiene posibilidades de migración hacia aguas subterráneas respectivamente. Por

⁴⁴ Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; anual Técnico para la Ejecución de Análisis de riesgos para Sitios de Distribución de Derivados de Hidrocarburos; Abril 2008.

otro lado para compuestos pesados (diesel orgánico) se encuentra en un rango de $2,5E+01$ mg/kg y $7,9E+01$ mg/kg si se encuentra en contacto directo o si tiene posibilidades de migración hacia aguas subterráneas respectivamente. Sin embargo se debe tener en cuenta que el análisis realizado para hidrocarburos fue más general, ya que se tuvo en cuenta solo los totales.

6.3 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y LA TRAYECTORIA DE LA PLUMA CONTAMINANTE, DETERMINADO POR MEDIO DEL SOFTWARE VISUAL MODFLOW.

Para el análisis del comportamiento del flujo de agua subterránea y trayectoria de la pluma contaminante se realizó una modelación mediante el uso del software Visual ModFlow. En el anexo 4, se muestran valores puntuales para cada pozo (monitoreo y recuperación) y apiques existentes en la Estación 1 y predio aledaño de Campo Palagua, donde se especifican las coordenadas geográficas y cotas puntuales de cada pozo/apique tomadas del GPS (precisión $\pm 8m$), también se muestran los niveles estáticos medidos en campo por medio de una sonda de nivel y la cotas piezométricas calculadas a partir de las cotas de terreno menos los niveles estáticos correspondientes.

A continuación se relacionan los resultados obtenidos en la modelación de flujo de agua subterránea y trayectoria de la pluma contaminante en el predio aledaño a la Estación 1 de Campo Palagua.

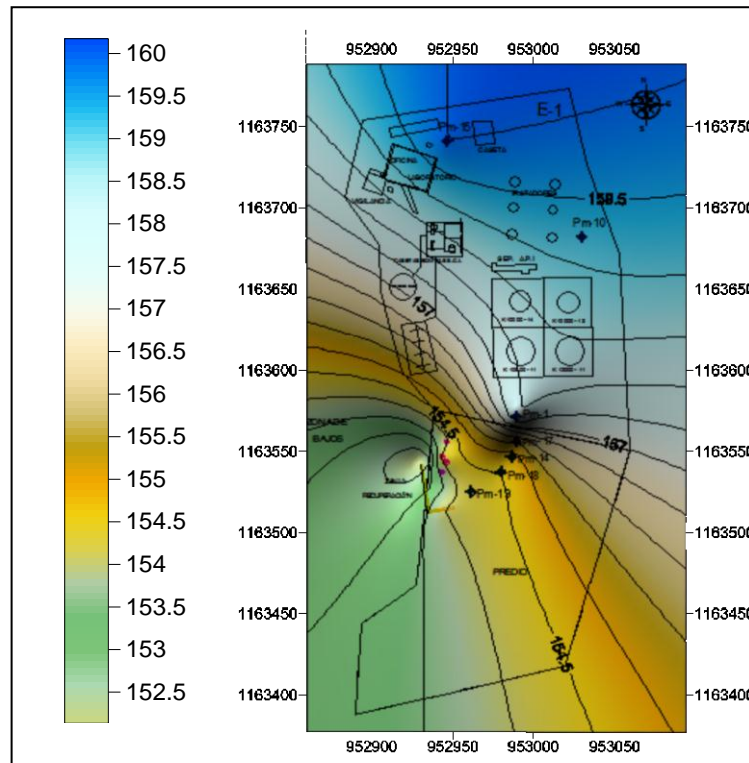
6.3.1 Interpolación de curvas de nivel por medio de Surfer.

A continuación se muestra la interpolación realizada para las curvas de nivel como un mapa de contornos en 3D y vista en planta, por medio del software Surfer.

En la imagen 5 se resalta el sistema de coordenadas y cotas correspondientes a la zona de estudio, así como la ubicación de los pozos de monitoreo ubicados en la zona de mayor interés (predio aledaño). De igual manera se presenta la variación de alturas del terreno por medio de la escala de colores en la parte izquierda, donde la coloración azul representa la mayor altura o cota (160m), disminuyendo hasta coloración verdosa cual representa las cotas más bajas (alrededor de 152.5m).

De esta manera, se hace evidente que los pozos de monitoreo PM-17, PM-14, PM-18 y PM-19 se encuentran en un terreno de un nivel más bajo que el PM-10 de la estación 1 y los tanques de almacenamiento cercanos. Lo anterior se puede relacionar con la presencia del contaminante (TPH's) en una concentración mayor encontrada en los pozos PM-14, PM-17 y PM-19, como el posible resultado de desplazamiento de la pluma contaminante.

Imagen 5. Representación gráfica de la topografía de la Estación 1 y predio aledaño



Fuente: Autor.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la simulación realizada en el software Visual Modflow, para el flujo de agua subterránea y trayectoria de la pluma contaminante en el predio aledaño a la Estación 1 de Campo Palagua.

6.3.2 Simulación en Visual Modflow para flujo de agua subterránea y trayectoria de la pluma contaminante.

Inicialmente el modelo requirió la información primaria necesaria para la instalación del modelo, donde se tuvieron en cuenta las siguientes características: simulación de flujo un tipo saturado (densidad constante), modelo de flujo designado Modflow 2000, la elección negativa de simulación de transporte (puesto que es un modelo estacionario, además que no se está considerando concentración del contaminante) y las unidades para longitud, tiempo, conductividad, entre otras.

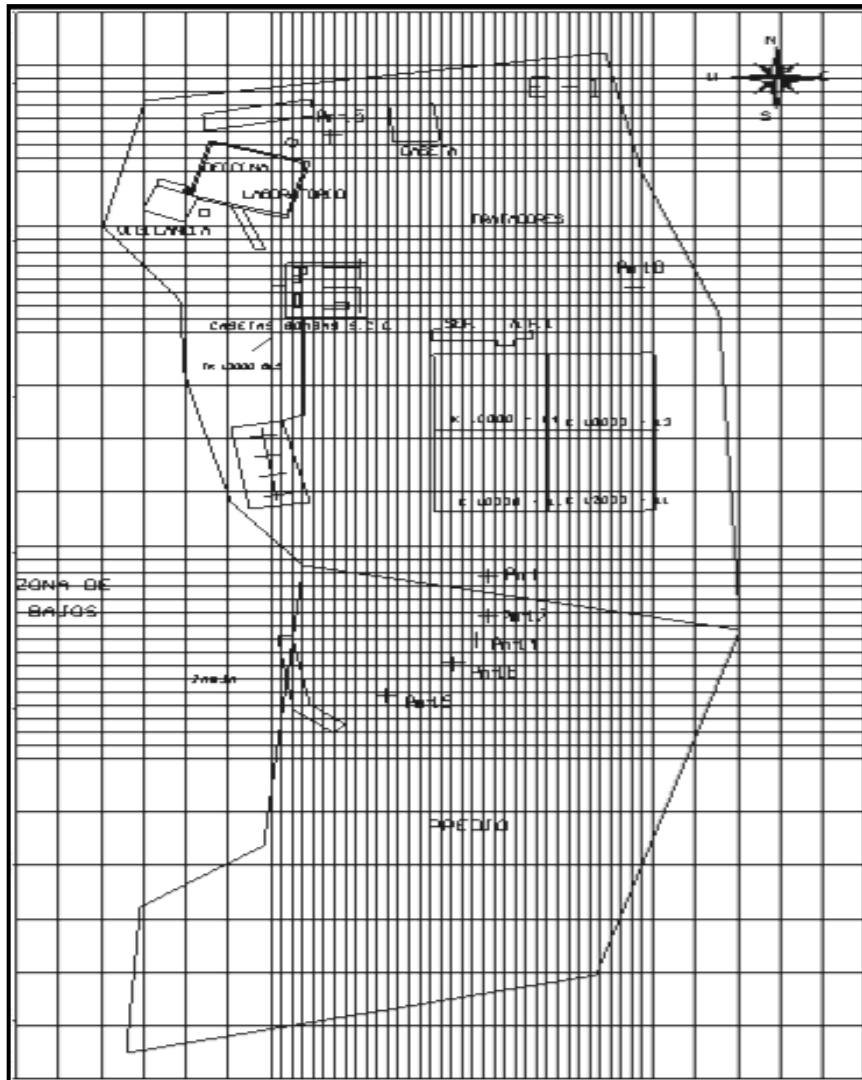
Una vez incluidas las variables iniciales, se procedió a la inclusión de los datos para la creación de una grilla, capas necesarias para la simulación y profundidad de las capas incluidas.

Para esta simulación se eligió una grilla inicial de 20 filas y 20 columnas, se eligió una sola capa de 10m de profundidad, el cual se asignó teniendo en cuenta la profundidad máxima de diseño de los pozos de monitoreo.

6.3.2.1 Discretización del modelo.

La imagen 6 muestra el plano de la estación 1 y predio aledaño de Campo Palagua con la malla anteriormente seleccionada. Además de un refinamiento por cuatro (zona resaltada con mayor número de líneas horizontales y verticales) tanto en filas como en columnas, sobre los pozos de monitoreo y zanja de intercepción.

Imagen 6. Malla planteada para simulación



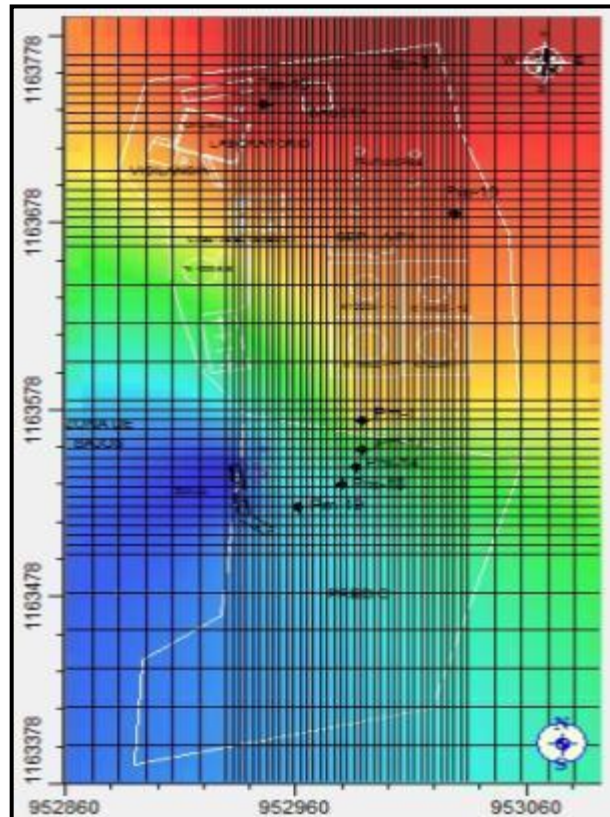
Fuente: Autor.

En esta imagen se puede ver el refinamiento que se realizó para las zonas de interés, las cuales comprenden los pozos de monitoreo, zanja de intercepción y apiques, de donde se tuvo una malla final de 5x5 con el fin de obtener la mayor cantidad de datos en áreas específicas, puesto que por cada celda que conforma la malla, el modelo ejecuta una serie de ecuaciones e iteraciones que influyen en la calibración del mismo. El resto de dominio del modelo se trabajó con el mallado inicial (20 columnas y 20 filas).

6.3.2.2 Topografía.

La topografía del terreno se incluyó en el modelo tanto para superficie como para el subsuelo (asumiendo que el subsuelo se comporta de la misma forma que la superficie). En la imagen 7 se muestran las coordenadas para X (dirección Este), para Y (dirección Norte) y elevación o cota del terreno. Se empleó Krigging como interpolador ya que es método que permite un mayor acercamiento a las condiciones visualizadas en campo

Imagen 7. Topografía del terreno



Fuente: Autor.

En esta imagen se puede ver en escala de colores las variaciones del terreno en la superficie, donde la coloración roja representa los puntos más elevados sobre el nivel del mar y la coloración azul los puntos menos elevados.

6.3.2.3 Parámetros hidráulicos.

En la tabla 26 se presentan los valores de conductividad hidráulica en cada uno de los pozos de monitoreo y recuperación, necesarios para la modelación del flujo de agua subterránea.

Tabla 26. Conductividad hidráulica de pozos de monitoreo

POZO / APIQUE	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (m/día)		
	Kx	Ky	Kz
PM-1	1.03E-01	1.03E-01	1.03E-02
PM-10	1.04E-01	1.04E-01	1.04E-02
PM-14	9.91E-02	9.91E-02	9.91E-03
PM-15	7.27E-02	7.27E-02	7.27E-03
PM-17	1.01E-01	1.01E-01	1.01E-02
PM-18	3.38E-02	3.38E-02	3.38E-03
PM-19	1.99E-02	1.99E-02	1.99E-03
PR-1	1.77E-01	1.77E-01	1.77E-02
PR-2	2.30E-01	2.30E-01	2.30E-02
PR-3	1.31E-02	1.31E-02	1.31E-03

Fuente: Autor.

En la tabla anterior se puede apreciar grandes valores de conductividad hidráulica para PR-1 y PR-2 debido a que en estos sitios no se encontró hidrocarburos, por lo cual la recuperación del agua en estos pozos fue muy rápida. De lo contrario en los pozos PM-14, PM-15, PM-18 y PM-19 el hidrocarburo presente en el suelo impidió la obtención de resultados óptimos de conductividad. En los apiques no se reportan datos porque son excavaciones de exploración realizadas para detectar la presencia de hidrocarburo, por lo que no se tienen datos de construcción como profundidad de diseño y datos de monitoreo como niveles estáticos. Por otro lado, no se tienen datos para los pozos de recuperación PR-4 y PR-5 ya que se encontraron trazas de

hidrocarburo el día en que se realizó el monitoreo, lo cual dificultó la ejecución del procedimiento para pruebas slug.

6.3.2.4 Condiciones iniciales.

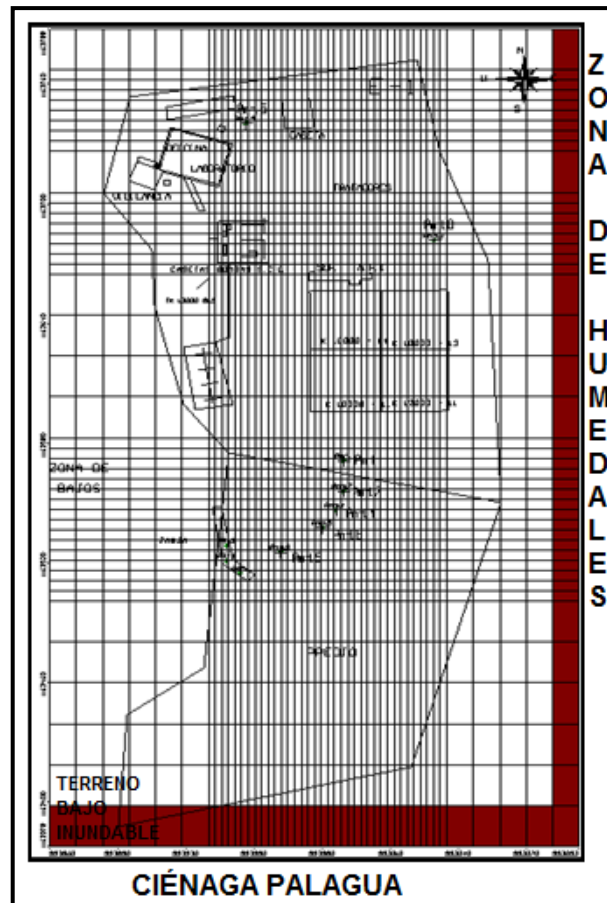
Se asignó un valor de cabeza inicial de 154 m para todo el dominio del modelo, como el promedio de cotas piezométricas calculadas a partir de la cota del terreno y los niveles estáticos de cada uno de los pozos de monitoreo y recuperación.

6.3.2.5 Límites de flujo.

En la imagen 8 se ven los dos límites (sombreado) asignados al modelo con el fin de direccionar el flujo del agua. En el extremo derecho, se estipuló un valor de cabeza constante de 154.5m a 156m en dirección noreste del predio aldaño y al sur del predio, en dirección a la Ciénaga Palagua de 152m a 154m. Al igual que las condiciones iniciales, estos valores se tomaron de las cotas piezométricas calculadas a partir de la cota de terreno y los niveles estáticos medidos en campo.

Al desarrollar el modelo se notó la importancia de ajuste de los dos límites y los promedios de cota piezométrica para obtener un modelo de dirección de flujo de agua subterránea más acertado con la topografía y condiciones del terreno verificados en campo.

Imagen 8. Limites asignados al dominio del modelo

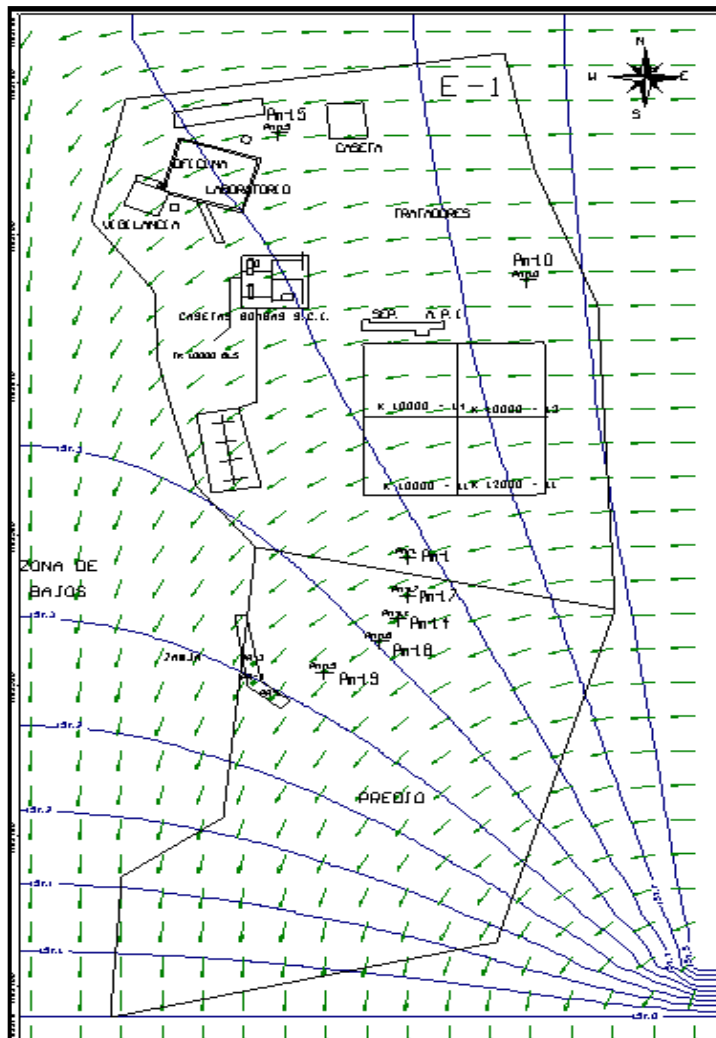


Fuente: Autor

- **Resultados de modelación de flujo de agua subterránea.**

Los resultados de la modelación fueron similares a los modelos de flujo realizados en el año 2008 y 2009, donde el flujo de agua subterránea presentó una dirección predominante Noroeste-Suroeste (NW a SW) y una velocidad máxima de flujo de 0.37 m/d. En la Imagen 9, se muestra el modelo final de flujo de agua subterránea realizado en este trabajo en donde las flechas indican la dirección del flujo y con esto posible desplazamiento de la pluma contaminante. La imagen 10 muestra el modelo de dirección de flujo de agua obtenido en el año 2009.

Imagen 9. Modelo de flujo subterráneo de la Estación 1 de Campo Palagua.



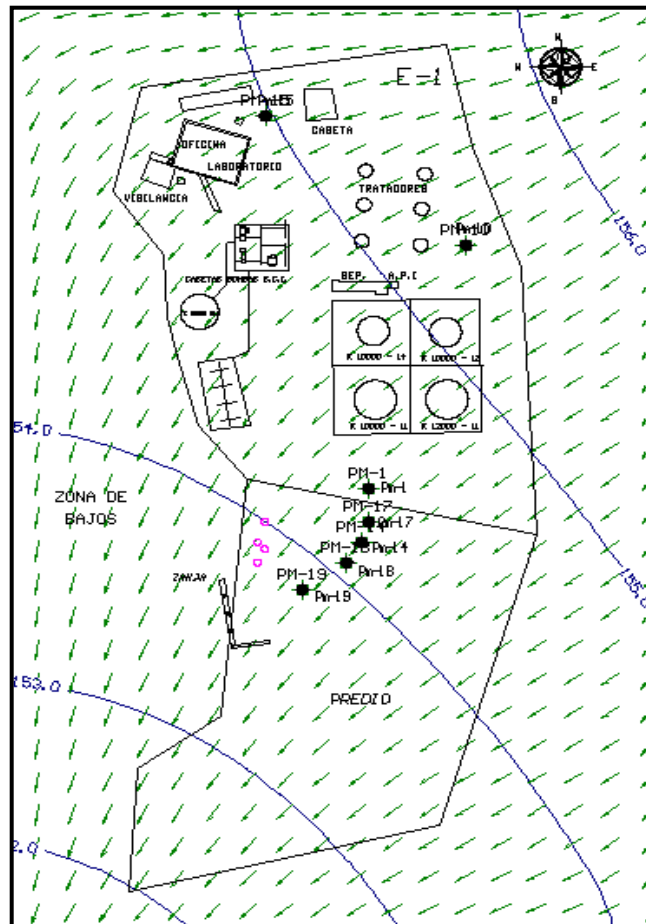
Fuente: Autor

Tanto en el modelo del año 2009 como el actual se puede apreciar la dirección de desplazamiento del agua subterránea junto con la pluma contaminante hacia la Ciénaga Palagua, lo cual se verificó en el campo por la presencia de hidrocarburos en esta. De igual manera en ambos modelos se encuentra coherencia en la conductividad hidráulica y la topografía del terreno con el resultado obtenido en cuanto a la orientación del flujo. La principal diferencia en los dos modelos radica en la velocidad de flujo del agua, donde el valor obtenido en 2009 fue de 0.12m/d y la velocidad obtenida en el modelo actual fue de 0.37m/d, esto es debido a que en el

ultimo se tuvo en cuenta cotas de terreno, niveles estáticos, cotas piezométricas y conductividad de los pozos de recuperación de la zanja, lo cual no se consideró en el modelo anterior.

La consecuencia de este aumento de la velocidad, obtenido en el modelo actual, es un desplazamiento de las partículas del contaminante más pronunciado, señalando de esta manera una necesidad de rápida solución de este problema.

Imagen 10. Modelo de dirección de flujo año 2009



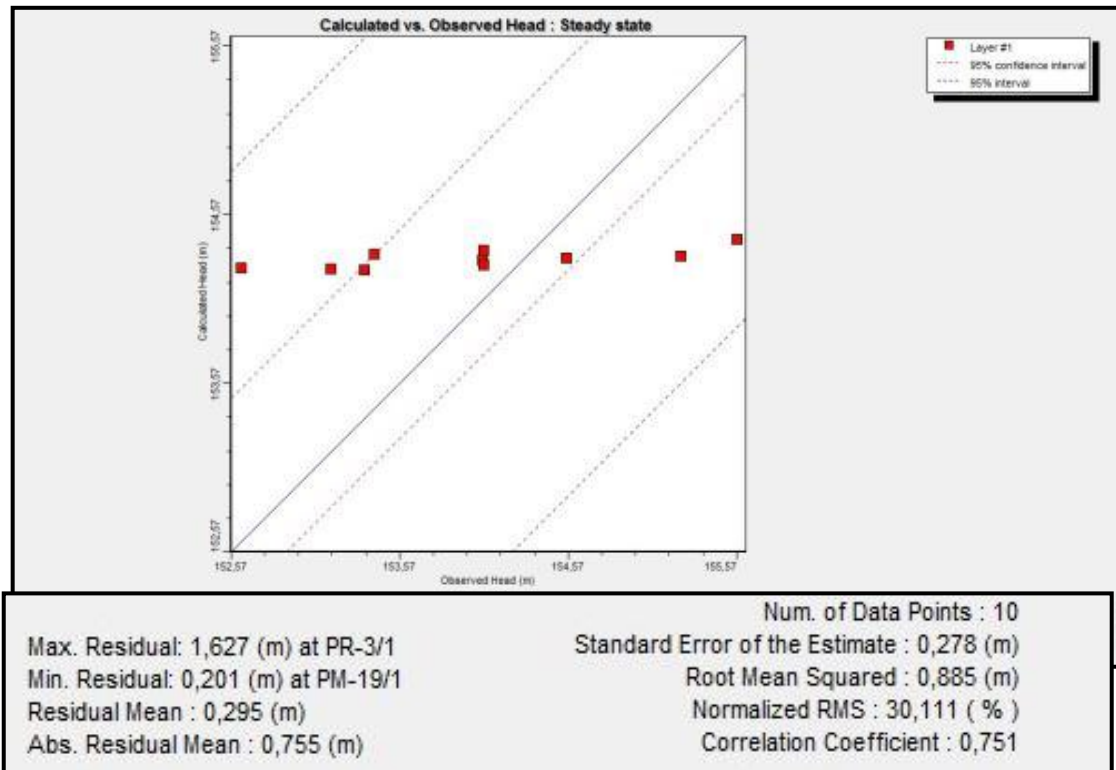
Fuente: OBREGON, Adriana; Informe con Actualización de Modelo de Flujo Subterráneo en la Estación 1 de Campo Palagua; ICP; 2009.

- **Calibración del modelo**

La imagen 11 muestra la calibración obtenida como resultado final del modelo de dirección y flujo del agua subterránea, donde el error medio obtenido es de 0.295m y el error absoluto de 0.755m, siendo estos un poco más altos a los obtenidos en el modelo del año 2009 (error medio -0.007m y error absoluto de 0.346m).

El error se eleva debido a la diferencia entre las cabezas calculadas y observadas en el PM-17. Estas diferencias son validas, puesto que el área de estudio no cuenta en toda su extensión con una topografía homogénea, ya que este predio ha sido sometido a sucesivos rellenos desde la fecha en que ocurrió el incidente del derrame de hidrocarburo.

Imagen 11. Calibración del modelo



Fuente: Autor

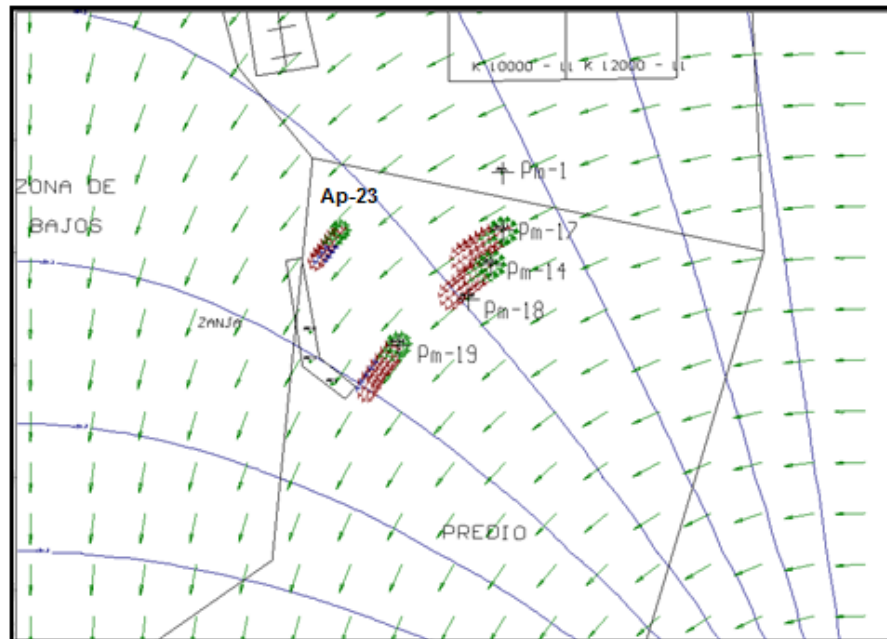
La calibración resultó ser inadecuada, probablemente porque la cantidad de datos introducidos no son suficientes para la extensión del dominio del modelo. No se tienen datos suficientes para los pozos de recuperación PR-1 a PR-5, ya que para el desarrollo de este modelo solo se contó con los valores obtenidos en el monitoreo realizado el 10 de mayo de 2010 y no son realmente representativos para introducirlos al software como pozos de observación para finalmente compararlos en la calibración con los pozos calculados por el modelo. No obstante, la dirección, velocidad y trayectoria de las partículas contaminantes simuladas en este modelo fueron adecuadas de acuerdo a los modelos anteriores realizados por la empresa y a las condiciones observadas en campo.

6.3.2.6 Aplicación de PATHLINES y MODPAHT para evaluación de la trayectoria de partículas.

Los resultados obtenidos en la modelación de partículas (posible trayectoria de la pluma contaminante) coinciden con la presencia de producto libre en la zona de bajos o predio aledaño de acuerdo a los monitoreos realizados en el campo.

En la imagen 12 se muestra la proyección y trayectoria que las partículas tomarían en un año, considerando que éstas se trasladan en la misma dirección del flujo del agua subterránea y siguiendo el dominio de la topografía del terreno en dirección Suroeste (SW).

Imagen 12. Trayectoria de partículas en un año



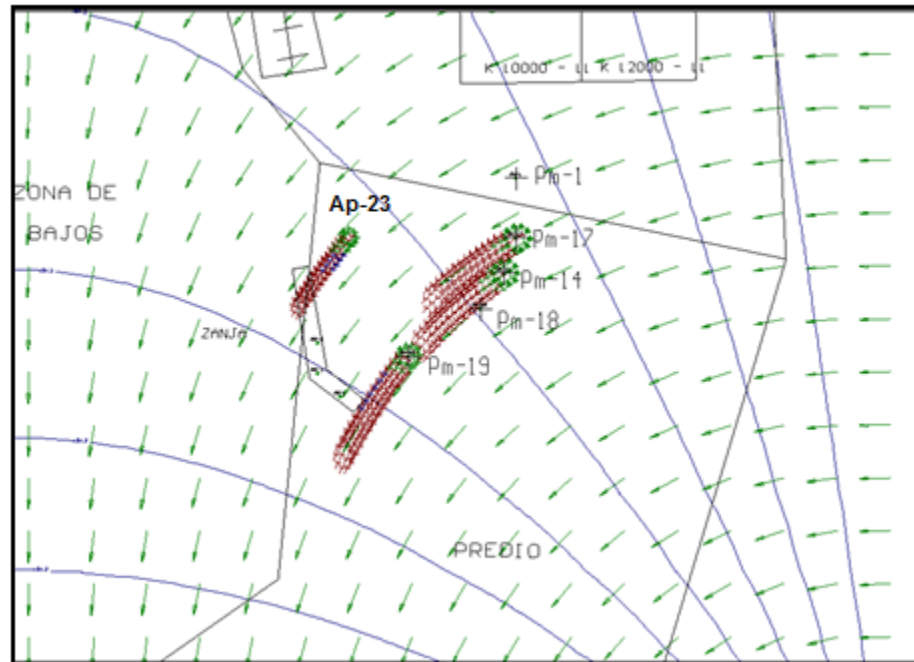
Fuente: Autor

En esta imagen se puede ver que para un tiempo relativamente corto (1 año), el desplazamiento de las partículas no es muy extenso, de tal manera que estas no alcanzan a llegar a la zanja de intercepción construida como medida de recuperación de producto libre. Por otro lado, la trayectoria proyectada para las partículas procedentes del PM-19 sugiere una vía al lado de la zanja de tal modo que no se logra retener este contaminante. Esto se pudo verificar en el campo puesto que no se encontró presencia de hidrocarburo en el pozo de recuperación 1 dentro de la zanja.

En las imágenes 13 y 14 se presenta la proyección de la trayectoria que tendría el contaminante en dos y tres años respectivamente, en donde se ve que las partículas presentes en el apique 23 sobrepasaría los pozos de recuperación en la zanja de intercepción y las partículas procedentes del PM-19 seguirían pasando al lado derecho de la zanja, sin poder recuperarse. Al igual que la proyección anterior, la dirección de la trayectoria de las partículas contaminantes se dirige junto con el flujo del agua subterránea y topografía del terreno hacia el suroeste.

En campo, actualmente el pozo de intercepción No. 5 ubicado al extremo izquierdo de la zanja, hacia la zona de bajos, presenta producto libre, procedente del apique 23. Debido a esto la empresa adoptó un sistema de monitoreo frecuente, con el fin de realizar extracción manual del hidrocarburo presente.

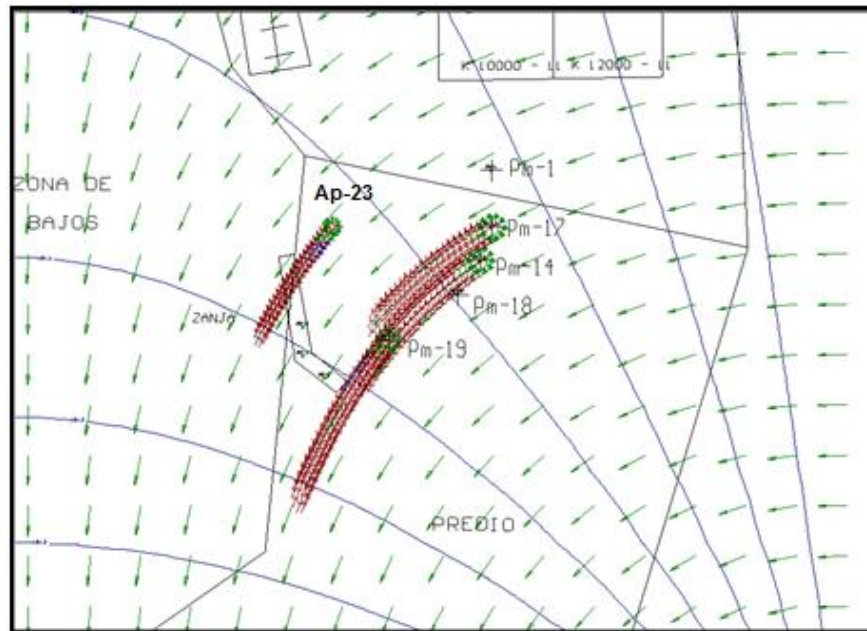
Imagen 13. Trayectoria de partículas en dos años



Fuente: Autor.

Para un tiempo de simulación de tres años, las partículas tuvieron un comportamiento similar al que se presentó en dos años, con una mayor extensión en su trayectoria.

Imagen 14. Trayectoria de partículas en tres años



Fuente: Autor.

En la proyección de las partículas para un tiempo de simulación de 3 años se puede ver que el desplazamiento de la pluma contaminante resultaría bastante extenso, lo cual demuestra la necesidad de implementación de sistemas de remediación del suelo y agua subterránea en esta zona.

El uso del software ModFlow permitió simular el movimiento de la pluma contaminante y la velocidad de las partículas en el agua subterránea y subsuelo, lo puede ayudar a reducir costos y esfuerzos para la delimitación de área a tratar con el sistema de remediación que se adecúe a las condiciones físico químicas de la zona.

6.4 ANÁLISIS COSTO BENEFICIO DE ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN FÍSICO QUÍMICAS PARA AGUA SUBTERRÁNEA Y SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

En el análisis de alternativas de remediación de agua subterránea y suelo contaminado con hidrocarburos, se tuvieron en cuenta los resultados de la caracterización físico química realizada al suelo y agua freática, como diagnóstico inicial de la zona de estudio, al igual que la dirección y velocidad del agua subterránea y la trayectoria de las partículas obtenidas en la modelación por medio del software Visual ModFlow, en donde se pudo ver que se cuenta con un tiempo estimado de un (1) año para la aplicación de la técnica de remediación más viable acorde a las condiciones del área.

Además de lo anteriormente mencionado, también se tuvo en cuenta los parámetros mencionados en la metodología (sección 5.4). La aceptación gubernamental se omitió puesto que en Colombia aún no se cuenta con políticas ambientales específicas en contaminación y recuperación de suelos y aguas subterráneas contaminadas con hidrocarburos. Las alternativas analizadas fueron:

6.4.1 Bombeo, tratamiento y reinyección.

A continuación en tabla 27 se exponen los parámetros a tener en cuenta para la evaluación de Bombeo, tratamiento y reinyección para remediación de aguas subterráneas contaminadas con hidrocarburos.

Tabla 27. Parámetros de evaluación de Bombeo, tratamiento y reinyección

Parámetro	Descripción
Generalidades	El bombeo, tratamiento y reinyección es una técnica de remediación ex situ de aguas subterráneas, que consiste en bombear el agua subterránea y tratarla por medio de técnicas fisicoquímicas o biológicas.
Efectividad y permanencia	Efectividad y permanencia de esta técnica depende del tratamiento aplicado, uno de los más efectivos es la Biorremediación en el cual se reportan en literatura las remociones de TPH entre 94 y 96% con respecto la concentración inicial.
Implementabilidad	Es una técnica de fácil implementación, puesto que los equipos necesarios son fácilmente manejables en cuanto al bombeo y reinyección. Debe tenerse en cuenta factores como condiciones iniciales de la zona contaminada, caudal de bombeo, estimación de la concentración de la contaminación en el agua bombeada, entre otros. El tratamiento del agua subterránea depende de la técnica que se acople a este sistema.
Costos	De acuerdo a una Evaluación hidrogeológica realizada a la Batería 1 de Campo Palagua por la Empresa de Consultorías Ambientales SIAM S.A. en donde proponen un programa remedial con el objetivo de detener el avance de la pluma contaminante, y al tiempo degradar el hidrocarburo libre del suelo contaminado se contemplan los siguientes costos: bombeo (aproximadamente \$3.600.000/Galón), extracción del producto libre (aproximadamente \$38.996.000/galón incluyendo bombas remedial y de inyección) y la inyección de microorganismos como una Biorremediación (aproximadamente \$3.500.000/Galón), para un total de cuarenta y seis millones novecientos seis mil pesos (\$46.096.000). ⁴⁵
Limitaciones	Algunos de los factores limitantes para la aplicación de este tratamiento son: <ul style="list-style-type: none"> • Se puede presentar contaminación por derrame proveniente del recorrido que el contaminante realiza durante la recuperación. • Puede presentar dificultad mecánica en el control del proceso de reinyección. • El periodo de tratamiento podría ser largo. • Se puede tener dificultad para controlar el tipo de flujo predominante en el acuífero si se presenta heterogeneidad en el suelo.

Fuente: Autor

El bombeo de aguas subterráneas y su tratamiento con la posterior reinyección se limita para un tratamiento de aguas sin tener en cuenta el subsuelo contaminado. El

⁴⁵ SIAM S.A.; Evaluación Hidrogeológica de la Batería 1 de Campo Palagua; 2007

éxito de esta técnica depende del tratamiento aplicado, pero resulta ser costosa e incompleta. Teniendo en cuenta que la pluma de hidrocarburo se hace extensa a medida que pasa el tiempo simulado en la trayectoria de partículas como se menciona en el numeral 6.3.2.6, se dificultaría en gran medida la aplicación de esta técnica que resulta ser insuficiente para este caso específico.

6.4.2 Oxidación química.

En la tabla 28 se exponen los parámetros a tener en cuenta para la evaluación de oxidación química, como técnica de remediación de suelos y aguas subterráneas contaminados con hidrocarburos.

Tabla 28. Parámetros de evaluación para oxidación química

Parámetro	Descripción
Generalidades	<p>El tratamiento por oxidación química se define como la detoxificación de contaminantes por medio de la transformación química mediante la adición de un agente oxidante.</p> <p>Las moléculas orgánicas son transformadas en CO₂ y H₂O y/o en compuestos intermedios menos tóxicos.</p> <p>Pueden aplicarse a una amplia gama de contaminantes incluyendo COV clorados, mercaptanos, fenoles, y moléculas inorgánicas como cianuro.</p> <p>La oxidación química se puede realizar con agentes reactivos como: dióxido de cloro, peróxido de hidrogeno, permanganato de potasio, ozono, entre otros.</p>
Efectividad y permanencia	<p>El proceso de oxidación química es realmente rápido, generando la destrucción química del contaminante, puesto que agentes oxidantes como el permanganato, peróxido de hidrogeno y reactivo Fenton permanecen en el sitio de recuperación.</p> <p>Se reporta en la literatura que el dióxido de cloro es bastante usado en la eliminación de contaminantes químicos en fase acuosa, el peróxido de hidrogeno oxida fácilmente anillos y compuestos orgánicos, los rayos UV y reactivo Fenton han mostrado que degradan PCB, dioxinas y PAH's.⁴⁶</p>

⁴⁶ GAN, S; et al; Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); Journal of Hazardous Materials 172 (2009) 532–549

Implementabilidad	<p>El tratamiento se realiza ex situ, en tanques mixtos o reactores de flujo pistón. Donde el agua subterránea contaminada se introduce por una zona del tanque y el agua tratada sale por la parte opuesta. El agente oxidante se inyecta al interior del agua y se debe garantizar una mezcla completa del agua y el agente oxidante, mediante agitación mecánica.</p> <p>Para el tratamiento de suelos, estos deben ser excavados y tratados en reactores de forma lechada.</p>
Costos	<p>Los costos de implementación de oxidación química dependen del tipo de agente oxidante empleado, por lo que se dificulta realizar un cálculo aproximado del mismo, sin embargo, en general el rango del costo de tratamiento para aguas subterráneas contaminadas con compuestos orgánicos volátiles (VOC's) son desde US\$30 a US\$200/galón, teniendo en cuenta que los estos varían dependiendo de las características del lugar, contaminantes específicos y por lo anterior la cantidad de agente oxidante requerida. Cabe destacar que los costos en la implementación de esta técnica pueden ser compensados por la disminución del tiempo de tratamiento.⁴⁷</p>
Limitaciones	<p>Algunos de los parámetros limitantes en la aplicación de oxidación química son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Podría resultar difícil bombear adecuadamente los agentes oxidantes en el lugar del tratamiento. • Los agentes oxidantes empleados tienen características corrosivas e inflamables. • Oxidantes como H₂O₂ y O₃ en altas concentraciones pueden suprimir las poblaciones microbianas presentes en el suelo. • La migración de vapores puede ser lenta. • Podría ocurrir desplazamiento de la pluma contaminante localizada. • El uso de peróxido de hidrógeno puede afectar la alcalinidad del agua subterránea. • La oxidación química no es efectiva en suelos con alto contenido de carbono orgánico (>1%) • Notable reacción exotérmica de Fenton y persulfato activado; puede tener riesgo de explosión pero podría resultar en migración de vapor por lo que se debe complementar con la técnica de Soil Vapor Extraction.

Fuente: Autor

⁴⁷Chemical Oxidation; Disponible en Línea; http://www.frtr.gov/matrix2/section4/Chemical_Oxidation.pdf

No sería conveniente el uso de oxidantes fuertes para la eliminación de los hidrocarburos de Campo Palagua, debido a que estos químicos destruirían los microorganismos presentes, evitando un posible proceso de Biorremediación en la zona. Además que se debe tener en cuenta que los agentes oxidantes no son específicos y no reaccionan con cualquier agente reductor y en algunas ocasiones el producto resultante puede llegar a ser aun más tóxico que el residuo inicial.

6.4.3 Air sparging.

En la tabla 29 se muestran los parámetros a tener en cuenta para la evaluación de air sparging en la remediación de suelos y aguas subterráneas.

Tabla 29. Parámetros de evaluación para Air Sparging

Parámetro	Descripción
Generalidades	La técnica consiste en la inyección de aire en el subsuelo, por debajo del nivel freático y bombeando a la superficie a través de pozos de extracción, con el fin de remover contaminantes orgánicos volátiles (COV's) o compuestos orgánicos biodegradables.
Efectividad y permanencia	De acuerdo a la literatura la eficiencia de eliminación del petróleo puede estar entre 40% y 70%, durante un burbujeo continuo por 40 días. ⁴⁸ Debido a los costos se recomienda un sistema de burbujeo intermitente de aire en la zona aumentando la volatilización de los hidrocarburos y Biorremediación.
Implementabilidad	A través de esta técnica se espera el movimiento de los contaminantes volátiles, por lo que es necesario instalar un sistema de recolección y determinar el destino de estos. En algunos casos se ha combinado el air sparging con la extracción de vapores del suelo y su posterior tratamiento, lo cual encarece el sistema. ⁴⁹
Costos	El costo estimado para el uso de air sparging está dado por el tamaño

⁴⁸ WANG ZQ; ET AL; Study on the Groundwater Petroleum Contaminant Remediation by Air Sparging; Huan Jing Ke Xue. 2007 Apr;28(4):754-60; Disponible en Línea; <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17639932>

⁴⁹ EWEIS, Juana; ERGAS, Sarina; CHANG, Daniel; SCHROEDER, Edward; Principios de Biorrecuperación Tratamientos para la Descontaminación y Regeneración de Suelos y Aguas Subterráneas Mediante procesos Biológicos y Físico-Químicos, p 161, 162

	<p>del área, donde para un área pequeña va de US\$84m² de suelo a US\$37m² de suelo y un área mayor de US\$24m² de suelo a US\$27m² de suelo.⁵⁰</p> <p>Para el área afectada en Campo Palagua (aproximadamente 800m²) el costo de implementación de air sparging estaría en el rango de diez y nueve mil doscientos dólares (US\$19.200) y veintiún mil seiscientos dólares (US\$21.600).</p>
<p>Limitaciones</p>	<p>Algunos de los factores limitantes para la implementación de air sparging son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La distribución del aire es muy impredecible a priori y podría resultar una baja eficiencia de remediación. • Un inadecuado control pueden llevar a conclusiones falsas sobre el rendimiento. • Puede presentar problemas de seguridad (migración de vapores indeseados a edificios, conductos, etc). • El rendimiento es mucho más sensible al diseño del sistema que otras tecnologías (SVE, bombeo y tratamiento). • Si se tienen suelos heterogéneos litológicamente pueden quedar zonas sin tratamiento adecuado.

Fuente: Autor

Es importante tener en cuenta que en el área de interés (predio aledaño a la Estación 1 de Campo Palagua) hay poca presencia de COV's, (cuales se eliminan principalmente en esta técnica) ya que el derrame de hidrocarburo ocurrió hace aproximadamente 13 años, por lo tanto este tratamiento no se considera viable, además que los costos de implementación son elevados y no justifican su uso para el área de estudio.

Complementando lo anterior, en la Estación 1 de Campo Palagua se cuenta con la una Tea (chimenea) en la cual se queman los gases provenientes de un tratamiento de aguas residuales producidas en este sitio. El tratamiento por air sparging podría

⁵⁰ Air Sparging; Disponible en Línea; <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-34.html>

generar un peligro debido a los posibles escapes de los COV's poniendo en riesgo la seguridad del lugar.

6.4.4 Soil vapor extraction (SVE).

En la tabla 30 se muestran los parámetros tenidos en cuenta para la aplicación de soil vapor extraction en la remoción de compuestos orgánicos volátiles.

Tabla 30. Parámetros de evaluación para soil vapor extraction

Parámetro	Descripción
Generalidades	SVE es una técnica de aplicación in situ para remover compuestos orgánicos volátiles (COV) y semivolátiles de la zona vadosa del suelo, la cual consiste en la inyección vertical de vapor de agua a través de pozos perforados por encima del nivel freático, en donde se genera un vacío con el fin de forzar el movimiento de los gases y permitir la remoción de hidrocarburos.
Efectividad y permanencia	<p>De acuerdo con experimentos realizados a escala de laboratorio, en suelos secos contaminados con tolueno se encontró eficacia de 97% en 25h, mientras con suelos húmedos de características similares la eficacia fue sólo 72% en 70h.</p> <p>El tratamiento tiene un radio efectivo entre 7 y 45m y profundidad media aproximada de 7m en suelos donde la permeabilidad no supere la conductividad hidráulica ($K= 10E-4$ cm /s.)</p> <p>Se tienen mejores resultados en suelos sueltos no saturados como arena, grava y limo grueso, sin embargo, se ha usado en suelos más densos, conllevando un mayor tiempo de tratamiento.</p> <p>La duración del tratamiento con SVE puede ir desde meses a años, no obstante, se debe tener en cuenta que factores como: el suelo y propiedades de los contaminantes, el tamaño de la zona a tratar, la tasa de intercambio de aire, y una adecuada vigilancia puede afectar la duración del tratamiento.⁵¹</p>

⁵¹ ALBERGARIA, et al; Remediation Efficiency of Vapour Extraction of Sandy Soils Contaminated with Cyclohexane: Influence of Air Flow Rate, Water and Natural Organic Matter Content; Environmental Pollution 143 (2006) pág.: 146-152; disponible en línea; www.sciencedirect.com

Implementabilidad	Los SVE no necesitan reactivos, y emplean personal, equipos y materiales convencionales. La infraestructura necesaria para la implementación consta de varios pozos de extracción de vapor, tuberías que conectan los pozos de extracción con la superficie, vaciómetros, válvulas de control de flujo, pozos de ventilación, entre otros. El sistema debe contar con unidades de tratamiento de gases en la superficie.
Costos	El costo de aplicación in situ de SVE se ve afectado por el tamaño del sitio a tratar, la naturaleza y cantidad de concentración y las características hidrogeológicas de la zona, así como el nivel de vacío requerido, la duración del tratamiento y la necesidad del tratamiento de los gases y el agua extraídos. Teniendo en cuenta lo anterior para un área pequeña el costo de aplicación de SVE se encuentra entre US\$1,275m ² de suelo US\$1,485m ² de suelo, por otro lado para áreas grandes el costo varía desde US\$405m ² de suelo hasta US\$975m ² de suelo dependiendo de la cantidad de arcilla en presente. ⁵² El costo de implementación de esta técnica en el área de interés de Ecopetrol S.A. estaría en un rango de trescientos veinticuatro mil dólares (US\$324.000) aproximadamente.
Limitaciones	Los factores que pueden limitar la aplicación y efectividad de extracción por vapor son: <ul style="list-style-type: none"> • El contenido de agua y materia orgánica en el suelo tienen una influencia negativa en los procesos de remediación, ya que los vuelven menos eficaces, consumen más tiempo y consecuentemente son más costosos. • La aplicación de la técnica está limitada a lugares con suelos de baja permeabilidad, donde los contaminantes tengan bajas presiones de vapor. • El vapor extraído debe ser tratado dependiendo de los contaminantes presentes y su concentración antes de ser liberados a la atmósfera. • El tratamiento de los gases puede incrementar los costos del uso de esta técnica. • Los suelos con gran contenido de finos y altamente saturados requieren mayor vacío, lo cual incrementa los costos y podría obstaculizar el funcionamiento del sistema in situ.

Fuente: Autor.

⁵² Soil Vapor extraction; Disponible en línea; <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-7.html>

La alta permeabilidad que caracteriza el suelo de Campo Palagua resulta ser un limitante para la aplicación de esta técnica. De igual manera como el bajo contenido de los hidrocarburos volátiles presentes en la zona contaminada no ameritan el uso de esta técnica para el área de interés. Además de esta razón se debe considerar que los costos de tratamiento son muy elevados para las condiciones en que se encuentra el área.

6.4.5 Bioventilación.

Esta técnica es muy parecida a Soil Vapor Extraction con la diferencia, que esta vez se está aplicado en la zona vadosa el aire, en cambio en la otra técnica se inyecta el vapor por encima del nivel freático. Además en esta técnica el flujo de aire es menos intenso con el propósito de dejar oxígeno disponible para los microorganismos y de esta manera estimular el proceso natural de Biorremediación, con lo cual se logra una eliminación de los contaminantes menos volátiles.

En la tabla 31 se exponen los parámetros establecidos para la evaluación de la técnica.

Tabla 31. Parámetros de evaluación para Bioventilación

Parámetro	Descripción
Generalidades	Bioventilación es una técnica empleada para tratamientos de contaminantes menos volátiles en la zona vadosa, en donde la transformación y degradación de los contaminantes se llevan a cabo in situ. Ésta tecnología estimula la biodegradación natural puesto que proporciona oxígeno a los microorganismos existentes en el suelo y agua subterránea.
Efectividad y permanencia	Estudios han demostrado que después de 3 y 7 meses de tratamiento con Bioventilación puede disminuir la concentración de hidrocarburos poliaromáticos como fenantreno de 55 ± 2 a $93\pm 4\%$, sin embargo, puede incrementar la toxicidad en plantas y organismos acuáticos. ⁵³

⁵³ GARCÍA Frutos, Javier; ESCOLANO, Olga; GARCÍA, Susana; BABÍN, Mar y FERNÁNDEZ Dolores; Bioventing Remediation and Ecotoxicity Evaluation of Phenanthrene – Contaminated Soil; Journal of Hazardous Materials 183 (2010) 806–813; Disponible en línea; <http://www.sciencedirect.com>

	<p>Magalhães et al., han demostrado que el uso de inyección de aire en bioventilación es eficaz en el tratamiento de suelos contaminados con tolueno, puesto que promueve una elevada eliminación del contaminante (hasta 99%), sin embargo cuenta con una desventaja de que altos porcentajes de Carbono Orgánico Volátil requieren de un sistema de tratamiento de gases.⁵⁴</p>
Implementabilidad	<p>Se basa en la extracción de vapores del suelo mediante una diferencia de presión generada por el bombeo de aire desde el exterior. Se aplica en suelos no saturados contaminados con hidrocarburos. La infraestructura necesaria es igual a la empleada en SVE, la variable radica en que se aplica aire y su caudal debe ser moderado para que ocurra biodegradación. Los gases generados deben ser tratados en sistemas ex situ, por ejemplo, haciéndolos pasar por filtros.</p> <p>Esta técnica de remediación no requiere de equipos costosos y demanda relativamente poco personal de operación y mantenimiento, sin embargo se necesita de un seguimiento periódico.</p>
Costos	<p>Los factores que pueden afectar el costo de aplicación de bioventilación incluyen el tipo y concentración de contaminantes, la permeabilidad del suelo, la porosidad, la tasa de bombeo y tratamiento de gases residuales.</p> <p>Teniendo en cuenta lo anterior el costo de implementación de un sistema de Bioventing puede variar entre US\$109m² y US\$979m² de suelo.⁵⁵</p> <p>El costo total de ejecución de Bioventing para el área afectada de Campo Palagua (aproximadamente 800m²) varía entre ochenta y siete mil doscientos dólares (US\$87.200) y setecientos ochenta y tres mil doscientos dólares (US\$783.200).</p>
Limitaciones	<p>Los factores que pueden limitar la aplicabilidad y la efectividad del proceso incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • No tiene aplicación para la recuperación de contaminantes en Fase Líquida No Acuosa (FLNA).

⁵⁴ Magalhães et al.; Investigations into the Application of a Combination of Bioventing and Biotrickling Filter Technologies for Soil Decontamination Processes – a Transition Regime Between Bioventing and Soil Vapour Extraction; Journal of Hazardous Materials 170 (2009) 711–715; Disponible en línea: <http://www.sciencedirect.com/>

⁵⁵ Bioventing; Disponible en Línea; http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_1.html

	<ul style="list-style-type: none"> • La pérdida de nutrientes necesarios para la vida microbiana, bajo contenido de humedad del suelo y dificultad en la circulación del aire a través del suelo. • Mantener el contenido de humedad del suelo cercano a la capacidad de campo. • Puede requerir de un seguimiento de los gases en la superficie del suelo. • Si se tienen compuestos clorados, la biodegradación anaeróbica podría no ser eficaz, a menos que se tenga un ciclo anaeróbico. • Bajas temperaturas pueden retardar la remediación.
--	--

Fuente: Autor

Al analizar el costo beneficio de esta tecnología, en cuanto a la aplicabilidad en Campo Palagua, se debe tener en cuenta que en esta zona la cantidad de los compuestos volátiles no se considera tan elevada, como para aplicar la técnica que se orienta para la eliminación de estos compuestos. Por otro lado los costos son muy elevados por la necesidad de implementar un tratamiento de los gases. Por estas razones no se recomienda su implementación en el predio aledaño a la Estación 1.

6.4.6 Atenuación natural monitoreada.

A continuación en la tabla 32 se muestran los parámetros considerados para la evaluación de atenuación natural monitoreada en remediación de suelos y aguas contaminadas con hidrocarburos.

Tabla 32. Parámetros de evaluación de Atenuación Natural Monitoreada

Parámetro	Descripción
Generalidades	Atenuación natural monitoreada es una técnica de remediación basada en el aprovechamiento y potenciación de los procesos naturales para eliminar o reducir la contaminación en los suelos y las aguas subterráneas.
Efectividad y permanencia	Estudios realizados por Sarkar et al, demostraron que la atenuación natural monitoreada pueden degradar hasta 94% de la contaminación de TPH en suelos, comparada con la bioestimulación por adición de biosólidos y modificación de fertilizantes al suelo contaminado por

	<p>hidrocarburos que puede degradar más del 96% de la concentración original.⁵⁶</p> <p>Por otro lado la reducción de la toxicidad por uso del tratamiento varía dependiendo si el proceso potencializado es de carácter destructivo (físicos y químicos) o no destructivo (Biorremediación).</p>
Implementabilidad	<p>La ejecución, mantenimiento y control del tratamiento depende principalmente del proceso empleado, es decir si se utiliza volatilización o mezcla y dilución como procesos físicos, sorción o intercambio iónico como procesos químicos o Biorremediación.</p>
Costos	<p>Atenuación natural monitoreada es una alternativa rentable, puesto que conlleva pocos gastos distintos a los de vigilancia y el tiempo requerido para que se lleven a cabo los procesos naturales⁵⁷. Además ésta técnica no requiere de excavación ni construcción de unidades de tratamiento o equipos especializados.⁵⁸</p> <p>Debido a la amplia gama de posibilidades de tratamientos el costo puede variar dependiendo del proceso que emplee.</p>
Limitaciones	<p>Algunos de los factores limitantes para la implementación de atenuación natural monitoreada son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tipo y concentración del contaminante. • Disponibilidad de nutrientes. • Duración del tratamiento. • Proximidad de la pluma contaminante.

Fuente: Autor

A pesar de un tiempo prolongado en la aplicación de atenuación natural, este tratamiento se considera muy conveniente como una técnica de remediación aplicada para las condiciones actuales de campo Palagua, esto es por las altas remociones de TPH que se pueden obtener (94% a 96%) y los bajos costos que implica su ejecución

⁵⁶ SARKAR, et al; Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons in Contaminated Soils: Comparison of Biosolids Addition, Carbon Supplementation, and Monitored Natural Attenuation; Environmental Pollution 136 (2005) pág.:187e195; [en línea]; <http://www.sciencedirect.com/>

⁵⁷ R. MARGESIN y F. SCHINNER; Bioremediation (Natural Attenuation and Biostimulation) of Diesel-Oil-Contaminated Soil in an Alpine Glacier Skiing Area; APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY,; July 2001, pág.: 3127–3133; [en línea]; <http://aem.asm.org/cgi/reprint/67/7/3127.pdf>

⁵⁸ 10. Restauración y Remediación de Suelos III: Suelos y Aguas Subterráneas; [Consulta: 13-07-09]; Disponible en: <http://www.uclm.es/users/higueras/mam/MMAM10.htm>

empleando biorremediación. Esta técnica permite una previa recombinación de tratamientos físicos, como el lavado del suelo, que atenúa las condiciones de estrés para el desarrollo de los microorganismos como por ejemplo las altas concentraciones de TPH.

6.4.7 Barreras reactivas permeables (BRP).

En la tabla 33 se muestran los parámetros de evaluación para la implementación de barreras reactivas permeables como tratamiento de remediación de aguas subterráneas contaminadas con hidrocarburos.

Tabla 33. Parámetros de evaluación de BRP

Parámetro	Descripción
Generalidades	Esta técnica se aplica in situ para descontaminación de aguas subterráneas y consiste en la intercepción del paso del agua para eliminar los contaminantes presentes en ella.
Efectividad y permanencia	La permanencia del tratamiento por medio de BRP de aguas subterráneas contaminadas puede verse limitada por cambios físicos, en las barreras o medios reactivos, tales como obstrucción por minerales acumulados o desarrollo de canales de flujo preferencial, cuales pueden afectar el objetivo del tratamiento. ⁵⁹ El uso de barreras reactivas permeables ha mostrado porcentajes de eficiencia de remoción entre (46.7% a 99.6%) para metales pesados como Cr, Ni, Pb, Mn, Se, Co, Cu, Cd, Zn, entre otros. ⁶⁰ Por otro lado, el tratamiento de aguas subterráneas por medio de barreras reactivas permeables permite la destrucción total del contaminante por medio de reacciones con el medio reactivo. El hierro por ejemplo transforma las sustancias químicas dañinas en inofensivas, la caliza precipita las sustancias químicas disueltas en el agua, el carbón activado atrapa las sustancias químicas en su superficie y los nutrientes y oxígeno estimulan los microorganismos

⁵⁹ Blowes, et al; Treatment of Inorganic Contaminants using Permeable Reactive Barriers; Journal of Contaminant Hydrology 45 (2000) Pág.: 123–137; Disponible en línea; <http://www.sciencedirect.com/>

⁶⁰ JUN, et al; Laboratory Study on Sequenced Permeable Reactive Barrier remediation for Landfill Leachate-Contaminated groundwater; Journal of Hazardous Materials 161 (2009) Pág.: 224–230; Disponible en línea: <http://www.sciencedirect.com>

	<p>del suelo para que se alimenten de las sustancias químicas.</p> <p>En el caso específico del hierro, éste reacciona con el agua (en ausencia de oxígeno) y genera H₂, el cual contribuye a la formación de ácido carbónico y bicarbonato como soluciones buffer, para finalmente formar precipitados de CaCO₃, FeCO₃ o hidrocarbonatos de magnesio.</p>
Implementabilidad	<p>La construcción de barreras reactivas permeables se hace mediante la excavación de una zanja larga estrecha que intercepte el camino de la pluma contaminante. Ésta zanja se llena de un material reactivo capaz de eliminar las sustancias químicas presentes, mezclándolo con arena para facilitar el flujo del agua subterránea a través de la barrera.</p>
Costos	<p>Los costos de implementación de BRP se dan de acuerdo a la relación peso por área, donde se tiene que para barreras tipo embudo el costo es de US\$269.25/m² y para barreras tipo pared el costo es de US\$1,200/m².⁶¹</p> <p>El costo de implementación de barreras reactivas tipo embudo para el área afectada en campo Palagua sería aproximadamente de doscientos quince mil cuatrocientos dólares (US\$215.400) y para barreras tipo pared sería de novecientos sesenta mil dólares (US\$960.000).</p>
Limitaciones	<p>Algunos de los factores que limitan la implementación de barreras reactivas permeables para remediación de aguas subterráneas contaminadas con hidrocarburos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alta concentración de contaminantes en el agua subterránea. • Necesita un estudio hidrogeológico completo del suelo. • Es necesario un monitoreo de concentración del contaminante a tratar.

Fuente: Autor

Desde el año 1997 cuando se generó el derrame de hidrocarburo en Campo Palagua, el contaminante inició la trayectoria en suelo de la Estación 1 hacia el predio aledaño abarcando un área extensa (aproximadamente 800m²). Esto dificultaría la implementación de una barrera reactiva permeable y aumentaría de manera significativa los costos de tratamiento. Al comparar el costo beneficio de esta técnica con la de lavado del suelo, es más conveniente la última, por las condiciones de

⁶¹ Environmental Protection Agency (EPA); Permeable reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation; Disponible en Línea; <http://www.clu-in.org/download/rtdf/prb/reactbar.pdf>

terreno, la trayectoria de la pluma contaminante y el valor elevado de la implementación de la tecnología.

6.4.8 Flushing in situ (lavado del suelo).

A continuación en la tabla 34 se exponen los parámetros de evaluación del lavado del suelo como alternativa de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

Tabla 34. Parámetros para evaluación de lavado del suelo

Parámetro	Descripción
Generalidades	Lavado del suelo es una técnica basada en la inyección de compuestos químicos como surfactantes y alcoholes que interactúan con el contaminante, disolviéndolo, para posteriormente bombear a superficie a través de pozos de extracción, ⁶² con el objetivo de separar las partículas finas y las gruesas con mayor y menor grado de contaminación.
Efectividad	Estudios a escala de laboratorio han demostrado que una mezcla de 5% de 1-pentanol y de etanol en agua al 85% en el proceso de lavado con un tiempo de contacto de 1h, es capaz de eliminar más del 95% de hidrocarburos aromáticos policíclicos extraíbles. ⁶³ De esta misma forma la mezcla 3:1 de ciclohexano y etanol resultó ser el solvente adecuado para remover fluoranteno (hidrocarburo aromático policíclico) con una eficiencia aproximada de 93%. ⁶⁴ Por otro lado, se debe tener en cuenta que los contaminantes no son destruidos, ya que el lavado se realiza con surfactantes y su principal aplicación es como agentes humectantes, solubilizadores, desincrustantes, emulsificantes y dispersantes.
Implementabilidad	La remediación de suelos contaminados por medio de lavado se realiza inyectando surfactantes o alcoholes en los pozos de monitoreo

⁶² EWEIS, Juana; ERGAS, Sarina; CHANG, Daniel; SCHROEDER, Edward; Principios de Biorrecuperación Tratamientos para la Descontaminación y Regeneración de Suelos y Aguas Subterráneas Mediante procesos Biológicos y Físico-Químicos, p 237

⁶³ GAN, et al; Remediation of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs); Journal of Hazardous Materials 172 (2009) Pág.: 532–549; Disponible en línea: www.sciencedirect.com

⁶⁴ *Ibíd*; Pág.:535

	<p>existentes, para posteriormente bombear el contaminante disuelto a través de los pozos de extracción. De igual manera se utilizan diferentes productos comerciales disueltos en agua aplicados en la superficie contaminada del terreno.</p>
Costos	<p>De acuerdo a aplicaciones de lavado de un suelos contaminados con hidrocarburos, realizadas en una refinería en México se trató un volumen de suelo de 41.6m³ correspondiente a un área de 38m², en donde un cálculo aproximado de los costes totales del proceso se estimó en \$104.20/m³ pesos mexicanos, correspondientes a \$114.00/m² de suelo pesos mexicanos .⁶⁵</p> <p>El costo total en pesos colombianos para la aplicación de lavado del suelo en Campo Palagua (área afectada aproximadamente 800m²) sería de quince millones setecientos sesenta y dos mil quinientos cincuenta y dos pesos con treinta y siete centavos (\$15.762.552,37).</p>
Limitaciones	<p>Los factores que pueden limitar la aplicabilidad y la efectividad del proceso incluyen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Presencia de mezclas complejas de contaminantes. • Alto contenido de materia orgánica en el suelo requiere de un tratamiento previo al lavado. • Puede necesitar de tratamientos adicionales para los residuos del tratamiento. • Puede tener dificultad en la eliminación de compuestos orgánicos adsorbidos en partículas del tamaño de arcillas. • Pocas zonas permeables en el terreno a remediar. • Presencia de NAPLs residual o movable. • Compuestos contaminantes fuertemente absorbidos en el terreno. • Resistencia a transferencia de masa. • Geología heterogénea, que desvíe el flujo del contaminante alrededor de las zonas contaminadas.

Fuente: Autor

El lavado de suelo por medio de surfactantes permite liberar los hidrocarburos adheridos al suelo haciéndolos disponibles para el proceso de biodegradación por los

⁶⁵ ITURBE, Rosario; FLORES, Carlos; CHAVEZ, Claudia; RAMIREZ, Adriana y TORRES, G Luis; *In Situ Flushing of Contaminated Soils From a Refinery: Organic Compounds and Metal Removals; Remediation the journal of environmental cleanup costs, technologies and techniques; Volume 14; Pages: 141 – 152; 2004; [en línea]; <http://onlinelibrary.wiley.com/>*

microorganismos. El lavado con surfactantes deja además una ventaja adicional para el caso de la biodegradación de los suelos, que presenta la Estación 1 y el predio aledaño en Campo Palagua, de mejorar su baja humedad, optimizando de esta manera las condiciones para el desarrollo de los microorganismos nativos. Comparando el costo beneficio de esta técnica con las demás, se recomienda su aplicación para la remediación de la contaminación en el área de estudio.

6.4.9 Stripping por aire.

A continuación en la tabla 35 se muestran los parámetros de evaluación para la implementación de stripping por aire para remediación de aguas subterráneas contaminadas con hidrocarburos.

Tabla 35. Parámetros de evaluación de Stripping por aire

Parámetro	Descripción
Generalidades	Stripping por aire es una técnica ex situ comúnmente empleada para el tratamiento de agua subterránea y residual contaminada con COV (solventes) reduciéndolos a concentraciones muy bajas. Se basa en el cambio de fase líquida del compuesto contaminante a fase gaseosa mediante el paso de vapor a contracorriente a través del agua.
Efectividad y permanencia	El uso de torres de 4 a 6 metros de embalaje convencional puede llegar a tener eficiencias de remoción alrededor de un 99% además de la eliminación de los compuestos susceptibles de extracción. Estas eficiencias se pueden mejorar mediante la adición de un segundo separador de aire en serie con el primero, calentando el agua contaminada, o cambiando el material de embalaje. Los valores típicos de reducción de los contaminantes están entre 90% y 99% en un tiempo de contacto de 9 a 15 meses, sin embargo, se debe tener en cuenta que el proceso es especialmente adecuado cuando se tienen bajas concentraciones de contaminantes (< 200 mg /l). ⁶⁶
Implementabilidad	El proceso consiste en formar un flujo a contracorriente del agua y aire

⁶⁶ LIHUÉ ingeniería; Tecnologías de Remediación; División Consultoría y Obras Ambientales; disponible en línea; <http://www.eco2site.com/informes/lihue.asp>

	<p>a través de un material de empaquetamiento (estructuras de plástico o cerámicas), que proporciona un área superficial alta para la transferencia de los compuestos orgánicos volátiles desde la fase líquida a la de aire.</p> <p>El stripping por aire se puede llevar a cabo usando torres de empaquetamiento (para aguas subterráneas), torres de bandeja, sistemas en spray, aireación difusa o mecánica.</p>
Costos	<p>El costo estimado de operación para el uso de air stripping está dado por el tamaño del área y la complejidad del tratamiento, donde para un área pequeña va de US \$23 a US \$34 por 10.000 galones de agua y un área mayor de US \$4 a US \$5 por 10.000 galones de agua, sin considerar los costos de arranque del sistema (bombeo, tratamiento de gases), mas sin embargo, los costos de acondicionamiento llegan a estar entre US\$105.975 y US\$571.061⁶⁷</p> <p>La técnica se limita para remediación de agua contaminada por consiguiente el costo varia dependiendo del volumen de ésta a tratar en Campo Palagua.</p>
Limitaciones	<p>Los sistemas de stripping por aire están limitados a concentraciones de COV bajas (< 300 mg /l) y compuestos no volátiles (H' < 0.01) no pueden ser eliminados con esta técnica.</p>

Fuente: Autor

La técnica se enfoca a la eliminación de los compuestos volátiles del agua subterránea contaminada, la cual se debe bombear para pasar por una torre con un material de empaquetamiento y flujo de aire a contracorriente que arrastra los CVO a posterior sistema de tratamiento. En Campo Palagua el problema no se limita solamente a tratamiento de agua subterránea sino también el suelo la técnica resulta ser insuficiente para la solución completa en el área.

⁶⁷ Air Stripping; Disponible en línea: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-46.html>

6.4.10 Adsorción por carbón activado.

En la tabla 36 se presentan los parámetros analizados para la evaluación de adsorción por carbón activado como técnica de remediación de aguas subterráneas contaminadas.

Tabla 36. Parámetros de evaluación de adsorción por carbón activado

Parámetro	Descripción
Generalidades	Es una técnica de tratamiento de aguas subterráneas contaminadas, en donde el contaminante poco soluble se remueve del agua mediante el contacto con la superficie sólida del carbón activado.
Efectividad	El uso de adsorción por carbón activado puede alcanzar eficiencias de remoción de contaminantes de 95%. La duración de este tratamiento depende del tipo de compuesto que se elimina (compuestos de alto peso molecular y baja solubilidad son mejor adsorbidos), de la concentración del contaminante (a mayor concentración del contaminante mayor es el consumo de carbón activado), de la presencia de otros compuestos orgánicos (competencia por los lugares de adsorción disponibles) y pH altos. ⁶⁸
Implementabilidad	Los sistemas de adsorción por carbón son columnas de flujo continuo dispuestas en serie, por lo que la columna final tiene un efecto de unidad de refinado, usando el carbón activo como adsorbente para eliminar del agua, contaminantes poco solubles por contacto con la superficie sólida. En estas columnas el agua ingresa por la parte superior, entra en contacto con el carbón activado y sale a través de un sistema de desagüe por la parte inferior. ⁶⁹
Costos	Los costos de implementación de esta técnica dependen de la cantidad de carbón consumido, es decir, si se desea tratar 2.83m ³ por minuto, el sistema podría requerir de 1.86m ² de área y un costo aproximado de Dos mil dólares (US\$2000) a tres mil dólares (US\$3000). ⁷⁰

⁶⁸ Water Treatment Solutions LENNTECH; Activated Carbon Adsorption; Disponible en línea; <http://www.lenntech.com/library/adsorption/adsorption.htm>

⁶⁹ ANDROMALOS, Ken; SARUBBI; Alejandro; Curso Latinoamericano de especialización en Técnicas de remediación Ambiental, Tema 7; Tratamientos Físico Químicos; Disponible en Línea: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/remediacion/tema07.pdf>

⁷⁰ SHEPHERD, Austin; Activated Carbon Adsorption for Treatment of VOC Emissions; (2001); Disponible en línea; <http://www.carbtrol.com/voc.pdf>

	En caso Palagua el costo total dependería del volumen de agua a tratar.
Limitaciones	<p>Los factores limitantes en el uso de carbón activado para remediación de aguas subterráneas contaminadas son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Valores altos de pH dificultan la adsorción del contaminante. • Partículas con alto peso molecular del contaminante, baja presión de vapor y alto punto de ebullición son mejor adsorbidos. • Alta concentración del contaminante. • Temperatura (a menor temperatura mayor es la capacidad de adsorción). • Presión (a mayor presión, mayor capacidad de adsorción) • Humedad (a menor contenido de humedad, mayor es la capacidad de adsorción).⁷¹

Fuente: Autor

La técnica presenta una limitación muy importante que es necesidad de constante renovación de carbón activado y la disposición final del material reemplazado. Junto con el costo de la implementación de esta técnica, que representa un valor muy elevado, no se considera viable el uso de este tratamiento para el caso de Campo Palagua.

⁷¹ Water Treatment Solutions LENNTECH; Activated Carbon Adsorption; Disponible en línea; <http://www.lennotech.com/library/adsorption/adsorption.htm>

7. CONCLUSIONES

- La caracterización química realizada por el Laboratorio del Instituto Colombiano del Petróleo al agua subterránea analizada en los puntos de monitoreo de la Estación 1 de Campo Palagua y predio aledaño contiene metales como el Bario, Plomo, Cromo hexavalente y Cadmio, que superan el límite permitido por el Decreto 1594 de 1984 para aguas de uso potable, sin embargo, se debe tener en cuenta que el uso de estas aguas no es potable. No obstante se debe tener un especial cuidado con la presencia de estos metales debido a su alta toxicidad para el hombre y el medio ambiente.
- En el área de estudio se evidenció la presencia de fenoles y metales en el agua subterránea, lo cual se relacionó con la contaminación causada a partir del derrame ocurrido en el año 1997. Esto dejó una especial preocupación por la alta toxicidad que caracteriza a los compuestos encontrados, ya que las mayores concentraciones se encuentran en el predio aledaño a la Estación 1, en donde se llevan a cabo labores de agricultura y ganadería.
- Se encontró gran diferencia en valores de conductividad eléctrica (487 micromhos/cm en PM-10 y 13630 micromhos/cm en PM-18), relacionada con el contenido de sólidos disueltos (347 mg/L en PM-10 y 6871 mg/L en PM-18) y cloruros presentes en el agua subterránea entre los pozos de la Estación 1 (PM-10) y predio aledaño (PM-18 y PM-19) como resultado del movimiento del agua hacia las partes bajas del terreno (predio aledaño) y la actividad ganadera que se establece en esta zona.
- Los análisis físico químicos realizados a los suelos de la Estación 1, donde no había presencia de hidrocarburo y predio aledaño (muestra con hidrocarburo remanente) señalaron características semejantes, que permitieron clasificarlos

como arenosos, lo cual coincide con la alta permeabilidad y rápida infiltración verificados en campo, junto con baja densidad relativa, baja retención de humedad, y estructura granular, lo cual indicó que estas dos muestras de suelo se pueden denominar como intercambiadores catiónicos, además de presentar adecuada disponibilidad de nutrientes. Estas propiedades de los suelos de la Estación 1 y predio aledaño favorecen en gran medida la posibilidad de implementar satisfactoriamente un sistema de remediación planteado en este proyecto.

- La determinación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) en las dos muestras de suelo (Estación 1 y predio aledaño), mostraron una mayor concentración en los suelos del predio aledaño, debido al desplazamiento de hidrocarburo a partir del derrame ocurrido en 1997, superando los límites genéricos basados en riesgo del Ministerio de Medio Ambiente para suelos de uso agrícola.
- La modelación del flujo de aguas subterráneas y trayectoria de partículas que representa una pluma contaminante simularon un comportamiento esperado, según los modelos realizados en los años 2008 y 2009, en donde la dirección de flujo es Noroeste a Suroeste coincidiendo con la topografía del área de estudio y la trayectoria de partículas contaminantes en dirección Suroeste pero con la velocidad del desplazamiento de flujo mucho mayor que en los modelos anteriores.
- Se planteó la alternativa de remediación del agua subterránea y el suelo contaminado con hidrocarburo del predio aledaño a la Estación 1 de Campo Palagua, que consiste en un lavado inicial del suelo por medio de un surfactante con el fin de lograr la separación de los hidrocarburos adheridos a las partículas de suelo, haciéndolos disponibles para los microorganismos presentes. Además esta técnica aporta humedad necesaria al suelo que optimiza las condiciones para realizar una posterior Biorremediación con los microorganismos nativos.

8. RECOMENDACIONES

- Considerando la presencia de hidrocarburo en la superficie del predio aledaño a la Estación 1, donde se lleva a cabo actividad ganadera, se recomienda realizar un tratamiento en el menor tiempo posible aprovechando las condiciones naturales del suelo con baja retención de humedad, textura arenosa y rápida permeabilidad, para aplicar un sistema de lavado de suelo con surfactante seguido por la Biorremediación.
- Realizar caracterización microbiológica del suelo antes del tratamiento y el cambio en las comunidades de microorganismos nativos después de aplicar el lavado al suelo para continuar eficazmente con la Biorremediación.
- Se recomienda realizar un nuevo modelo utilizando el software Visual Modflow después del tratamiento de remediación para verificar el cambio en el desplazamiento de la pluma contaminante remanente.
- Continuar con seguimiento en los pozos de monitoreo para el control de niveles estáticos, detección de presencia de hidrocarburo, e inspección de sistema de tratamiento de remediación aplicado.
- Debido a la predicción del desplazamiento de las partículas en el PM-19 obtenido en el modelo actual, al lado derecho de la zanja de intercepción en dirección a la Ciénaga Palagua, se sugiere la construcción de un nuevo pozo de monitoreo que pueda interceptar el contaminante y efectuar un control de la presencia de este.
- Se recomienda realizar monitoreos de suelo y agua subterránea a mayores profundidades y caracterización del tipo de hidrocarburo presente en el predio aledaño, teniendo en cuenta la variabilidad de sus componentes, con el fin de verificar el comportamiento del producto a través del tiempo y el cambio en la concentración de los metales encontrados.

9. BIBLIOGRAFÍA

ALBERGARIA, et al; Remediation Efficiency of Vapour Extraction of Sandy Soils Contaminated with Cyclohexane: Influence of Air Flow Rate, Water and Natural Organic Matter Content; Environmental Pollution 143 (2006) pág.: 146-152; disponible en línea; www.sciencedirect.com

Alcaldía de Puerto Boyacá; Información General Puerto Boyacá; Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:MunsBoyaca_Puerto_Boyaca.png#filehistory

ANDROMALOS, Ken; SARUBBI; Alejandro; Curso Latinoamericano de especialización en Técnicas de remediación Ambiental, Tema 7; Tratamientos Físico Químicos; Disponible en Línea: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/remediacion/tema07.pdf>

BARCELONA, Michael y ROBBINS, Gary; Soil and Groundwater Pollution; [Consulta: 30/10/09]; [En Línea]; <http://www.sciencedirect.com>

BOHÓRQUEZ Saval, Susana; La Reparación del Daño. Aspectos Técnicos: Remediación y Restauración; [Consulta : 30/04/09]; [En Línea]; 1997; Pág.: 123 – 137; <http://www.bibliojuridica.org/libros/1/141/9.pdf>

BRISSIO, Pedro; Evaluación Preliminar del Estado de Contaminación en Suelos de la Provincia de Neuquén donde se Efectúan Actividades de Exploración Hidrocarbonífera; [En Línea]; <http://www.tesis.bioetica.org/pab7.htm>; [citado: 29 de enero de 2010]

COLE, Mattney G; Assessment and Remediation of Petroleum Contaminated Sites; Lewis Publishers; 1994; by CRC Press, Inc.

D. Sarkar, M. Ferguson, R. Datta, y S. Birnbaum, Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons in Contaminated Soils: Comparison of Biosolids Addition, Carbon Supplementation, and Monitored Natural Attenuation, Environmental Pollution 136, 2005, pp. 187 – 195, Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/>

D.W. Blowes, C.J. Ptacek, S.G. Benner, W.T. McRae, T. Bennett y R. Puls, Treatment of Inorganic Contaminants using Permeable Reactive Barriers, *Journal of Contaminant Hydrology* 45, 2000, pp. 123–137, Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/>

D. Jun, Z. Yongsheng, Z. Weihong, y H. Mei, Laboratory Study on Sequenced Permeable Reactive Barrier remediation for Landfill Leachate-Contaminated groundwater, *Journal of Hazardous Materials* 161, 2009, pp. 224–230, Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>

Environmental Protection Agency (EPA); Permeable reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation; Disponible en: <http://www.clu-in.org/download/rtdf/prb/reactbar.pdf>

ESCALLON Ortiz, Miguel Ángel (compilador); Código Nacional de Recursos Naturales - Anotado; Editorial Leyer; Edición 20; 2010.

EWEIS, Juana; ERGAS, Sarina; CHANG, Daniel; SCHROEDER, Edward; Principios de Biorrecuperación Tratamientos para la Descontaminación y Regeneración de Suelos y Aguas Subterráneas Mediante Procesos Biológicos y Físico-Químicos; 1999; p 27, 29, 151 – 162, 169, 237, 238

Federal Remediation Technologies Roundtable; Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide (FRTR), Version 4.0; Disponible en: <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-46.html>

Federal Remediation Technologies Roundtable; Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide (FRTR); Chemical Oxidation; Disponible en Línea; http://www.frtr.gov/matrix2/section4/Chemical_Oxidation.pdf

Federal Remediation Technologies Roundtable; Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide (FRTR); Air Sparging; Disponible en Línea; <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-34.html>

Federal Remediation Technologies Roundtable; Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide (FRTR); Soil Vapor extraction; Disponible en línea; <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-7.html>

Federal Remediation Technologies Roundtable; Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide (FRTR); Bioventing; Disponible en Línea; http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4_1.html

Federal Remediation Technologies Roundtable; Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide (FRTR); Air Stripping; Disponible en línea; <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-46.html>

HARRISON, Roy M; El Medio Ambiente: Introducción a la Química Medioambiental y a la Contaminación; España; Editorial Acirbia S.A.; 2003

HERNÁNDEZ, Diana; PLAZA, Cesar; POLO, Alfredo; Consideraciones Generales Sobre la Contaminación y Restauración de Suelos; Revista Residuos; Año XII, No. 67; Julio – Agosto 2002; Pág.: 126 - 134

HIGUERAS, Pablo; OYARZUN, Roberto; Restauración y Remediación de Suelos III: Suelos y Aguas Subterráneas; Curso de Minería y Medio Ambiente; [Consulta: 13-07-09]; [En Línea]; <http://www.uclm.es/users/higueras/mam/MMAM10.htm>

HINCHER, Robert E; MILLER, Ross N; JHONSON, Paul C; In Situ Airation Air Sparging, Biovening and Related Remediation Processes; Battelle Memorial Institute; 1995

IBARRA, Diana; Evaluación del Potencial de Biodegradación de Hidrocarburos Totales en Suelos Contaminados Procedentes de PetroSantander (Colombia) INC. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana-Seccional Bucaramanga. Facultad de Ingeniería Ambiental, 2008; 51 – 53p.

Instituto Tecnológico Geominero de España; Contaminación y Depuración de Suelos; 1995; pág.: 126

ITURBE, Rosario; FLORES, Carlos; CHAVEZ, Claudia; RAMIREZ, Adriana y TORRES, G Luis; *In Situ* Flushing of Contaminated Soils From a Refinery: Organic Compounds and Metal Removals; Remediation the journal of environmental cleanup costs, technologies and techniques; Volume 14; Pages: 141 – 152; 2004; Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/>

GARCÍA Frutos, Javier; ESCOLANO, Olga; GARCÍA, Susana; BABÍN, Mar y FERNÁNDEZ Dolores; Bioventing Remediation and Ecotoxicity Evaluation of Phenanthrene – Contaminated Soil, Journal of Hazardous Materials 183, 2010, pp. 806–813, Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>

LAGREGA, Michael; BUCKINGHAM, Phillip; EVANS, Jeffrey; Gestión de Residuos Tóxicos: Tratamiento, Eliminación y Recuperación de Suelos; Volumen I; McGraw Hill; 1996; Pág.: 208, 209, 523, 524, 555 – 558, 588, 589,

LIHUÉ ingeniería; Tecnologías de Remediación; División Consultoría y Obras Ambientales; disponible en línea; <http://www.eco2site.com/informes/lihue.asp>

OBREGON Farfán; Adriana Milena; Informe de Actividades de Recuperación de Aguas Subterráneas en Campo Palagua; Instituto Colombiano del Petróleo (ICP); 2009; pág.: 3 – 5

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; anual Técnico para la Ejecución de Análisis de riesgos para Sitios de Distribución de Derivados de Hidrocarburos; Abril 2008.

MUSKUS, María Angélica; Manual de Laboratorio de Análisis de Suelos; Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga; 2001; pág.: 23, 24, 25, 27, 28, 30, 32, 33, 36, 37, 39, 41, 43, 71, 74

PEDERSON, Tom A; CURTIS Jaimes, T; Soil Vapor Extraction Technology; Cambridge Massachusets; Noyes Data Corporation; 1991

PELLINI, Leandro; Biorremediación Estimulada por Efluentes Cloacales Tratados de Suelos Contaminados con Hidrocarburos; [Consulta: 29/01/10]; Disponible en internet: <http://www.tesis.bioetica.org/lp.htm>

POLANCO DE HURTADO, Margarita; Mecánica de Suelos; Popayan; Universidad del Cauca; 1998; Pág.: 31

Restauración y Remediación de Suelos III: Suelos y Aguas Subterráneas; [Consulta: 13-07-09]; Disponible en: <http://www.uclm.es/users/higueras/mam/MMAM10.htm>

R. MARGESIN y F. SCHINNER; Bioremediation (Natural Attenuation and Biostimulation) of Diesel-Oil-Contaminated Soil in an Alpine Glacier Skiing Area; APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY,; July 2001, pág.: 3127–3133; [en línea]; <http://aem.asm.org/cgi/reprint/67/7/3127.pdf>

Schlumberger Water Service; Visual ModFlow Premium Demo Tutorial.

SEOÁNEZ Calvo, Mariano; Contaminación del Suelo: Estudios, Tratamiento y Gestión; 1999 p. 53, 93, 143

SHEPHERD, Austin; Activated Carbon Adsorption for Treatment of VOC Emissions; (2001); Disponible en línea; <http://www.carbtrol.com/voc.pdf>

SIAM S.A.; Evaluación Hidrogeológica de la Batería 1 de Campo Palagua; 2007

S. Gan, E.V. Lau, H.K. Ng, Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), Journal of Hazardous Materials 172, 2009, pp 532–549, Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>

S.M.C. Magalhães, R.M. Ferreira, y P.M.L. Castro, Investigations into the Application of a Combination of Bioventing and Biotrickling Filter Technologies for Soil Decontamination Processes – a Transition Regime Between Bioventing and Soil Vapour Extraction, Journal of Hazardous Materials 170, 2009, pp. 711–715, Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/>

United States Department of Agriculture (USDA); Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo; [Citado: 10 de febrero de 2010]; Disponible en: <http://soils.usda.gov/sqi/assessment/files/KitSpanish.pdf>;

United States Environmental Protection Agency (EPA); Guidance for Conducting Remedial Investigations and Feasibility Studies Under CERCLA; EPA 540/G-89/004; Disponible en: <http://www.epa.gov/superfund/policy/remedy/pdfs/540g-89004-s.pdf>

WANG ZQ; ET AL; Study on the Groundwater Petroleum Contaminant Remediation by Air Sparging; Huan Jing Ke Xue. 2007 Apr;28(4):754-60; Disponible en Línea; <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17639932>

Water Treatment Solutions LENNTECH; Activated Carbon Adsorption; Disponible en: <http://www.lennotech.com/library/adsorption/adsorption.htm>

ANEXOS
TABLAS CORRESPONDIENTES TOPOGRAFÍA Y RESULTADOS DE ANALISIS
FISICO QUIMICO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y SUELOS

Anexo 1. Resultados análisis in situ y laboratorio de aguas subterráneas de Campo Palagua

CAMPO PALAGUA	IDENTIF. MUESTRA	PM 10	PM 17	PM 18	PM 19	
SUBMISSION 100093516	FECHA DE MUESTREO	11-MAR-10	12-MAR-10	12-MAR-10	12-MAR-10	DE
COMPONENTE	UNIDAD	200513016	200513028	200513029	200513030	
ANALISIS IN SITU						
PROFUNDIDAD		4.45	1.3	0.7		
OXIGENO DISUELTO	mg O ₂ /L	0.5	0.0	0.0	0.0	
PH/T (GR C)	Uni. pH	6.62/33.0	6.68/34.8	6.11/34.3	6.13/36.2	
ANALISIS DE LABORATORIO						
ANALISIS FISICOQUIMICOS						
CONDUCTIVIDAD/T	Micromhos/cm	487/22.1	564/21.9	13630/21.7	4280/21.9	
ALCALINIDAD TOTAL	mg CaCO ₃ /L	236	218	177	206	
BICARBONTOS	mg HCO ₃ /L	288	266	216	252	
CARBONATOS	mg CO ₃ /L	0.0	0.0	0.0	0.0	
SULFATOS	mg SO ₄ =/L	7.94	<1.00	<1.00	28.3	
NITRATOS NO3	mg NO ₃ /L	0.71	<0.080	NM	2.48	
NITRITOS (NO2)	mg NO ₂ /L	0.29	0.057	0.20	0.12	
CLORUROS	mg/L	5.16	69.9	4706	1237	
SOLIDOS DISUELTOS	mg/L	347	413	6871	2780	
NITROGENO AMONIACAL	mg NH ₃ /L	<0.59	3.97	38.0	11.6	
GRASAS Y ACEITES	mg/L	1.84	207	64.8	828	p
HIDROCARBUROS TOTALES	mg/L	<1.07	32.7	20.5	251	
FENOLES	mg/L	<0.030	<0.030	<0.030	<0.030	
BALANCE IONICO						
BALANCE IONICO	NA	16.3	1.6	0.9	0.8	
TDS/CONDUCTIVIDAD	TDS/CE	3.0	0.7	0.5	0.5	
TDS MED/TDS CAL	NA	0.2	1.1	0.9	1.4	
ANALISIS DE BTEX						
BENCENO	microg/L	<2.76	<2.76	<2.76	<2.76	
TOLUENO	microg/L	<2.23	<2.23	<2.23	<2.23	
ETILBENCENO	microg/L	<1.82	<1.82	0.23	<1.82	
M+P-XILENO	microg/L	<1.85	<1.85	4.2649	<1.85	
OXILENO	microg/L	<2.30	<2.30	1.2893	<2.30	
ANALISIS DE HIDROCARBUROS EXTRACTALES HCs						

OCTANO	mg/L	<9.00E-05	<9.00E-05	<9.00E-05	<9.00E-05
NONANO	mg/L	<8.00E-05	<8.00E-05	<8.00E-05	<8.00E-05
DECANO	mg/L	<8.00E-05	6.00E-05	4.00E-04	5.00E-04
UNDECANO	mg/L	<9.00E-05	8.00E-04	2.00E-04	7.00E-04
DUDECANO	mg/L	<9.00E-05	3.60E-03	8.00E-04	4.20E-03
TRIDECANO	mg/L	<9.00E-05	1.27E-03	2.70E-03	1.02E-02
TETRADECANO	mg/L	<9.00E-05	6.80E-03	3.50E-03	4.80E-03
PENTADECANO	mg/L	<9.00E-05	6.60E-03	2.20E-03	3.10E-03
HEXADECANO	mg/L	<9.00E-05	2.52E-02	1.13E-02	1.64E-02
HEPTADECANO	mg/L	<9.00E-05	2.04E-02	6.80E-03	1.23E-02
PRISTANO	mg/L	<9.00E-05	5.03E-02	1.88E-02	2.86E-02
OCTADECANO	mg/L	<9.00E-05	1.48E-02	8.10E-03	8.50E-03
FITANO	mg/L	<9.00E-05	3.23E-02	1.33E-02	2.03E-02
NONADECANO	mg/L	<9.00E-05	3.69E-02	3.10E-03	4.10E-03
EICOSANO	mg/L	<9.00E-05	2.25E-02	2.20E-03	7.20E-03
HEINECOSANO	mg/L	<8.00E-05	2.38E-02	9.50E-03	2.76E-02
DOCOSANO	mg/L	<9.00E-05	1.70E-02	1.26E-02	2.17E-02
TRICOSANO	mg/L	<8.00E-05	8.40E-03	2.70E-03	6.90E-03
TETRACOSANO	mg/L	<8.00E-05	1.23E-02	4.10E-03	8.50E-03
PENTACOSANO	mg/L	<8.00E-05	2.43E-02	9.00E-03	8.90E-03
HEXACOSANO	mg/L	<8.00E-05	1.45E-02	6.40E-03	9.70E-03
HEPTACOSANO	mg/L	<8.00E-05	2.06E-02	5.00E-03	1.66E-02
OCTACOSANO	mg/L	<8.00E-05	8.10E-03	5.40E-03	1.48E-02
NONACOSANO	mg/L	<8.00E-05	8.90E-03	6.00E-03	6.80E-03
TRIANCONTANO	mg/L	<9.00E-05	1.53E-02	3.80E-03	4.90E-03
HENTRIACONTANO	mg/L	<9.00E-05	1.21E-02	4.70E-03	2.02E-03
DOTRIACONTANO	mg/L	<1.00E-04	1.25E-02	3.60E-03	6.50E-03
TRITRIACONTANO	mg/L	<1.00E-04	2.58E-02	1.15E-02	1.17E-02
TETRATRIACONTANO	mg/L	<1.10E-04	4.40E-03	4.10E-03	8.20E-03
PENTATRIACONTANO	mg/L	<1.20E-04	3.70E-03	5.60E-03	7.20E-03
HEXATRIACONTANO	mg/L	<1.30E-04	3.40E-03	4.50E-03	5.70E-03
HEPTATRIACONTANO	mg/L	<1.40E-04	3.30E-03	1.10E-03	5.00E-03
OCTATRIACONTANO	mg/L	<1.70E-04	1.30E-03	2.50E-03	2.00E-03
TETRACONTANO	mg/L	<2.50E-04	6.00E-04	<2.50E-04	<2.50E-04
ANALISIS HIDROCARBUROS POLIAROMATICOS PAHs					
NAFTALENO	mg/L	<1.60E-4	<1.60E-4	<1.60E-4	<1.60E-4
ACENAFTILENO	mg/L	<1.90E-4	<1.90E-4	<1.90E-4	<1.90E-4
ACENAFTENO	mg/L	<1.90E-4	<1.90E-4	<1.90E-4	0.0299
FLUORENO	mg/L	<2.00E-4	4.43E-02	1.64E-02	7.35E-02
FENANTRENO	mg/L	<2.20E-4	5.69E-02	2.26E-02	8.86E-02
ANTRACENO	mg/L	<2.20E-4	<2.20E-4	<2.20E-4	<2.20E-4

FLUORANTENO	mg/L	<2.20E-4	<2.20E-4	<2.20E-4	<2.20E-4
PIRENO	mg/L	<2.20E-4	<2.20E-4	<2.20E-4	<2.20E-4
BENZO ANTRACENO (A)	mg/L	<2.50E-4	<2.50E-4	<2.50E-4	<2.50E-4
CRISENO	mg/L	<2.50E-4	0.0587	0.0072	0.0494
BENZO (B)FLUORANTENO	mg/L	<2.60E-4	<2.60E-4	<2.60E-4	<2.60E-4
BENZO FLUORANTENO (K)	mg/L	<2.80E-4	<2.80E-4	<2.80E-4	<2.80E-4
BENZO(A) PIRENO	mg/L	<2.80E-4	<2.80E-4	<2.80E-4	<2.80E-4
DIBENZO ANTRACENO (A,H)	mg/L	<4.10E-4	<4.10E-4	<4.10E-4	<4.10E-4
BENZO PERILENO (G,H,I)	mg/L	<4.00E-4	<4.00E-4	<4.00E-4	<4.00E-4
INDENO PIRENO (1,2,3-CD)	mg/L	<3.60E-4	<3.60E-4	<3.60E-4	<3.60E-4
ANALISIS DE METALES					
CALCIO	mg/L	661	36.15	528.2	159.9
BARIO	microg/L	1743	1338	13110	2772
MAGNESIO	mg/L	18.53	13.64	197	33.12
SODIO	mg/L	1481	60	1451	396
POTASIO	mg/L	3.795	2.585	14.49	11.78
MANGANESIO	mg/L	2.671	1.580	11.55	1.869
HIERRO	mg/L	249	42.81	269	32.03
ALUMINIO	mg/L	344	22.51	12.12	8.611
CADMIO	microg/L	33.1	0.967	0.906	3.60
CROMO	microg/L	154	26.5	16.8	11.1
COBRE	microg/L	535	53.3	24.6	15.0
PLOMO	microg/L	77.8	32.1	16.4	9.21
NIQUEL	microg/L	237	24.2	29.4	13.6
VANADIO	microg/L	468	88.6	38.2	31.5
ZINC	microg/L	4818	118	85.4	36.8
ARSENICO	microg/L	35.5	16.4	18.4	5.36
SELENIO	microg/L	<0.860	0.880	23.1	4.76
MOLIBDENO	microg/L	0.779	1.53	1.18	2.01
MERCURIO	microg/L	<0.123	<0.123	<0.123	0.255
NR: No reporta NA: No analizado					

Fuente: Laboratorio ICP

Anexo 2. Nivelación topográfica de la estación 1

Δ	V (+) (m)	V (i)	V (-)	Cota (m)	H Intrumento (m)
PM15	2.8			160 (tomada con GPS)	162.8
2		3.92		158.88	
3		3.47		159.33	
4		3.73		159.07	
5		3.34		159.46	
6			3.61	159.19	
6	1.6				160.79
API		1.31		159.48	
PM10		1.6		159.19	
4b		1.73		159.06	
5b			2.03	158.76	
5b	1.94				160.7
2c		1.51		159.19	
3c			2.42	158.28	
3c	1.56				159.84
2d		0.78		159.06	
3d			0.67	159.17	
3d	1.53				160.7
PM1		2.68		158.02	
3e		2.0		158.7	
4e			1.88	158.82	
4e	1.2				160.02
Hidrante 2		0.62		159.4	
Hidrante 3		0.35		159.67	
3f			0.88	159.14	
3f	1.86				1.61
2g	1.79			159.21	
3g		1.69		159.31	
3g	1.40				160.71
Mojon		0.08		160.63	
PM15			0.85	159.86	

Fuente: Autor

Anexo 3. Nivelación topográfica del predio aledaño a la Estación 1

Δ	V. Atrás	V. Int.	V. Ad	Cota	H Instr.
PM17	1.19			147 (GPS)	148.19
PM14		1.95		146.24	
PM18		2.17		146.02	
PM19			2.49	145.7	
B					
PM19	0.85				146.55
AP23		0.4		146.15	
3B		0.38		146.17	
4B		0.15		146.4	
AP22		0.78		145.77	
AP21		0.85		145.7	
AP20			1.14	145.41	
C					
AP20	2.55				147.96
PM17		0.93		147.03	

Fuente: Autor

Anexo 4. Valores empleados en modelación.

COORDENADAS		COTA (m)	PROF. DISEÑO (m)	PROF. ACTUAL (m)	NIVELES ESTÁTICOS (m)						COTA PIEZOMETRICA(m)					
NORTE	ESTE				sep- 08	oct- 08	mar- 09	oct- 09	mar- 10	may- 10	sep- 08	oct- 08	mar- 09	oct- 09	mar- 10	m
1163571.5	952989.2	158.0	7.7	7.2	4.0	4.2	4.4	4.4	5.0	4.6	154.1	153.8	153.6	153.6	153.0	15
1163682.1	953029.3	159.2	6.3	6.0	NR	NR	3.7	3.7	4.5	3.6	NR	NR	155.5	155.5	154.7	15
1163547.0	952986.1	154.7	6.3	5.7	0.0	0.0	0.2	0.2	0.8	0.2	154.7	154.7	154.5	154.6	153.9	15
1163740.5	952946.3	160.0	6.3	6.2	NR	NR	5.4	5.4	5.7	5.9	NR	NR	154.6	154.6	154.3	15
1163556.2	952989.2	155.5	6.0	3.7	0.1	0.3	0.6	0.5	1.4	0.3	155.4	155.3	154.9	155.0	154.1	15
1163537.7	952979.9	154.5	6.0	4.3	0.9	0.3	0.5	0.3	0.8	0.5	153.6	154.2	154.1	154.2	153.8	15
1163525.5	952961.5	154.2	6.0	4.4	0.1	0.2	0.3	0.2	0.6	0.1	154.1	154.0	153.9	154.0	153.6	15
1163543.9	952946.1	154.3	-	2.5	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
1163547.0	952943.0	154.2	-	2.0	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
1163556.2	952946.1	153.9	-	1.2	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
1163515.0	952944.0	154.0	3.0	2.8	NR	NR	NR	NR	NR	0.6	NR	NR	NR	NR	NR	NR
1163521.0	952938.0	153.5	3.0	2.8	NR	NR	NR	NR	NR	0.3	NR	NR	NR	NR	NR	NR
1163529.0	952938.0	153.0	3.0	2.2	NR	NR	NR	NR	NR	0.4	NR	NR	NR	NR	NR	NR
1163538.0	952936.0	153.0	3.0	2.0	NR	NR	NR	NR	NR	0.2	NR	NR	NR	NR	NR	NR
1163545.0	952933.0	152.0	3.0	1.5	NR	NR	NR	NR	NR	0.2	NR	NR	NR	NR	NR	NR

Fuente: Autor

NR (no reportado)

*El apique 20 fue obstruido, por lo tanto no se muestra en la tabla.

** Profundidad actual menor a la de diseño por los sedimentos formados en el fondo de los pozos.