

**FORMULACIÓN DE UNA MEZCLA PARA EL MANTENIMIENTO DE VÍAS
TERCIARIAS A PARTIR DE SEDIMENTOS CON HIDROCARBUROS,
MATERIAL GRANULAR E HIDRÓXIDO DE CALCIO**

JUAN DIEGO NAVARRO SARMIENTO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

**FORMULACIÓN DE UNA MEZCLA PARA EL MANTENIMIENTO DE VÍAS
TERCIARIAS A PARTIR DE SEDIMENTOS CON HIDROCARBUROS,
MATERIAL GRANULAR E HIDRÓXIDO DE CALCIO**

JUAN DIEGO NAVARRO SARMIENTO

Trabajo de grado para optar al título de Magister En Ingeniería Civil

Asesor

SERGIO MANUEL PINEDA VARGAS

Doctor En Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD INGENIERÍA CIVIL

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2019

CONTENIDO

Lista de Tablas	9
Lista de Ilustraciones.....	11
Introducción	16
Capítulo 1	26
Diseño Experimental.....	26
1.1) Evaluación fisicoquímica del material base de la mezcla mediante la determinación de parámetros como granulometría, contenido de asfalto y prueba TCLP, para conocer su composición y proporciones	26
1.2) Diseño de un experimento para la mezcla, que evalúe su resistencia al esfuerzo cortante (%CBR como una medida del esfuerzo cortante) y lixiviación de hidrocarburos	31
1.2.1) Parámetros Estructurales.....	37
1.2.2) Parámetros Fisicoquímicos.....	38
1.3) Análisis de la viabilidad de la mezcla comparando los parámetros estructurales y resultados de la prueba TCLP con normatividades existentes	40
1.3.1) Parámetros Estructurales.....	40
1.3.2) Parámetros Fisicoquímicos.....	43

Capítulo 2.....	46
Resultados Obtenidos.....	46
2.1) Evaluación fisicoquímica del material base de la mezcla mediante la determinación de parámetros como granulometría, contenido de asfalto y prueba TCLP, para conocer su composición y proporciones	46
2.2) Diseño de un experimento para la mezcla, que evalúe su resistencia al esfuerzo cortante y lixiviación de hidrocarburos.....	48
2.2.1) Parámetros Estructurales.....	48
2.2.2) Parámetros Fisicoquímicos.....	52
2.3) Análisis de la viabilidad de la mezcla comparando los parámetros estructurales y resultados de la prueba TCLP con normatividades existentes	65
2.3.1) Parámetros Estructurales.....	65
2.3.2) Parámetros Fisicoquímicos	68
Capítulo 3.....	71
Análisis de Resultados	71
3.1) Evaluación fisicoquímica del material base de la mezcla mediante la determinación de parámetros como granulometría, contenido de asfalto y prueba TCLP, para conocer su composición y proporciones	71
3.2) Diseño de un experimento para la mezcla, que evalúe su resistencia al esfuerzo cortante y lixiviación de hidrocarburos.....	73

3.2.1) Parámetros Estructurales.....	73
3.2.2) Parámetros Fisicoquímicos.....	77
3.3) Análisis de la viabilidad de la mezcla comparando los parámetros estructurales y resultados de la prueba TCLP con normatividades existentes	80
3.3.1) Parámetros Estructurales.....	80
3.3.2) Parámetros Fisicoquímicos.....	82
Capítulo 4.....	84
Conclusiones.....	84
Capítulo 5.....	87
Recomendaciones.....	87
BIBLIOGRAFÍA	89
ANEXOS	96
ANEXO 1. Certificado Calibración Báscula	97
ANEXO 2. Certificado de calidad Cal Hidratada Tipo N.....	100
ANEXO 3. Granulometría de los sedimentos con hidrocarburos procedentes del contrapozo LS M11	103
ANEXO 4. Determinación de contenido de asfalto en los sedimentos con hidrocarburos	104
ANEXO 5. Composición Química de los sedimentos con hidrocarburos procedentes del contrapozo LS M11	105

ANEXO 6. Resultados Proctor modificado y %CBR para la mezcla 0% sedimentos con hidrocarburos + 100% de material de afirmado + 0% de cal hidratada.....	107
ANEXO 7. Resultados Proctor modificado y %CBR para la mezcla 0% sedimentos con hidrocarburos + 100% de material de afirmado + 1% de cal hidratada.....	115
ANEXO 8. Resultados Proctor modificado y % CBR para la mezcla 0% sedimentos con hidrocarburos + 100% material de afirmado + 5% de cal hidratada.....	123
ANEXO 9. Resultados Proctor modificado y %CBR para la mezcla 0% sedimentos con hidrocarburos + 100% de material de afirmado + 8% de cal hidratada.....	129
ANEXO 10. Resultados Proctor modificado y %CBR para la mezcla 0% sedimentos con hidrocarburos + 100% de material de afirmado + 12% de cal hidratada.....	137
ANEXO 11. Resultados Proctor modificado y %CBR para la mezcla 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 0% de cal hidratada.....	145
ANEXO 12. Resultados Proctor modificado y %CBR para la mezcla 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 1% de cal hidratada.....	154
ANEXO 13. Resultados Proctor modificado y %CBR para la mezcla 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 5% de cal hidratada.....	162
ANEXO 14. Resultados Proctor modificado y %CBR para la mezcla 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 8% de cal hidratada.....	170
ANEXO 15. Resultados Proctor modificado y %CBR para la mezcla 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 12% de cal hidratada.....	178

ANEXO 16. Resultados Proctor modificado y %CBR para la mezcla 60% sedimentos con hidrocarburos + 40% de material de afirmado + 0% de cal hidratada	187
ANEXO 17. Resultados Proctor modificado y %CBR para la mezcla 60% sedimentos con hidrocarburos + 40% de material de afirmado + 1% de cal hidratada	193
ANEXO 18. Resultados Proctor modificado y %CBR para la mezcla 60% sedimentos con hidrocarburos + 40% de material de afirmado + 5% de cal hidratada	201
ANEXO 19. Resultados Proctor modificado y %CBR para la mezcla 60% sedimentos con hidrocarburos + 40% de material de afirmado + 8% de cal hidratada	210
ANEXO 20. Resultados Proctor modificado y %CBR para la mezcla 60% sedimentos con hidrocarburos + 40% de material de afirmado + 12% de cal hidratada	218
ANEXO 21. Resultados Fisicoquímicos para la mezcla 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 0% de cal hidratada	226
ANEXO 22. Resultados Fisicoquímicos para la mezcla 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 1% de cal hidratada	227
ANEXO 23. Resultados Fisicoquímicos para la mezcla 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 5% de cal hidratada	228
ANEXO 24. Resultados Fisicoquímicos para la mezcla 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 8% de cal hidratada	229
ANEXO 25. Resultados Fisicoquímicos para la mezcla 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 12% de cal hidratada	230

ANEXO 26. Resultados Fisicoquímicos para la mezcla 60% sedimentos con hidrocarburos + 40% de material de afirmado + 0% de cal hidratada	232
ANEXO 27. Resultados Fisicoquímicos para la mezcla 60% sedimentos con hidrocarburos + 40% de material de afirmado + 1% de cal hidratada	233
ANEXO 28. Resultados Fisicoquímicos para la mezcla 60% sedimentos con hidrocarburos + 40% de material de afirmado + 5% de cal hidratada	234
ANEXO 29. Resultados Fisicoquímicos para la mezcla 60% sedimentos con hidrocarburos + 40% de material de afirmado + 8% de cal hidratada	236
ANEXO 30. Resultados Fisicoquímicos para la mezcla 60% sedimentos con hidrocarburos + 40% de material de afirmado + 12% de cal hidratada	237
ANEXO 31. Espectros Infrarrojos Muestras de Hidrocarburos procedentes de la mezcla 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 0% de cal hidratada	238
ANEXO 32. Resultados Prueba TCLP para la mezcla 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 0% de cal hidratada	243
ANEXO 33. Procedimiento para la determinación de los tamaños de las partículas de los suelos afectados por derrames de hidrocarburo	244
ANEXO 34. Determinación del límite líquido de los suelos afectados por derrames de hidrocarburo	265
ANEXO 35. Procedimiento para la determinación del límite plástico e índice de plasticidad de suelos afectados con hidrocarburos	286

ANEXO 36. Procedimiento para la determinación de relaciones de humedad- masa unitaria seca en los suelos afectados por derrames de hidrocarburo	301
ANEXO 37. Procedimiento de lixiviación para la característica de toxicidad- TCLP	326

Lista de Tablas

Tabla 1. Diseño Experimental para la preparación de las muestras de sedimentos con hidrocarburos, material de afirmado y Cal hidratada.....	33
Tabla 2. Valores para límite líquido, índice de plasticidad y %CBR como requisito de agregados para material de afirmados.....	41
Tabla 3. Franjas granulométricas del material de afirmado.....	42
Tabla 4. Franjas granulométricas de los agregados combinados para la construcción de capas de subbases estabilizadas con una mezcla asfáltica natural	42
Tabla 5. Valores para límite líquido, índice de plasticidad y CBR como requisito de los agregados pétreos a estabilizar de una subbase con una mezcla asfáltica natural	42
Tabla 6. Franjas granulométricas de los agregados combinados para la construcción de capas de bases estabilizadas con una mezcla asfáltica natural.....	43
Tabla 7. Valores para límite líquido, índice de plasticidad y CBR como requisito de los agregados pétreos a estabilizar de una base con una mezcla asfáltica natural.....	43
Tabla 8. Normativas para reúso de residuos aceitosos en construcción y/o mantenimiento de vías	45
Tabla 9. Resultados prueba de lixiviación para la muestra de sedimentos con hidrocarburos	48
Tabla 10. Resultados para Proctor modificado y CBR en las muestras analizadas	49
Tabla 11. Resultados Análisis Físicoquímicos muestras con sedimentos con hidrocarburos, material de afirmado y Cal hidratada en diferentes proporciones.....	53

Tabla 12. Resultados obtenidos con la muestra compuesta por 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% de afirmado versus normatividades internacionales para el reúso de residuos aceitosos en vías..... 69

Tabla 13. Comparación mezcla en frío (40% sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado) con los requerimientos INVIAS para subbase y base estabilizada con asfalto natural..... 81

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Sedimento con hidrocarburo almacenado en el contrapozo LS M11 en Campo Salinas de PetroSantander (Colombia) GmbH.....	30
Ilustración 2. Sedimento con contenido de hidrocarburo proveniente del contrapozo LS M11 de Campo Salinas en PetroSantander (Colombia) GmbH	30
Ilustración 3. Balanza y Cal hidratada para la preparación de muestras de sedimentos con hidrocarburos, material de afirmado y cal hidratada.....	34
Ilustración 4. Pesaje de Cal hidratada para la preparación de las muestras de sedimentos con hidrocarburos, material de afirmado y cal hidratada.....	34
Ilustración 5. Material de afirmado empleado para la preparación de las muestras	35
Ilustración 6. Mezcla de material de afirmado, sedimentos con hidrocarburos y cal hidratada	36
Ilustración 7. Volteo manual para la mezcla de material de afirmado, sedimentos con hidrocarburos y cal hidratada	36
Ilustración 8. Muestras de sedimentos con hidrocarburos, material de afirmado y cal hidratada compactadas con la humedad óptima para los análisis fisicoquímicos.....	39
Ilustración 9. Curva granulométrica de los sedimentos con hidrocarburos	47
Ilustración 10. %CBR Versus % Cal hidratada en las diferentes mezclas.....	50
Ilustración 11. Densidad máxima seca (g/cm ³) versus % cal hidratada en las distintas combinaciones.....	51
Ilustración 12. % Humedad Óptima Versus % Cal hidratada en las distintas combinaciones	51

Ilustración 13. Variación del contenido de asfalto en las combinaciones en función del % de cal hidratada	52
Ilustración 14. Variación del pH en las distintas combinaciones en función del % de cal hidratada	54
Ilustración 15. Conductividad Eléctrica versus % de adición de cal hidratada	54
Ilustración 16. Variación del contenido de grasas & aceites en las combinaciones en función del % de cal hidratada	55
Ilustración 17. Contenido de Arsénico (As) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	56
Ilustración 18. Contenido de Bario (Ba) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	56
Ilustración 19. Contenido de Cadmio (Cd) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	57
Ilustración 20. Contenido de Cromo (Cr) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	57
Ilustración 21. Contenido de Plomo (Pb) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	58
Ilustración 22. Contenido de Mercurio (Hg) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	58
Ilustración 23. Contenido de Plata (Ag) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	59
Ilustración 24. Contenido de Selenio (Se) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	59

Ilustración 25. Contenido de Zinc (Zn) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	60
Ilustración 26. Contenido de Cloruros (Cl-) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	60
Ilustración 27. Contenido de Calcio (Ca) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	61
Ilustración 28. Contenido de Magnesio (Mg) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	61
Ilustración 29. Contenido de Sodio (Na) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	62
Ilustración 30. Contenido de Níquel (Ni) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	62
Ilustración 31. Contenido de Cobre (Cu) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	63
Ilustración 32. Contenido de Molibdeno (Mo) en las combinaciones en función del % de cal hidratada	63
Ilustración 33. Curva granulométrica combinación óptima (40% sedimentos + 60 % material de afirmado)	65
Ilustración 34. Curva granulométrica muestra 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado versus material de afirmado A-38 versus A-25 requerido por INVIAS	66

Ilustración 35. Comparación entre la granulometría de la muestra con 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado versus los requerimientos de una subbase estabilizada con una mezcla asfáltica natural SBE-MAN 50 y SBE-MAN 38 INVIAS 67

Ilustración 36. Granulometría de la muestra con 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado versus los requerimientos de una base estabilizada con una mezcla asfáltica natural BE-MAN 25 y BE-MAN 38 INVIAS 68

Ilustración 37. Espectros infrarrojos del análisis de hidrocarburos totales del petróleo para la muestra compuesta por 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado . 70

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO:	FORMULACIÓN DE UNA MEZCLA PARA EL MANTENIMIENTO DE VÍAS Terciarias A PARTIR DE SEDIMENTOS CON HIDROCARBUROS, MATERIAL GRANULAR E HIDRÓXIDO DE CALCIO
AUTOR(ES):	Juan Diego Navarro Sarmiento
PROGRAMA:	Maestría en Ingeniería Civil
DIRECTOR(A):	Sergio Manuel Pineda Vargas

RESUMEN

El objetivo general de la presente investigación se enfocó en formular una mezcla para el mantenimiento de vías terciarias a partir de sedimentos con hidrocarburos, material granular e hidróxido de Calcio, siendo por un lado una alternativa para el manejo y disposición final de un residuo proveniente de la explotación de hidrocarburos y a su vez la materia prima para la elaboración de una mezcla para el mantenimiento de vías terciarias. Para alcanzar el objetivo general se planteó una metodología, en la cual se aplicó una matriz para encontrar la mezcla óptima entre sedimentos con hidrocarburos, material granular e hidróxido de Calcio, en cumplimiento de normativas colombianas para el caso de parámetros estructurales y de normativas internacionales para parámetros fisicoquímicos, ya que en Colombia carecemos de una normativa específica para el reúso de residuos aceitosos provenientes del sector de exploración y explotación de hidrocarburos para aplicación en vías. De acuerdo con lo anterior, la formulación de la mezcla en frío para el mantenimiento de vías terciarias en el área de operaciones de PetroSantander (Colombia), corresponde a 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado, con una densidad máxima seca de 2.14 g/cm³, una humedad óptima de 6.95 %, un CBR de 39.5% y un contenido de asfalto de 0.60%. El costo aproximado de aplicación de la mezcla en frío corresponde a \$81 millones de pesos por kilómetro, beneficiando las vías utilizadas por la empresa PetroSantander (Colombia) y a la comunidad de 9 veredas del área de influencia del proyecto. Se estima una generación anual de 185,37 m³ de sedimentos con hidrocarburos en Campo Salinas, materia prima que según la formulación de la mezcla permitiría el mantenimiento entre 770 a 1,326 metros de vía terciaria, dependiendo del espesor de la mezcla aplicado en la vía.

PALABRAS CLAVE:

Sedimentos con hidrocarburos, TCLP, CBR, Vías Terciarias

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: FORMULATION OF A MIXTURE FOR MAINTENANCE OF LEASE ROADS FROM SEDIMENTS WITH HYDROCARBONS, GRANULAR MATERIAL AND CALCIUM HYDROXIDE

AUTHOR(S): Juan Diego Navarro Sarmiento

FACULTY: Maestría en Ingeniería Civil

DIRECTOR: Sergio Manuel Pineda Vargas

ABSTRACT

The general goal of the present investigation focused on formulating a mixture for the maintenance of lease roads from sediments with hydrocarbons, granular material and calcium hydroxide, being on the one hand an alternative for the management and final disposal of a waste from the exploitation of hydrocarbons and in turn the raw material for the preparation of a mixture for the maintenance of lease roads. To achieve the general goal, a methodology was proposed, in which a matrix was applied to find the optimal mixture between sediments with hydrocarbons, granular material and calcium hydroxide, in compliance with Colombian laws in the case of structural parameters and international laws for Physicochemical parameters, because in Colombia we lack a specific regulation for the reuse of oily wastes from the hydrocarbon exploration and exploitation sector for application on roads. According to the above, the formulation of the cold mixture for the maintenance of lease roads in operation areas of PetroSantander (Colombia), corresponds to 40% of sediments with hydrocarbons + 60% of granular material, with a maximum density dry of 2.14 g / cm³, an optimum humidity of 6.95%, a California bearing ratio of 39.5% and an asphalt content of 0.60%. The approximate cost of applying the cold mix corresponds to \$ 81 million pesos per kilometer, benefiting the roads used by the company PetroSantander (Colombia) and the community of 9 villages in the area of influence of the project. An annual generation of 185.37 m³ of sediments with hydrocarbons in Campo Salinas is estimated, a raw material that according to the formulation of the mixture would allow maintenance between 770 and 1,326 meters of lease roads, depending on the thickness of the mixture applied on the road.

KEYWORDS:

oil sands, TCLP, CBR, Lease roads

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

En el campo Salinas de la empresa Petrosantander (Colombia) ubicada en el municipio de Sabana de Torres, Departamento de Santander, se generan anualmente 185 m³ de sedimentos con hidrocarburos, los cuales debe ser tratados y dispuestos acorde a la naturaleza del residuo y en cumplimiento de la normatividad ambiental vigente. El costo actual de gestión integral (recolección, tratamiento y disposición final) por m³ corresponde a \$ 324.283 COP, dando como resultado un costo anual de \$ 60.112.340 COP. Adicional, el método convencional para el mantenimiento de vías terciarias en las zonas de explotación de hidrocarburos en nuestro país incluye la aplicación y compactación de material de afirmado, requiriéndose una alta frecuencia en el mantenimiento vial debido a las cargas a las cuales se somete el material (tránsito de maquinaria pesada y vehículos livianos). Otras opciones disponibles para el mantenimiento de vías terciarias en Colombia, incluyen la estabilización con cal, estabilización con cemento portland, estabilización con productos asfálticos, instalación de adoquines en arcilla cocida, tratamientos superficiales como sellos de arena y lechadas asfálticas, conformación de capas asfálticas con asfaltos naturales como la asphaltita y material pétreo impregnado de asfalto- MAPIA y placa huellas (Acuña & Pinzón, 2015). En Colombia se tienen 142.284 kilómetros de vías terciarias, las cuales tienen como función conectar las cabeceras municipales con veredas y corregimientos. De los 142.284 kilómetros de vías terciarias, el 96% se encuentra en mal estado (Editorial La República, 2019). De acuerdo a lo anterior, se planteó una propuesta con doble propósito, siendo por un lado una alternativa para el manejo y disposición final de un residuo proveniente de la explotación de

hidrocarburos y a su vez la materia prima para la elaboración de una mezcla en frío para el mantenimiento de vías terciarias, a través de la mezcla en diferentes proporciones de un sedimento con contenido de hidrocarburos, un material granular disponible en la zona y cal hidratada, para el beneficio de las vías terciarias usadas por PetroSantander (Colombia) y por la comunidad de 9 veredas del municipio de Sabana de Torres que hacen parte del área de influencia directa del proyecto de explotación de hidrocarburo, teniendo como ventaja la disponibilidad del residuo en el área de operaciones, así como su función de supresor de material particulado en la mezcla para mantenimiento de vías.

Valbuena Rojas & Sierra González (2017), desarrollaron un proyecto, con el propósito de diseñar una mezcla entre material granular y borras petroleras para uso como capa granular en una estructura de vía, encontrando, que la mezcla entre el recebo y las borras, generó una mezcla impermeable y mejoró la capacidad portante del suelo, resultando viable el uso del residuo para mantenimiento de vías, sin embargo, la exudación de hidrocarburos en la mezcla, representó un problema desde el punto de vista ambiental.

En la legislación ambiental colombiana, es considerado como residuo peligroso, todo aquel residuo impregnado con hidrocarburos, por lo cual no puede ser dispuesto en el suelo, aguas o incinerado a cielo abierto (Trujillo Toro & Ramírez Quirama, 2012). En el anexo 1 de la Ley 253 de 1996, por el cual se aprueba el convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, se listan los residuos o desechos peligrosos por procesos o actividades, identificando a las mezclas y emulsiones de desechos de aceites y agua o de hidrocarburos y agua como residuos peligrosos

(Red Jurista, 2019). En la Ley 1252 de 2008 se prohíbe la generación, almacenamiento o eliminación de residuos o desechos peligrosos en ecosistemas estratégicos o importantes del país, así como diseñar planes, sistemas y procesos adecuados, limpios y eficientes, de tratamiento, almacenamiento, transporte, reutilización y disposición final de residuos peligrosos que propendan al cuidado de la salud humana y el ambiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019). El Decreto 4741 de 2005 expedido por el entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, reguló el manejo de los residuos generados, con el propósito de proteger la salud humana y el ambiente, mediante la definición de los desechos que se consideran peligrosos, pero permitiendo al generador demostrar ante la autoridad ambiental que sus residuos no presentan ningún riesgo ambiental, para lo cual deberá efectuar la caracterización fisicoquímica del residuo. Puntualmente en el Anexo 1 Del Decreto 4741 de 2005, se estipuló que las mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua, son residuos peligrosos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005).

La composición de un lodo aceitoso es muy compleja, incluyendo crudo en agua y sólidos suspendidos. Los lodos aceitosos contienen sustancias tóxicas tales como hidrocarburos aromáticos e hidrocarburos poliaromáticos. La composición típica de un lodo aceitoso comprende cerca de 55.13% de agua, 9.25 % de sedimentos, 1.92% de asfaltenos, 10.51% de cera y 23.94% de hidrocarburos volátiles, así como una alta concentración de metales pesados, como por ejemplo Vanadio 204 ppm, Hierro 0.6% y Níquel 506 ppm, lo cual hace que el lodo sea peligroso para el ambiente y los organismos (Islam, 2015). Otros autores han reportado las siguientes concentraciones de metales en lodos aceitosos: Mercurio 0.277

mg/L, Cadmio 0.078 mg/L, Plomo 1.01 mg/L, Hierro 132.25 mg/L (Sabai & Rugudagiza, 2018). Estudios similares han determinado la composición de un lodo aceitoso como 70% de agua, 22% de sedimentos y 8% de hidrocarburos. A nivel químico, se ha identificado la siguiente composición: azufre 1.4%, Níquel 5694 ppm, Vanadio 38 ppm, Oxido de Calcio 11%, Fe_2O_3 4.9 % y CuO 5.73% (Al-Abdul Wahhab & Dalhat, 2014).

Se han llevado a cabo estudios, los cuales muestran el potencial del uso del aceite recuperado provenientes de residuos para la preparación de asfalto, así como el uso de suelos impregnados con hidrocarburos para la preparación de concreto asfáltico frío para ser usado en mantenimiento de vías (Mansurov, Ongarbaev, & Tuleutaev, 2016). El asfalto juega un importante rol al beneficiar la sociedad en términos de infraestructura, por lo cual es ampliamente usado en el mundo y puede aplicarse para variados usos, tales como en construcción de vías, productos impermeabilizantes, materiales de construcción, etc...). Típicamente la producción de concreto asfáltico involucra la mezcla con arena, grava y roca con bitumen, el cual actúa como agente ligante (Razali, 2016). Al-Abdul Wahhab & Dalhat (2014), diseñaron mezclas a partir de lodos aceitosos con asfalto, para generar emulsiones asfálticas, actuando como agente ligante con los materiales agregados en el asfalto. Alfutaisi, Jamrah, Yaghi, & Taha (2007), realizaron una evaluación de las alternativas de manejo de los lodos provenientes de tanques de almacenamiento de crudo, encontrando que es viable el uso en vías y su aplicación no se considera peligrosa de acuerdo con las pruebas de lixiviación desarrolladas. Pivsaev, Krasnikov, Pimenov, & Bykov (2015) adicionaron amidoaminas sintetizadas a partir de un residuo vegetal proveniente de la industria de alimentos, con el propósito de mejorar las propiedades adhesivas del asfalto en vías. Ghuzlan, Al-Khateeb, &

Damrah (2013), realizaron un estudio utilizando cenizas provenientes del calentamiento del queroseno, como modificador de las propiedades ligantes en asfaltos, mejorando las propiedades reológicas y el desempeño a altas temperaturas.

Lee, Baek, & Park (2012) demostraron que el uso de cal en mezclas asfálticas incrementa las propiedades mecánicas de la mezcla. Diab & Enieb (2018) emplearon cal hidratada en mezclas asfálticas, para incrementar las propiedades mecánicas, siendo de especial relevancia, determinar la cantidad óptima en el diseño, para asegurar el desempeño adecuado de la mezcla en campo. Gorkem & Sengoz (2009) agregaron cal y un polímero a una mezcla asfáltica en caliente, encontrando que la adición de cal hidratada y del polímero aumentaron la resistencia de las mezclas de asfalto frente al efecto perjudicial del agua. Sharma, Sirdesai, Sharma, & Singh (2018), recomiendan el uso de cal y cemento para estabilizar suelos, ya que representa una opción técnica y económica para la construcción de vías y pavimentos. Kogbara & Al-Tabbaa (2011), estudiaron el efecto del uso de cal y cemento para evitar la lixiviación de metales pesados e hidrocarburos en suelos contaminados, concluyendo que representa una opción técnica y económica para encapsular contaminantes y posteriormente usar estos suelos para construcción de vías. Hassan et al., (2005), realizaron pruebas a un suelo contaminado con hidrocarburo, el cual fue tratado con cemento y al momento de evaluar la lixiviación, encontraron que el cemento encapsuló los contaminantes y mejoró las propiedades mecánicas para su uso en mantenimiento de vías. El conocimiento de los valores de dispersividad en medio poroso, es de vital importancia, para poder inferir la movilidad de contaminantes en el suelo. En un estudio se realizó la inyección de un contaminante menos denso que el agua, con el propósito de determinar la dispersividad del medio poroso,

encontrando que un suelo con gradación entre el tamiz No. 4 y el No. 50 y el tamiz No. 50 y el 200, los valores de dispersividad correspondieron a $1.27 \text{ m}^2/\text{d}$ y $0.7411 \text{ m}^2/\text{d}$, respectivamente, concluyendo que a medida que el tamaño del grano disminuye, también disminuye la capacidad de los fluidos para desplazarse en el medio (Serrano-Guzmán, Forero Sarmiento, Guzmán Arias, & Pérez Ruiz, 2012).

Kok & Yilmaz (2009) evaluaron la aplicación de estireno-butadieno-estireno (SBS) y cal en las propiedades de una mezcla asfáltica en caliente. Con base en los resultados de las pruebas de laboratorio, se concluyó que la adición de cal y SBS en el asfalto mezclado en caliente, mejoró significativamente el rendimiento de las mezclas, especialmente en cuanto a resistencia al daño por humedad (Kok & Yilmaz, 2009). Palacio & Maquilón (2013), demostraron que es posible usar el aceite de palma para modificar una mezcla entre asfalto, agregados finos, agregados gruesos y cal hidratada como llenante, para el desarrollo de una mezcla asfáltica tibia, obteniendo una disminución en la temperatura de producción de la mezcla y de la viscosidad del asfalto y mejorando el desempeño de la mezcla asfáltica tibia comparada con la mezcla asfáltica en caliente.

Abousnina, Manalo, Lokuge, & Shiau (2015), encontraron que las propiedades de un mortero preparado con arena contaminada con petróleo, se considera adecuado para algunas aplicaciones de ingeniería. Con una concentración de 10% de petróleo ligero en la arena contaminada, la resistencia a la compresión es comparable a la de un mortero con arena no contaminada, lo que indica que se puede utilizar como un material emergente y sostenible en construcción (Abousnina et al., 2015). Oreshkin, Chebotaev, & Perfilov (2015), investigaron

el uso de lodos de perforación, para la fabricación de materiales de construcción, resultando viable para la fabricación de ladrillos, a partir de la mezcla de lodos de perforación con cemento.

Teniendo en cuenta el estado del arte, se evidencia el potencial del uso de sedimentos con contenidos de hidrocarburos para la formulación de una mezcla en frío para el mantenimiento de vías terciarias, requiriéndose el análisis químico de la mezcla, para asegurar la no afectación medioambiental. El uso de la cal hidratada (hidróxido de calcio) como agente encapsulante, ha sido ampliamente estudiada para el tratamiento y disposición final de residuos provenientes del sector de hidrocarburos, lo cual representa a su vez, una opción viable para inmovilizar los hidrocarburos en las mezclas destinadas al mantenimiento de vías y mejorar la resistencia del material.

Alcances de la Investigación

El objetivo general de la presente investigación corresponde a la formulación de una mezcla para el mantenimiento de vías terciarias a partir de sedimentos con hidrocarburos, material granular e hidróxido de Calcio.

Los objetivos específicos de la investigación son:

- Evaluar fisicoquímicamente el material base de la mezcla mediante la determinación de parámetros como granulometría, contenido de asfalto y prueba TCLP, para conocer su composición y proporciones.
- Diseñar un experimento para la mezcla, que evalúe su resistencia al esfuerzo cortante y lixiviación de hidrocarburos.
- Analizar la viabilidad de la mezcla comparando los parámetros estructurales y resultados de la prueba TCLP con normatividades existentes.

Para el análisis de la viabilidad de la mezcla, se evaluaron los siguientes parámetros fisicoquímicos mediante la prueba de lixiviación TCLP, los cuales corresponden al alcance de la presente investigación: pH, Conductividad, Cloruros, Arsénico, Selenio, Mercurio, Plomo, Zinc, Plata, Cadmio, Cromo Total, Bario, TPH's y Benceno, con el propósito de simular el comportamiento de la muestra frente a la precipitación pluvial. Adicional, se llevó a cabo la determinación del contenido de grasas y aceites e hidrocarburos totales del petróleo, cloruros, el contenido de metales totales (Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo, Plomo, Mercurio, Selenio, Plata, Zinc, Cobre, Níquel) y el contenido de BETX (Benceno, Etilbenceno, Tolueno, Xileno) en la muestra sólida. Es de especial importancia el conocimiento de la composición química del sedimento a utilizar en la mezcla, ya que se ha identificado que la presencia de metales pesados en el ambiente como mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), entre otros, pueden desencadenar intoxicaciones

generando daños irreparables en la salud humana y animal, con efectos teratogénicos, cáncer e incluso la muerte (Londoño-Franco, Londoño-Muñoz, & Muñoz-García, 2016).

En cuanto a parámetros estructurales, se evaluaron los siguientes: Densidad máxima seca, Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de plasticidad y Relación de Soporte de California (CBR).

Los resultados obtenidos en la presente investigación aplican para los sedimentos con hidrocarburos procedentes de campo Salinas de PetroSantander (Colombia), cuya composición fisicoquímica y mecánica se definen en el segundo capítulo del presente documento.

El documento se encuentra organizado por capítulos, siendo el primero de ellos la metodología propuesta para el desarrollo de la investigación. El segundo capítulo contiene los resultados obtenidos. El tercer capítulo contiene el análisis de resultados. El cuarto capítulo contiene las conclusiones y el quinto capítulo las recomendaciones.

Capítulo 1

Diseño Experimental

El diseño experimental incluyó la caracterización de los sedimentos con hidrocarburos, la fase experimental para la evaluación de la resistencia y el análisis químico de la mezcla. Finalmente, se analizó la viabilidad de la mezcla, comparando los parámetros estructurales y fisicoquímicos con normatividades existentes.

1.1) Evaluación fisicoquímica del material base de la mezcla mediante la determinación de parámetros como granulometría, contenido de asfalto y prueba TCLP, para conocer su composición y proporciones

Se obtuvo una muestra representativa del sedimento con hidrocarburo almacenado en tanques de producción provenientes de la operación de PetroSantander (Colombia) GmbH en Sabana de Torres y se llevó a cabo la determinación de los siguientes parámetros: granulometría por tamizado con lavado por el tamiz No 200 según el procedimiento adaptado de INV E-123-13 (Ver Anexo 33) para suelos afectados por derrames de hidrocarburo (Serrano & Torrado, 2013a), contenido de asfalto según procedimiento INV E- 732-13 método A (Instituto Nacional de Vías- INVIAS, 2013), determinación del límite líquido según el procedimiento tomado y adaptado de INV E-125-13 (Ver Anexo 34) para suelos afectados por hidrocarburos (Serrano & Torrado, 2013b) y límite plástico e índice de plasticidad según el procedimiento

tomado y adaptado de INV E-126-13 (Ver Anexo 35) para suelos afectados por hidrocarburos (Serrano & Torrado, 2013c).

Para la determinación de la granulometría en suelos con hidrocarburo, es necesario llevar a cabo el lavado de la muestra con un tensoactivo como un detergente o sustancias similares. Antes del tamizado, se deberá secar la muestra hasta peso constante en un horno a temperatura de $50^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{ C}$ ($122^{\circ} \pm 41^{\circ} \text{ F}$) entre 35 y 40 horas. Posteriormente se prepara la muestra de ensayo para el análisis mecánico acorde a la norma INV E – 106, la cual tendrá dos fracciones: una retenida sobre el tamiz de 2mm (no.10) y otra que pasa dicho tamiz. Las dos fracciones se ensayarán por separado. La masa del suelo impregnada con hidrocarburo secado al aire y seleccionada para el ensayo, deberá ser suficiente para producir las cantidades requeridas para el análisis mecánico. La porción de muestra retenida en el tamiz de 2.0 mm (No. 10) se separa en fracciones, usando los tamices de 75 mm (3”), 50 mm (2”), 37.5 mm (1 ½”), 25.0 mm (1”), 19.0 mm (3/4”), 9.5 mm (3/8”), 4.75 mm (No. 4) y 2.0mm (No. 10), o los que sean requeridos, dependiendo de la muestra o de las especificaciones aplicables al material que se ensaya. Para la porción que pasa el tamiz de 2.0 mm (No.10), se determina por un proceso de sedimentación, con la ayuda de un hidrómetro (Serrano & Torrado, 2013a). En el Anexo 33, se encuentra el procedimiento completo para la determinación del tamaño de las partículas.

Para la determinación del límite líquido, se procesa la muestra con el propósito de remover la porción retenida en el tamiz de 425 pm (No. 40). El límite líquido se determina mediante tanteos, empleando una cazuela de bronce que se divide en dos partes con un ranurador,

permitiendo que esas dos partes fluyan como resultado de los golpes recibidos por la caída repetida de la cazuela sobre una base normalizada. El límite líquido multipunto, Método A, requiere 3 o más tanteos sobre un rango de contenidos de agua, cuyos resultados se dibujan para establecer una relación a partir de la cual se determina el límite líquido. El método de un punto, Método B, usa los datos de dos tanteos realizados con un solo contenido de agua, multiplicado el valor obtenido por un factor de corrección (Serrano & Torrado, 2013b). En el Anexo 34, se encuentra el procedimiento completo para la determinación del límite líquido en suelos contaminación con hidrocarburos.

El límite plástico se determina presionando de manera repetida una porción de suelo contaminado con hidrocarburo y húmedo, para formar rollos de 3.2 mm (1/8”) de diámetro, hasta que su contenido de agua se reduce a un punto en el cual se produce el agrietamiento y/o desmoronamiento de los rollos. El límite plástico es la humedad más baja con la cual se pueden formar rollos de suelo de este diámetro, sin que ellos se agrieten o desmoronen. El índice de plasticidad se calcula sustrayendo el límite plástico del límite líquido (Serrano & Torrado, 2013c). En el Anexo 35, se encuentra el procedimiento completo para la determinación del límite plástico en suelos contaminación con hidrocarburos.

Adicionalmente, se determinaron los siguientes parámetros fisicoquímicos mediante prueba de lixiviación TCLP según el método 1311 (Ver Anexo 37) establecido por la United States Environmental Protection Agency-EPA (US EPA, 2019): pH, Conductividad, Cloruros, Arsénico, Selenio, Mercurio, Plomo, Zinc, Plata, Cadmio, Cromo Total, Bario, Cromo Hexavalente, RAS, Calcio, Sodio, Magnesio y TPH's. La prueba TCLP está diseñada para

determinar la movilidad de analitos orgánicos e inorgánicos presentes en residuos líquidos, sólidos y multifase. Para la prueba TCLP, se emplean dos fluidos de extracción, dependiendo del pH de la muestra. Si el pH es menor a 5.0, se deberá usar el fluido de extracción # 1, el cual está compuesto por ácido acético glacial ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OOH}$) e hidróxido de sodio (NaOH). Si el pH de la muestra es mayor a 5.0, se deberá agregar el fluido de extracción 2, el cual corresponde a ácido acético glacial ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OOH}$) y agua (US EPA, 2019). El método completo, se encuentra descrito en el Anexo 37.

Los resultados obtenidos fueron comparados con lo estipulado en el Decreto 4741 de 2005 expedido por el entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos y con los criterios para reúso de material proveniente del procesamiento de residuos de exploración y producción del sector de hidrocarburos de la norma Louisiana 29B (Department of Natural Resources | State of Louisiana, 2010).

En las ilustraciones 1 y 2, se aprecia el sedimento con hidrocarburo, empleado para los ensayos a nivel de laboratorio, obtenido del contrapozo LS M11 de Campo Salinas en PetroSantander (Colombia) GmbH.



Ilustración 1. Sedimento con hidrocarburo almacenado en el contrapozo LS M11 en Campo Salinas de PetroSantander (Colombia) GmbH

Fuente: Propia, abril 2019



Ilustración 2. Sedimento con contenido de hidrocarburo proveniente del contrapozo LS M11 de Campo Salinas en PetroSantander (Colombia) GmbH

Fuente: Propia, abril 2019

1.2) Diseño de un experimento para la mezcla, que evalúe su resistencia al esfuerzo cortante (%CBR como una medida del esfuerzo cortante) y lixiviación de hidrocarburos

Para el diseño de la mezcla, se siguió la metodología propuesta por Al-Abdul Wahhab & Dalhat (2014), en la cual se propone una matriz en función del porcentaje de agente ligante, porcentaje de llenante y porcentaje de asfalto. Para el presente trabajo, se utilizó como agente ligante el sedimento con contenido de hidrocarburo proveniente de operaciones de limpieza de facilidades petroleras de la empresa PetroSantander (Colombia) GmbH, en el municipio de Sabana de Torres, Departamento Santander. Como llenante, se empleó cal hidratada, con un contenido de Óxido de Calcio y Magnesio (96.93%), Dióxido de Carbono (2%), Humedad Libre (0.20%), retenido en el tamiz No.30 (0.40%) y retenido en el tamiz No. 200 (7.63%), suministrada por la empresa RioCal S.A.S, la cual cumple con los requerimientos estipulados en la Tabla 601-2 de las normas y especificaciones INV E-601-13 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS)-Colombia (Instituto Nacional de Vías- INVIAS, 2013).

Como base para la preparación de las mezclas, se utilizó un material granular, compuesto por una mezcla entre arena arcillosa de color gris (SC), con clasificación A.A.S.H.T.O A-2-4 (0) y una arcilla inorgánica de media plasticidad color rojo (CL), con clasificación A.A.S.H.T.O A-7-6 (17), en una relación 90/10 respectivamente, materiales obtenidos de la cantera El Almendro, ubicada en el municipio de Sabana de Torres, la cual cuenta con Licencia

Ambiental según la Resolución 603 del 30 de Junio de 2005, expedida por la Corporación Autónoma Regional de Santander- CAS y título minero con código de expediente FGE-142. Para la evaluación de la resistencia del material y la lixiviación de hidrocarburos, se elaboró la matriz de la tabla 1, en la cual se varió el porcentaje de sedimentos con hidrocarburos, material granular y cal hidratada, según pruebas preliminares realizadas a nivel de laboratorio, así como con recomendaciones según bibliografía especializada para la estabilización de suelos variando el porcentaje de cal hidratada (Sharma et al., 2018), con el propósito de encontrar la combinación óptima entre resistencia y composición química, para asegurar una formulación adecuada, para poder ser usada en el mantenimiento de vías terciarias de la operación de PetroSantander (Colombia) GmbH en Sabana de Torres.

Tabla 1. Diseño Experimental para la preparación de las muestras de sedimentos con hidrocarburos, material de afirmado y Cal hidratada

% Agente ligante (Sedimento con hidrocarburo)	% llenante (Cal hidratada)*				
	0%	1%	5%	8%	12%
0% Sedimento	60,000 g_ Material granular	60,000 g_ Material granular + 600g_ Cal Hidratada	60,000 g_ Material granular + 3000g_ Cal hidratada	60,000 g_ Material granular + 4800 g_ Cal Hidratada	60,000 g_ Material granular +7200 g_ Cal Hidratada
40% Sedimento	36,000 g_ Material granular + 24,000 g_ Sedimento + 0_g Cal Hidratada	36,000 g_ Material granular + 24,000 g_ Sedimento + 600_g Cal Hidratada	36,000 g_ Material granular + 24,000 g_ Sedimento + 3000_g Cal Hidratada	36,000 g_ Material granular + 24,000 g_ Sedimento +4800_g Cal Hidratada	36,000 g_ Material granular + 24,000 g_ Sedimento + 7200_g Cal Hidratada
60% Sedimento	24,000 g_ Material granular + 36,000 g_ Sedimento + 0_g Cal Hidratada	24,000 g_ Material granular + 36,000 g_ Sedimento + 600_g Cal Hidratada	24,000 g_ Material granular + 36,000 g_ Sedimento + 3000_g Cal Hidratada	24,000 g_ Material granular + 36,000 g_ Sedimento + 4800_g Cal Hidratada	24,000 g_ Material granular + 36,000 g_ Sedimento + 7,200_g Cal Hidratada

*la masa de la cal hidratada a aplicar, se calculó en función de la masa de la mezcla entre material granular y los sedimentos con hidrocarburo, que para el presente caso correspondió a 60,000 g

Fuente: Adaptada de Al-Abdul Wahhab & Dalhat, 2014

Para la preparación de las muestras, se empleó una báscula rectangular, referencia D32XW30VR, marca OHAUS, con capacidad máxima de 30 kg y una sensibilidad de 5 g, la cual fue calibrada en el sitio de preparación de las muestras. En las ilustraciones 3 y 4, se observa la balanza y la cal hidratada empleada para la preparación de las muestras.



Ilustración 3. Balanza y Cal hidratada para la preparación de muestras de sedimentos con hidrocarburos, material de afirmado y cal hidratada

Fuente: Propia, abril 2019



Ilustración 4. Pesaje de Cal hidratada para la preparación de las muestras de sedimentos con hidrocarburos, material de afirmado y cal hidratada

Fuente: Propia, abril 2019

Una vez se agregó el sedimento con hidrocarburo, el material de afirmado y la cal hidratada de acuerdo con las proporciones de la tabla 1, se llevó a cabo un volteo del material de forma manual, para mezclar los tres componentes. En la ilustración 5, se aprecia el material de afirmado empleado para las pruebas. En la ilustración 6, se aprecia la mezcla de material de afirmado, sedimentos con hidrocarburos y cal hidratada. En la ilustración 7, se observa el volteo manual para la mezcla del material de afirmado, los sedimentos con hidrocarburos y la cal hidratada.



Ilustración 5. Material de afirmado empleado para la preparación de las muestras

Fuente: Propia, abril 2019



Ilustración 6. Mezcla de material de afirmado, sedimentos con hidrocarburos y cal hidratada

Fuente: Propia, abril 2019



Ilustración 7. Volteo manual para la mezcla de material de afirmado, sedimentos con hidrocarburos y cal hidratada

Fuente: Propia, abril 2019

Como tiempo de curado de las muestras, se estableció siete días, para favorecer las reacciones químicas entre la cal hidratada y los componentes de la mezcla, teniendo en cuenta estudios previos, en los cuales se ha demostrado el aumento de la resistencia de suelos mezclados con cal hidratada con un periodo de curado de 7 días (Kavak & Akyarlı, 2007), alcanzando en este tiempo prácticamente la resistencia final del material (Ghorbani, Hasanzadehshooili, Karimi, Daghigh, & Medzvieckas, 2015), así como la reducción del potencial de lixiviación de hidrocarburos y de metales pesados en suelos cuando se adiciona cal hidratada (Kogbara, Yi, & Al-Tabbaa, 2011). Las muestras fueron empacadas en bolsas plásticas y selladas con cinta pegante, para evitar pérdidas de humedad. Con el propósito de simular las condiciones de curado a las condiciones climáticas del municipio de Sabana de Torres, las muestras fueron almacenadas bajo techo, antes de ser trasladadas al laboratorio para los análisis físicos y químicos. Durante la fase experimental, se llevó a cabo un monitoreo diario de la humedad atmosférica y de la temperatura con el equipo ThermoPro Modelo No.:TP-55.

1.2.1) Parámetros Estructurales

Una vez se cumplió el tiempo de curado de siete días, se determinó la densidad máxima seca, según el procedimiento tomado y adaptado de la norma INV E - 142-13 para suelos afectados por derrames de hidrocarburos, por el cual una muestra de suelo impregnado con hidrocarburo con una humedad de moldeo seleccionada, se coloca en cinco capas dentro de un molde, sometiendo cada capa a 25 o 56 golpes con un martillo de 44.48 N (10 lb f) que cae desde una altura de 457.2 mm (18"), produciendo una energía de compactación

aproximada de 2700 kN–m/m³ (56 000 lbf–pie/pie³). Posteriormente se determina el peso unitario seco resultante y el procedimiento se repite con un número suficiente de humedades de moldeo, para establecer una curva que relacione a éstas con los respectivos pesos unitarios secos obtenidos. Esta curva se llama curva de compactación y su vértice determina la humedad óptima y el peso unitario seco máximo, para el ensayo normal de compactación. El secado preliminar de la muestra, se deberá realizar en un horno a una temperatura de $50^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{ C}$ ($122^{\circ} \pm 41^{\circ} \text{ F}$), teniendo en cuenta que la muestra contiene hidrocarburos (Serrano & Torrado, 2013d). La descripción completa del procedimiento tomado y adaptado de la norma INV E - 142-13, se encuentra en el Anexo 36.

Seguidamente, se determinó el % CBR como una medida del esfuerzo cortante del material bajo condiciones controladas de densidad y humedad (Patel, Patel, & Dadhich, 2013), según el procedimiento INV E148-13 (Instituto Nacional de Vías- INVIAS, 2013) para la totalidad de mezclas preparadas en campo, acorde a las proporciones de la tabla 1. Adicional, se llevó a cabo la determinación del contenido de asfalto, según el procedimiento INV E-732-13 (Instituto Nacional de Vías- INVIAS, 2013) para las combinaciones que contienen sedimentos con hidrocarburos.

1.2.2) Parámetros Físicoquímicos

Para las combinaciones que contienen sedimentos con hidrocarburos, cada mezcla fue compactada a la humedad óptima determinada en el laboratorio y se procedió al análisis

fisicoquímico para determinar los siguientes parámetros: pH, Conductividad eléctrica, Contenido de grasas y aceites (porcentaje por peso), Contenido de metales totales (Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo, Plomo, Mercurio, Selenio, Plata y Zinc), Contenido de cloruros en el lixiviado (mg/L), Relación de Adsorción de Sodio (RAS): Calcio, Sodio, Magnesio y Porcentaje de Sodio Intercambiable (% PSI). En la ilustración 8 se aprecia las muestras compactadas a la humedad óptima, para proceder a los análisis fisicoquímicos.



Ilustración 8. Muestras de sedimentos con hidrocarburos, material de afirmado y cal hidratada compactadas con la humedad óptima para los análisis fisicoquímicos

Fuente: Propia, abril 2019

Acorde a los resultados obtenidos, se seleccionó como mezcla de diseño óptima, aquella mezcla que presentó un % de CBR > 15 según lo requerido en las especificaciones de la tabla 311-1 del capítulo 3 artículo 311, de las normas Colombianas del Instituto Nacional de Vías- INVIAS referente a materiales de afirmado (Instituto Nacional de Vías- INVIAS, 2013). Adicional, la mezcla de diseño óptima debía tener una concentración de

grasas & aceites < 1% porcentaje en peso, según los requerimientos del numeral 313G de la norma Louisiana 29 B, referentes a los criterios de uso de mezclas para aplicación en vías (Department of Natural Resources | State of Louisiana, 2010).

Una vez seleccionada la mezcla de diseño óptima, se procedió a realizar la granulometría por tamizado con lavado por el tamiz No 200 y la prueba de lixiviación TCLP, para la determinación de los parámetros pH, Conductividad, Cloruros, Arsénico, Selenio, Mercurio, Plomo, Zinc, Plata, Cadmio, Cromo Total, Bario, TPH's y Benceno, con el propósito de simular el comportamiento de la muestra frente a la precipitación pluvial. Adicional, se llevó a cabo la determinación del contenido de grasas y aceites e hidrocarburos totales del petróleo, cloruros, el contenido de metales totales (Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo, Plomo, Mercurio, Selenio, Plata, Zinc, Cobre, Níquel) y el contenido de BETX (Benceno, Etilbenceno, Tolueno, Xileno) en la muestra sólida.

1.3) Análisis de la viabilidad de la mezcla comparando los parámetros estructurales y resultados de la prueba TCLP con normatividades existentes

1.3.1) Parámetros Estructurales

Una vez obtenida la mezcla de diseño óptima, se llevó a cabo la comparación con la normatividad aplicable al tema. Para los parámetros de %CBR, granulometría y límites, los

resultados fueron comparados con las normas Colombianas del Instituto Nacional de Vías- INVIAS, específicamente para lo requerido para el material de afirmado, acorde al numeral 311 del tercer capítulo, de las especificaciones técnicas para construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras (Instituto Nacional de Vías- INVIAS, 2013). Adicionalmente, se llevó a cabo la comparación de los resultados, con las especificaciones requeridas en el artículo 321P-17, de las normas Colombianas del Instituto Nacional de Vías- INVIAS referente a subbase estabilizada con una mezcla asfáltica natural (Instituto Nacional de Vías- INVIAS, 2017) y con los requerimientos del artículo 341P-17 para bases estabilizadas con una mezcla asfáltica natural (Instituto Nacional de Vías- INVIAS, 2017) teniendo en cuenta la similitud del material. En las Tablas 2, 3, 4 ,5, 6 y 7, se presentan los parámetros estructurales acorde a la normatividad colombiana, para comparación con los resultados obtenidos con la mezcla de diseño óptima.

Tabla 2. Valores para límite líquido, índice de plasticidad y %CBR como requisito de agregados para material de afirmados

Característica	Unidad	Requisito
Límite Líquido	%	40
Índice de plasticidad	%	4 – 9
CBR	%	≥ 15

Fuente: Tabla 311- 1, Capítulo 3 INVIAS, 2013

Tabla 3. Franjas granulométricas del material de afirmado

Tipo de Gradación	Tamiz (mm/ U.S. Standard)							
	37.5 1 1/2"	25.0 1"	19.0 3/4"	9.5 3/8"	4.75 No. 4	2.00 No. 10	0.425 No. 40	0.075 No. 200
	% Pasa							
A-38	100	-	80-100	60-85	40-65	30-50	13-30	9 – 18
A-25	-	100	90 – 100	65- 90	45 - 70	35- 55	15 – 35	10 – 20
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (+ -)	0 %		7%			6%		3%

Fuente: Tabla 311- 2, Capítulo 3 INVIAS, 2013

Tabla 4. Franjas granulométricas de los agregados combinados para la construcción de capas de subbases estabilizadas con una mezcla asfáltica natural

Tipo de Gradación	Tamiz (mm/ U.S. Standard)								
	50.0 2"	37.5 1 1/2"	25.0 1"	12.5 1/2"	9.5 3/8"	4.75 No. 4	2.00 No. 10	0.425 No. 40	0.075 No. 200
	% Pasa								
SBEMAN-50	100	70-95	60 - 90	45-75	40- 70	25-55	15-40	6 -25	2 -15
SBEMAN-38	-	100	75 - 95	55- 85	45 - 75	30- 60	20-45	8-30	2-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (+ -)	0 %		7%			6%		3%	

Fuente: Tabla 321P- 1, Artículo 321P-17 INVIAS, 2017

Tabla 5. Valores para límite líquido, índice de plasticidad y CBR como requisito de los agregados pétreos a estabilizar de una subbase con una mezcla asfáltica natural

Característica	Unidad	Requisito
Límite Líquido	%	35
Índice de plasticidad	%	9
CBR	%	≥ 15

Fuente: Tabla 321P- 2, Artículo 321P-17 INVIAS, 2017

Tabla 6. Franjas granulométricas de los agregados combinados para la construcción de capas de bases estabilizadas con una mezcla asfáltica natural

Tipo de material	Tamiz (mm/ U.S. Standard)								
	37.5 1 1/2"	25.0 1"	12.5 1/2"	9.5 3/8"	4.75 No. 4	2.36 No.8	0.425 No. 40	0.150 No.100	0.075 No. 200
BEMAN-38	100	70-100	50-80	45-75	30-60	20-45	10-27	5-18	3-15
BEMAN-25	-	100	60-90	50-80	30-60	20-45	10-27	5-18	3-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (+ -)				5%				3%	

Fuente: Tabla 341P- 1, Artículo 341P-17 INVIAS, 2017

Tabla 7. Valores para límite líquido, índice de plasticidad y CBR como requisito de los agregados pétreos a estabilizar de una base con una mezcla asfáltica natural

Característica	Unidad	Requisito
Límite Líquido	%	35
Índice de plasticidad	%	7
CBR	%	20

Fuente: Tabla 341P- 2, Artículo 341P-17 INVIAS, 2017

1.3.2) Parámetros Físicoquímicos

Para la comparación de los resultados de los análisis físicoquímicos obtenidos, se elaboró una matriz, con las normativas existentes para el reúso y reutilización de residuos aceitosos para construcción y o mantenimiento de vías. Teniendo en cuenta que Colombia no cuenta con normatividad para reúso de residuos aceitosos provenientes del sector de hidrocarburos, para construcción y mantenimiento de vías, fue necesario revisar normatividades

internaciones aplicables al tema. De acuerdo con lo anterior, se realizó una revisión documental sobre las normas disponibles en esta materia y se encontraron dos normativas norteamericanas y dos canadienses, las cuales contienen parámetros específicos para el reúso de residuos aceitosos para mantenimiento de vías. A continuación se relacionan las 4 normativas que se evaluaron: norma Louisiana 29B (Department of Natural Resources | State of Louisiana, 2010), requerimientos de la Railroad Commission Of Texas para el reciclaje de residuos aceitosos para ser usados en vías (Railroad Commission Of Texas, 2013), lineamientos para aplicación de residuos aceitosos en vías municipales en Saskatchewan Canadá (Saskatchewan Energy and Mine, 1997) y los lineamientos para construcción de carreteras con arenas aceitosas de la Alberta Energy and Utilities Board (Connor, Ahmad, C. Hamel, & J. Pokluda, 2019). En la tabla 8, se presentan las normativas y los respectivos parámetros fisicoquímicos evaluados.

Tabla 8. Normativas para reúso de residuos aceitosos en construcción y/o mantenimiento de vías

Normativas para reúso de residuos aceitosos en vías/Parámetros fisicoquímicos requeridos	Louisiana 29B (using the mixture onsite to develop lease roads)	Railroad Commission of Texas (Standards for Recyclable Product to be Used as Road Base)	Alberta Energy and Utilities Board	Guidelines for the Application of Oily Byproducts to Municipal Roads in Saskatchewan
pH (Unidades de pH)	6-12	6 - 12,49	-	6-9
Conductividad Eléctrica (mmhos/cm)	< 8	-	4	-
Contenido de grasas y aceite (porcentaje por peso)	< 1	-	-	-
Hidrocarburos Totales del Petróleo (porcentaje por peso)	-	-	≤ 5%	< 5%
Contenido de Cloruros (mg/Kg)	-	-	≤ 3000	-
Contenido de metales totales:				
Arsénico (ppm)	10	-	-	-
Bario (ppm)	20000	-	-	-
Cadmio (ppm)	10	-	≤ 1	≤ 3
Cromo (ppm)	500	-	-	-
Plomo (ppm)	500	-	≤ 70	≤ 375
Mercurio (ppm)	10	-	≤ 6.6	≤ 0.8
Selenio (ppm)	10	-	-	-
Plata (ppm)	200	-	-	-
Zinc (ppm)	500	-	≤ 200	≤ 600
Cobre (ppm)	-	-	≤ 63	≤ 150
Níquel (ppm)	-	-	≤ 150	≤ 150
BETX:				
Benceno (ppm)	-	-	≤ 0.5	-
Etilbenceno (ppm)	-	-	≤ 1.2	-
Tolueno (ppm)	-	-	≤ 0.80	-
Xileno (ppm)	-	-	≤ 1	-
Concentración de cloruros en el lixiviado (mg/L)	< 500	<700	-	-
Contenido de metales en el lixiviado:				
Arsénico (mg/L)	-	<5	-	-
Bario (mg/L)	-	<100	-	-
Cadmio (mg/L)	-	<1	-	-
Cromo Total (mg/L)	-	<5	-	-
Plomo (mg/L)	-	<5	-	-
Mercurio (mg/L)	-	<0,2	-	-
Selenio (mg/L)	-	<1	-	-
Plata (mg/L)	-	<5	-	-
Zinc (mg/L)	-	<5	-	-
Benceno (mg/L)	-	<0,5	-	-
TPH (mg/L)	-	<100	-	-

Fuente: Propia, abril 2019

Capítulo 2

Resultados Obtenidos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en desarrollo de la fase experimental.

2.1) Evaluación fisicoquímica del material base de la mezcla mediante la determinación de parámetros como granulometría, contenido de asfalto y prueba TCLP, para conocer su composición y proporciones

La granulometría del sedimento con hidrocarburos reveló un contenido de arenas del 83.4%, un contenido de gravas de 0.1% y un contenido de finos de 16.5%. La muestra analizada, no presentó límite líquido ni plástico, clasificando el sedimento según el U.S.C como arena limosa (SM) y según la A.A.S.H.T.O como A - 2 - 4 (0). En la ilustración 9 se observa la curva granulométrica del sedimento con hidrocarburos.

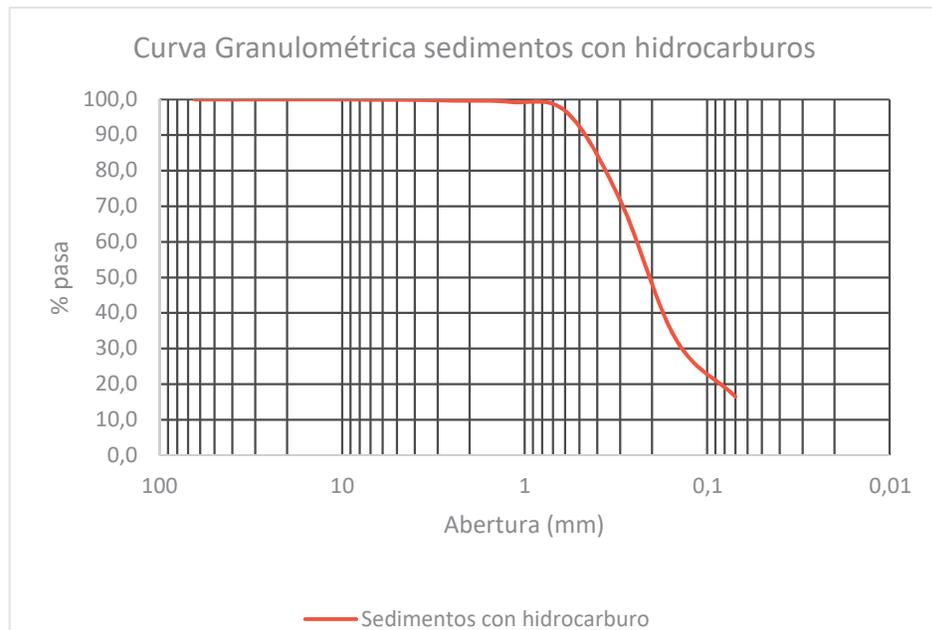


Ilustración 9. Curva granulométrica de los sedimentos con hidrocarburos

Fuente: Ingenieros Geotécnicos Asociados, marzo 2019

La muestra de sedimentos con hidrocarburos presentó un contenido de asfalto de 4,4%.

En la tabla 9, se presentan los resultados de la prueba de lixiviación para la muestra de sedimentos con hidrocarburos.

Tabla 9. Resultados prueba de lixiviación para la muestra de sedimentos con hidrocarburos

Parámetro	Resultado	Louisiana 29B (Testing Criteria for reusable material, §565 F)	Decreto 4741 de 2005, MAVDT
pH (Unidades de pH)	8,44	6,5 - 9,0	-
Conductividad (mmhos/cm)	0,80	8 mmhos/cm	-
Cloruros (mg Cl ⁻ /L)	145,15	500	-
Arsénico (mg As/L)	<0,001	0,5	5
Selenio (mg Se/L)	<0,001	0,1	1
Mercurio (mg Hg/L)	<0,001	0,02	0,2
Plomo (mg Pb/L)	<0,1	0,5	5
Zinc (mg Zn/L)	0,053	5	
Plata (mg Ag/L)	<0,2	0,5	5
Cadmio (mg Cd/L)	<0,001	0,1	1
Cromo Total (mg Cr/L)	<0,05	0,5	5
Bario (mg Ba/L)	<0,2	10	100
Relación Absorción Sodio (RAS)	4,68	12	-
Porcentaje de Sodio Intercambiable (% PSI)	6,52	15%	-
Hidrocarburos Totales Lixiviados (mg/L)	282,55	10	-

Fuente: Propia, abril 2019

2.2) Diseño de un experimento para la mezcla, que evalúe su resistencia al esfuerzo cortante y lixiviación de hidrocarburos

2.2.1) Parámetros Estructurales

En la tabla 10, se observan los resultados obtenidos a nivel de laboratorio con las diferentes muestras, para los parámetros densidad máxima seca, humedad óptima, %CBR y contenido

de asfalto. Durante el periodo de curado de las muestras, el rango de humedad atmosférica se mantuvo entre 33% - 99%. La temperatura durante el tiempo de curado de las muestras se mantuvo entre 24,2 °C – 42,4°C.

Tabla 10. Resultados para Proctor modificado y CBR en las muestras analizadas

% Agente ligante	% llenante (Cal Hidratada)				
	0%	1%	5%	8%	12%
0% Sedimento	Densidad: 2,01 g/cm ³	Densidad: 1,93 g/cm ³	Densidad: 1,87 g/cm ³	Densidad: 1,893 g/cm ³	Densidad: 1,748 g/cm ³
	Humedad: 9,65%	Humedad: 11,15%	Humedad: 12,35%	Humedad: 10,9%	Humedad: 12,25 %
	CBR: 27%	CBR: 69%	CBR: 78 %	CBR:78%	CBR: 71,5 %
40% Sedimento	Asfalto: 0 %	Asfalto: 0 %	Asfalto: 0 %	Asfalto: 0 %	Asfalto: 0 %
	Densidad: 2,14 g/cm ³	Densidad: 2,05 g/cm ³	Densidad: 1,95 g/cm ³	Densidad: 1,93 g/cm ³	Densidad: 1,87 g/cm ³
	Humedad: 6,95%	Humedad: 8,15%	Humedad: 9,95%	Humedad: 10,25%	Humedad: 11,90%
60% Sedimento	CBR: 39,50%	CBR: 52,00%	CBR: 56,50%	CBR: 73,00%	CBR: 97,50%
	Asfalto: 0,60 %	Asfalto: 0,65 %	Asfalto: 0,50%	Asfalto:0,35 %	Asfalto: 0,05%
	Densidad: 2,049 g/cm ³	Densidad: 2,025 g/cm ³	Densidad: 1,997g/cm ³	Densidad: 1,974 g/cm ³	Densidad: 1,974 g/cm ³
	Humedad:6,65 %	Humedad: 6,75%	Humedad: 7,25%	Humedad: 7,20%	Humedad: 7,25%
	CBR:36,5 %	CBR: 39,50%%	CBR: 79,50%%	CBR: 88,00% %	CBR: 81,00%
	Asfalto: 1,45 %	Asfalto: 2,10%	Asfalto: 1,80%	Asfalto: 1,80%	Asfalto: 1,60%

Fuente: Ingenieros Geotécnicos Asociados, Julio 2019

En la ilustración 10, se muestra los resultados % de CBR versus los porcentajes de cal hidratada para las distintas combinaciones.

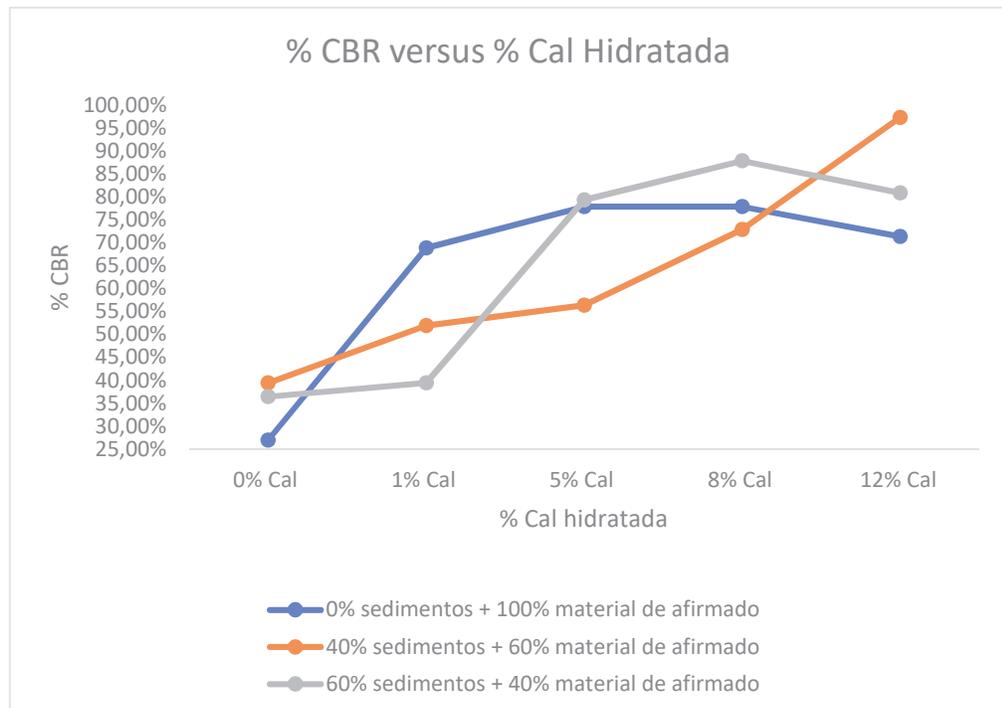


Ilustración 10. %CBR Versus % Cal hidratada en las diferentes mezclas

Fuente: Propia, agosto 2019

En la ilustración 11, se presentan los datos de densidad máxima seca versus el % de cal hidratada en las distintas combinaciones.

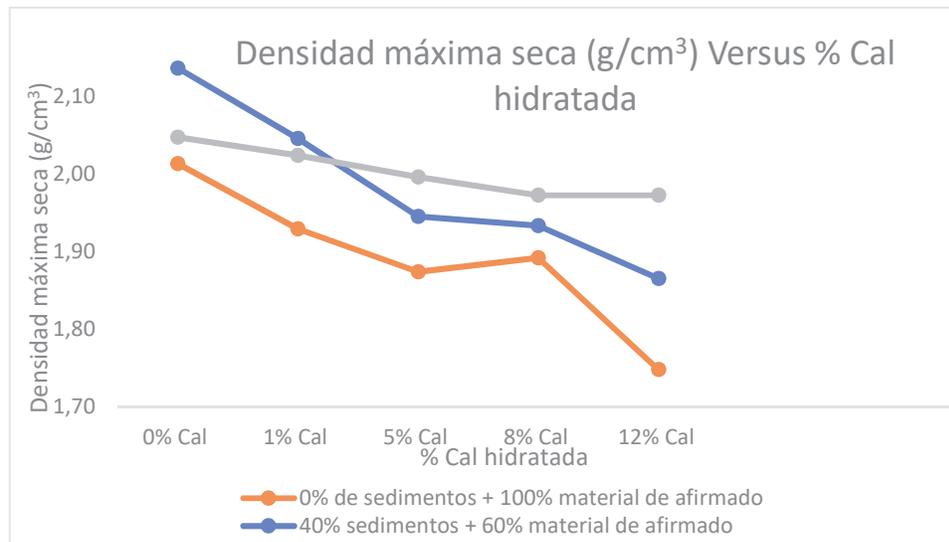


Ilustración 11. Densidad máxima seca (g/cm³) versus % cal hidratada en las distintas combinaciones

Fuente: Propia, agosto 2019

En la ilustración 12, se presenta la variación de la humedad óptima versus el % de cal hidratada en las distintas combinaciones.

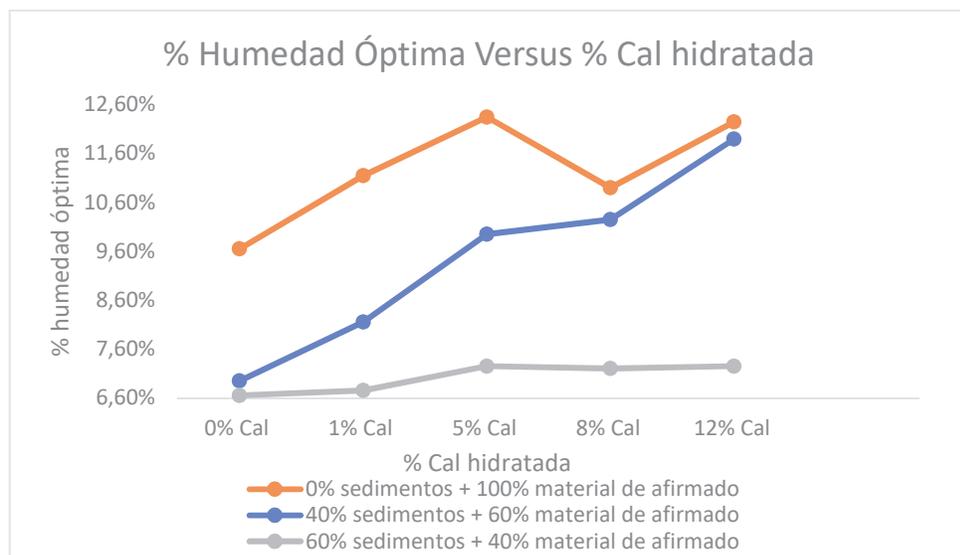


Ilustración 12. % Humedad Óptima Versus % Cal hidratada en las distintas combinaciones

Fuente: Propia, agosto 2019

En la ilustración 13, se presentan los resultados de contenido de asfalto en las combinaciones preparadas en función de la variación del porcentaje de cal hidratada.

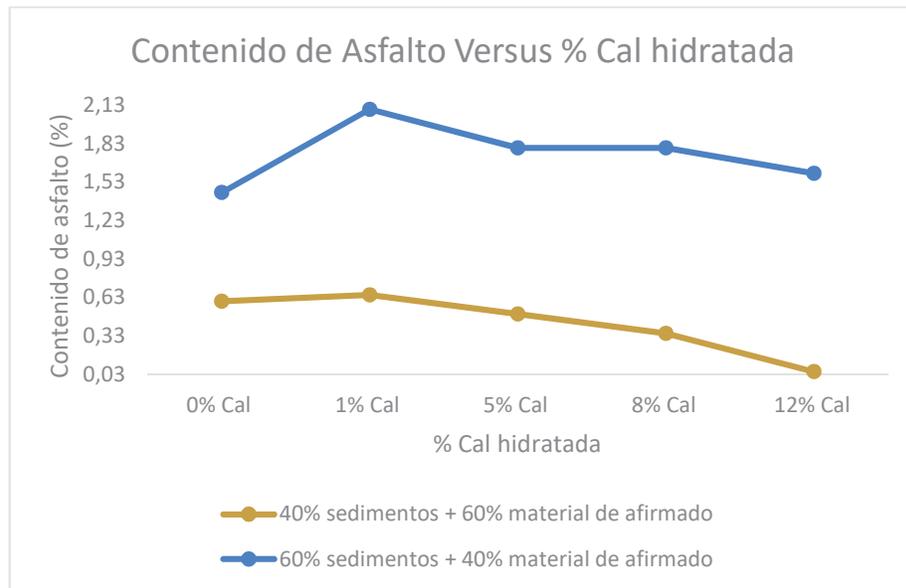


Ilustración 13. Variación del contenido de asfalto en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

2.2.2) Parámetros Físicoquímicos

En la tabla 11, se presentan los resultados físicoquímicos obtenidos en las diferentes combinaciones de acuerdo con la tabla 1.

Tabla 11. Resultados Análisis Fisicoquímicos muestras con sedimentos con hidrocarburos, material de afirmado y Cal hidratada en diferentes proporciones

Agente ligante	% llenante (Cal Hidratada)					
	0%	1%	5%	8%	12%	
40% Sedimento	pH: 8,94 μS/cm: 447,50 G&O (%):0,61 mg As/Kg: <0,11 mg Ba/kg: 24,74 mg Cd/kg: 1,34 mg Cr/kg: 22,54 mg Pb/kg: 11,54 mg Hg/kg: <0,01 mg Ag/kg: 0,12 mg Se/kg: <0,01 mg Zn/kg: 22,54 mg Cl -/L: 11,64 mg Ca/L: 2,15 mg Mg/L: 0,20 mg Na/L: 4,46 PSI(%):1,14 RAS: 0,78	pH: 10,62 μS/cm: 743,50 G&O (%):0,40 mg As/Kg: <0,11 mg Ba/kg: 22,03 mg Cd/kg:1,62 mg Cr/kg:24,60 mg Pb/kg:14,26 mg Hg/kg:<0,01 mg Ag/kg:0,14 mg Se/kg:<0,01 mg Zn/kg:24,60 mg Cl -/L:11,31 mg Ca/L:10,84 mg Mg/L:0,19 mg Na/L:4,03 PSI(%):0,49 RAS: 0,33	pH: 11,55 μS/cm: 7514,00 G&O (%):0,34 mg As/Kg: <0,11 mg Ba/kg: 30,02 mg Cd/kg: 2,10 mg Cr/kg: 27,60 mg Pb/kg: 23,18 mg Hg/kg: <0,01 mg Ag/kg: 0,12 mg Se/kg: <0,01 mg Zn/kg: 27,60 mg Cl -/L: 13,07 mg Ca/L:74,28mg Mg/L:0,27 mg Na/L: 3,61 PSI(%):0,17 RAS: 0,12	pH: 11,65 μS/cm: 7228,50 G&O (%):0,41 mg As/Kg: <0,11 mg Ba/kg: 28,79 mg Cd/kg: 4,66 mg Cr/kg: 26,54 mg Pb/kg: 36,57 mg Hg/kg: <0,01 mg Ag/kg: 0,11 mg Se/kg: <0,01 mg Zn/kg: 26,54 mg Cl -/L: 31,33 mg Ca/L: 115,31 mg Mg/L: 0,21 mg Na/L: 3,36 PSI(%):0,13 RAS: 0,09	pH: 11,68 μS/cm: 8025,50 G&O (%):0,45 mg As/Kg: <0,11 mg Ba/kg: 28,00 mg Cd/kg: 1,22 mg Cr/kg: 26,17 mg Pb/kg: 39,57 mg Hg/kg: <0,01 mg Ag/kg: 0,11 mg Se/kg: <0,01 mg Zn/kg: 26,18 mg Cl -/L: 35,06 mg Ca/L: 240,92 mg Mg/L: 0,26 mg Na/L: 3,28 PSI(%):0,09 RAS: 0,06	
	60% Sedimento	pH: 8,76 μS/cm: 2012,50 G&O (%):1,43 mg As/Kg: <0,11 mg Ba/kg: 9,28 mg Cd/kg: 0,48 mg Cr/kg: 3,29 mg Pb/kg: 0,88 mg Hg/kg: 0,03 mg Ag/kg: 0,14 mg Se/kg: <0,01 mg Zn/kg: 54,16 mg Cl -/L: 55,84 mg Ca/L: 0,23 mg Mg/L: 0,22 mg Na/L: 31,44 PSI(%):7,94 RAS: 5,77	pH: 10,50 μS/cm: 4109,00 G&O (%):1,84 mg As/Kg: <0,11 mg Ba/kg: 10,24 mg Cd/kg: 0,75 mg Cr/kg: 4,33 mg Pb/kg: 0,84 mg Hg/kg: 0,04 mg Ag/kg: 0,12 mg Se/kg: <0,01 mg Zn/kg: 36,34 mg Cl -/L: 42,76 mg Ca/L: 14,09 mg Mg/L: 0,16mg Na/L: 31,42 PSI(%):3,29 RAS: 2,29	pH: 11,82 μS/cm: 7718,50 G&O (%):1,89 mg As/Kg: <0,11 mg Ba/kg: 12,87 mg Cd/kg: 0,95mg Cr/kg: 3,94 mg Pb/kg: 0,76 mg Hg/kg: 0,09 mg Ag/kg: 0,12 mg Se/kg: <0,01 mg Zn/kg: 71,98 mg Cl -/L: 75,34 mg Ca/L: 171,01 mg Mg/L: 0,20mg Na/L: 26,53 PSI(%):0,82 RAS: 0,56	pH: 11,81 μS/cm: 8816,50 G&O (%):1,70 mg As/Kg: <0,11 mg Ba/kg: 11,37 mg Cd/kg: 1,36 mg Cr/kg: 4,07 mg Pb/kg: 0,87 mg Hg/kg: 0,22 mg Ag/kg: 0,11 mg Se/kg: <0,01 mg Zn/kg: 52,05 mg Cl -/L: 84,20 mg Ca/L: 318,03 mg Mg/L: 0,19 mg Na/L: 18,79 PSI(%):0,43 RAS: 0,29	pH: 12,73 μS/cm: 8963,50 G&O (%):1,70 mg As/Kg: <0,11 mg Ba/kg: 15,56 mg Cd/kg: 1,18 mg Cr/kg: 3,90 mg Pb/kg: 0,67 mg Hg/kg: 0,26 mg Ag/kg: 0,11 mg Se/kg: <0,01 mg Zn/kg: 38,98 mg Cl -/L: 102,95 mg Ca/L: 305,89 mg Mg/L: 0,46 mg Na/L: 22,04 PSI(%):0,51 RAS: 0,35

Fuente: Laboratorio Químico de Consultas Industriales- Universidad Industrial de Santander, Julio 2019

En la ilustración 14, se muestra el comportamiento del pH en las diferentes combinaciones en las cuales se varió el porcentaje de cal hidratada.

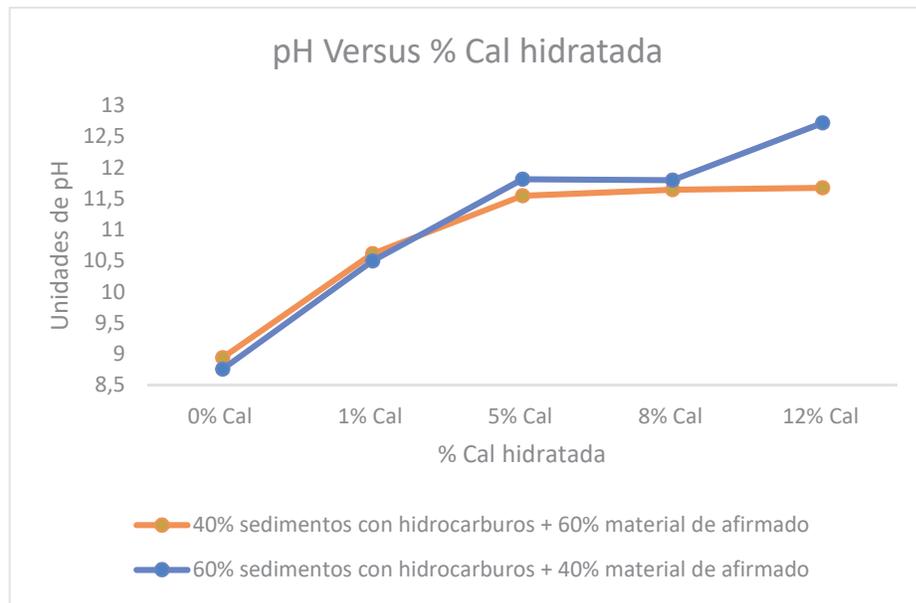


Ilustración 14. Variación del pH en las distintas combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

En la ilustración 15, se muestra la variación de la conductividad eléctrica, en función de la adición de cal hidratada.

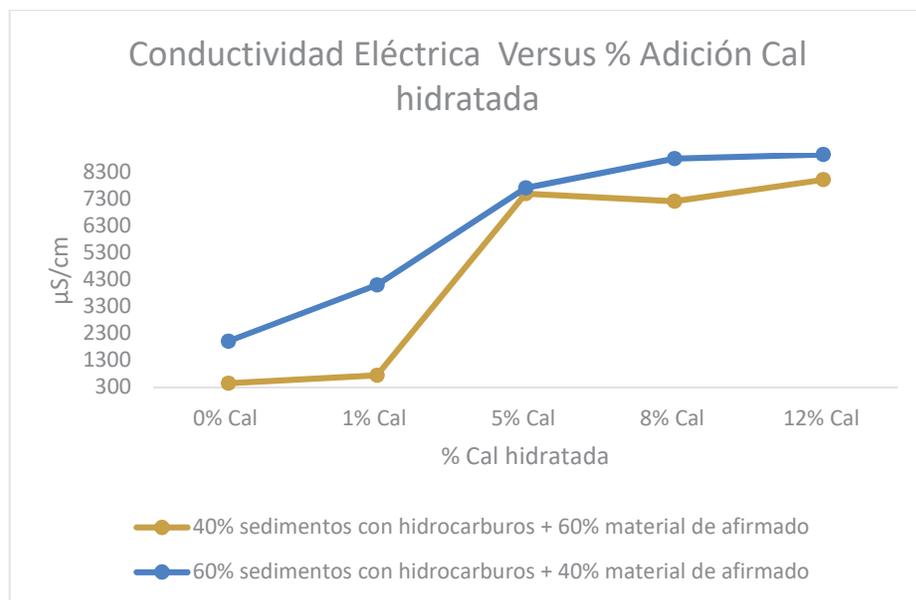


Ilustración 15. Conductividad Eléctrica versus % de adición de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

En la ilustración 16, se muestra el comportamiento del contenido de grasas & aceites en las distintas combinaciones.

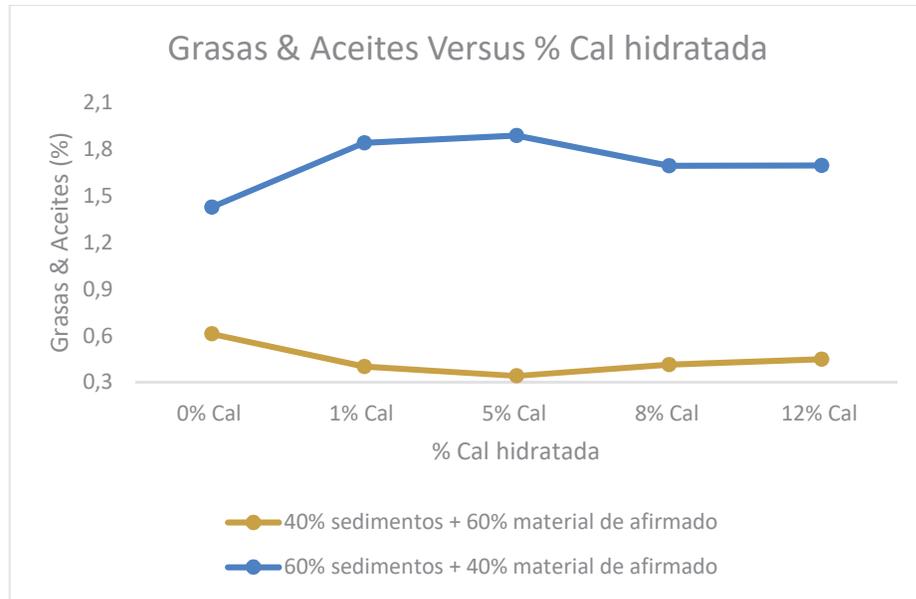


Ilustración 16. Variación del contenido de grasas & aceites en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

A continuación, se presenta el resultado del contenido de los elementos químicos en la mezcla correspondiente a 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado y de la mezcla de 60% de sedimentos con hidrocarburos + 40% material de afirmado, en las cuales se varió el porcentaje de cal, acorde a los resultados de la tabla 11.

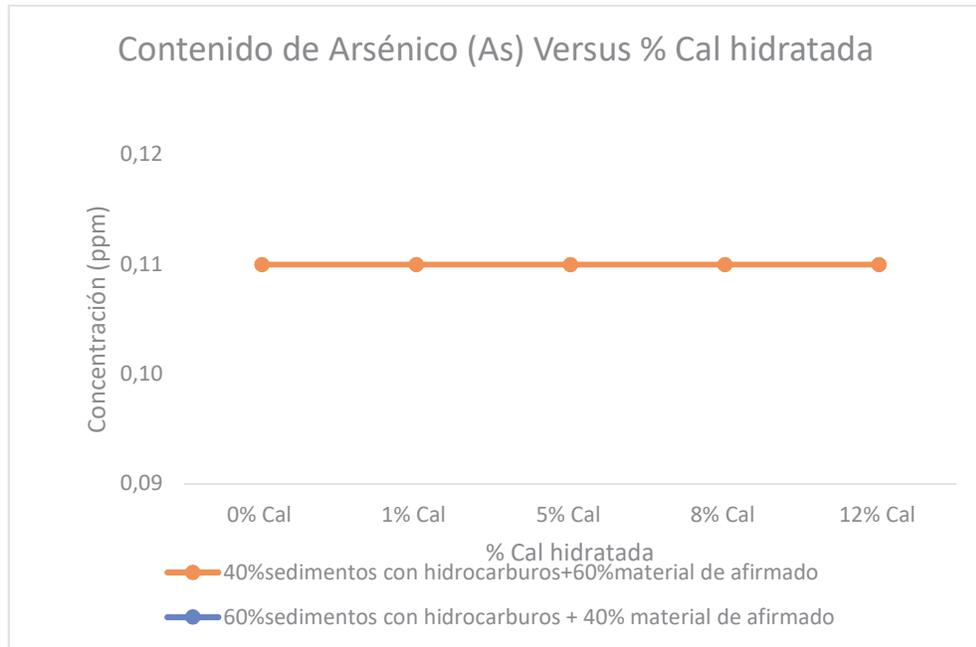


Ilustración 17. Contenido de Arsénico (As) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

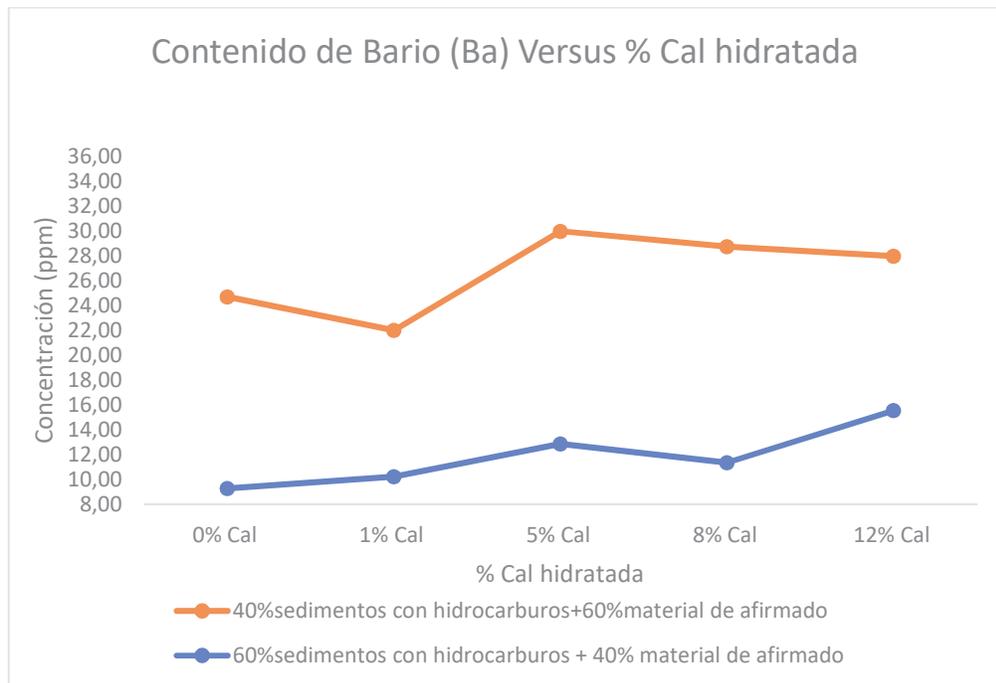


Ilustración 18. Contenido de Bario (Ba) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

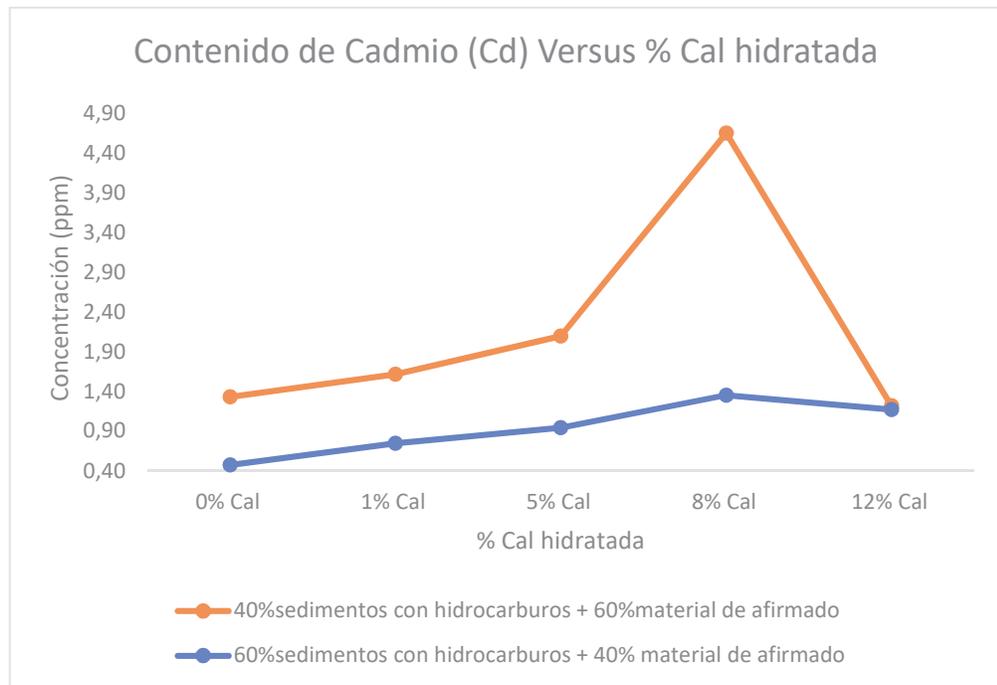


Ilustración 19. Contenido de Cadmio (Cd) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

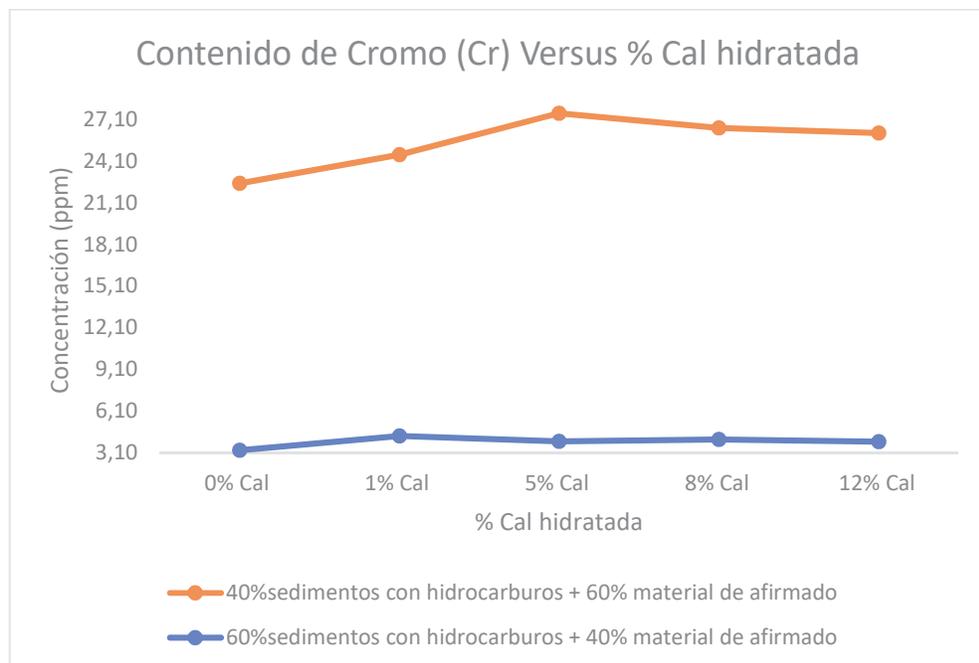


Ilustración 20. Contenido de Cromo (Cr) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

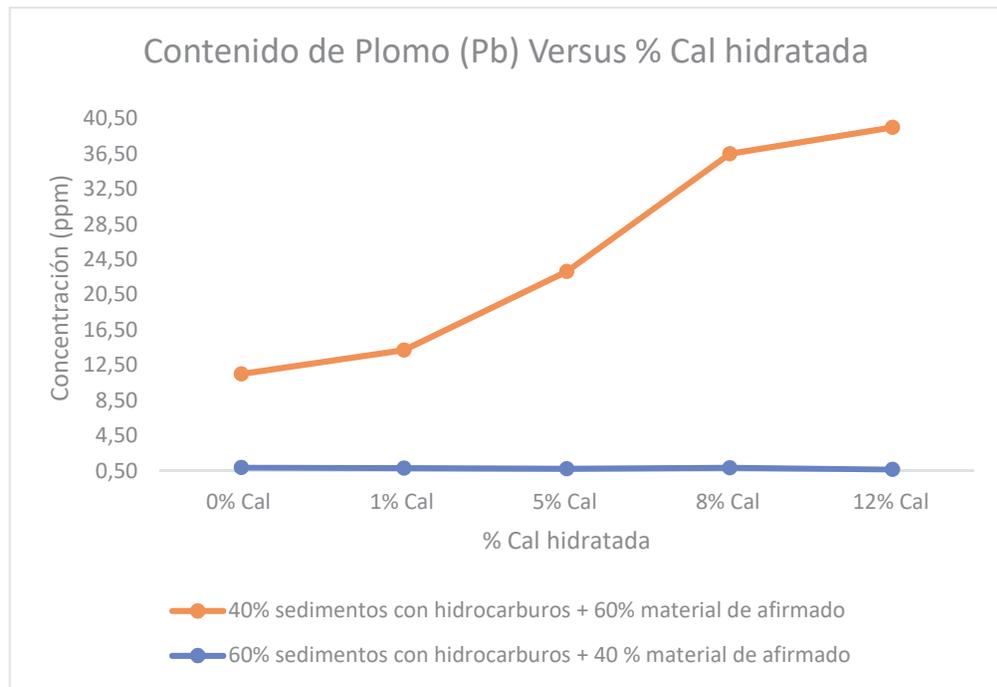


Ilustración 21. Contenido de Plomo (Pb) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

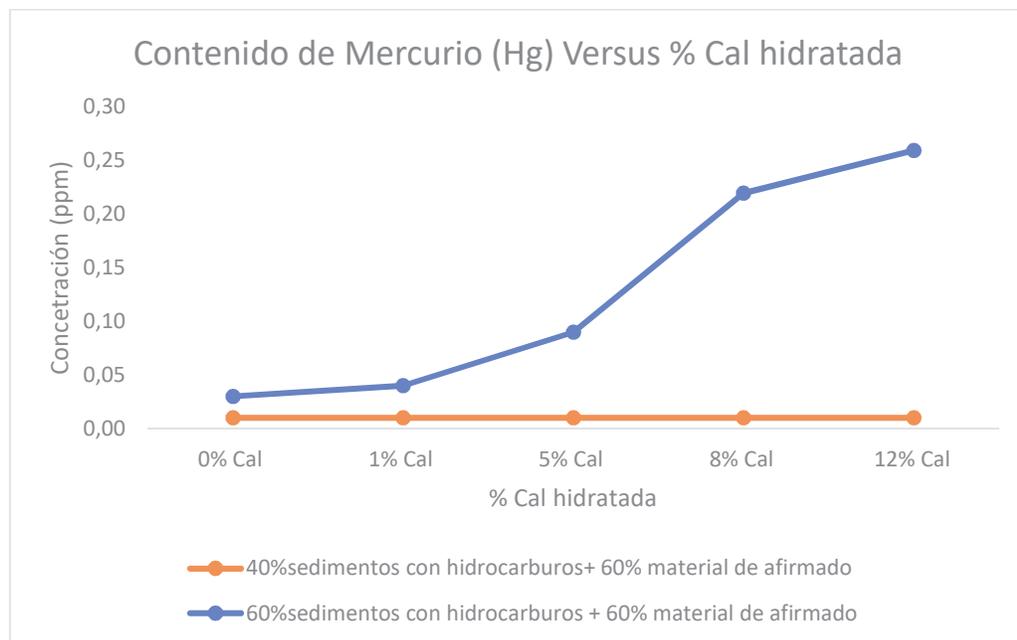


Ilustración 22. Contenido de Mercurio (Hg) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

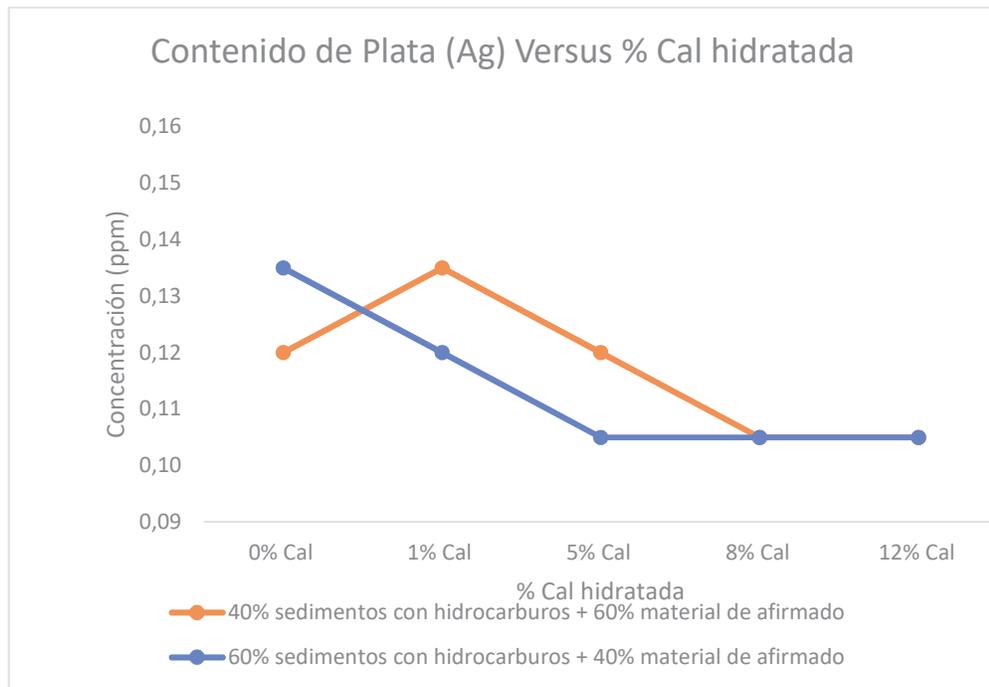


Ilustración 23. Contenido de Plata (Ag) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

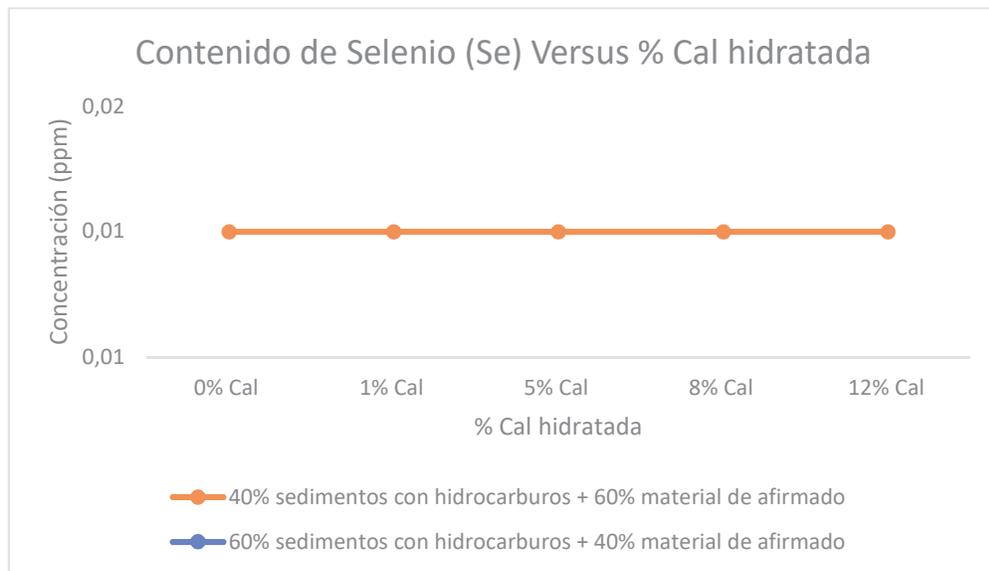


Ilustración 24. Contenido de Selenio (Se) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

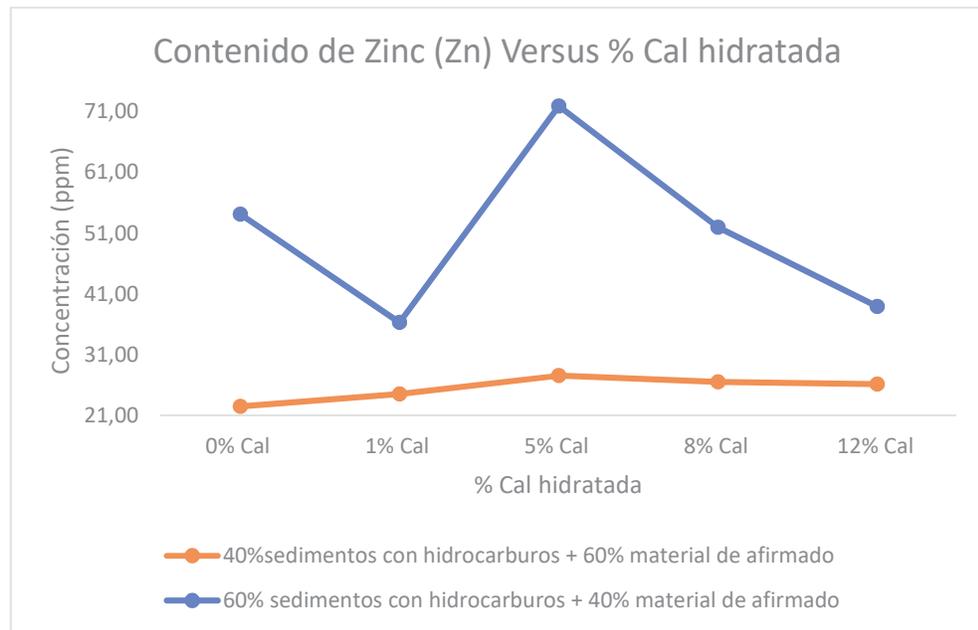


Ilustración 25. Contenido de Zinc (Zn) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

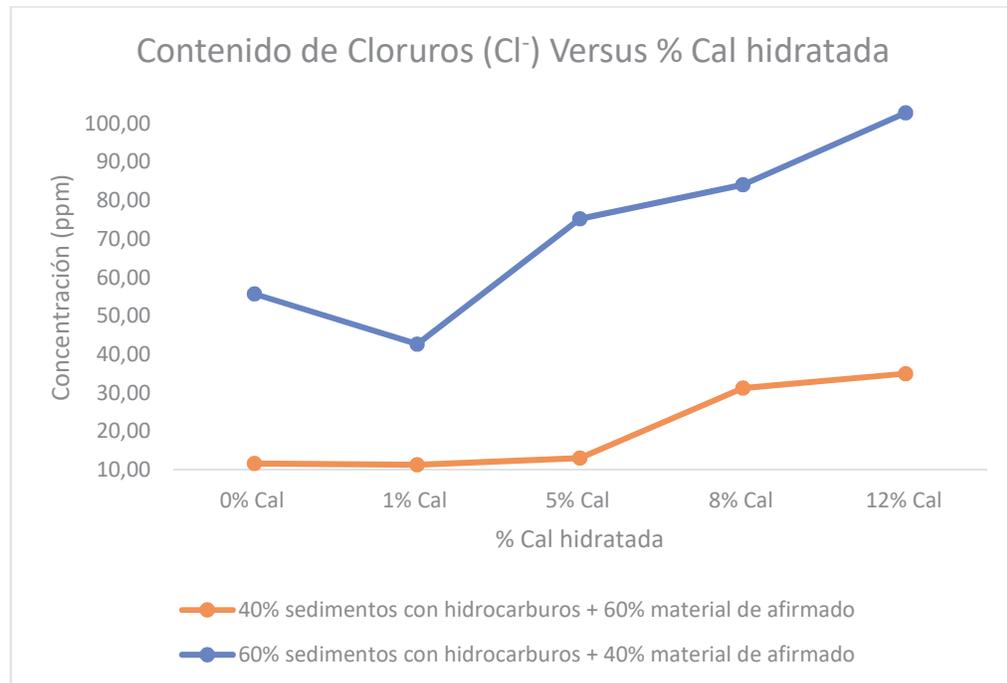


Ilustración 26. Contenido de Cloruros (Cl⁻) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

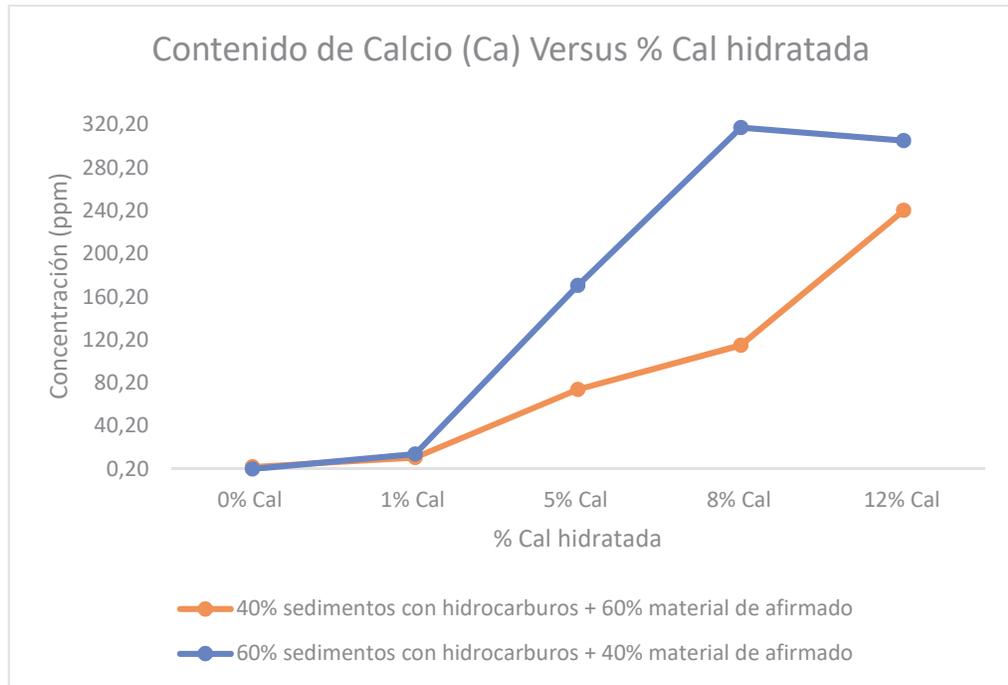


Ilustración 27. Contenido de Calcio (Ca) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

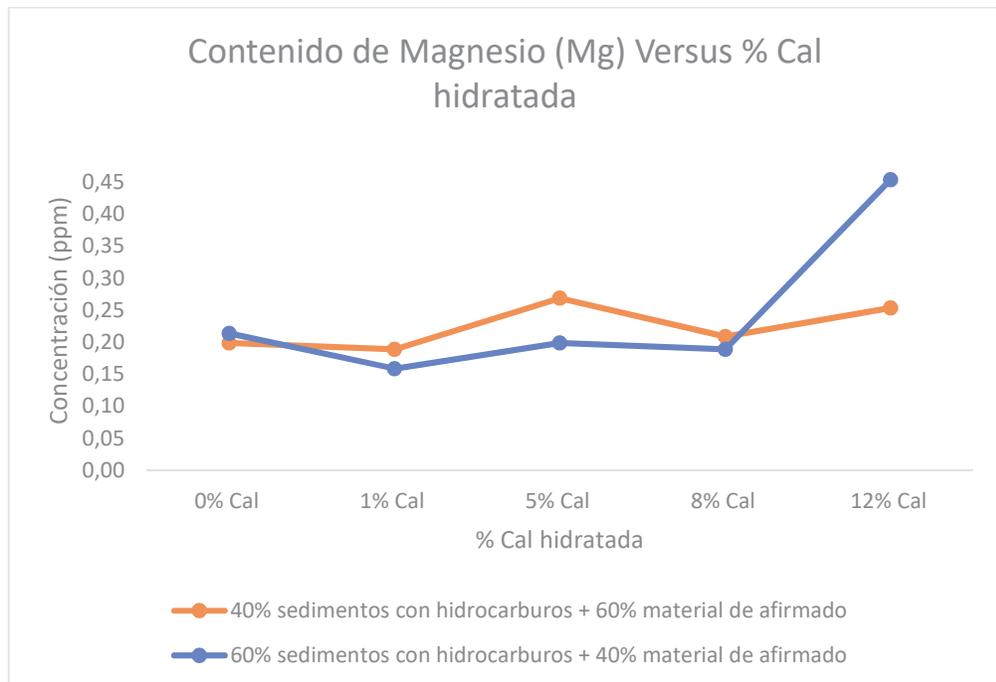


Ilustración 28. Contenido de Magnesio (Mg) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

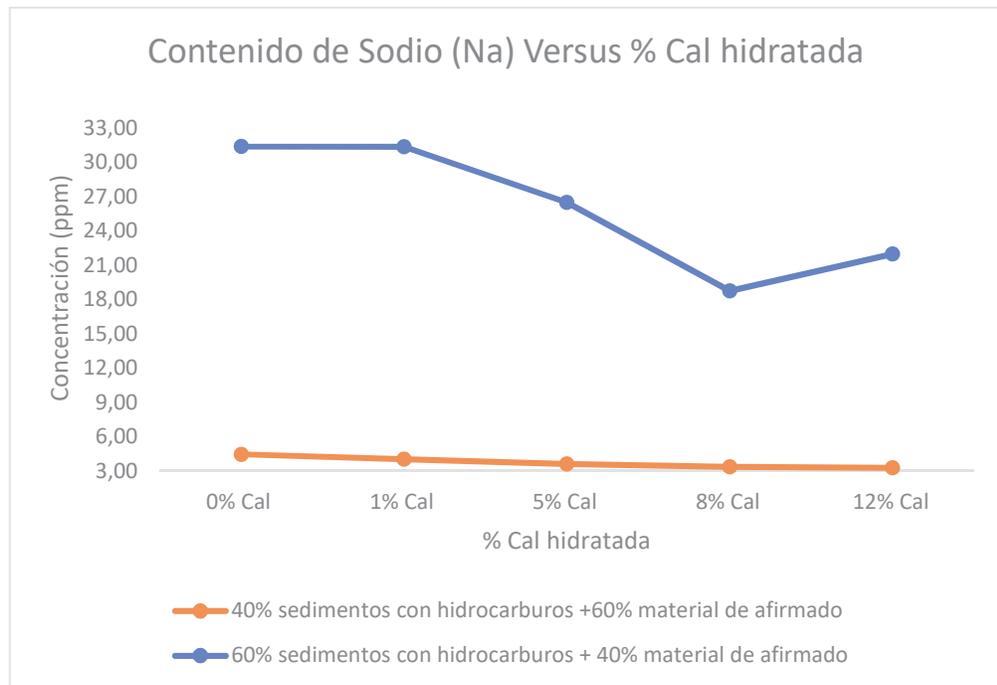


Ilustración 29. Contenido de Sodio (Na) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

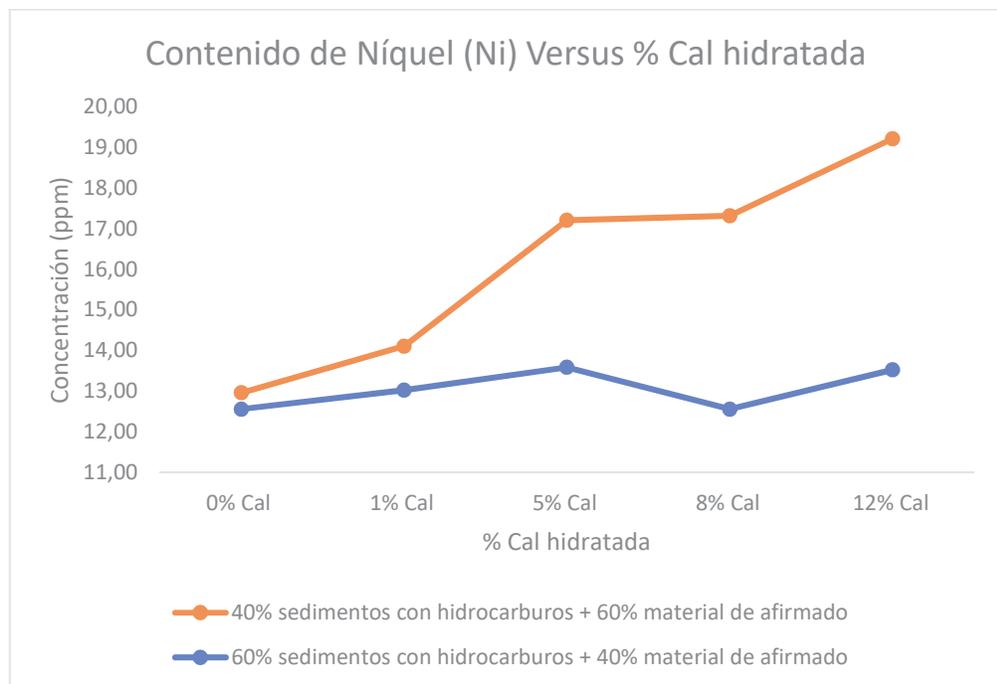


Ilustración 30. Contenido de Níquel (Ni) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

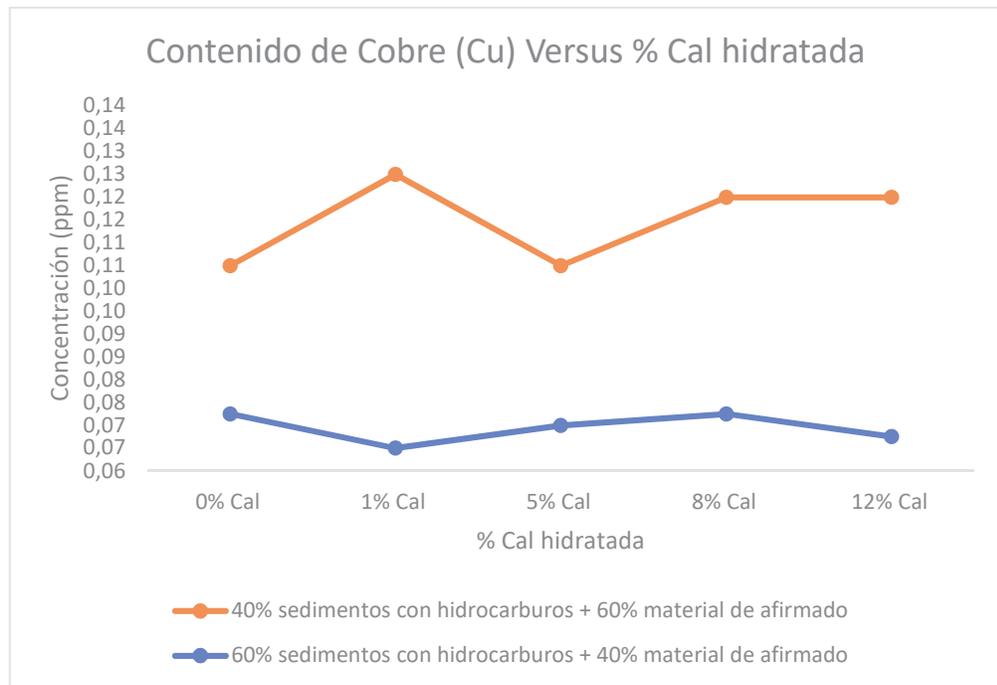


Ilustración 31. Contenido de Cobre (Cu) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

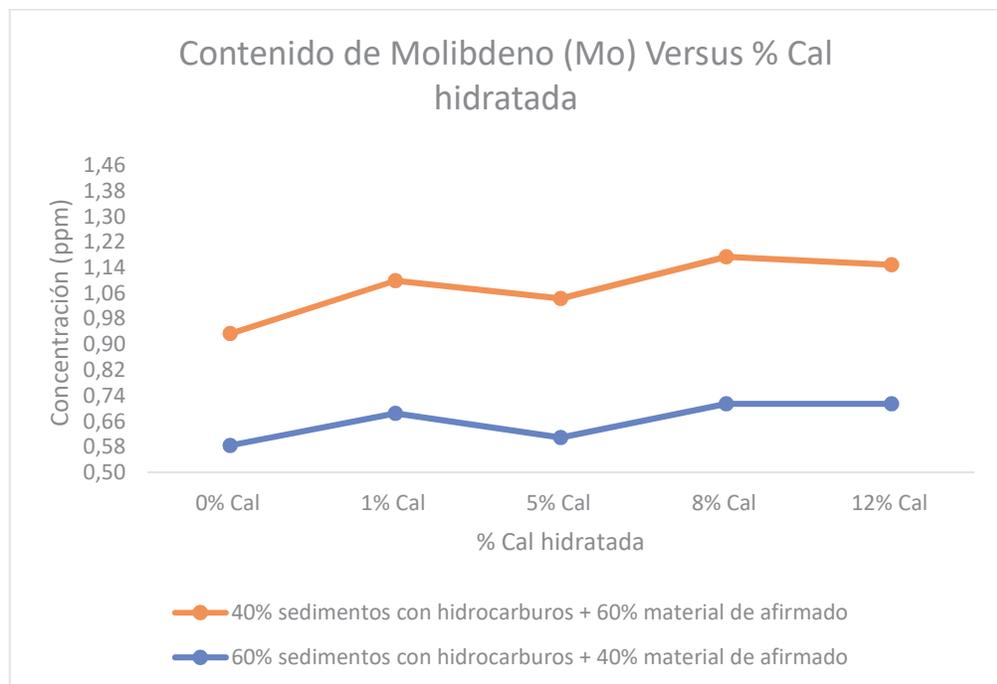


Ilustración 32. Contenido de Molibdeno (Mo) en las combinaciones en función del % de cal hidratada

Fuente: Propia, agosto 2019

Acorde a Connor, *et al.* (2019), se recomienda que el % de CBR en materiales residuales aceitosos que van a ser usados para mantenimiento de vías en campos petroleros, se encuentre en el rango entre 20%-50% para tráfico pesado y teniendo en cuenta los resultados de la tabla 10, se escogió como diseño de mezcla óptima, la combinación de 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 0 % de cal, ya que con esta combinación, se estaría cumpliendo con el % de CBR > 15% y con el contenido de grasas & aceites < 1% en peso, según los criterios establecidos para la selección de la mezcla óptima. Adicionalmente, se considera que la mezcla de 40% de sedimentos + 60% de afirmado + 0% de cal, cumple a cabalidad los requerimientos de resistencia, no necesitándose la adición de Cal hidratada, lo cual permite obtener un resultado acorde a las recomendaciones sin necesidad de adicionar un producto químico, resultando en un beneficio económico al momento de realizar la aplicación a estala real. De acuerdo con lo anterior, la formulación de la mezcla para el mantenimiento de vías terciarias en el área de operaciones de PetroSantander, corresponde a 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado, con una densidad máxima seca de 2.14 g/cm³, una humedad óptima de 6.95 %, con un CBR de 39.5% y un contenido de asfalto de 0.60%.

2.3) Análisis de la viabilidad de la mezcla comparando los parámetros estructurales y resultados de la prueba TCLP con normatividades existentes

2.3.1) Parámetros Estructurales

En la ilustración 33, se muestra la curva granulométrica para la mezcla óptima, compuesta por 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado. La clasificación del suelo obtenido corresponde a una arena arcillosa-arena limosa, clasificada según la A.A.S.H.T.O como A-2-4 (0) y según el sistema U.S.C como SC-SM.

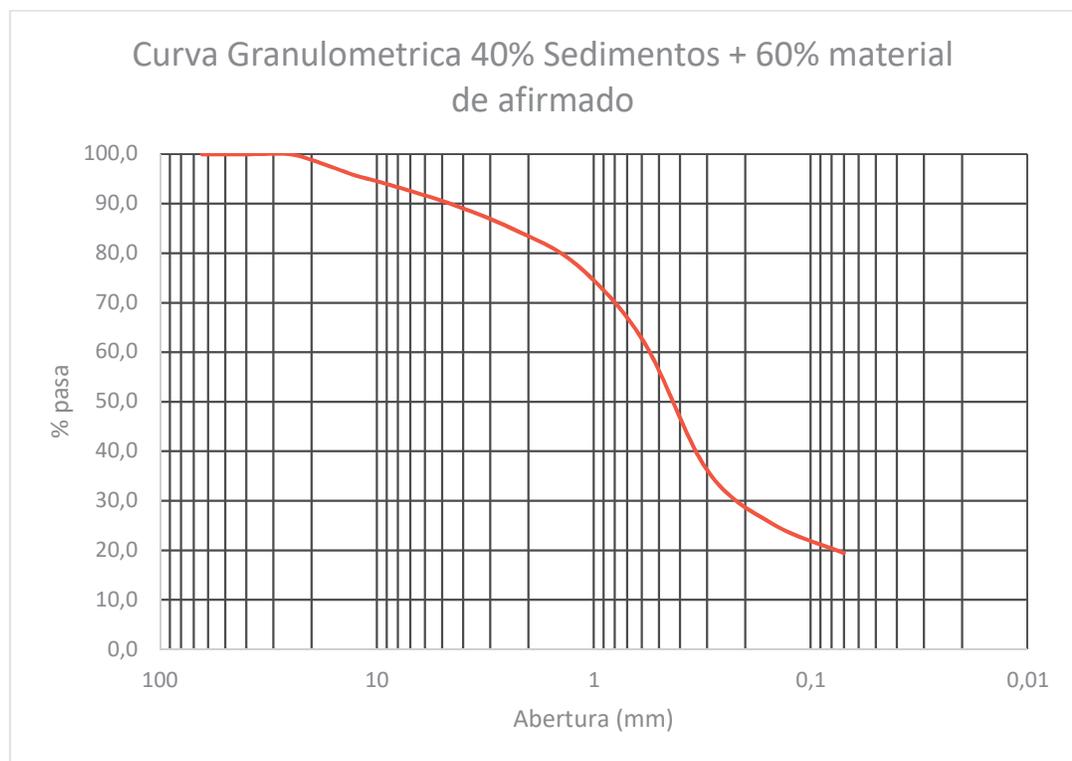


Ilustración 33. Curva granulométrica combinación óptima (40% sedimentos + 60 % material de afirmado)

Fuente: Propia, agosto 2019

En la ilustración 34, se muestra la comparación entre la granulometría de la muestra con 40%sedimentos con hidrocarburos+60% material de afirmado versus los requerimientos de material de afirmado A-38 y A-25 según INVIAS (Instituto Nacional de Vías- INVIAS, 2013).

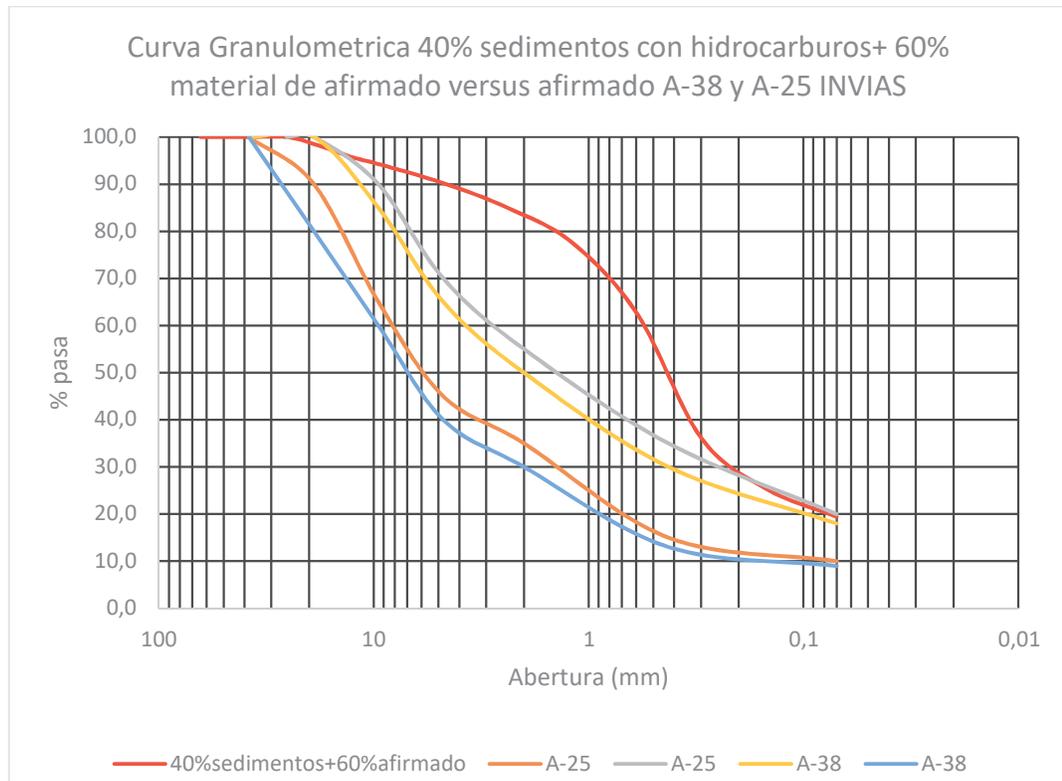


Ilustración 34. Curva granulométrica muestra 40%sedimentos con hidrocarburos+60% material de afirmado versus material de afirmado A-38 versus A-25 requerido por INVIAS

Fuente: Propia, agosto 2019

En la ilustración 35, se presenta la comparación entre la granulometría de la muestra con 40% sedimentos con hidrocarburos+ 60% material de afirmado versus los requerimientos de una subbase estabilizada con una mezcla asfáltica natural SBE-MAN 50 y SBE-MAN 38 según INVIAS (Instituto Nacional de Vías- INVIAS, 2013).

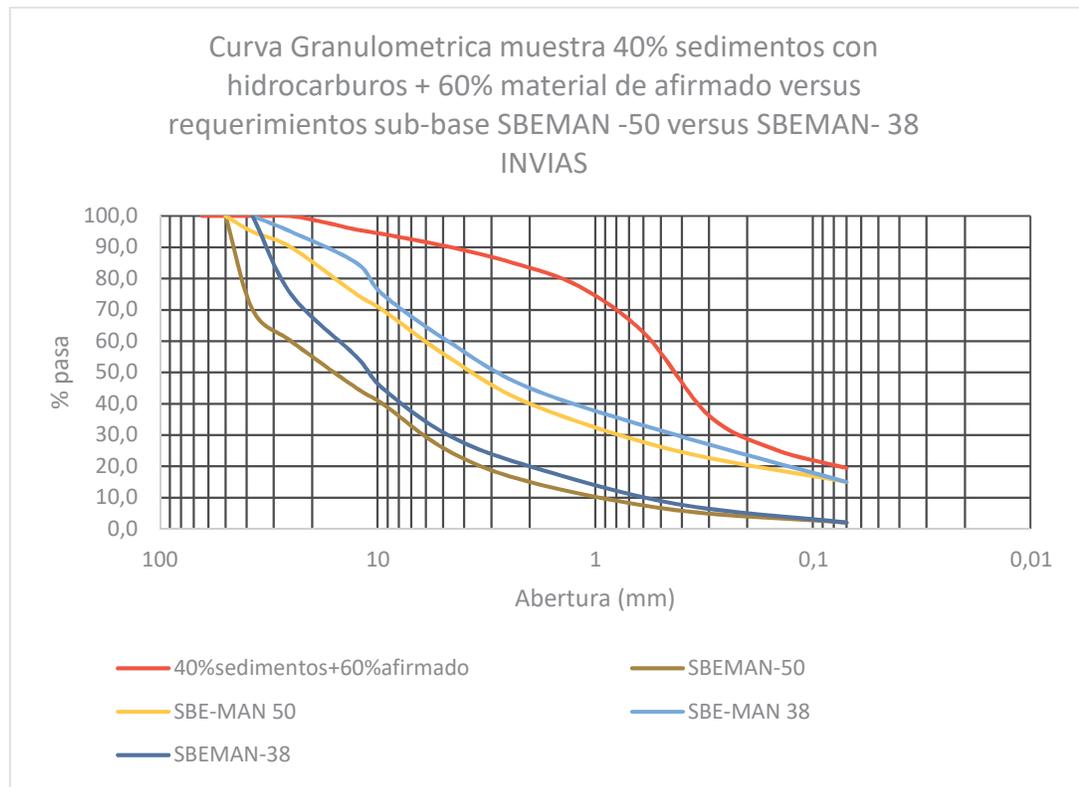


Ilustración 35. Comparación entre la granulometría de la muestra con 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado versus los requerimientos de una subbase estabilizada con una mezcla asfáltica natural SBE-MAN 50 y SBE-MAN 38 INVIAS

Fuente: Propia, Agosto 2019

En la ilustración 36, se muestra la granulometría de la muestra con 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado versus los requerimientos de una base estabilizada con una mezcla asfáltica natural BE-MAN 25 y BE-MAN 38 según INVIAS (Instituto Nacional de Vías- INVIAS, 2013).

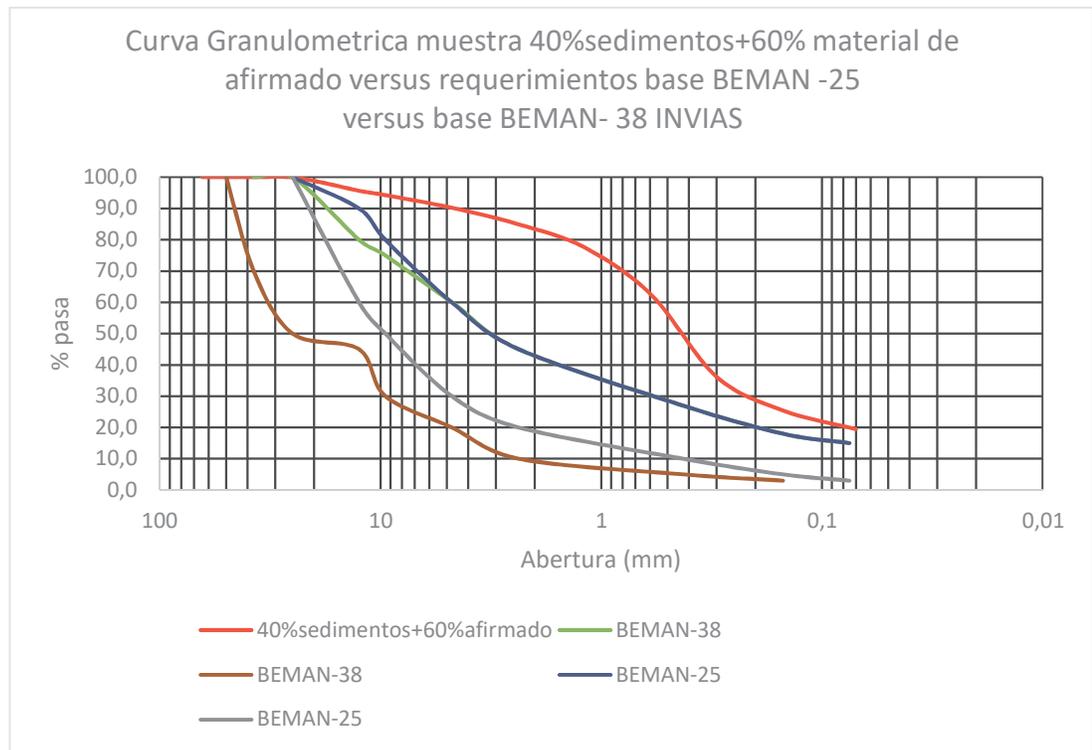


Ilustración 36. Granulometría de la muestra con 40%sedimentos con hidrocarburos+60%material de afirmado versus los requerimientos de una base estabilizada con una mezcla asfáltica natural BE-MAN 25 y BE-MAN 38 INVIAS

Fuente: Propia, Agosto 2019

2.3.2) Parámetros Físicoquímicos

En la Tabla 14, se muestra los resultados físicoquímicos obtenidos para la muestra compuesta por 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado, en comparación con las normatividades internacionales para el reúso de residuos aceitosos en vías.

Tabla 12. Resultados obtenidos con la muestra compuesta por 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% de afirmado versus normatividades internacionales para el reúso de residuos aceitosos en vías

Normativas para reúso de residuos aceitosos en vías/Resultados fisicoquímicos mezcla óptima	Resultados Fisicoquímicos mezcla 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado	Louisiana 29B (using the mixture onsite to develop lease roads)	Railroad Commision of Texas (Standards for Recyclable Product to be Used as Road Base)	Alberta Energy and Utilities Board	Guidelines for the Application of Oily Byproducts to Municipal Roads in Saskatchewan
pH (Unidades de pH)	8,94	6-12	6 - 12,49	-	6-9
Conductividad Eléctrica (mmhos/cm)	0,45	< 8	-	4	-
Contenido de grasas y aceite (porcentaje por peso)	0,61%	< 1%	-	-	-
Hidrocarburos Totales del Petróleo (porcentaje por peso)	0,44%	-	-	≤ 5%	< 5%
Contenido de Cloruros (mg/Kg)	971,76	-	-	≤ 3000	-
Contenido de metales totales:			-	-	
Arsénico (ppm)	<0,11	10	-	-	-
Bario (ppm)	24,74	20000	-	-	-
Cadmio (ppm)	1,34	10	-	≤ 1	≤ 3
Cromo (ppm)	22,54	500	-	-	-
Plomo (ppm)	11,54	500	-	≤ 70	≤ 375
Mercurio (ppm)	<0,01	10	-	≤ 6.6	≤ 0.8
Selenio (ppm)	<0,01	10	-	-	-
Plata (ppm)	0,12	200	-	-	-
Zinc (ppm)	22,54	500	-	≤ 200	≤ 600
Cobre (ppm)	0,11	-	-	≤ 63	≤ 150
Níquel (ppm)	12,97	-	-	≤ 150	≤ 150
BETX:					
Benceno (ppm)	0,00	-	-	≤ 0.5	-
Etilbenceno (ppm)	0,00	-	-	≤ 1.2	-
Tolueno (ppm)	0,00	-	-	≤ 0.80	-
Xileno (ppm)	0,00	-	-	≤ 1	-
Concentración de cloruros en el lixiviado (mg/L)	11,64	< 500	<700	-	-
Contenido de metales en el lixiviado:					
Arsénico (mg/L)	<0,001	-	<5	-	-
Bario (mg/L)	<0,3	-	<100	-	-
Cadmio (mg/L)	<0,01	-	<1	-	-
Cromo Total (mg/L)	<0,05	-	<5	-	-
Plomo (mg/L)	<0,1	-	<5	-	-
Mercurio (mg/L)	<0,001	-	<0,2	-	-
Selenio (mg/L)	<0,001	-	<1	-	-
Plata (mg/L)	<0,2	-	<5	-	-
Zinc (mg/L)	<0,1	-	<5	-	-
Benceno (mg/L)	0	-	<0,5	-	-
TPH (mg/L)	9,8	-	<100	-	-

Fuente: Propia, Septiembre 2019

A la muestra compuesta por 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado, se le determinó el espectro infrarrojo al hidrocarburo total del petróleo (TPH) para determinar la presencia de grupos aromáticos asociados a los compuestos: Benceno, Tolueno y Xilenos (orto, meta y para). Al comparar los resultados obtenidos con los espectros de literatura, se observó la no presencia de estos compuestos. En la ilustración 37, se presentan los espectros infrarrojos obtenidos para la muestra compuesta por 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado.

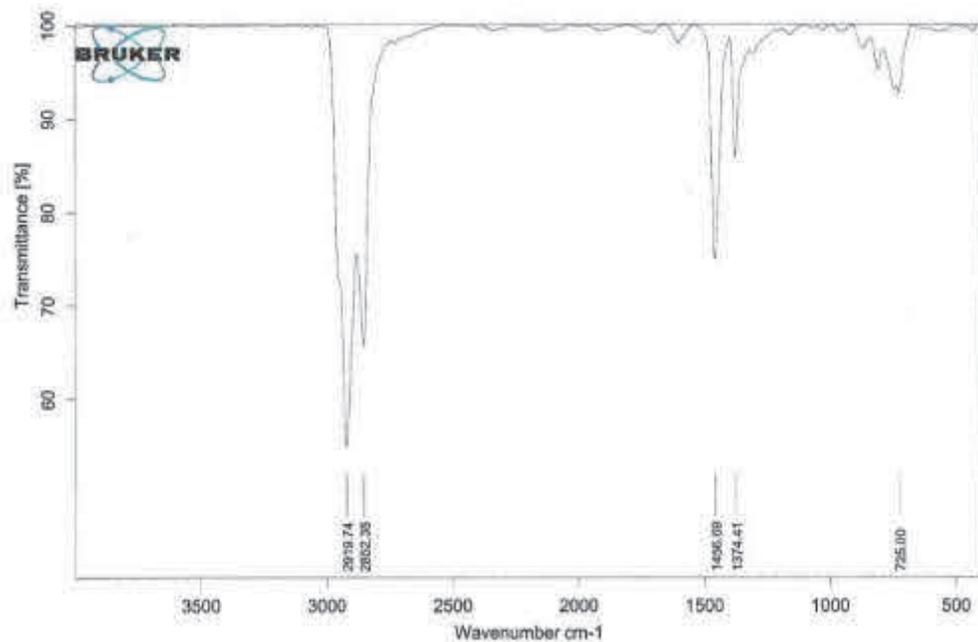


Ilustración 37. Espectros infrarrojos del análisis de hidrocarburos totales del petróleo para la muestra compuesta por 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado

Fuente: Laboratorio Químico de Consultas Industriales- Universidad Industrial de Santander, Julio 2019

Capítulo 3

Análisis de Resultados

3.1) Evaluación fisicoquímica del material base de la mezcla mediante la determinación de parámetros como granulometría, contenido de asfalto y prueba TCLP, para conocer su composición y proporciones

Los resultados de la granulometría de la muestra de sedimentos con hidrocarburos procedentes del contrapozo LS-M11 de Campo Salinas, mostró según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), que corresponde a una arena limosa (SM) y según la clasificación A.A.S.H.T.O, se cataloga como A - 2 - 4 (0). En cuanto al contenido de asfalto, la muestra presentó un alto valor (4,4%), lo cual es de esperar teniendo en cuenta la procedencia del residuo.

La comparación de los resultados de la tabla 9 con lo estipulado en el Decreto 4741 de 2005, reveló que los metales: Arsénico (As), Bario (Ba), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Mercurio (Hg), Selenio (Se), Plata (Ag), se encuentran por debajo del límite establecido para considerar el residuo o desecho como tóxico. El Decreto 4741 de 2005, no contempla en los parámetros TCLP, el contenido de hidrocarburos en el lixiviado. La comparación de los resultados obtenidos para los metales: Arsénico (As), Bario (Ba), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Mercurio (Hg), Selenio (Se) y Plata (Ag), reveló que las concentraciones para

el sedimento con hidrocarburos procedente del contrapozo LSM11, se encuentra por debajo del límite establecido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) en la prueba TCLP (US EPA, 2015).

De igual manera se compararon los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica, con los parámetros de la tabla del numeral 565 F de la norma Louisiana 29B (Department of Natural Resources | State of Louisiana, 2010), encontrando que los parámetros: pH, conductividad eléctrica, contenido de cloruros (Cl^-), relación adsorción sodio (RAS), porcentaje de sodio intercambiable (%PSI), Arsénico (As), Bario (Ba), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Mercurio (Hg), Selenio (Se), Plata (Ag) y Zinc (Zn), cumplen con lo establecido en dicha norma. Sin embargo, los hidrocarburos totales en la prueba de lixiviación se encuentran por fuera de especificación, lo cual era de esperar, teniendo en cuenta la procedencia del residuo, ya que la muestra analizada presentó una concentración de 282,55 mg/L de TPH. Tomando en cuenta lo anterior, se considera que el único parámetro fuera de especificación y que le concede característica de peligrosidad al residuo, corresponde a los hidrocarburos totales del petróleo presentes en el lixiviado.

3.2) Diseño de un experimento para la mezcla, que evalúe su resistencia al esfuerzo cortante y lixiviación de hidrocarburos

3.2.1) Parámetros Estructurales

El análisis gráfico de los datos de la densidad máxima seca obtenida a partir del ensayo del Proctor modificado para la totalidad de las muestras del diseño experimental de la Tabla 1, los cuales se observan en la tabla 10 y en la ilustración 11, permiten concluir, que a medida que aumenta el porcentaje de sedimentos con hidrocarburos en la mezclas sin contenido de cal hidratada, el valor de la densidad máxima seca aumenta con respecto al valor reportado para la muestra que solo contiene material de afirmado. También si se realiza un análisis horizontal de los resultados obtenidos para densidad máxima seca, en los cuales se varió el porcentaje de cal hidratada, en términos generales, se observa que al aumentar el porcentaje de cal hidratada disminuye el valor de la densidad máxima seca debido a un mejor comportamiento de la compactación. Los menores valores de densidad máxima seca se obtuvieron con las mezclas en las cuales no hay presencia de sedimentos con hidrocarburos, puntualmente con la mezcla de 100% material de afirmado + 12% de cal hidratada (densidad= 1,748 g/cm³).

El análisis de la humedad óptima de las muestras, acorde a los resultados obtenidos para el ensayo del Proctor modificado para la totalidad de las muestras del diseño experimental de la Tabla 1, mostrados en la tabla 10 y en la ilustración 12, revelan que al aumentar el

porcentaje de sedimentos con hidrocarburos en la mezclas que no contienen cal hidratada, disminuye el valor de humedad óptima, debido al aporte de humedad por el contenido de hidrocarburo, lo cual representa un beneficio económico para el mantenimiento de vías, ya que no se requiere una adición de agua para obtener la humedad óptima. El análisis horizontal, reveló que al aumentar el porcentaje de cal hidratada en las muestras, aumentó el valor de la humedad óptima y disminuyó el valor de la densidad máxima seca, lo cual coincide con estudios similares (Sharma et al., 2018), y es de esperar, debido a la deshidratación que sufre el suelo en contacto con la cal hidratada. Las combinaciones que presentaron los menores valores de humedad óptima corresponden al grupo de las mezclas con 60% de sedimentos con hidrocarburos y 40% de material de afirmado, debido a la mayor proporción de hidrocarburo comparado con las mezclas con 40% de sedimentos con hidrocarburos y 60% de material de afirmado, siendo un resultado favorable para la aplicación a escala real.

Al realizar el análisis vertical de los resultados obtenidos para el parámetro %CBR, se observó un mejoramiento de los valores obtenidos de %CBR, al aumentar el porcentaje de sedimentos con hidrocarburos en las mezclas sin contenido de cal hidratada acorde al diseño experimental de la tabla 1, cuyos resultados se muestran en la tabla 10 y en la ilustración 10, debido al incremento en la cohesión (Abousnina et al., 2015). Si se analiza los resultados obtenidos, en las muestras que solo contienen material de afirmado y sedimentos con hidrocarburos (sin presencia de Cal hidratada), se observa un incremento en los valores con respecto a la muestra que solo contiene material de afirmado, lo cual puede deberse, a que el material aplicado (sedimentos con hidrocarburo), corresponde a una arena limosa (SM), en

la cual se presenta un alto contenido de arenas (83.4%). Al realizar el análisis horizontal para el primer grupo de muestras (aquellas que no contienen sedimentos con hidrocarburos y solo contienen material de afirmado y cal hidratada), se observó un aumento en los valores de % CBR con el aumento del porcentaje de cal hidratada, hasta estabilizarse en 8% del porcentaje de cal hidratada y presentar una pequeña caída en los valores con la adición de 12% de cal hidratada. El mayor valor obtenido de % CBR en las muestras que contienen material de afirmado y cal hidratada sin sedimentos con hidrocarburos fue de 78% (con adición de 5% de cal hidratada) frente al valor de la muestra que solo contiene material de afirmado con un %CBR de 27%, representando un aumento de la resistencia de 189%.

El grupo de muestras que contienen 40% de sedimentos en su preparación y 60% de material de afirmado, presentó un valor máximo de CBR de 97,5%, para la mezcla con 12% de cal hidratada, representando el valor más alto de %CBR obtenido en la fase experimental, frente a un 39,5% de CBR para la muestra con 0% de contenido de cal, lo cual resultaría en un aumento de la resistencia de 147%, pero si se compara con el valor obtenido de %CBR, para la muestra que solo contiene afirmado (sin contenido de cal hidratada ni sedimentos con hidrocarburos), representaría un aumento de resistencia de 261%. En el grupo de muestras con 40% de sedimentos con hidrocarburos y 60% de material de afirmado, se apreció una relación directamente proporcional entre el % de CBR y el aumento de cal hidratada en todas las muestras analizadas, debido a las reacciones puzolánicas que se generan al mezclar la cal hidratada con el suelo, lo cual coincide con estudios anteriores (Ghorbani et al., 2015). En términos de aumento de resistencia del suelo, se observó que con una adición de 5% de cal hidratada, se incrementó la resistencia del suelo en un 43%, lo cual coincide con estudios

previos desarrollados (Sharma et al., 2018), sin embargo, a diferencia de los resultados mostrados por Sharma et al., con aplicaciones bajas tales como 1%, se apreció aumentos importantes de resistencia en los ensayos realizados en la presente investigación.

El grupo de muestras que contienen 60% de sedimentos con hidrocarburos y 40% de material de afirmado, presentó un valor máximo de 88% de %CBR, para la combinación con 8% de cal hidratada y un valor mínimo de 36,5% de %CBR, para la muestra que solo contiene material de afirmado y sedimentos con hidrocarburo (sin cal hidratada), representando un mejoramiento de resistencia de 141%. Si se compara el resultado máximo obtenido en este grupo para % CBR, con la muestra que solo contiene material de afirmado (sin contenido de cal hidratada ni sedimentos con hidrocarburos), representaría un aumento de 226% de % CBR.

Los resultados para % CBR, muestran que los mayores valores obtenidos, por grupo de preparación de muestras, se obtuvieron para las mezclas que presentaron 0% de sedimentos con hidrocarburo y 100% material de afirmado con 5% de cal hidratada (%CBR= 78%), 40% de sedimentos con hidrocarburos y 60% material de afirmado con 12% de Cal hidratada (%CBR= 97,5%) y 60% de sedimentos con hidrocarburos + 40% de material de afirmado con 8% de Cal hidratada (%CBR= 88%).

El análisis del contenido de asfalto en las diferentes combinaciones en las cuales se varió el porcentaje de cal hidratada en la preparación de las muestras, cuyos resultados se observan en la tabla 10 y en la ilustración 13, permitió concluir, que la adición de cal hidratada para el

grupo de muestras preparadas con 40% de sedimentos con hidrocarburos y 60% de material de afirmado, generó una retención o fijación del asfalto en las muestras de suelo al momento de proceder a la extracción con los solventes utilizados. En el grupo de muestras con 60% de sedimentos con hidrocarburos y 40% de material de afirmado, se observó un comportamiento opuesto, en donde la aplicación de cal, no generó retención de asfalto en las muestras de suelos, debido posiblemente al alto contenido de sedimentos con hidrocarburos frente al material de afirmado. Los resultados de contenido de asfalto en las distintas combinaciones, demostró una alta heterogeneidad en las muestras de los suelos analizados, aunque se realizó un mezclado manual de los componentes, no se puede asegurar una mezcla completa, con resultados homogéneos. El mayor valor de % de asfalto, se obtuvo para la mezcla con 60% de sedimentos con hidrocarburos y 1% de cal hidratada, para un valor de 2,10% de asfalto.

3.2.2) Parámetros Fisicoquímicos

En la ilustración 14, se muestra el comportamiento del pH en las distintas combinaciones en función de adición de cal hidratada. Como es de esperar, existe una relación directamente proporcional, entre la adición de cal hidratada y el pH final de la muestra. Los cambios más representativos en el pH de las muestras de suelos se dan para el caso de la combinación de 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado, en el rango entre 0% a 1% de cal hidratada. El pH tiende a estabilizarse a partir de 5% de cal hidratada. La medición del pH en las muestras analizadas, catalogan a los suelos como fuertemente alcalinos.

La interpretación de los resultados de conductividad eléctrica mostrados en la ilustración 15, muestran un comportamiento directamente proporcional entre la adición de cal y el aumento en los valores de la conductividad eléctrica, debido al aporte de cationes Ca^{+2} , generando que la muestra con 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado, pase de ser un suelo no salino sin adición de cal hidratada, a fuertemente salino con la adición de 12% de cal hidratada. Los resultados mostrados en la ilustración 16, referentes a la concentración de grasas & aceites en las distintas combinaciones en función de la adición de cal hidratada, revelan para la combinación de 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado, una retención mínima de hidrocarburo por efecto de la adición de cal. Para la combinación de 60% de sedimentos con hidrocarburos + 40% de material de afirmado, se observó que no hay retención de grasas & aceites por efecto del aumento de cal hidratada, lo cual coincide con los resultados reportados para el porcentaje de asfalto en esta combinación. El menor contenido de grasas & aceites se obtuvo, para la combinación de 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 5% Cal hidratada, en donde el valor de grasas y aceites fue de 0,342%. Sin embargo, la diferencia en los resultados obtenidos en el parámetro de grasas y aceites no difiere en gran proporción, entre la mezcla con 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 1% de cal hidratada y 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 5% de cal hidratada, ya que con 1% de cal hidratada, el valor de grasas y aceites es de 0,403% y para 5% es de 0,342%. Se observó el mismo comportamiento en los valores de % CBR, para las combinaciones con 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado + 1% de cal hidratada y 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado + 5% de

cal hidratada, en donde para 1% de cal hidratada, se obtuvo un valor de 52% de CBR y para 5% se obtuvo un valor de 56,50% de CBR.

El análisis de los elementos químicos en las combinaciones con 40% de sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado, reveló para el caso del elemento Cadmio (Cd), una liberación del metal en función del aumento del pH para el rango entre 0% y 8% de cal. El mismo comportamiento se observó para elemento Plomo (Pb) y para el Níquel (Ni), en el rango entre 0% de cal a 12% de cal. Los elementos químicos Arsénico (As), Bario (Ba), Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Plata (Ag), Selenio (Se), Zinc (Zn), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Cobre (Cu) y Molibdeno (Mo), presentaron mínimas variaciones en su concentración en función del aumento de pH en las mezclas. En las combinaciones con 60% de sedimentos con hidrocarburos + 40% material de afirmado, en las cuales se varió el porcentaje de cal, reveló para el elemento mercurio (Hg), una liberación del metal en función del aumento del pH para el rango entre 0% y 12% de cal. El resto de los elementos químicos, presentaron variaciones mínimas en su concentración en función del aumento del pH. En la ilustración 27, se observó el comportamiento directamente proporcional entre la concentración de Calcio (Ca) y el aumento del porcentaje de cal en las muestras, lo cual es de esperar debido al aporte de Calcio proveniente de la cal hidratada. El aumento en la concentración del ion cloruro se debe a impurezas de la cal hidratada. El análisis de los parámetros relación adsorción de sodio (RAS) y porcentaje de sodio intercambiable (%PSI), revelaron, que dichos parámetros, disminuyen a medida que aumenta la concentración de cal hidratada, lo cual era de esperar, teniendo en cuenta que al aumentar el porcentaje de cal hidratada en las muestras, aumenta

por consiguiente la concentración de calcio, reduciendo la proporción relativa del sodio en comparación de los cationes divalentes de calcio y magnesio.

El análisis de los datos estructurales y químicos, reveló que el aumento de la cal hidratada en las muestras ensayadas aumentó la resistencia del suelo en términos de %CBR y a su vez generó mayor movilidad de algunos elementos químicos, lo cual en términos de gestión ambiental no sería muy favorable al momento de una fuerte lluvia, sin embargo, las concentraciones de los elementos, iones y compuestos químicos analizados son muy bajas.

3.3) Análisis de la viabilidad de la mezcla comparando los parámetros estructurales y resultados de la prueba TCLP con normatividades existentes

3.3.1) Parámetros Estructurales

La mezcla óptima entre sedimentos con hidrocarburos, material de afirmado y cal hidratada, correspondió a la combinación 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 0% de cal hidratada, con la cual se obtuvo un valor de 39,5% de %CBR

Tabla 13. Comparación mezcla en frío (40% sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado) con los requerimientos INVIAS para subbase y base estabilizada con asfalto natural

Característica	Unidad	Resultados Formulación Mezcla En Frío (40% sedimentos con hidrocarburos + 60% material de afirmado)	Requisito Material de afirmado	Requisito de Subbase Estabilizada con Asfalto Natural	Requisito Base Estabilizada con Asfalto Natural
Límite Líquido	%	22,2	40	35	35
Índice de plasticidad	%	4,1	4 – 9	9	7
CBR	%	39.5	≥ 15	≥ 15	20

Fuente: Propia, Septiembre 2019

Al comparar los resultados obtenidos, con los parámetros de la Tabla 2 referente a valores para límite líquido, índice de plasticidad y %CBR como requisito de agregados para afirmados según INVIAS (Instituto Nacional de Vías- INVIAS, 2013), se observó que el valor de %CBR se encuentra por encima del valor de referencia (>15%CBR). El límite plástico presentó un valor de 22.2% y un índice de plasticidad de 4.1%, cumpliendo con lo requerido para ser utilizado como material de afirmado. También se llevó a cabo la comparación de los resultados obtenidos de la muestra óptima, con los requisitos de los agregados pétreos a estabilizar de una subbase con una mezcla asfáltica natural, acorde a la tabla 5, determinando que también cumple con el %CBR requerido (>15%CBR), así como el límite líquido (máximo 35%) e índice de plasticidad (máximo 9%). De igual manera, se llevó a cabo la comparación de los resultados obtenidos de la muestra óptima, con los requisitos de los agregados pétreos a estabilizar de una base con una mezcla asfáltica natural, encontrando que también cumple con el requisito mínimo de 20% de % CBR, así como el

límite líquido (máximo 35%) e índice de plasticidad (máximo 7%). Los valores de %CBR, límite líquido e índice de plasticidad de la mezcla óptima se compararon con los valores para base y subbase con mezcla asfáltica natural, teniendo en cuenta la similitud del material con el sedimento con contenido de hidrocarburos. Al comparar los resultados de la granulometría para la combinación 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 0% de cal hidratada, con las franjas granulométricas establecidas en las tablas 3, 4 y 6, según el INVIAS para material de afirmado, subbase granular estabilizada con una mezcla asfáltica natural y con los requerimientos para una base granular estabilizada con una mezcla asfáltica natural, se observó que la granulometría obtenida para la muestra óptima no entra en ninguna de las franjas granulométricas, sin embargo si cumple con los parámetros %CBR, límite líquido e índice de plasticidad.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se propone mejorar el material de afirmado de las vías terciarias dentro del área de influencia de PetroSantander (Colombia), mediante la mezcla con los sedimentos que contienen hidrocarburos provenientes de campo salinas, para generar una capa de rodadura que permita el tránsito seguro y confiable de los vehículos en dichas vías. El costo de la mezcla en frío tendrá un valor aproximado de \$81.000.000 /kilometro.

3.3.2) Parámetros Fisicoquímicos

Al comparar los resultados obtenidos en las pruebas fisicoquímicas acorde a la tabla 11, se observó que la mezcla de 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado + 0% de cal hidratada, cumple con la totalidad de parámetros estipulados en el numeral 313 G de la norma Louisiana 29B, para usar la mezcla en el desarrollo de vías terciarias (Ver Tabla 12). De igual manera, los resultados obtenidos fueron comparados con los estándares para el reciclaje de productos para ser usados en vías, acorde al numeral 4.222 (d) de la Railroad Commission of Texas, encontrando que la concentración de los parámetros en el lixiviado: pH, cloruros, así como la totalidad de elementos químicos (As, Ba, Cd, Cr, Pb, Hg, Se, Ag, Zn), el compuesto químico benceno y la concentración de hidrocarburos totales del petróleo cumplieron con los límites requeridos en dicha norma. Adicional, los resultados obtenidos fueron comparados con los estándares de la Alberta Energy and Utilities Board, encontrando que los parámetros: conductividad eléctrica, % de hidrocarburos totales del petróleo, contenido de cloruros, contenido de metales totales (Cd, Pb, Hg, Zn, Cu, Ni), los compuestos químicos Benceno, Etilbenceno, Tolueno y Xileno (BETX) cumplen con lo establecido en dicha norma. Finalmente, se llevó a cabo la comparación, con los estándares de Guidelines for the Application of Oily Byproducts to Municipal Roads in Saskatchewan de Canadá, encontrando que los parámetros: pH, % de hidrocarburos totales del petróleo, contenido de metales totales (Cd, Pb, Hg, Zn, Cu, Ni), cumplen con lo requerido en dicha norma. De acuerdo con lo anterior, se concluye que el uso de la mezcla de 40% sedimentos con hidrocarburos + 60% de material de afirmado, es viable para su aplicación en vías de la operación de PetroSantander (Colombia) GmbH, de acuerdo con la comparación con cuatro normativas internacionales específicas en el tema.

Capítulo 4

Conclusiones

Se llevó a cabo la evaluación fisicoquímica del material base de la mezcla (sedimentos con hidrocarburos), mediante la determinación de parámetros como granulometría, contenido de asfalto y prueba TCLP, encontrando que el material base de la mezcla, corresponde a una arena limosa (SM), clasificada según la A.A.S.H.T.O como A - 2 - 4 (0) y con un contenido de asfalto de 4,4%. La prueba TCLP, reveló que los hidrocarburos totales del petróleo son el único parámetro que se sale de las especificaciones, de acuerdo con los parámetros determinados en la presente investigación.

Se diseñó un experimento con el propósito de evaluar la resistencia al esfuerzo cortante y lixiviación de hidrocarburos, mediante la elaboración de una matriz, en la cual se ensayaron 15 combinaciones entre sedimentos con hidrocarburos, material de afirmado y cal hidratada, para poder seleccionar la mezcla óptima. Los resultados a nivel de laboratorio revelaron que la combinación de 40% de sedimentos con hidrocarburos y 60% de material de afirmado correspondió a la mezcla óptima, ya que dicha mezcla cumplió con los parámetros

estructurales y fisicoquímicos para ser usada en el mantenimiento de las vías de la operación de PetroSantanderf (GmbH).

Se analizó la viabilidad de uso de la mezcla óptima, la cual correspondió a la combinación de 40% de sedimentos con hidrocarburos y 60% de material de afirmado, cuyos resultados fueron comparados con dos normativas estadounidenses y dos normativas canadienses aplicables al tema. La comparación de los resultados obtenidos con las cuatro normativas internacionales permitió concluir, que la mezcla puede ser usada en el mantenimiento de las vías de Petrosantander, aumentando la resistencia del material de la vía y sin ningún riesgo ambiental. Teniendo en cuenta que en Colombia no existe una normativa para reúso de residuos aceitosos en vías, los resultados obtenidos en la presente investigación, pueden ser tomados para proponer al Instituto Nacional de Vías- INVIAS y a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA, el desarrollo de pruebas piloto, con el propósito de generar unas especificaciones técnicas, para viabilizar el uso del material residual en vías, teniendo en cuenta, que aplicación de material es ampliamente usada a nivel internacional, representando una opción técnica y ambientalmente viable, para convertir un residuo del sector de hidrocarburos en materia prima para el sector vial, como alternativa a la práctica convencional de biorremediación de lodos impregnados con hidrocarburos.

Acorde a los resultados obtenidos en la fase experimental, se concluyó que la cal hidratada generó un aumento de la resistencia en términos de %CBR, pero originó un aumento en la movilidad de ciertos elementos químicos en función del aumento del porcentaje de cal hidratada en las muestras.

El análisis de los resultados obtenidos permitió concluir, que la presencia de hidrocarburos en el material base de la mezcla, reduce el contenido de humedad óptima para lograr la máxima densidad seca del material para ser usado en vías, lo cual representa un ahorro en el proceso debido al menor requerimiento de agua para alcanzar la resistencia requerida.

Los resultados obtenidos a nivel de laboratorio revelaron que no se requiere del uso de cal hidratada, ya que la mezcla obtenida entre los sedimentos con hidrocarburos y el material de afirmado, aumenta la resistencia del material, generando una composición química que se ajusta a estándares internacionales para uso del material en el mantenimiento de vías en campos petroleros.

Aunque la granulometría de la mezcla compuesta por 40% de sedimentos con hidrocarburos y 60% de material de afirmado no entra en ninguna franja granulométrica de acuerdo con las recomendaciones de INVIAS, se considera que el material es completamente viable para el mantenimiento de vías, acorde a parámetros como %CBR, límite líquido e índice de plasticidad. Sin embargo, si se desea cumplir con las franjas granulométricas estipuladas por INVIAS, se requeriría realizar un estudio, con el propósito de mezclar suelos, para lograr la granulometría deseada.

Capítulo 5

Recomendaciones

Para estudios posteriores, se recomienda ampliar la cantidad de parámetros estructurales a determinar en la mezcla compuesta por 40% de sedimentos con hidrocarburos y 60% de material de afirmado, entre los cuales se encuentran: flash point, desgaste en la máquina de los ángeles a 500 revoluciones, pérdidas en ensayo de solidez de los agregados en sulfato de sodio y magnesio, contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, contracción lineal, equivalente de arena, resistencia de probetas curadas en seco, resistencia conservada tras curado húmedo, según los procedimientos establecidos por el Instituto Nacional de Vías – INVIAS, con el propósito de establecer una especificación particular para el uso de residuos provenientes del sector hidrocarburos para mantenimiento de vías. Adicionalmente, se recomienda realizar la determinación de material radiactivo que ocurre naturalmente (NORM) por sus siglas en Inglés (Naturally Occurring Radioactive Material), con el propósito de comparar los resultados obtenidos con normativas internacionales.

Con el propósito de realizar un tramo de prueba, aplicando la mezcla en frío de 40% de sedimentos con hidrocarburos y 60% de material de afirmado para vías de la operación de PetroSantander (Colombia) GmbH, se recomienda realizar un diseño estructural para determinar el espesor de la mezcla, acorde a un estudio de tránsito y al módulo resiliente de la subrasante en los tramos donde se aplicará el material. Previa aplicación del material en la vía, los sedimentos con hidrocarburos deberán acopiarse en un sitio que evite la percolación de los líquidos presentes en el material, con el propósito de lograr un curado, favoreciendo la evaporación de hidrocarburos volátiles, para posteriormente realizar la mezcla con el material de afirmado y ajuste de humedad de acuerdo los resultados obtenidos en el Proctor modificado, para lograr la resistencia requerida mediante el proceso de compactación.

Previo uso del material para mantenimiento de vías, se deberá solicitar pronunciamiento de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), con el propósito de viabilizar el uso de los sedimentos con hidrocarburos para el mantenimiento de vías, teniendo como soporte los resultados obtenidos en la presente investigación, así como aquellos parámetros adicionales que podrá solicitar dicha autoridad para autorizar la disposición final del residuo mediante la mezcla con material de afirmado para ser dispuesto en vías de la operación.

BIBLIOGRAFÍA

- Abousnina, R. M., Manalo, A., Lokuge, W., & Shiau, J. (2015). Oil Contaminated Sand: An Emerging and Sustainable Construction Material. *Procedia Engineering*, *118*, 1119–1126. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.453>
- Acuña, W. C., & Pinzón, C. M. (2015). *EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE PAVIMENTACIÓN PARA VÍAS DE BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO* (Universidad Católica de Colombia). Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2617/1/Evaluaci%C3%B3n-alternativas-pavimentaci%C3%B3n-v%C3%ADas-bajos-vol%C3%BAmenes-de-tr%C3%A1nsito.pdf>
- Al-Abdul Wahhab, H. I., & Dalhat, M. A. (2014). Oil-Sludge Extended Asphalt Mastic Filled with Heavy Oil Fly Ash and Cement Waste for Waterproofing. *The Journal of Engineering Research [TJER]*, *11*(2), 27. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol11iss2pp27-38>
- Alfutaisi, A., Jamrah, A., Yaghi, B., & Taha, R. (2007). Assessment of alternative management techniques of tank bottom petroleum sludge in Oman. *Journal of*

Hazardous Materials, 141(3), 557–564.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.023>

Connor, J., Ahmad, F., C. Hamel, K., & J. Pokluda, R. (2019). *Practical Guidelines for Roadspreading of Exploration and Production (E&P) Wastes*.

Department of Natural Resources | State of Louisiana. (2010). *Louisiana Administrative Code 29B*. Recuperado de <http://www.dnr.louisiana.gov/index.cfm/page/62>

Diab, A., & Enieb, M. (2018). Investigating influence of mineral filler at asphalt mixture and mastic scales. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(3), 213–224. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.10.008>

Editorial La República. (2019). *Del total de la red vial terciaria con la que cuenta Colombia, 96% está en mal estado*. Recuperado de <https://www.larepublica.co/infraestructura/del-total-de-la-red-vial-terciaria-con-la-que-cuenta-colombia-96-esta-en-mal-estado-2828335>

Ghorbani, A., Hasanzadehshooiili, H., Karimi, M., Daghigh, Y., & Medzvieckas, J. (2015). Stabilization of problematic silty sands using microsilica and lime. *THE BALTIC JOURNAL OF ROAD AND BRIDGE ENGINEERING*, 10(1), 61–70. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.08>

Ghuzlan, K., Al-Khateeb, G., & Damrah, A. A. (2013). Using oil shale ash waste as a modifier for asphalt binders. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 15(4), 522–529. <https://doi.org/10.1007/s10163-013-0135-8>

Gorkem, C., & Sengoz, B. (2009). Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime.

Construction and Building Materials, 23(6), 2227–2236.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.12.001>

Hassan, H. F., Taha, R., Al Rawas, A., Al Shandoudi, B., Al Gheithi, K., & Al Barami, A.

M. (2005). Potential uses of petroleum-contaminated soil in highway construction.

Construction and Building Materials, 19(8), 646–652.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.001>

Instituto Nacional de Vías- INVIAS. (2013). Especificaciones generales de construcción de

carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. Recuperado 1 de agosto

de 2019, de [https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-](https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras)

[documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-](https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras)

[carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras](https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras)

Instituto Nacional de Vías- INVIAS. (2017a). *BASE ESTABILIZADA CON UNA MEZCLA*

ASFÁLTICA NATURAL ARTÍCULO 341P - 17 (p. 22). Recuperado de Instituto

Nacional de Vías- INVIAS website: [https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-](https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/7031-base-estabilizada-con-una-mezcla-asfaltica-natural-articulo-341p-17)

[documentos/documentos-tecnicos/7031-base-estabilizada-con-una-mezcla-asfaltica-](https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/7031-base-estabilizada-con-una-mezcla-asfaltica-natural-articulo-341p-17)

[natural-articulo-341p-17](https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/7031-base-estabilizada-con-una-mezcla-asfaltica-natural-articulo-341p-17)

Instituto Nacional de Vías- INVIAS. (2017b). *SUB-BASE ESTABILIZADA CON UNA*

MEZCLA ASFÁLTICA NATURAL ARTÍCULO 321P - 17 (p. 22). Recuperado de

[https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-](https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/7030-sub-base-estabilizada-con-una-mezcla-asfaltica-natural-articulo-321p-17)

[tecnicos/7030-sub-base-estabilizada-con-una-mezcla-asfaltica-natural-articulo-](https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/7030-sub-base-estabilizada-con-una-mezcla-asfaltica-natural-articulo-321p-17)

[321p-17](https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/7030-sub-base-estabilizada-con-una-mezcla-asfaltica-natural-articulo-321p-17)

Islam, B. (2015). *PETROLEUM SLUDGE, ITS TREATMENT AND DISPOSAL : A REVIEW.*

19.

- Kavak, A., & Akyarlı, A. (2007). A field application for lime stabilization. *Environmental Geology*, 51(6), 987–997. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0368-0>
- Kogbara, R. B., & Al-Tabbaa, A. (2011). Mechanical and leaching behaviour of slag-cement and lime-activated slag stabilised/solidified contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 409(11), 2325–2335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.02.037>
- Kogbara, R. B., Yi, Y., & Al-Tabbaa, A. (2011). Process envelopes for stabilisation/solidification of contaminated soil using lime–slag blend. *Environmental Science and Pollution Research*, 18(8), 1286–1296. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0480-x>
- Kok, B. V., & Yilmaz, M. (2009). The effects of using lime and styrene–butadiene–styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1999–2006. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.019>
- Lee, S., Baek, C., & Park, J.-J. (2012). Performance-based mix design of unmodified and lime-modified hot mix asphalt. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(7), 824–833. <https://doi.org/10.1139/l2012-067>
- Londoño-Franco, L. F., Londoño-Muñoz, P. T., & Muñoz-García, F. G. (2016). Los Riesgos De Los Metales Pesados En La Salud Humana Y Animal. *RISK OF HEAVY METALS IN HUMAN AND ANIMAL HEALTH.*, 14(2), 145–153. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)
- Mansurov, Z. A., Ongarbaev, E. K., & Tuleutaev, B. K. (2016). Utilization of Oil Wastes for Production of Road-building Materials. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2(2), 161. <https://doi.org/10.18321/ectj374>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). *Decreto número 4741*.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2019). Leyes | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado 17 de octubre de 2019, de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/normativa/leyes>
- Oreshkin, D. V., Chebotaev, A. N., & Perfilov, V. A. (2015). Disposal of Drilling Sludge in the Production of Building Materials. *Procedia Engineering*, *111*, 607–611. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.053>
- Palacio, C. H. L., & Maquilón, J. E. C. (2013). *DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA A PARTIR DE LA MEZCLA DE ASFALTO Y ACEITE CRUDO DE PALMA*. 10.
- Patel, M. A., Patel, H. S., & Dadhich, G. (2013). Prediction of Subgrade Strength Parameters from Dynamic Cone Penetrometer Index, Modified Liquid Limit and Moisture Content. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *104*, 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.117>
- Pivsaev, V. Yu., Krasnikov, P. E., Pimenov, A. A., & Bykov, D. E. (2015). Enhancement of adhesive properties of road asphalts, waste oil processing products. *Petroleum Chemistry*, *55*(1), 80–83. <https://doi.org/10.1134/S0965544115010119>
- Railroad Commission Of Texas. (2013). *TITLE 16. ECONOMIC REGULATION PART 1. RAILROAD COMMISSION OF TEXAS CHAPTER 4. ENVIRONMENTAL PROTECTION SUBCHAPTER B. COMMERCIAL RECYCLING DIVISION 1. GENERAL; DEFINITIONS*. Recuperado de <https://www.rrc.state.tx.us/oil-gas/applications-and-permits/environmental-permit-types-information/recycling/>
- Razali, M. N. (2016). *FORMULATION OF BITUMEN FROM INDUSTRIAL WASTE*. *11*(8), 7.

- Red Jurista. (2019). Ley 253 de 1996 Congreso de la República—Colombia. Recuperado 17 de octubre de 2019, de [Www.redjurista.com](http://www.redjurista.com) website: https://www.redjurista.com/Documents/ley_253_de_1996_congreso_de_la_republica.aspx
- Sabai, S. M. M., & Rugudagiza, B. X. (2018). Recycling of oil sludge together with construction and demolition waste into building materials in Tanzania. *Afr. J. Environ. Sci. Technol.*, 12, 7.
- Saskatchewan Energy and Mine. (1997). *Oily Byproducts: Road Spreading and Roadbed Incorporation Guideline*. Recuperado de <https://publications.saskatchewan.ca/#/products/75542>
- Serrano, M. F., & Torrado, L. M. (2013a). *Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos afectados por derrames de hidrocarburo (Tomado y Adaptado de INV E-123-13)*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Serrano, M. F., & Torrado, L. M. (2013b). *Determinación del límite líquido de los suelos afectados por derrames de hidrocarburo (Tomado y Adaptado de INV E-125-13)*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Serrano, M. F., & Torrado, L. M. (2013c). *Límite Plástico e índice de plasticidad de suelos afectados con hidrocarburos (Tomado y Adaptado de INV E-126-13)*. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Serrano, M. F., & Torrado, L. M. (2013d). *Relaciones de humedad- masa unitaria seca para suelos afectados por derrames de hidrocarburos (ensayo modificado de compactación) basado en la norma INV E- 142 -13*. Universidad Pontificia Bolivariana.

- Serrano-Guzmán, M. F., Forero Sarmiento, J. C., Guzmán Arias, D. A., & Pérez Ruiz, D. D. (2012). Predicción Del Tiempo De Transporte De Un Contaminante En Suelo Arenoso. *TRAVEL TIME PREDICTION OF CONTAMINANT TRANSPORT IN SANDY SOIL.*, (13), 74–82.
- Sharma, L. K., Sirdesai, N. N., Sharma, K. M., & Singh, T. N. (2018). Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study. *Applied Clay Science*, 152, 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.012>
- Trujillo Toro, M. A., & Ramírez Quirama, J. F. (2012). Biorremediación en suelos contaminados con hidrocarburos en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 3(2), 37. <https://doi.org/10.22490/21456453.952>
- US EPA. (2019). SW-846 Test Method 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure | Hazardous Waste Test Methods / SW-846 | US EPA. Recuperado 16 de octubre de 2019, de <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-1311-toxicity-characteristic-leaching-procedure>
- US EPA, O. (2015, julio 20). Technical Assistance Document for Complying with the Toxicity Characteristics Rule and Implementing the Toxicity Characteristic Leaching Procedure [Policies and Guidance]. Recuperado 22 de agosto de 2019, de US EPA website: <https://www.epa.gov/quality/technical-assistance-document-complying-toxicity-characteristics-rule-and-implementing>
- Valbuena Rojas, D. S., & Sierra González, J. M. (2015). *Diseño de una Mezcla entre Material Granular y Borrás Petroleras para uso como Capa Granular en una Estructura de*

Via (Universidad Distrital Francisco José de Caldas). Recuperado de <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/4997>

ANEXOS

ANEXO 1. Certificado Calibración Báscula