

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LA DESHIDRATACIÓN DE RECORTES
DE PERFORACIÓN DE LODO BASE AGUA COMPARANDO TECNOLOGÍAS
CONVENCIONALES CON EL SECADOR DE CORTES EQUIPO Q-DRYING-
KILN BAJO EL MARCO AMBIENTAL COLOMBIANO (LOUSIANA 29B Y
DECRETO 4741 DEL 2005).**

KEVIN LEÓN DURAN

MARIA PAULA RODRIGUEZ RUIZ

**FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BOGOTÁ
2020**

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LA DESHIDRATACIÓN DE RECORTES DE PERFORACIÓN DE LODO BASE AGUA COMPARANDO TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES CON EL SECADOR DE CORTES EQUIPO Q-DRYING-KILN BAJO EL MARCO AMBIENTAL COLOMBIANO (LOUSIANA 29B Y DECRETO 4741 DEL 2005).

KEVIN LEÓN DURAN

MARIA PAULA RODRIGUEZ RUIZ

**Proyecto integral para optar por el título de
INGENIERO DE PETROLEOS**

Director:

Jorge Lizarazo

Ingeniero de Petróleos

**FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BOGOTÁ
2020**

Nota de aceptación

Director

Ing. Angie Tatiana Ortega
Jurado

Ing. Sebastián Gómez Alba
Jurado

Bogotá, D.C., Agosto 2020.

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del CLAUSTRO

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectoría Académica y de Investigaciones

Dra. Maria Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Decano Facultad de Ingenierías

Dr. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería de petróleos

Ing. Juan Carlos Rodriguez

Secretaría General

Alexandra Mejía Guzmán

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento.

Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIAS

Este trabajo va dedicado a **DIOS** y a todos aquellos familiares que me apoyaron para llegar hasta este punto de mi vida, a mi madre **Marlen**, a mis padres **Pablo** y **Enrique**, a mi abuela **Luz**, que en paz descansa, fue un gran apoyo desde mis inicios y siempre me motivo para dar mi mejor esfuerzo y me dejó grandes consejos de vida; por estar allí y darme su apoyo incondicional haciéndome una mejor persona cada día.

Agradecimientos especiales a nuestro director **Jorge Lizarazo**, por su formidable apoyo, consejo y la entrega de su tiempo para sacar adelante este proyecto.

Gracias a mi compañero de trabajo, **Kevin León Duran** por su constante esfuerzo durante todo el desarrollo del proyecto de inicio a fin, y por nunca desvanecer en las dificultades que tuvimos que afrontar.

Gracias a todos aquellos compañeros que hicieron de esta etapa de mi vida un tiempo de aprendizaje lleno de buenos momentos y alegrías.

Maria Paula Rodriguez Ruiz

DEDICATORIAS

A **DIOS** que dirigió este proyecto con su gran amor y bondad. Porque es actor fundamental en mi vida y Porque siempre cumple sus promesas: "No temas, que yo estoy contigo. No desmayes, que yo soy tu Dios que te fortalezco. Siempre te ayudaré, siempre te sustentaré con la diestra de mi justicia." Isaías 41:10.

A mis padres, **RUBÉN** y **ANA**, por su incomparable amor hacia mí. Porque gracias a su lucha y su entrega, he podido cumplir mi sueño de ser ingeniero de petróleos. Su comprensión y su ayuda incondicional fueron factores primordiales para alcanzar la meta. A ellos debo mi vida y los amo con lo mayor de todas mis fuerzas. Doy gracias a Dios por ellos.

A mi compañera y amiga **MARIA PAULA RODRIGUEZ** por su arduo trabajo, por su entrega y su gran apoyo para el proyecto. Por su firmeza en los momentos difíciles y por la compañía y la confianza que me brindó durante mi proceso como ingeniero. Excelente trabajo en equipo.

Al ingeniero **JORGE LIZARAZO**, por su amistad, su profesionalismo y su interés en hacer posible el proyecto. Por todos los conocimientos que nos aporta, sus enseñanzas y su calidad humana que lo hacen ser un mentor excelente. Solo quedan agradecimientos hacia él.

A todos mis amigos(as), el equipo P. C. F. C. Y demás compañeros(as) que han sido parte de este gran proceso. Hicieron que mi estadía en la universidad fuera linda e inolvidable, estuvieron presentes en mis alegrías y tristezas y me ayudaron a crecer como persona. siempre los llevaré en mi corazón.

Cristo viene pronto

Kevin León Duran

AGRADECIMIENTOS

” Cuando llegas a la cima de la montaña caes de rodillas, alzas tus manos, Elevas tu vista al infinito del firmamento y das gracias a Dios que te inspiro a Subir. Luego conscientemente, regresas con la mirada hasta el valle, para Apreciar lo mucho que tuviste que superar para llegar hasta la cumbre.”
(Rosado, 2006).

Agradecemos a **Dios** por darnos su fuerza y fortaleza en cada momento y cada instante de nuestras vidas. Y permitirnos alcanzar nuestra meta de ser ingenieros de petróleos.

A la **Fundación Universidad de América** nuestro segundo hogar, por ser nuestra alma máter y albergarnos durante la formación como Ingenieros de Petróleos.

A nuestro director e Ingeniero **Jorge Lizarazo** por su disposición, ayuda y confianza hacia nosotros. A la compañía **QMAX solutions Colombia**, por abrirnos las puertas y permitirnos realizar nuestro trabajo de grado.

Agradecemos a nuestros Tutores, el profesor **Nelson Fernández** y el profesor **Jorge Tovar**, por todo su tiempo invertido, sus consejos y su ayuda, de las cuales han hecho posible esta tesis.

A nuestra **Familia** por todo su apoyo incondicional y su esfuerzo. Porque siempre han estado con nosotros en todo momento.

Finalmente agradecemos a nuestros amigos y a todas aquellas personas que de forma directa e indirecta nos animaron para la culminación del presente proyecto.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	22
INTRODUCCION	25
1. MARCO TEORICO	28
1.1 MANEJO DE LOS RECORTES DE PERFORACIÓN	28
1.1.1 Bio-Tratamiento	29
1.1.2 Desorción térmica.	29
1.1.3 Estabilización/Fijación.	30
1.2 DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RECORTES DE PERFORACIÓN	31
1.2.1 Confinamiento en celdas o piscinas	31
1.2.2 Zodmes (Zonas De Disposición De Materiales De Excavación Sobrantes).	32
1.3 SECADOR DE CORTES EQUIPO Q-DRYING-KILN	33
1.3.1 Horno rotatorio.	33
1.3.1.1 Horno de tres apoyos	34
1.3.1.2 Horno de dos apoyos	34
1.3.2 Funcionamiento	35
1.3.2.1 Calentamiento	35
1.3.2.2 Movimiento.	35
1.3.3 Hidrociclones.	36
1.3.4 Tolvas industriales.	37
1.4 NORMATIVIDAD	37
1.4.1 Decreto 4741 del 30 de diciembre del 2005.	37
1.4.2 Normatividad extranjera como modelo de aplicación en la legislación colombiana.	38
1.4.2.1 Lousiana 29B.	38
2. METODOLOGIA	40
2.1 MUESTREO	41

2.1.1 Memoria fotográfica muestreo en campo	42
2.2 PRUEBAS DE LABORATORIO ESTIPULADAS POR LA REGULACIÓN AMBIENTAL	45
2.2.1 Extracción TCLP.	46
2.2.1.1 Método electrométrico.	47
2.2.1.2 Colorimetría	49
2.2.1.3 Determinación de grasa, aceites e hidrocarburos por infrarrojo de partición	53
2.2.1.4 Gravimetría.	55
2.2.1.5 Determinación de metales pesados totales con digestión acida y solubles lectura directa por espectrofotometría de absorción atómica.	57
2.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS ENTRE LOS MÉTODOS CONVENCIONALES Y EL EQUIPO Q-DRYING-KILN	59
2.3.1 Tabla Comparativa	61
2.3.2 Comparación.	62
2.3.3 Cálculo de la eficiencia.	62
2.4 PRUEBAS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y CUMPLIMIENTO DE LA NORMA AMBIENTAL.	63
2.4.1 Apiques.	64
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
3.1 MUESTREO	66
3.2 RESULTADOS DE RECORTES TRATADOS POR METODOS CONVENCIONALES	68
3.2.1 Arsénico.	68
3.2.2 Bario.	69
3.2.3 Cromo Hexavalente y Total.	70
3.2.4 Conductividad Eléctrica.	72
3.2.5 Grasas y Aceites.	73
3.2.6 Hidrocarburos Totales.	75
3.2.7 Humedad Natural.	77
3.2.8 Mercurio Total.	79

3.2.9 pH.	80
3.2.10 Plata Total.	81
3.2.11 Plomo.	82
3.2.12 PSI y RAS.	83
3.2.13 Selenio.	84
3.2.14 Zinc Total.	85
3.2.15 Pruebas TCLP.	86
3.2.16 Perfil de caracterización química con los métodos convencionales.	88
3.3 RESULTADOS DE RECORTES TRATADOS POR EL EQUIPO Q-DRYING-KILN	90
3.3.1 Arsénico.	90
3.3.2 Bario Total.	91
3.3.3 Cadmio Total.	92
3.3.4 Calcio.	94
3.3.5 Conductividad Eléctrica.	94
3.3.6 Cromo Total y Hexavalente.	96
3.3.7 Grasas y Aceites.	97
3.3.8 Hidrocarburos Totales.	98
3.3.9 Humedad Higroscópica.	100
3.3.10 Humedad Natural.	100
3.3.11 Magnesio soluble, Mercurio Total y Plata Total.	102
3.3.12 PH.	103
3.3.13 Plomo total.	104
3.3.14 PSI y RAS.	105
3.3.15 Selenio Total.	107
3.3.16 Zinc Total.	108
3.3.17 TCLP.	109
3.3.18 Perfil de caracterización química para los pozos con el equipo Q-DRYING-KILN.	111
3.3.19 Resumen de los parámetros que tuvieron variación.	112
3.4 EFICIENCIA EN LA DESHIDRATACION DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN.	113
3.4.1 Descripción general del Equipo Q-DRYING-KILN.	113

3.4.1.1 Funcionamiento	114
3.4.2 Eficiencia de los métodos convencionales.	116
3.4.3 Eficiencia del Equipo Q-DRYING-KILN.	116
3.4.4 Comparación de la eficiencia con los métodos convencionales.	123
3.5 PRUEBAS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	125
4. CONCLUSIONES	128
5. RECOMENDACIONES	129
BIBLIOGRAFIA	130
ANEXOS	136

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Manejo de Recortes de Perforación.	28
Figura 2. Proceso Desorción Térmica.	30
Figura 3. Tornillos helicoidales.	30
Figura 4. Piscina con Geomembranas.	31
Figura 5. Estabilización con Cal viva.	32
Figura 6. Creación de ZODME.	32
Figura 7. Equipo Q-Drying-Kiln.	33
Figura 8. Horno Rotatorio.	34
Figura 9. Sistema de Accionamiento.	62
Figura 10. Movimientos Transversales.	35
Figura11. Hidrociclones	36
Figura 12. Tolva Industrial	37
Figura 13. Cortes de perforación Húmedos	42
Figura 14. Deshidratación con cal	42
Figura 15. Cortes Tratados por el equipo Q-Drying-Kiln	43
Figura 16. Disposición final ZODME	43
Figura 17. Disposición en Zodme con retroexcavadora	44
Figura 18. Sedimentación del Zodme	44
Figura 19. Proceso de deshidratación	45
Figura 20. Método deshidratacion convencional	62
Figura 21. Diseño de tabla comparativa para el equipo Q-DRYING-KILN	62
Figura 22. Muestra de recortes	67
Figura 23. Compactacion de los recortes	67
Figura 24. Descripcion General del Equipo	119
Figura 25. Funcionamiento del Equipo Q-DRYING-KILN	115
Figura 26. Aspecto de los recortes antes y despues de pasar por el equipo	119
Figura 27. Disposición en el Zodme.	119
Figura 28. Área de disposición final de los recortes	120

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Monitoreo Cortes de Perforación.	39
Tabla 2. Parámetros explícitos en Lousiana 29b.	40
Tabla 3. Correlación de pozos para los métodos convencionales.	60
Tabla 4. Correlación de pozos con el equipo Q-DRYING-KILN.	61
Tabla 5. Parámetros evaluativos de la eficiencia.en el equipo.	63
Tabla 6. Volúmenes Requeridos para los pozos.	66
Tabla 7. Arsénico Total.	68
Tabla 8. Bario Total.	69
Tabla 9. Cromo Hexavalente y Cromo Total	71
Tabla 10. Conductividad Eléctrica.	72
Tabla 11. Grasas y Aceites.	73
Tabla 12. Hidrocarburos Totales.	75
Tabla 13. Humedad Natural.	77
Tabla 14. Mercurio Total.	79
Tabla 15. pH.	80
Tabla 16. Plata Total	81
Tabla 17. Plomo Total.	82
Tabla 18. PSI Y RAS	83
Tabla 19. Selenio Total.	84
Tabla 20. Zinc Total.	85
Tabla 21. TCLP	87
Tabla 22. Perfil de caraterizacion quimica de los pozos con metodos convencionales	.87
Tabla 23. Arsénico	90
Tabla 24. Bario Total	91
Tabla 25. Cadmio Total	93
Tabla 26. Calcio Soluble	94
Tabla 27. Conductividad Eléctrica	95
Tabla 28. Cromo Total y Hexavalente	96
Tabla 29. Grasas y Aceites.	97
Tabla 30. Hidrocarburos Totales	98
Tabla 31. Humedad Higroscópica	100
Tabla 32. Humedad Natural	100
Tabla 33. Mercurio Total, Plata Total y Magnesio Soluble.	102
Tabla 34. pH	103
Tabla 35. Plomo Total.	104

Tabla 36. PSI y RAS	105
Tabla 37. Selenio Total	107
Tabla 38. Zinc Total	108
Tabla 39. TCLP.	110
Tabla 40. Perfil de caracterización química de los pozos con el equipo Q-DRYING-KILN.	.112
Tabla 41. Parametros de Lousiana 29b	112
Tabla 42. Parámetros del decreto 4741 del 2005.	112
Tabla 43. Volúmenes producidos y tratados con métodos convencionales.	116
Tabla 44. Volúmenes producidos y tratados por el equipo Q-DRYING-KILN.	117
Tabla 45. Límites de variación para el equipo.	118
Tabla 46. Cálculo de área para disposición	118
Tabla 47. Barriles de recortes tratados.	125
Tabla 48. Pruebas de estabilización in situ.	126

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Metodología General.	40
Diagrama 2. Muestreo de suelos.	41
Diagrama 3. Extracción TCLP.	46
Diagrama 4. Medición del pH	49
Diagrama 5. Primera Parte del Método de Colorimetría.	51
Diagrama 6. Segunda Parte del Método de Colorimetría.	52
Diagrama 7. Determinacion de Grasas y Aceites.	52
Diagrama 8. Determinación de Hidrocarburos Totales.	55
Diagrama 9. Análisis Gravimétrico	56
Diagrama 10. Absorción atomica.	59
Diagrama 11. Apiques.	65

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Normalidad.	47
Ecuación 2. pH asignado	48
Ecuación 3. pH de muestra	48
Ecuación 4. Análisis Cromo hexavalente.	50
Ecuación 5. Matriz fortificada.	51
Ecuación 6. Determinación grasas y aceites.	53
Ecuación 7. Determinación de Hidrocarburos Totales	54
Ecuación 8. Factor Gravimétrico.	57
Ecuación 9. Porcentaje total de analito	57
Ecuación 10. Concentración de metales.	58
Ecuación 11. Coeficiente de variación.	63
Ecuación 12. Coeficiente de variación.	118

LISTA DE GRAFICOS

	pág.
Gráfico 1. Resultados Grasas y Aceites	74
Gráfico 2. Resultados de Hidrocarburos Totales	76
Gráfico 3. Resultados Humedad Natural.	78
Gráfico 4. Resultados del pH	81
Gráfico 5. Resultados de Zinc Total	86
Gráfico 6. Resultados de Arsénico Total.	91
Gráfico 7. Resultados del Cadmio.	93
Gráfico 8. Resultados de Conductividad Eléctrica	95
Gráfico 9. Resultados de Grasas y Aceites	98
Gráfico 10. Resultados de Hidrocarburos Totales	99
Gráfico 11. Resultados de Humedad Natural	101
Gráfico 12. Resultados del pH	104
Gráfico 13. Resultados PSI	106
Gráfico 14. Resultados de RAS	106
Gráfico 15. Resultados Zinc Total	109
Gráfico 16. Volúmenes producidos y tratados.	117
Gráfico 17. Humedad Promedio.	119
Gráfico 18. Resultados del Area	123
Gráfico 19. Comparacion de la humedad Promedio.	123
Gráfico 20. Comparación de volumen dispuestos	124
Gráfico 21. Comparación de Área	230

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Carta de confidencialidad	135

LISTA DE ABREVIATURAS

%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrogeno
PSI	Porcentaje de sodio intercambiable
RAS	Relación de absorción sodio
TPH	Hidrocarburos totales de petróleo
CST	Corte sin tratar
CT	Corte tratado
TCLP	Procedimiento de lixiviación para características de toxicidad
N	Normalidad
A	Gramos Na ₂ CO ₃ pesados en el balón de 1000ml
B	ml de solución de Na ₂ CO ₃
C	ml de ácido empleados para la solución
pH_B	pH asignado al tampón NIST
NIST	National Institute of Standards and Technology
PH	pH de la muestra medido potenciométricamente
F	Faraday: 9.649*10 ⁴ culombios/mol
Fem	Fuerza electromotriz
E_x	Muestra fem
E_s	Tampón fem
R	Contante del gas
T	Temperatura absoluta
C_s	Concentración de LFM
C	Concentración de la muestra antes del aumento
S	Concentración adicionada
CV	Coefficiente de variación
X_n	Valor antes del tratamiento
X_{n-1}	Valor después del tratamiento
n	Número de pozos
Vol	Volumen
Bbl	Barriles
m³	Metros
Hr	Horas

GLOSARIO

ABSORCIÓN: es el fenómeno a través del cual los átomos, moléculas o iones pasan de una fase, bien sea, líquida o gaseosa a otra líquida o gaseosa. Es decir, se transfiere la materia de una fase A (absorbato) a otra fase B (absorbente) en la que queda disuelto o disperso.

ACUIFERO: un cuerpo de roca cuya saturación de fluidos, porosidad y permeabilidad permiten la producción de agua subterránea.

COMPACTACION: El proceso físico por el cual los sedimentos se consolidan, lo que produce la reducción del espacio poroso a medida que los granos se empaquetan en forma más estrecha.

DESHIDRATACION: La pérdida de agua de una lechada de cemento o un fluido de perforación por el proceso de filtración.

ESPECTROFOTOMETRIA: es un método científico utilizado para medir cuánta luz absorbe una sustancia química, midiendo la intensidad de la luz cuando un haz luminoso pasa a través de la solución muestra, basándose en la Ley de Beer-Lambert.

ESTABILIZACION: La estabilización es la elección correcta para crear la capacidad portante y la calidad de los suelos, así como para prepararlos para proyectos de construcción de carreteras.

HELICOIDALES: tiene forma de hélice

HIDROCICLONES: Un equipo para control de sólidos que consiste en un cono invertido, por el que el lodo se alimenta tangencialmente en la parte superior (el diámetro mayor).

HUMEDAD RELATIVA: El contenido de agua en el aire en comparación con el contenido de agua que el aire podría contener si se satura, expresado como un porcentaje.

LIXIVIACION: Es un proceso en el que un disolvente líquido se pone en contacto con un sólido pulverizado produciéndose la disolución de uno de los componentes del sólido.

METALES PESADOS: Un término utilizado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EUA para especificar los elementos cadmio (Cd) y mercurio (Hg). En un sentido más amplio, el término puede utilizarse para especificar otros metales que generan preocupación por el medio ambiente, tales como el cobre, el plomo, el cromo, el níquel, el arsénico y el Zinc.

PISCINAS DE RECORTES: Disposición final para los recortes de perforación.

SEDIMENTACION: El proceso de formación, transporte y depositación de los sedimentos.

TOLVA INDUSTRIAL: Tiene un diseño de cono invertido con una apertura en la zona inferior para la salida del material, simulando el estilo de un embudo.

VERTEDERO: Lugar donde se vierte basuras, residuos o escombros, generalmente situado a las afueras de una población.

ZODMES: Zona de disposición de material de excavación sobrante.

RESUMEN

La deshidratación de los recortes de perforación es un tema de gran importancia para la industria del petróleo y gas. El alto riesgo de contaminación que se puede generar al medio ambiente e incluso suspensiones por parte de la autoría ambiental, son algunos de los efectos que la humedad y la relación con ciertos factores externos pueden ocasionar. Por lo general, existen métodos convencionales que ayudan a disminuir el porcentaje de humedad, el problema radica en los altos costos de operación que se puedan llevar a cabo y la ocupación de grandes áreas innecesarias en el campo de operaciones. A partir de este proyecto, se evalúa la eficiencia de deshidratación comparando métodos convencionales con el horno deshidratador patentado por Qmax Solutions Colombia.

El equipo Q-Drying-Kiln, es un horno rotatorio diseñado con altos estándares de calidad para reducir en un gran porcentaje la humedad y los volúmenes a disponer de recortes en las zonas de disposición final. El estudio se realizó en el campo “bloques llanos 34” ubicado en los llanos orientales, donde actualmente opera el equipo.

El proyecto se fundamenta en el análisis de los resultados de los parámetros resultantes de las pruebas de laboratorio estipuladas por el protocolo Louisiana 29b y el decreto 4741 del 2005, de los recortes que han sido tratados por el equipo y por los métodos convencionales. Además, se realiza la comparación de los dos procesos por medio de cálculos volumétricos y estadísticos que demuestran las grandes ventajas que puede ofrecer el equipo Q-Drying-Kiln para deshidratar los cortes de perforación.

Al finalizar el proyecto se hizo uso de pruebas de estabilización de suelos evaluando los recortes de perforación después del estricto tratamiento con el horno, con el fin de verificar el cumplimiento a la normativa ambiental y supervisar el lugar de disposición final para evitar una posible contaminación en la zona de estudio.

Palabras Clave: Perforación, Deshidratación, Zedme, Solidos, Secador, Cortes, Humedad.

ABSTRACT

Dehydration of drill cuttings is a major issue for the oil and gas industry. The high risk of contamination that can be generated to the environment and even suspensions by environmental authorship, are some of the effects that humidity and the relationship with certain external factors can cause. In general, there are conventional methods that help decrease the percentage of humidity, the problem lies in the high operating costs that can be carried out and the occupation of large unnecessary areas in the field of operations. From this project, the dehydration efficiency is evaluated by comparing conventional methods with the dewatering oven patented by Qmax Solutions Colombia.

The Q-Drying-Kiln equipment is a rotary kiln designed with high quality standards to reduce humidity and volumes to a large percentage by having cuttings in the final disposal areas. The study was carried out in the Bloque Llanos 34's field located in the eastern plains, where the team currently operates.

The project is based on the analyzes corresponding to each parameter resulting from laboratory tests stipulated by the Louisiana 29b protocol and Decree 4741 of 2005, of the cuts that have been treated by the team and by conventional methods. In addition, the comparison is made by means of volumetric and statistical calculations that give clarity to the advantages that can be obtained when using the oven.

At the end of the project, soil stabilization tests were used, evaluating drilling cuttings after strict treatment with the furnace, in order to verify compliance with environmental regulations and supervise the final disposal site to avoid possible contamination in the study area.

Key Words: Drill, Dehydration, Zodme, Solids, Dryer, Cuts, Humidity.

INTRODUCCION

En la industria de petróleo y gas existen varias áreas de trabajo, una de ellas es el control de sólidos que es fundamental para generar un menor impacto en el medio ambiente. Dentro de esta área de trabajo se encuentran distintos tratamientos para reducir la humedad que contienen los recortes de perforación, entre los más importantes están: Bio-tratamiento, Desorción térmica y Estabilización/fijación. Además, se requiere una adquisición de terrenos para la disposición de los recortes, en estas zonas se construyen piscinas con geomembranas y zonas de disposición de material de excavación sobrante (Zodmes) para el cumplimiento adecuado de la regulación ambiental Louisiana 29b y decreto 4741 del 2005.

De acuerdo a lo anterior, los cortes de perforación recibidos inicialmente en la operación, presentan una humedad entre el 60-80% en volumen y deben ser deshidratados para su disposición final, por lo tanto uno de los grandes riesgos asociados es la deficiencia en la deshidratación de cortes de perforación con métodos convencionales que conlleva a un aumento de áreas y volúmenes para la disposición final provocando problemas socio-ambientales y el aumento de los costos operacionales por parte de las operadoras. En los métodos convencionales se utiliza material nativo y Cal viva para la deshidratación de los recortes de perforación.

En el mejor del caso se usa material nativo se utiliza una relación 1:2, que significa que por cada barril de recortes se requieren dos de material nativo, por lo tanto, se obtienen 3 barriles de mezcla para su respectiva deshidratación y posterior disposición final.

La importancia de este proyecto es dar a conocer un nuevo equipo llamado Q-DRYING-KILN. Este equipo es un secador de recortes de lodo base agua que reduce el porcentaje de humedad significativamente y da solución a un problema común en el manejo de los recortes y es la deficiencia en la deshidratación de los recortes de perforación por los métodos y prácticas convencionales, generando además beneficios para las compañías operadoras disminuyendo áreas, volúmenes y costos en el transporte y disposición final de los recortes, ofreciendo un nuevo plan de manejo y prevención de riesgos para cumplimiento de la regulación ambiental.

El manejo de los recortes de perforación es el gran desafío porque llevan consigo una posible responsabilidad medioambiental cuando se gestionan o eliminan de forma incorrecta, algunos estudios están enfocados en la importancia que tiene la disposición final. EL-SAYED Abdullah y ABU EL-NAGA Kamal H¹, caracterizan la naturaleza y la sensibilidad de los entornos y un equilibrio entre las necesidades de

¹ EL-SAYED Abdullah, ABU EL-NAGA Kamal H. Treatment of drill cuttings. Belayim Petroleum Company(Petrobel).SPE,2001. SPE 66530.

la economía y las necesidades del de la minimización del impacto del medio ambiente. Este artículo, ofrece dos procedimientos o métodos para el correcto tratamiento de los recortes de perforación, el primero es el método de fijación, el cual consiste en que los recortes se transfieren a la tolva de carga y luego por medio de un sistema de transporte, puede ser grúa o camión se dirigen hacia el mezclador donde se agrega una cantidad requerida de suspensión de cemento y solución de silicio y otros agentes necesarios dependiendo de cada trabajo en particular y Una vez establecidos los parámetros de dosificación para los aditivos, la mezcladora comienza a funcionar con el objeto de deshidratar los recortes por medio de reacciones químicas que el cemento y el sílice ofrecen en los recortes de perforación, para luego llevarlos a la zona de restauración y estabilización de los mismos; Para el segundo método llamado método de separación, ofrece una serie de pasos a seguir para cumplir con el principio de deshidratación térmica por medio de una cámara de calentamiento compuesta por ocho partes: unidad de tratamiento, *blower*, filtro de aire, *chiller*, generador, condensador y el sistema de tratamiento de agua. Gracias a este artículo se puede obtener una serie de información importante para nutrir correctamente el marco teórico del presente proyecto y comprender los diversos procedimientos adecuados para no generar ‘pasivos ambientales’ o mejor dicho, gastos y multas innecesarios en operaciones de exploración y explotación de hidrocarburos respecto a los desechos. Además, el artículo demuestra que los recortes deben recogerse de la operación del área y deben ser transportados al sitio de limpieza de corte en tierra, donde pueden ser tratados.

La deficiencia en la deshidratación de los recortes de perforación ha causado un revuelo importante en el sector y por ende el objetivo principal de este proyecto es Evaluar la eficiencia en la deshidratación de recortes de perforación del lodo base agua comparando tecnologías convencionales con el secador de cortes equipo Q-DRYING-KILN bajo el marco ambiental colombiano (LOUSIANA 29b Y Decreto 4741 del 2005). Y los objetivos específicos son:

- Realizar un acompañamiento a las pruebas de laboratorio aplicadas a los recortes de perforación deshidratados por los métodos convencionales y por el equipo Q-DRYING-KILN.
- Analizar los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio realizadas a los recortes de perforación obtenidos de los métodos convencionales y del equipo Q-DRYING-KILN en el campo estipulado por la empresa.
- Comparar los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio sobre la deshidratación de los recortes de perforación sometidos a tratamiento en el equipo Q-DRYING-KILN frente a los métodos convencionales teniendo en cuenta el marco ambiental colombiano (LOUSIANA 29b Y Decreto 4741 del 2005).
- Calcular la eficiencia en la deshidratación de los recortes de perforación, del secador equipo Q-DRYING-KILN.
- Demostrar mediante pruebas de estabilización de suelos, el cumplimiento al marco ambiental colombiano (LOUSIANA 29b Y Decreto 4741 del 2005), en las

zonas aledañas a la disposición final de los recortes generados por el equipo Q-DRYING-KILN.

Mediante la aplicabilidad del secador de cortes de lodo base agua equipo Q-DRYING-KILN, la deshidratación de los recortes de perforación es eficiente con respecto a los métodos convencionales; Además reduce el área y el volumen de disposición de recortes de perforación generando menores impactos ambientales y económicos.

El decreto 4741 del 2005 y el protocolo lousiana 29b, son la base y estructura para desarrollar los distintos objetivos específicos del proyecto. Dentro del capítulo del manejo de los recortes de perforación, se da una breve especificación de cada uno de los métodos convencionales y disposiciones finales de los recortes de perforación actualmente utilizados por la industria, además da a conocer la parte innovadora del proyecto: El equipo Q-DRYING-KILN. Dentro del capítulo de la metodología del proyecto en el numeral de 'pruebas estipuladas por la regulación ambiental', se reconoce cada una de las diversas pruebas a desarrollar determinando cada uno de los criterios y procedimientos necesarios, como también el 'plus' al proyecto: las pruebas de estabilidad de suelos. A través del capítulo de resultados, se da un exhaustivo análisis de cada uno los datos obtenidos de las distintas pruebas, teniendo en cuenta las regulaciones ambientales antes mencionadas y adicionando los resultados de la evaluación y comparación de la eficiencia de cada uno de los tratamientos de deshidratación de cortes de perforación base agua donde se determinan por medio de cálculos volumétricos dando cumplimiento al objetivo principal del proyecto.

1. MARCO TEORICO

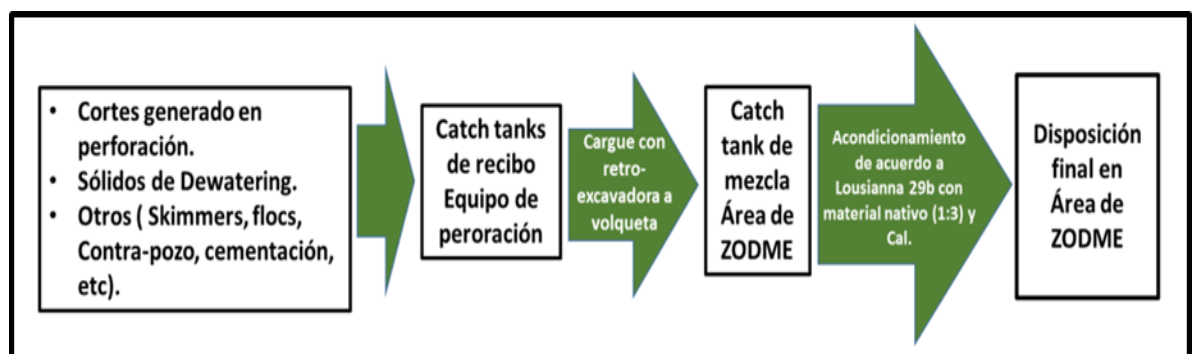
En este capítulo se plantean conceptos importantes de los tratamientos convencionales como: Bio-tratamientos, desorción térmica, estabilización y fijación y por consiguiente la disposición final en 'Zodmes' y piscinas con geomembranas. Adicional a esto, se describe el equipo Q-DRYING-KILN como base fundamental para el desarrollo del presente proyecto y por ende se dan especificaciones sobre las regulaciones ambientales que rigen el manejo de desechos en la industria, el decreto 4741 del 2005 y Louisiana 29b.

1.1 MANEJO DE LOS RECORTES DE PERFORACIÓN

Los recortes de perforación son partículas sólidas que se generan por la acción de trituración de la broca con el suelo nativo en el proceso de perforación de un pozo; Estos son llevados a superficie con ayuda de un lodo de perforación y llegan a los equipos de control de sólidos donde son separados de acuerdo a características específicas.

El manejo o tratamiento que se le da a los recortes de perforación después de un buen sistema de control de sólidos permite que las condiciones de estos mejoren y a partir de los resultados se elige la mejor opción para su disposición final de acuerdo a las distintas regulaciones en la legislación ambiental. El manejo de los cortes que se generan se puede ilustrar en la **Figura 1**.

Figura 1. Manejo de Recortes de Perforación.



Fuente: ECOPETROL S.A.

Es importante resaltar cada uno de los principales tratamientos en los que son sometidos los recortes de perforación y se define de acuerdo al tipo de lodo utilizado en la perforación como: Bio-tratamientos, desorción térmica y estabilización o

fijación por agentes reactivos y por ende, sus respectivas disposiciones finales que ayudan a estabilizar los recortes de perforación producidos.

1.1.1 Bio-Tratamiento. Las modificaciones o disminución de la concentración se realizan mediante la acción de bacterias propias del suelo, y se aplica tanto para residuos peligrosos como no peligrosos. El Bio-tratamiento “Se logra con la degradación de los sólidos que puede darse de manera aeróbica y anaeróbica, Quiere decir, en ambientes con abundante oxígeno y en otros que carecen de oxígeno”.²

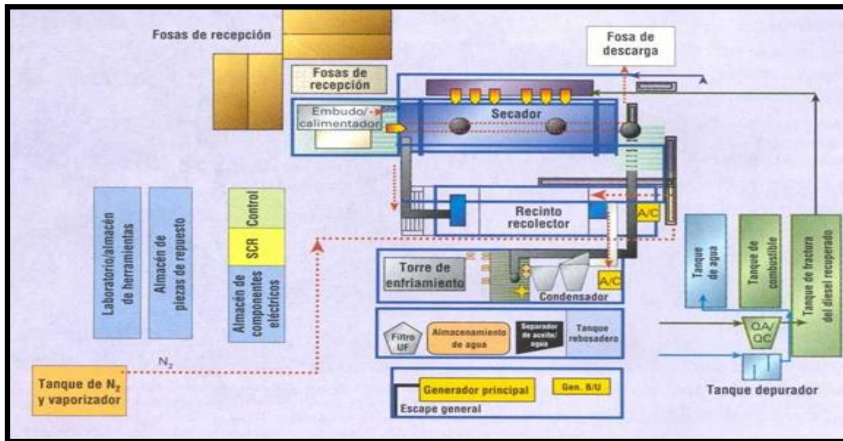
1.1.2 Desorción térmica. Es un proceso en el que se usa alta temperatura para la separación del agua y la destrucción de tóxicos, tanto hidrocarburos como lodos de perforación y sustancias químicas de materiales sólidos, Según Ballesteros,³ este método permite recuperar la base sintética, es decir, la fase de dónde vienen humectados, y remover todos los contaminantes que pueda tener dichos recortes de perforación, y que no puedan causar daños severos al ambiente. Este tratamiento se realiza de forma directa e indirecta y su diferencia radica en la forma en que actúa el calor o la llama sobre el material contaminado. Básicamente el procedimiento se desarrolla por medio de dos etapas, la primera, aumenta la temperatura hasta el punto de ebullición del contaminante, por lo tanto, volatiliza y separa el contaminante del sólido; La segunda etapa involucra enfriamiento de los gases del proceso y la condensación de estos mismos a forma líquida.

Este método se ve limitado por la capacidad de la unidad térmica y por la disposición en la locación del combustible que alimenta la fuente de calor, pero, su principal beneficio es que reduce hasta en un 50% el volumen de los recortes; el diseño de la planta y el proceso puede verse en la **Figura 2**.

² ZULUAGA BELTRÁN Ana María. Estudio de viabilidad del uso de los recortes de perforación en la creación de mampostería estructural. Tesis de ingeniería de petróleos. Bogotá D.C. Fundación Universidad de América, 2019. 32 p.

³ BALLESTEROS VILLEGAS, Adriana Cristina. Evaluación de diferentes sistemas para el tratamiento de residuos de perforación en el Campo Tarapoa Petroleum S.A. trabajo de grado de ingeniería de petróleos. Guayaquil, Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 2007. 57p

Figura 2. Proceso Desorción Térmica.



Fuente: elaboración propia.

1.1.3 Estabilización/Fijación. Es la mezcla de residuos con agentes reactivos que encapsulan los contaminantes y prevenir la lixiviación de estos al medio ambiente y así, el producto final podrá cumplir con las regulaciones y normas que exige la legislación ambiental. Suele usarse, cenizas, cal viva, cemento portland, yeso, vapor de sílice o revoques de chimenea. Tanto en cortes base aceite como en cortes base agua, los reactivos antes mencionados reducen la movilidad de hidrocarburos e iones metálicos y generando un material estable más seco. Normalmente se suele utilizar un sistema de tornillos helicoidales o tanque de tornillo doble para la mezcla. Véase en **Figura 3**.

Figura 3. Tornillos helicoidales.



Fuente: ECOPETROL S.A.

1.2 DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RECORTES DE PERFORACIÓN

Los Cortes pueden ser colectados para ser transferidos a un proceso de tratamiento en la locación, secador de recortes, unidades de inyección o ser contenidos en cajas de Cortes, bolsas o contenedores de alta capacidad. Dentro de las opciones para disponer finalmente los recortes son los siguientes:

1.2.1 Confinamiento en celdas o piscinas. Este método se utiliza cuando se perforan los pozos comúnmente con lodos base agua en donde demuestran las estadísticas que los resultados de estabilización cumplen con parámetros ambientales, Tal y como expresa Zuluaga⁴, la construcción de estas piscinas depende del volumen de los recortes que sea necesario confinar, por ende, es necesario hacer inversión en obras civiles. Véase **Figura 4**.

Figura 4. Piscina con Geomembranas.



Fuente: ECOPEPETROL S.A.

En la piscina de mezcla se adiciona el material estabilizante, frecuentemente se usa cal viva, este material estabilizante se mezcla con los cortes usando una retroexcavadora de orugas, hasta obtener una mezcla homogénea. Este proceso se realiza con el fin de disminuir la humedad de los cortes y conformar un material residual apto para ser dispuesto. Este material ya estabilizado, se lleva a una piscina de disposición, donde van a quedar depositados finalmente. Véase **Figura 5**.

⁴ ZULUAGA. Op.cit., p. 38

Figura 5. Estabilización con Cal viva.



Fuente: ECOPETROL S.A.

1.2.2 Zodmes (Zonas De Disposición De Materiales De Excavación Sobrantes).

Como se indica en el informe general de HMV INGENIEROS⁵ El tamaño de los ZODMES está marcado por el volumen de residuos producidos por alguna práctica civil. Tal cantidad de material desechable depende fundamentalmente de la topografía y del tipo de material a mover, Es posible que en una misma área coexistan combinaciones diversas de estas estructuras, en función de la extensión que ocupe el emplazamiento. Asimismo, la forma de los ZODMES depende de las licencias ambientales y estudios sobre la estabilidad de terrenos, se van transportando los recortes hasta la zona y luego, con ayuda de un equipo compactador se van formando ciertas estructuras que dependen de la forma natural del terreno, véase **Figura 6**.

Figura 6. Creación de ZODME.



Fuente: QMAX SOLUTIONS COLOMBIA.

⁵ HMV INGENIEROS LTDA-PCA. Informe del Diseño de ZODMES. Bogotá, Mayo de 2011. Informe: 2361-00-EV-RP-001-1

1.3 SECADOR DE CORTES EQUIPO Q-DRYING-KILN

Los recortes que son transferidos desde el pozo en donde se está perforando al sistema de control de sólidos, son llevados por los camiones a las piscinas o Zodmes para luego ser mezclados con cal, estos van todavía impregnados de lodo que ha sido utilizado en la perforación del pozo y por lo tanto con un porcentaje importante de humedad y de aditivos tales como metales pesados, sustancias tóxicas y reactivas que son contaminantes al medio ambiente. El recorte debe ser sometido a un proceso de deshidratación y trituración para depositarlo en un lugar adecuado y que esté de acuerdo a la regulación ambiental exigida.

El equipo Q-DRYING-KILN patentado por la empresa Qmax solutions, está constituido por tres partes principales donde su funcionamiento se basa en cada uno de los principios de: Horno rotatorio, sistema de Hidrociclones y tolvas industriales. Ver **figura 7**.

Figura 7. Equipo Q-Drying-Kiln.



Fuente: QMAX SOLUTIONS COLOMBIA.

1.3.1 Horno rotatorio. Se trata de un cilindro enorme de acero que gira sobre un sistema de accionamiento que comúnmente utiliza 2 motores, donde tiene cierto ángulo de inclinación y permite que la materia prima sea fácilmente extraída por el otro lado del cilindro, cabe resaltar que el horno rotatorio se usa comúnmente en centrales de fabricación del cemento portland. Tal como se ve en la **Figura 8**.

Figura 8. Horno Rotatorio.



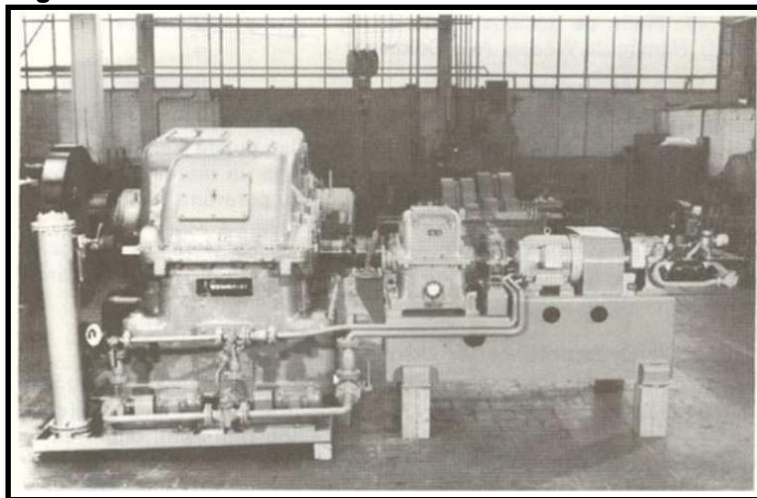
Fuente: elaboración propia.

Como dice Yusdel⁶, el sistema de rotación puede construirse de dos formas:

1.3.1.1 Horno de tres apoyos. Pueden ser por medio de uno o dos grupos de accionamiento en los que un piñón ajusta una corona dentada fijada sobre la virola.

1.3.1.2 Horno de dos apoyos. Directamente por medio de uno o dos rodillos accionados por dos o cuatro motores electromecánicos. El sistema de accionamiento comprende un engranaje entre corona dentada y los piñones ambos engranajes con acoplamientos, motores y trenes de engranajes como reductores de velocidad. Véase **Figura 9**.

Figura 9. Sistema de Accionamiento.



Fuente: DÍAZ HERNÁNDEZ, Yusdel. Diseño de un horno rotatorio para la fabricación de cemento. P.10.

⁶ DÍAZ HERNÁNDEZ, Yusdel. Diseño de un horno rotatorio para la fabricación de cemento. P.10

El horno está asegurado por topes hidráulicos, los cuales permiten que el horno mantenga un movimiento axial limitado, con el fin de repartir de manera uniforme el desgaste sobre toda la superficie de los rodillos soporte⁷.

A medida que el material avanza en el interior del horno, se forman tres zonas dependiendo del tamaño de las partículas; las más grandes tienden a colocarse en la parte externa del horno, mientras que las partículas medianas y pequeñas tienden a moverse en el centro de la cama del material. El grado de llenado de estos hornos usualmente se encuentra en el orden del 15%.

1.3.2 Funcionamiento. Existen dos condiciones de operación: El tipo de calentamiento y el movimiento del horno para que el equipo opere de manera correcta.

1.3.2.1 Calentamiento. Puede ser de dos formas, de forma directa e indirecta, la diferencia radica en que la llama producida intervenga en los recortes. Dentro del calentamiento indirecto “se realiza sin permitir el contacto entre el medio de calentamiento y los productos que se procesan”⁸ el flujo de calor se transmite a través de las paredes del horno; mientras en el calentamiento directo, el cual el equipo Q-DRYING-KILN utiliza dentro de su funcionamiento, tiene que ver en que la llama o como en algunos casos que se utilizan gases de combustión, intervienen de primera mano con el producto o en este caso, los recortes de perforación.

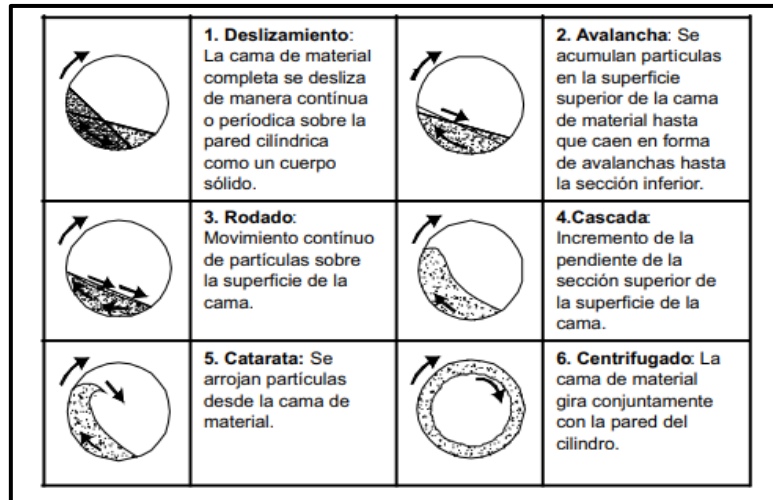
1.3.2.2 Movimiento. Libardo⁹ aclara que, para los procesos de transferencia de calor, la ubicación de un plano perpendicular al eje del cilindro hace posible la forma en que esta la cama del material en el plano transversal; Dicho movimiento transversal varía según la velocidad de rotación, las características reológicas del material y el llenado del cilindro. Los principales tipos de movimiento transversal se pueden representar en la **Figura 10**.

⁷ DIAZ HERNANDEZ. Ibid. p. 13

⁸ GOMEZ Alexander. WOLFGANG klose. Procesos de transporte de biomasa y carbonizados en hornos rotatorios. Alemania. 2016. P 6-7.

⁹ MENDOZA GENEY Libardo Enrique. Pirolisis de biosólidos en horno rotatorio. Tesis de grado como requisito para optar al título de: Doctor en Ingeniería - Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. 2016. 134p

Figura 10. Movimientos Transversales.



Fuente: GOMEZ Alexander. WOLFGANG Klose. Procesos de transporte de biomasa y carbonizados en hornos rotatorios. Alemania. 2016. P 6-7.

1.3.3 Hidrociclones. El hidrociclón es un cono invertido alimentado por una entrada tangencial en el borde superior donde cuenta con el diámetro mayor tal como se muestra en la **Figura 11**. Su nombre es causa de que el sistema trabaja con sólidos con un grado de humedad, donde son inyectados con alta presión, describiendo una espiral convergente hacia el centro o fondo hasta encontrar la salida. El efecto de la fuerza centrífuga causada por la espiral sobre las partículas gruesas obliga a que los sólidos colisionen con la pared del cono provocando que mientras el líquido sale por la parte inferior, en el fondo los sólidos sedimentados sean expulsados y recolectados.

Figura 11. Hidrociclón



Fuente: elaboración propia.

1.3.4 Tolvas industriales. La tolva es aquel dispositivo de gran tamaño y de distintas estructuras, utilizado para el procesamiento de materiales. Generalmente, se fabrica con diseño de cono invertido simulando el estilo de un embudo. De esta forma, tiene la capacidad de almacenar, moler, triturar, disolver o incluso clasificar materiales, según el tipo de tolva de la que se trate. Cabe decir que el equipo en estudio utiliza una serie de sistema de mangas o aspiradoras controladas por válvulas con el fin de acondicionar y despresurizar el sistema de procesamiento. Véase **Figura 12.**

Figura 12. Tolva Industrial.



Fuente: elaboración propia.

1.4 NORMATIVIDAD

A continuación, se explica detalladamente el decreto 4741 del 2005 y el protocolo Louisiana 29b con los cuales el proyecto y la industria se rigen en el tema del manejo y disposición de desechos y/o recortes de perforación, especificando los cumplimientos ambientales.

1.4.1 Decreto 4741 del 30 de diciembre del 2005¹⁰. Tiene por objeto la reglamentación en el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral, con el fin de proteger el medio ambiente y/o la salud humana.

Este decreto concibe en sus 28 artículos y respectivos parágrafos las responsabilidades, deberes que debe tener el generador, receptor y quien

¹⁰ COLOMBIA. Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial. Decreto 4741. (30, diciembre, 2005). Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o

transporta los residuos peligrosos; y todo lo concerniente al manejo adecuado de estos residuos. A continuación, se presenta uno de los artículos más relevantes de este decreto para el presente proyecto

Artículo 5°. Clasificación de los residuos o desechos peligrosos. El generador podrá demostrar ante la autoridad ambiental que sus residuos no presentan ninguna característica de peligrosidad, para lo cual deberá efectuar la caracterización fisicoquímica de sus residuos o desechos. Para tal efecto, el generador podrá proponer a la autoridad ambiental los análisis de caracterización de peligrosidad a realizar, sobre la base del conocimiento de sus residuos y de los procesos que los generan, sin perjuicio de lo cual, la autoridad ambiental podrá exigir análisis adicionales o diferentes a los propuestos por el generador. La mezcla de un residuo o desecho peligroso con uno que no lo es, le confiere a este último, características de peligrosidad y debe ser manejado como residuo o desecho peligroso.

1.4.2 Normatividad extranjera como modelo de aplicación en la legislación colombiana. La autoridad nacional de licencias ambientales, ANLA, junto a la empresa estatal de hidrocarburos en Colombia, Ecopetrol, decidieron adoptar la normativa que se viene trabajando en el estado de Lousiana, EE.UU., con el fin de controlar de una manera más estricta y organizada el tema de los desechos producidos por la actividad petrolera.

1.4.2.1 Lousiana 29B¹¹. “En Colombia las normas pertinentes al manejo ambiental están basadas en la norma estadounidense Lousiana 29B, esta norma es la pionera de las reglamentaciones dadas a todas las actividades industriales que afectan el medio ambiente”¹². Están contemplados todos los criterios a tener en cuenta para el manejo y disposición final de todos los residuos generados por las actividades de exploración y producción petrolera que se generan en la perforación y producción de petróleo y gas. A continuación, en la **Tabla 1**, Se presenta los límites permisibles de las propiedades los desechos al momento de depositarlos en áreas de confinamiento.

desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Bogotá D.C.: El ministerio, 2005. P. 1-50

¹¹ ESTADOS UNIDOS. Office of conservation. Titulo 43. (diciembre, 2005). Natural resources. Lousiana, 2005. P. 1-115

¹² CORDOBA RIOS, Ingrid Carolina y VALLEN VARGAS, Yenyfer Yamile. Estudio De Factibilidad De La Biorremediación De Cortes De Perforación En Lodos Base Agua De Pozos Estratigráficos Profundos. Trabajo de grado para optar el título de Ingenieras de Petróleos. Bucaramanga, Santander: Universidad Industrial De Santander, 2013. 92 p.

Tabla 1. Monitoreo Cortes de Perforación.

PARAMETRO	LIMITE
PH	6-9
Contenido Humedad	<50%
Conductividad Eléctrica	<4 Mmhos/cm
Grasas Y Aceites	<1% (Peso seco)
Relación De Adsorción De Sodio	<12
Porcentaje De Sodio Intercambiable	<15%
Tope De Mezcla	Mezclar mínimo 5 ft bajo suelo.
Base De Mezcla	Mínimo 5 ft encima de lámina de agua.

Fuente: elaboración propia.

Dentro de la **Tabla 2** se aprecian los parámetros explícitos como: las grasas, los aceites, el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), pH, conductividad, relación de adsorción de sodio (RAS), los Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH), TCLP y Cromo Total de los recortes de perforación.

Tabla 2. Parámetros explícitos por lousiana 29b.

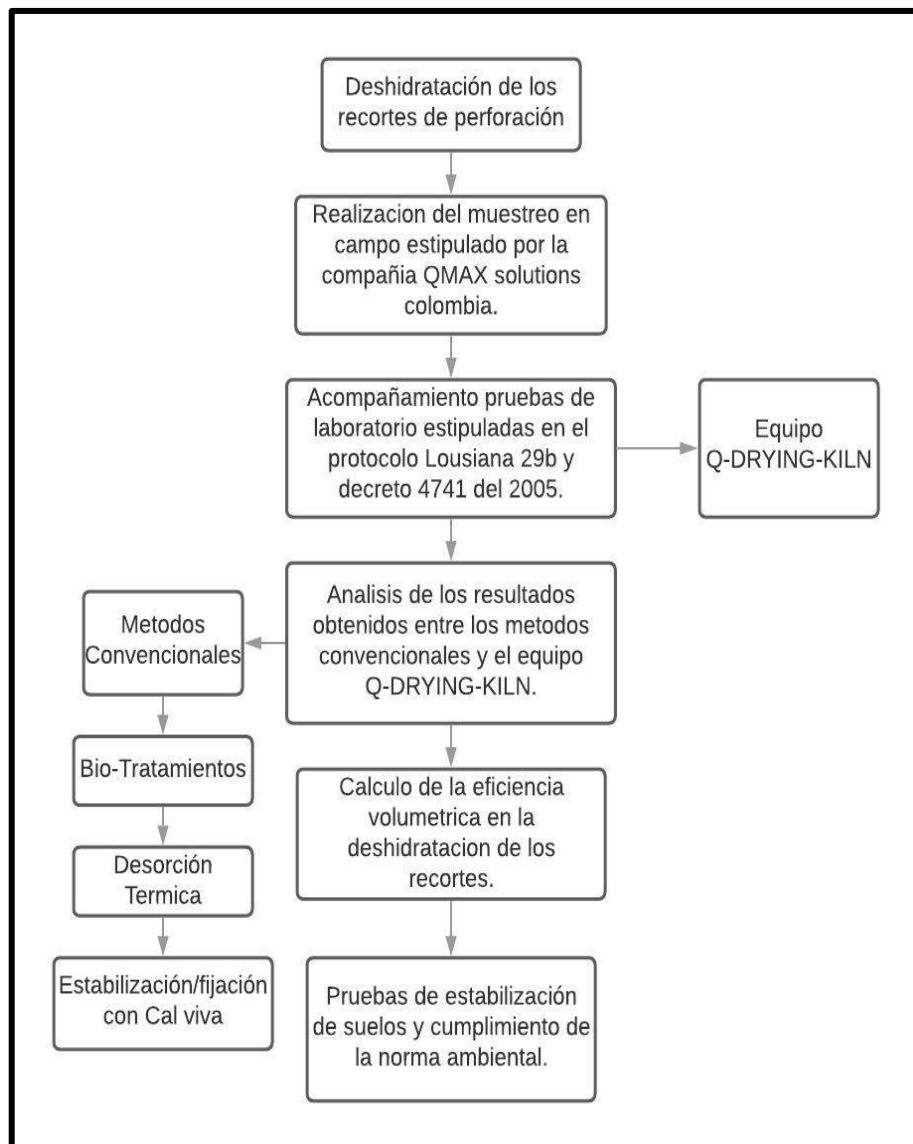
PARÁMETRO	LIMITE
Bario total	40,000-100,000 ppm
TPH	10.0 mg/l
TCLP benceno	0.5 mg/l
Lixiviados (metales)	
Arsenio	0.5 mg/l
Bario	10.0 mg/l
Cadmio	0.1 mg/l
Cromo	0.5 mg/l
Cobre	0.5 mg/l
Plomo	0.5 mg/l
Mercurio	0.02 mg/l
Molibdeno	0.5 mg/l
Níquel	0.5 mg/l
Selenio	0.1 mg/l
Plata	0.5 mg/l
Zinc	5.0 mg/l

Fuente. elaboración propia, con base en: ESTADOS UNIDOS. Office of conservation. Op. Cit. P. 113.

2. METODOLOGIA

En este capítulo se describen cada uno de los ensayos y procedimientos descritos en el **Diagrama 1**, Los cuales se deben realizar a nivel de laboratorio y campo, con el fin de analizar cada uno de los parámetros de estudio para el desarrollo del presente proyecto. Es importante evaluar el comportamiento de los metales pesados que se encuentran en los residuos como base para establecer la evaluación de la eficiencia de deshidratación de cortes de perforación.

Diagrama 1. Metodología General.



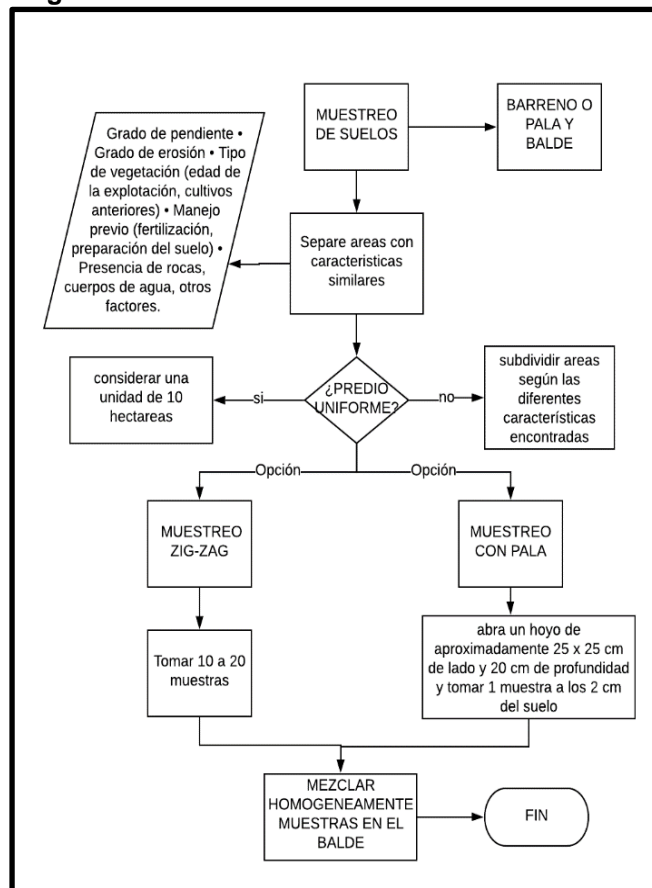
Fuente: elaboración propia.

2.1 MUESTREO

Según indica el IGAC (Instituto geográfico Agustín Codazzi)¹³, La técnica con la cual se hace el muestreo, depende de cada uno de los aspectos como: fertilidad, clasificación, física, mineralogía, determinación de micro y macroorganismos, mecánica, etc. El muestreo es la etapa inicial y fundamental que permite establecer unidades específicas para el adecuado manejo y análisis de datos de, en este caso, el suelo.

El muestreo que se realizó en el presente proyecto se rige a partir del Procedimiento que se presenta en el **Diagrama 2**, para obtener una muestra de suelo que represente el área que desea analizar.

Diagrama 2. Muestreo de suelos.



Fuente: elaboración propia.

¹³ IGAC, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Guía de Muestreo. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. p. 1

Una vez terminó el procedimiento de fijación y estabilización de los cortes generados durante la perforación, se tomó una muestra compuesta por el método de cuarteo hasta llegar a un peso de la muestra de aproximadamente de 1 ½ Libra para los respectivos análisis fisicoquímicos del lixiviado y el residuo estabilizado, estos análisis se llevarán a cabo por el laboratorio externo aprobado por QMAX, todo conforme a la legislación colombiana vigente (Ley 296 de 2005 y el decreto 4741 del 2005).

2.1.1 Memoria fotográfica muestreo en campo. Fotografías del proceso de estabilización de cortes y la disposición final donde se hizo el muestreo de los recortes de perforación en estudio como se muestra en **la Figura 13.**

Figura 13. Cortes de perforación Húmedos.



Fuente: elaboración propia.

La **Figura 14** y la **Figura 15**, permiten visualizar el proceso de deshidratación con cal viva en piscinas con geomembranas y también los cortes de perforación al momento de pasar por el equipo Q-Drying-Kiln, respectivamente.

Figura 14. Deshidratación con cal.



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Cortes tratados por el equipo Q-Drying-Kiln.



Fuente: elaboración propia.

A partir de la **Figura 16** a la **Figura 18**, Se puede apreciar la disposición final en ZODMES, donde los recortes llegan con un porcentaje menos de humedad al finalizar la deshidratación con cal viva.

Figura 16. Disposición final ZODME.



Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Disposición en Zodme con retroexcavadora.



Fuente: elaboración propia.

La **Figura 18** representa el Zodme al final del proceso de sedimentación y arreglo de este.

Figura 18. Sedimentación del Zodme.



Fuente: elaboración propia.

Cabe recordar que, en el presente proyecto, de todos procesos demostrados anteriormente se tomó el muestreo para el análisis posterior. Es decir, cuando el recorte está húmedo, cuando está en la piscina con geomembranas, los recortes tratados con el equipo Q-Drying-Kiln y en el Zodme.

En la **Figura 19**, se muestra el proceso completo de la deshidratación de los recortes y donde se hizo cada uno de los muestreos para el estudio.

Figura 19. Proceso de deshidratación



Fuente: elaboración propia.

2.2 PRUEBAS DE LABORATORIO ESTIPULADAS POR LA REGULACIÓN AMBIENTAL

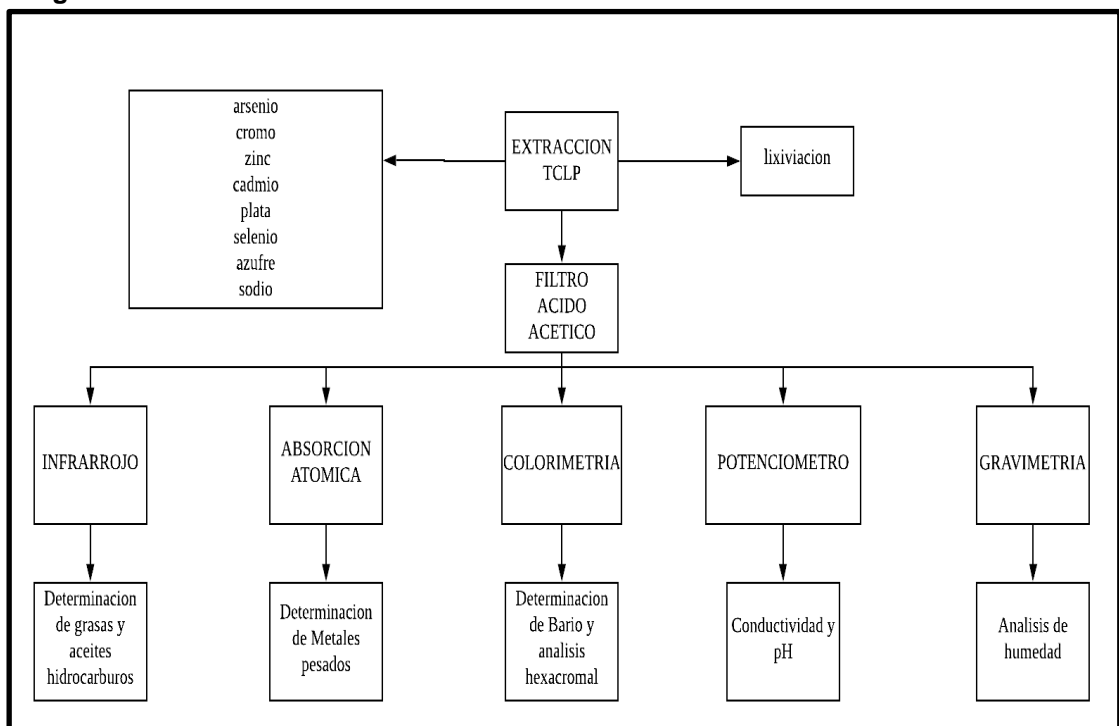
Según Louisiana 29 b y el decreto 4741 del 2005, existen pruebas necesarias para dar seguimiento y control a los desechos producidos por la actividad industrial basada en pruebas bases de extracción y se divide en 5 técnicas necesarias para convenir con los parámetros necesarios en el análisis como: Extracción infrarrojo, absorción atómica, colorimetría, potenciómetro y el método gravimétrico, donde este será el punto de partida para realizar la comparación en la deshidratación de los distintos métodos convencionales y el equipo Q-DRYING-KILN.

2.2.1 Extracción TCLP. El ensayo denominado *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP) estudia e involucra la toxicidad hacia el medio ambiente. Es un método de extracción de muestra de suelo y se simula a través de los vertederos de lixiviación. Se utiliza en la clasificación de residuos de algunos productos que contienen algún producto químico y se estructura bajo las regulaciones de la Ley Federal de protección ambiental (EPA).

Este método está diseñado para determinar la movilidad de los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en un desecho líquido, sólido o de múltiples fases. Si un análisis de una de las fracciones líquidas indica que si la concentración de un compuesto presente es mucho mayor que las demás concentraciones al nivel regulatorio, el desecho se clasifica como peligroso. Cabe resaltar que No se presenta los métodos de ensayo de laboratorio para cada compuesto individual sino en conjunto.

En la prueba TCLP, se realiza una extracción por medio de un tambor rotatorio que por dentro contiene una solución acida, el ácido acético el más común, con la muestra de suelo y como resultado los metales *lixiviados*. Durante esta técnica sobresalen técnicas básicas que permiten dar el análisis adecuado de cada uno de los datos arrojados. Ver **Diagrama 3**

Diagrama 3. Extracción TCLP.



Fuente: elaboración propia.

2.2.1.1 Método electrométrico. Es la medida de la actividad de los iones de hidrogeno por mediciones potenciométricas utilizando electrodos patrón y de referencia de hidrogeno, en general se usa para expresar la condición acida o alcalina de una solución, lo que básicamente es la medición de pH.

La medida electrométrica del pH se fundamenta por la fuerza electromotriz (*fem*) producida por los iones de hidrogeno en el sistema electroquímico donde varia linealmente con el pH de la muestra o solución en estudio.¹⁴ Las mediciones de pH cambian con la temperatura y por efectos mecánicos ocasionados por las propiedades de los electrodos y efectos químicos de la alteración de constantes de equilibrio.

Para medir el pH de la muestra, se usa los siguientes equipos y reactivos:¹⁵

- Potenciómetro con lecturas de 0,05 unidades de pH.
- Vaso de titulación.
- Agitador magnético.
- Solución de carbonato de sodio, aproximadamente 0,05 N.
- Ácido sulfúrico estándar, 0,1 N.
- Ácido sulfúrico 0,02 N.

Dentro de los cálculos para determinar la alcalinidad de la muestra en estudio, previo se debe estandarizar la muestra calculando la normalidad como se puede Ver en la **Ecuación 1**.

Ecuación 1. Normalidad.

$$Normalidad, N = \frac{A \times B}{53,00 \times C}$$

Fuente: Elaboración propia, tomado de: _____ . [Sitio web]. Bogotá D.C.: IDEAM, instructivo de ensayo. Psi Determinación De Alcalinidad Por Potenciometria [14-12-2017]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155.pdf>. P. 5

¹⁴ _____ . [Sitio web]. Bogotá D.C.: IDEAM, instructivo de ensayo. Pso Determinación De Alcalinidad Por Potenciometria [14-12-2017]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155.pdf> . P. 1

¹⁵ *Ibíd.*, p. 4

Donde:

A: g Na₂CO₃ pesados en el balón de 1000 mL.

B: mL de solución de Na₂CO₃ tomados para la titulación

C: mL de ácido empleados.

Después de calcular la Normalidad se debe titular en varias ocasiones hasta que el pH dé como resultado 4.5, a medida que se acerque al punto final, hacer adiciones de ácido más pequeñas y verificar que se alcance el equilibrio de pH. Una vez se establezca la lectura en el potenciómetro, se debe asegurar que el pH no haya cambiado, debido a que la materia orgánica y la grasa hacen que la respuesta del pH metro sea lenta.

Debido a lo anterior se procede a realizar cálculos de la escala operativa del pH, y se define como: Ver **Ecuación 2**.

Ecuación 2. pH asignado

$$pH_b = -\log_{10} a_{H^+}$$

Fuente: elaboración propia.

Es preciso destacar que, aunque la ecuación para el pH de la muestra medido potenciométricamente aparece en la literatura con un signo más (+) el signo de las lecturas de *fem* en milivoltios para la mayoría de los medidores de pH es negativo (-). Ver **Ecuación 3**.

Ecuación 3. pH de muestra

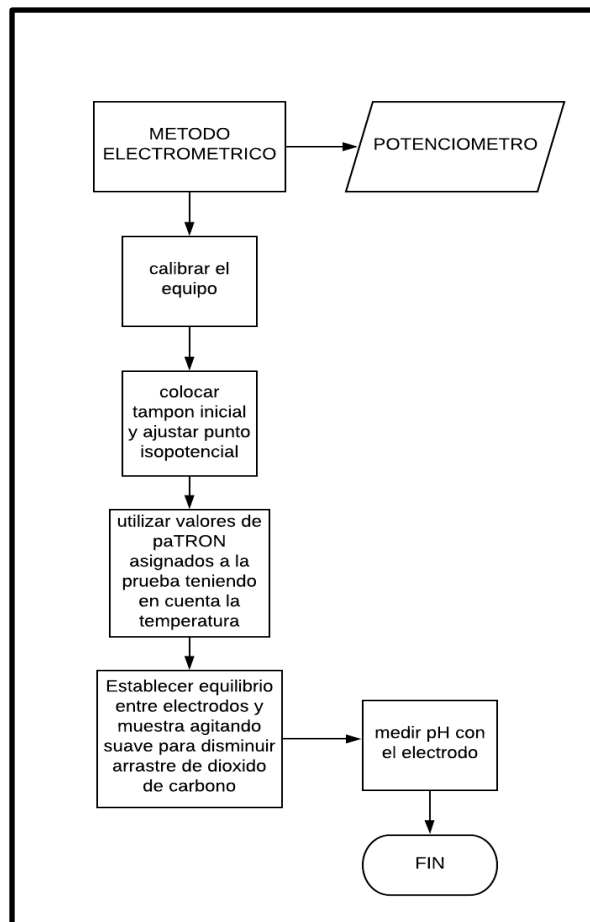
$$pH_s = pH_b \pm \frac{F(E_A - E_s)}{2.303RT}$$

Fuente: elaboración propia.

La ecuación para el pH_s supone que la *fem* de las células que contiene la muestra y el tampón se deben únicamente a la actividad del hidrógeno no afectada por la composición de la muestra. Las muestras deben ser soluciones acuosas diluidas. No se puede determinar el pH con exactitud en medios NO acuosos, suspensiones, coloides o soluciones de gran fuerza iónica.

A partir del **Diagrama 4**, se describe el procedimiento para el medir el pH con el potenciómetro y para conservación y preparación de los electrodos.

Diagrama 4. Medición del pH



Fuente: elaboración propia.

2.2.1.2 Colorimetría. Determina la concentración del cromo hexavalente a través de la formación de un colorante rojizo producido a un pH de 2,0 a 2,5 por acoplamiento de sulfanilamida diazotada con dihidrocloruro de N (1-naftil)-etilendiamina (diclorhidrato de NED)¹⁶ y oxidando el permanganato de potasio en solución ácida para determinar el cromo total hexavalente. Se digiere la muestra con mezcla ácida (sulfúrico-nítrico) para reaccionar con la difenilcarbonizada. El sistema de color obedece a la ley de Beer, esta ley explica cómo la materia absorbe la luz, bien sea por, el número de materiales de absorción (concentración), distancias que la luz debe atravesar a través de la muestra y dependiendo de que el fotón pueda absorberse por el material (absorbencia).

¹⁶ _____. [Sitio web]. Bogotá D.C.: IDEAM, instructivo de ensayo. determinación de nitritos por colorimetría. sm 4500 no2. b. [14-12-2017]. Disponible en: <http://sgi.ideam.gov.co/documents/412030/35488871.pdf>

Para este caso, el método colorimetría se usa para determinar el cromo hexavalente, un elemento metálico inodoro e insípido que forma parte de la corteza terrestre, también se encuentra en grandes cantidades en el aire, el agua, la tierra y los alimentos.

Los reactivos que usan para este método son:¹⁷

- Agua libre de nitritos.
- Reactivo de color en 800 ml de agua destilada, 100 ml de ácido fosfórico al 85% y 10 g de sulfanilamida y 1 g de diclorhidrato de N- (1naftil) -etilendiamina.
- Oxalato de sodio, 0.025M (0.05N) y 3.350 g de Na₂C₂O₄.
- Ácido Sulfúrico H₂SO₄ 1.
- Permanganato de potasio estándar Titulante 0,05 N.

El espectrofotómetro arroja resultados en mg N - NO₂-/L de acuerdo al factor de dilución digitado en el momento de la lectura, siendo esto la base para el análisis para determinar el cromo hexavalente por colorimetría. Ver **Ecuación 4**.

Ecuación 4. Análisis Cromo hexavalente.

$$\frac{mg\ N - NO_{2-}}{L} = pendiente \times Absorbancia \times FD$$

Fuente: Elaboración propia. Tomado de INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES [Sitio web]. Bogotá D.C.: IDEAM, instructivo de ensayo. Determinación de nitritos por colorimetría. sm 4500 no2. b. [14-12-2017]. Disponible en: <http://sgi.ideam.gov.co/documents/412030/35488871.pdf>. p. 9.

Donde:

Pendiente: obtenida a partir de la curva de calibración.

Absorbancia: Lectura realizada por el espectrofotómetro.

$\frac{mg\ N - NO_{2-}}{L}$: Concentración de nitritos calculada y registrada por el espectrofotómetro

UV-VIS.

FD: Factor de dilución.

Para hacer correcciones como lo indica la norma se debe hacer mediante la recuperación de la matriz fortificada. Ver **Ecuación 5**.

¹⁷ Ibíd., p. 3

Ecuación 5. Matriz fortificada.

$$\frac{(C_s - C)}{S} \times 100 = \% \text{ Recuperación LFM O LFMD}$$

Fuente: elaboración propia, tomado de: ibíd., p. 9.

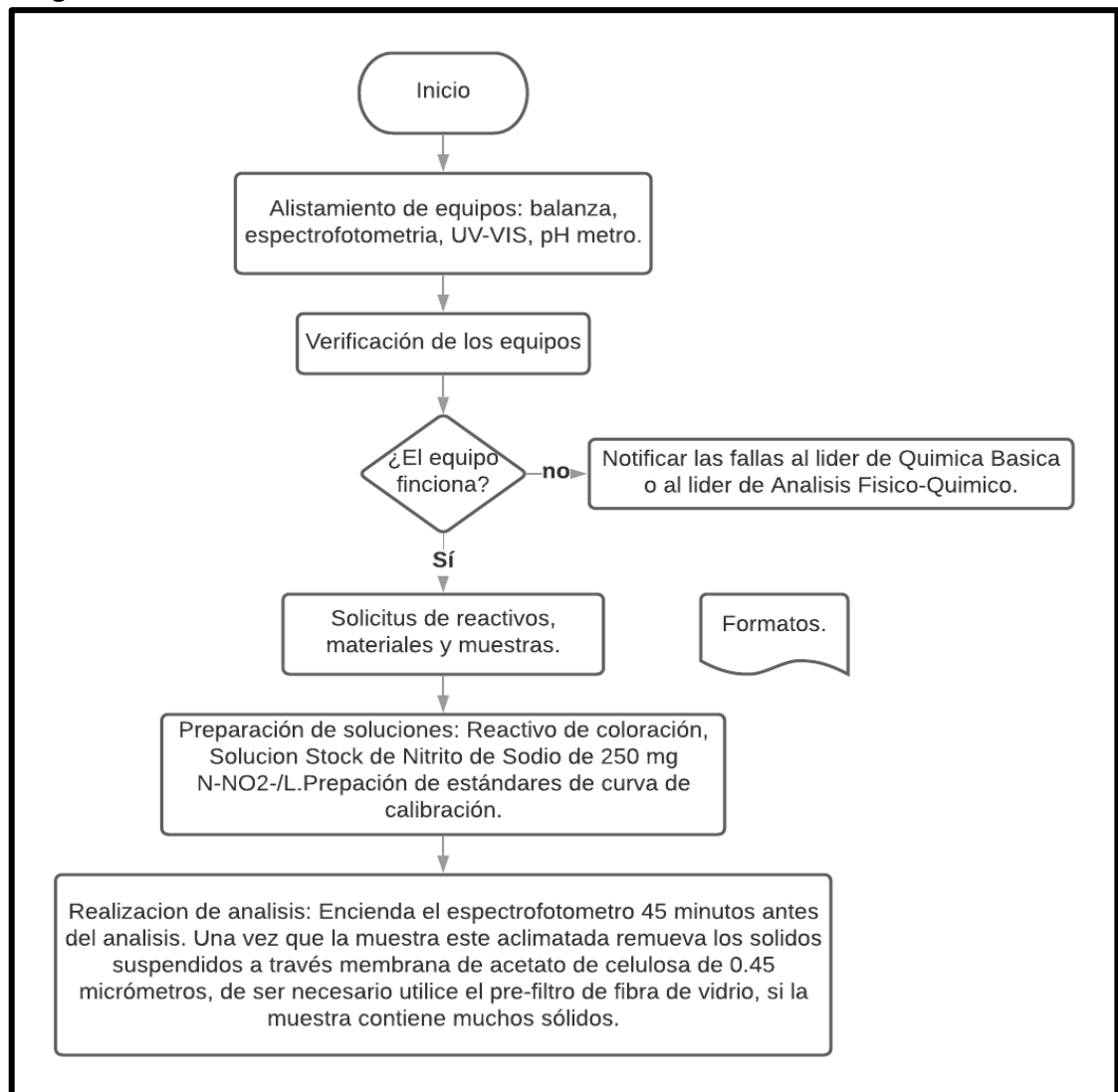
Cs: concentración de LFM o LFMD determinada experimentalmente.

C: concentración de la muestra antes del aumento.

S: concentración adicionada.

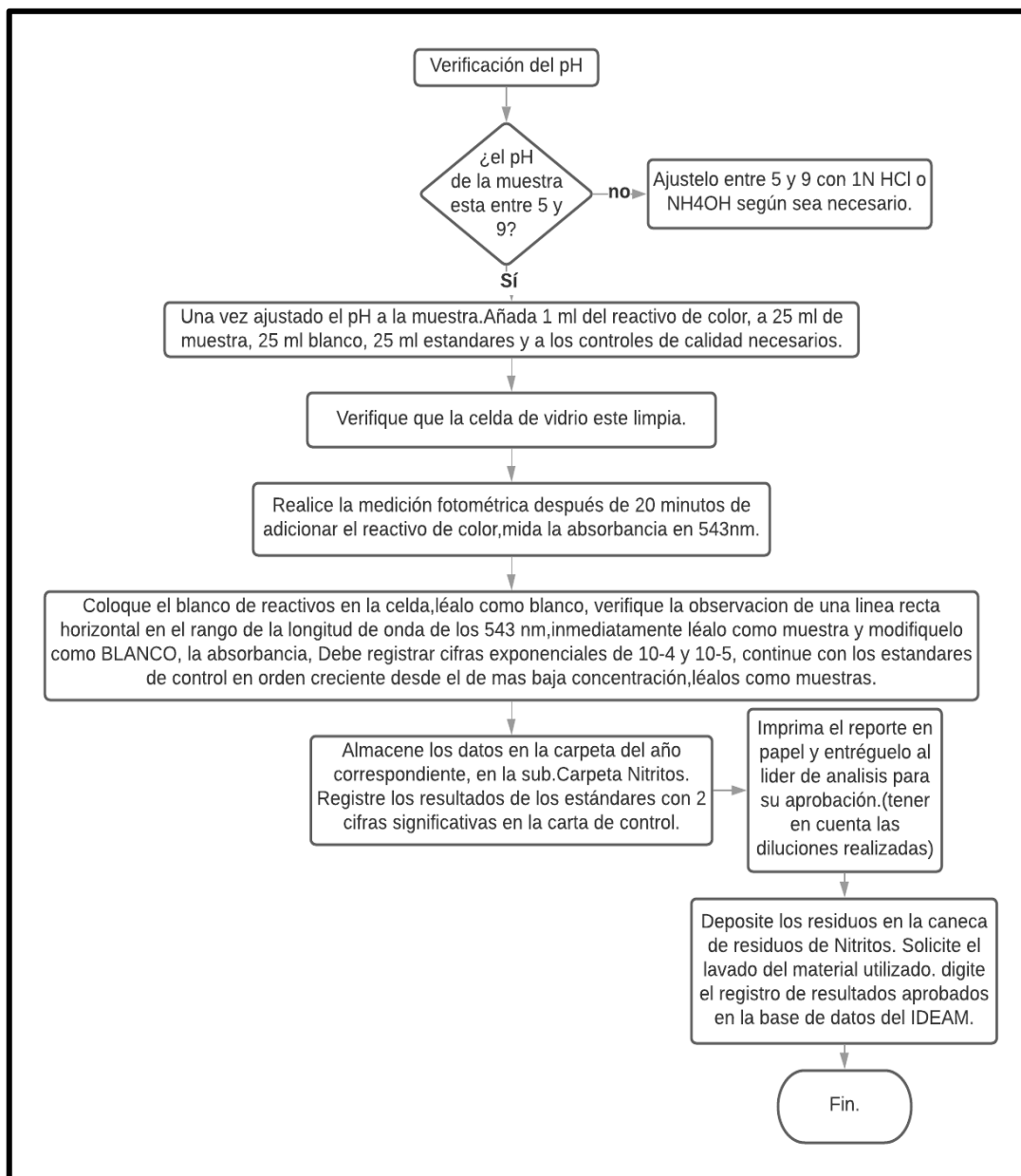
A partir del **Diagrama 5 y Diagrama 6** se puede evidenciar el procedimiento para método de colorimetría.

Diagrama 5.Primera Parte del Método de Colorimetría.



Fuente: elaboración propia.

Diagrama 6. Segunda Parte del Método de Colorimetría.



Fuente: elaboración propia.

2.2.1.3 Determinación de grasa, aceites e hidrocarburos por infrarrojo de partición. Es una extracción líquido-líquido con tetracloroetileno y permite la determinación de solventes orgánicos o de todas las diferentes sustancias con características similares recuperadas por solubilidad. Se emplea el gel de sílice que tiene la capacidad de absorber los materiales polares como los ácidos grasos. Los materiales no eliminados por absorción al gel de sílice son considerados hidrocarburos en esta prueba.¹⁸ Los materiales polares comúnmente son los compuestos aromáticos complejos y los derivados de cloro, azufre y nitrógeno.

Dentro de los equipos, reactivos y materiales se utilizan¹⁹:

- Infrarrojo con capacidad para medir a 2930 cm⁻¹.
- Cabina extractora de vapores orgánicos.
- Balanza analítica.
- Centrifuga.
- Agitador magnético.
- Ácido clorhídrico, HCl, 1:1. 50 mL de HCl concentrado y 40 mL de agua desionizada.
- Tetracloroetileno equivalente.
- Sulfato de sodio, Na₂SO₄.
- Aceite de referencia: mezcla en volumen 10 mL de 37,5% de isooctano, 37,5% hexadecano y 25 % benceno.
- Sílica gel, malla 100 a 200.

El cálculo sugerido para determinar grasas y aceites se lleva a cabo por medio de la **Ecuación 6**.

Ecuación 6. Determinación grasas y aceites.

$$\frac{mg \text{ de } GyA}{L} = \frac{Ax1000}{mL \text{ de muestra}}$$

Fuente: Elaboración propia. Tomado de: INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. [Sitio web]. Bogotá D.C.: IDEAM, instructivo de ensayo para la determinación de grasa, aceites e hidrocarburos por infrarrojo de partición. [01-10-2018]. Disponible en: <http://sai.ideam.gov.co/documents/412030/35488871.pdf>

Donde:

A: mg de aceite y grasa en el extracto determinado a partir de la curva de calibración

¹⁸ INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. [Sitio web]. Bogotá D.C.: IDEAM, instructivo de ensayo para la determinación de grasa, aceites e hidrocarburos por infrarrojo de partición. [01-10-2018]. Disponible en: <http://sgi.ideam.gov.co/documents/412030/35488871.pdf>. p.3

¹⁹ *Ibíd.*, p. 3

En efecto, para determinar los hidrocarburos totales en la muestra, se utiliza la **Ecuación 7**.

Ecuación 7. Determinación de Hidrocarburos Totales.

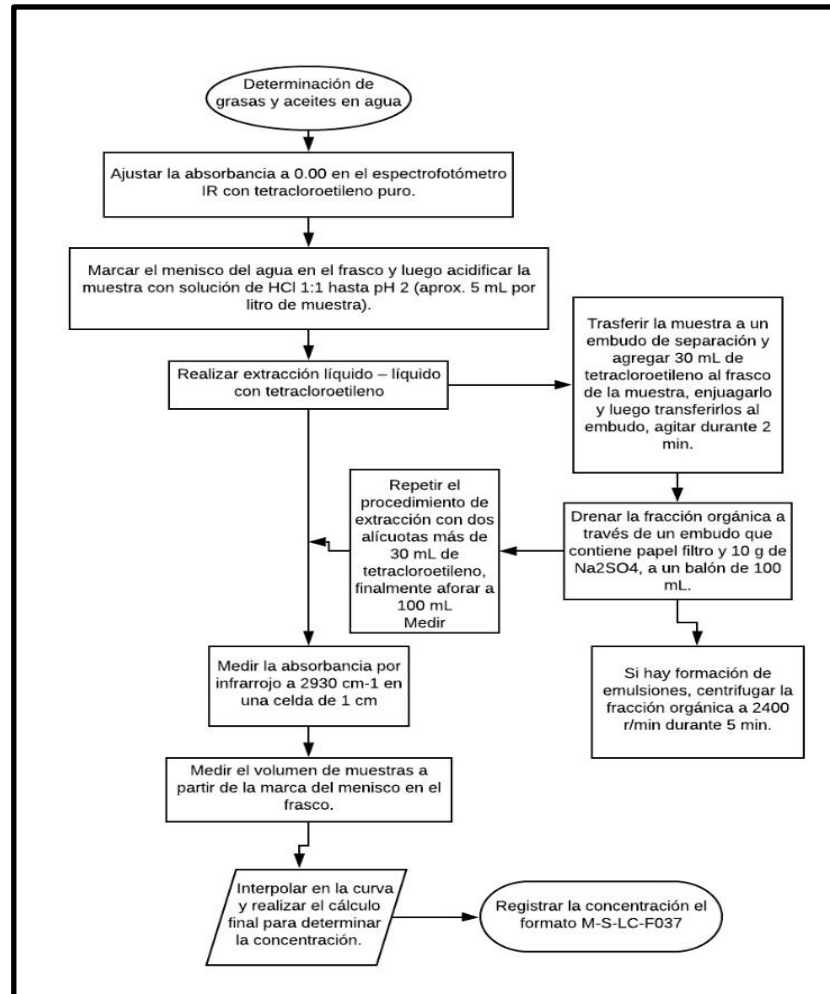
$$\frac{\text{mg de hidrocarburos totales}}{L} = \frac{A \times 1000}{\text{mL de muestra}}$$

Fuente: elaboración propia. Tomado de: INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. *Ibíd.*, p. 7.

Donde:

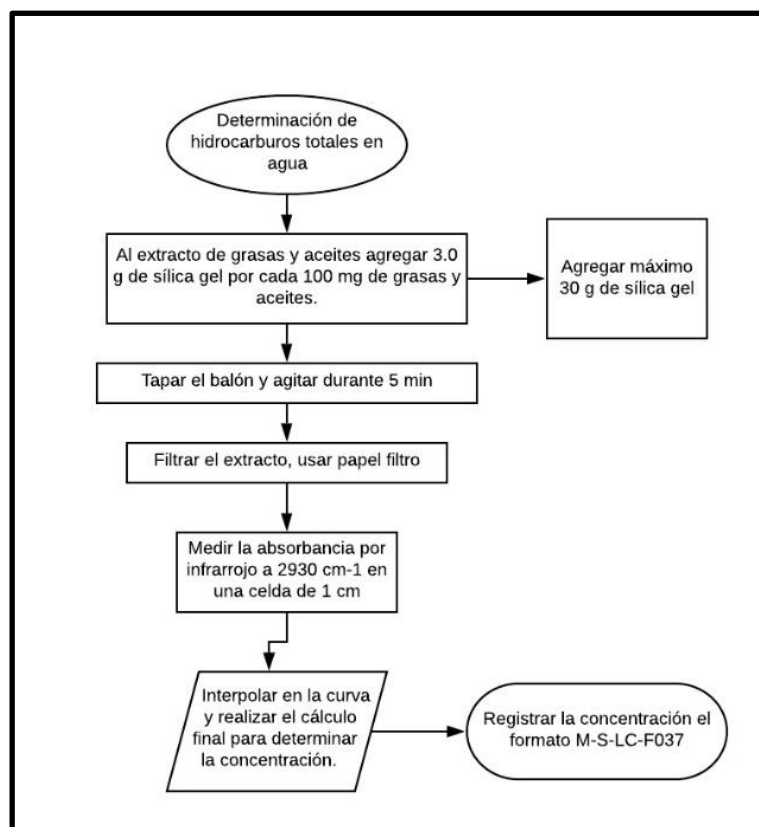
A: mg de aceite y grasa en el extracto determinado a partir de la curva de calibración. A través del **Diagrama 7** y el **Diagrama 8**, se puede observar el procedimiento adecuado para determinar grasas y aceites e hidrocarburos totales respectivamente.

Diagrama 7. Determinación de Grasas y Aceites.



Fuente: elaboración propia.

Diagrama 8. Determinación de Hidrocarburos Totales.

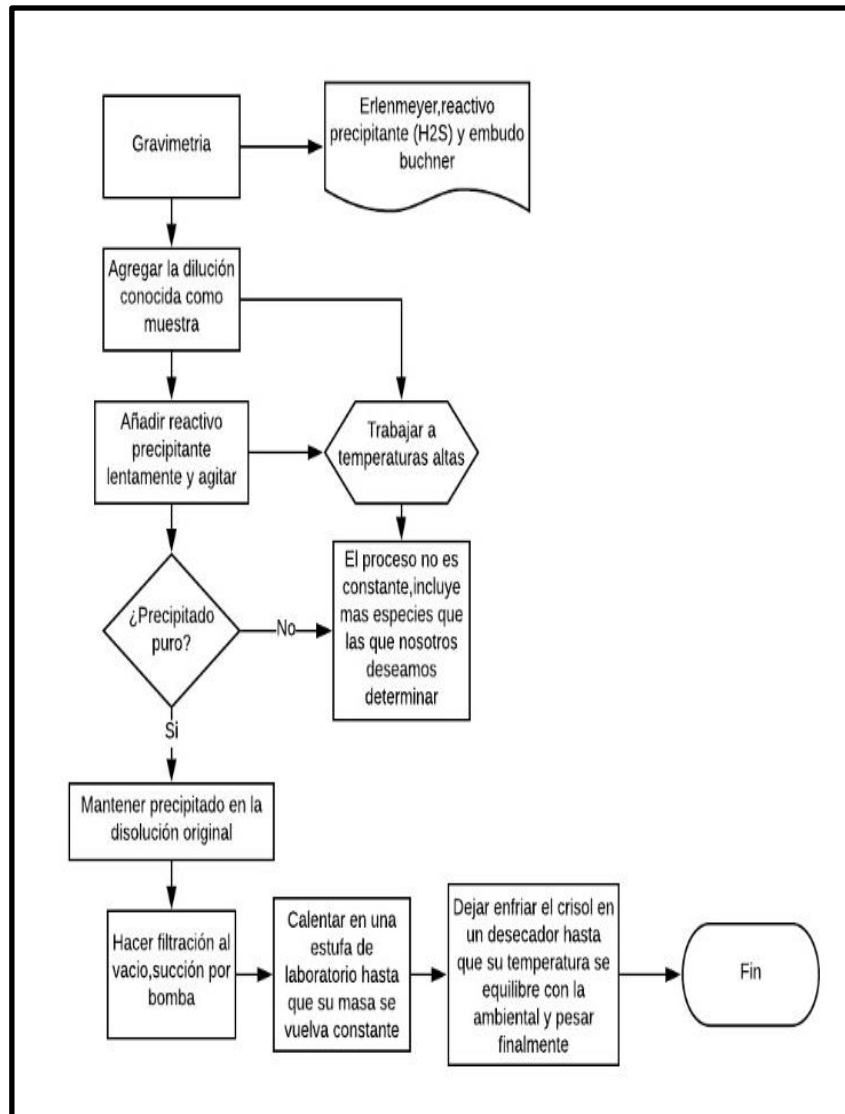


Fuente: elaboración propia.

2.2.1.4 Gravimetría. El análisis gravimétrico es una técnica de laboratorio que permite determinar la masa o la concentración de una sustancia midiendo un cambio en la masa. Existen dos clases de gravimetría, por volatilización y por precipitación. Se habla de gravimetría por volatilización cuando se conlleva a separar los componentes de la muestra por calentamiento o descomposición química, gracias a dicha descomposición, en cualquier material volátil resulta un cambio en la masa, por ende, dicho cambio se puede medir. En la gravimetría por precipitación, como su nombre lo indica, se usa la precipitación para separar partes de una solución que contienen algún sólido, la masa del sólido precipitado puede usarse para calcular la cantidad o la concentración de los compuestos iónicos en solución.

Al momento de llevar a cabo los análisis por gravimetría, previamente se debe seguir el procedimiento presentado en el **Diagrama 9**.

Diagrama 9. Análisis Gravimétrico



Fuente: elaboración propia.

Los resultados de un análisis gravimétrico suelen expresarse en porcentaje del analito en la muestra. Se deben utilizar los llamados factores gravimétricos; El factor gravimétrico (F) es la relación entre los pesos moleculares de la muestra y la especie que está en estudio. Cuanto menor sea el factor gravimétrico, menor será el error. Ver **Ecuación 8** y **Ecuación 9**.

Ecuación 8. Factor Gravimétrico.

$$F = \frac{M(\text{inicial})}{m(\text{final})}$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

M: Peso formula analito

M: Peso molecular forma de pesada

Ecuación 9. Porcentaje total de analito

$$\% \text{Analito} = \frac{\text{Cantidad crisol pesado} * F * 100}{\text{Peso total muestra}}$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

F: Factor gravimétrico

2.2.1.5 Determinación de metales pesados totales con digestión acida y solubles lectura directa por espectrofotometría de absorción atómica. El análisis de absorción atómica se basa en el número de electrones asociados con el núcleo de cada elemento en estudio. El estado fundamental es el estado estable de la configuración orbital de un átomo, Si se aplica energía a un átomo, significa que el átomo entra a un estado activo, es decir, la energía será absorbida y un electrón será promovido a un estado menos estable. Desde este estado inestable el átomo volverá a su estado fundamental, liberando energía luminosa. Por la medición de la cantidad de luz absorbida, se puede hacer una determinación cuantitativa de la cantidad de analito²⁰. El uso de fuentes de luz especiales y una cuidadosa selección de las longitudes de onda permiten determinar elementos específicos.

Por este método se determinan los metales, Cadmio, Cromo, Cobre, Plomo, Níquel y Zinc; Son componentes naturales de la corteza terrestre y no pueden ser destruidos.²¹

Dentro de los equipos y reactivos se utilizan:²²

²⁰ _____. [Sitio web]. Bogotá D.C.: IDEAM, instructivo de ensayo para la determinación de metales pesados totales con digestión acida y solubles lectura directa por espectrometría de absorción atómica. [23-07-2014]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155.pdf>. p.2

²¹ *Ibíd.*, p. 3

²² *Ibíd.*, p. 9

- Espectrofotómetro de Absorción Atómica PELKIN-ELEMER 2380.
- Lámparas de cátodo hueco (LCH) o de descarga sin electrodo (LDE) PERKIN - ELMER; para Cd, Pb, Ni, Cr, Cu, Zn.
- Válvulas reductoras de presión.
- Compresor de aire de 30 litros a una presión de 40 psig.
- Ventilación: un extractor entre 15 y 30 cm por encima del quemador para remover los humos y vapores de la llama.
- Plancha de calentamiento Schott Ceran o Thermolyne Cimarec.
- Cabina extractora para vapores inorgánicos.
- Aire, limpio y seco.
- Acetileno, grado absorción atómica
- Agua desionizada.
- Ácido nítrico (HNO₃) al 65% grado ultra puro.
- Agua acidulada.
- Peróxido de hidrogeno (H₂O₂) al 30%.
- Soluciones patrón trazable a SRM de NIST de 1000 mg/L. de Cadmio, Cromo, Cobre, Níquel, Plomo y Zinc.

Para determinar y analizar el reporte de concentraciones de cada ion metálico arrojado por el equipo de espectrofotometría, se sugiere hacer el cálculo referente a la curva de calibración. **Ver ecuación 10.**

Ecuación 10. Concentración de metales.

$$\frac{Mg\ metal}{L\ muestra} = \frac{A * Vol\ final}{Vol\ muestra}$$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

A: mg/L de metal en alícuota diluida o muestra procesada, de la curva de calibración.

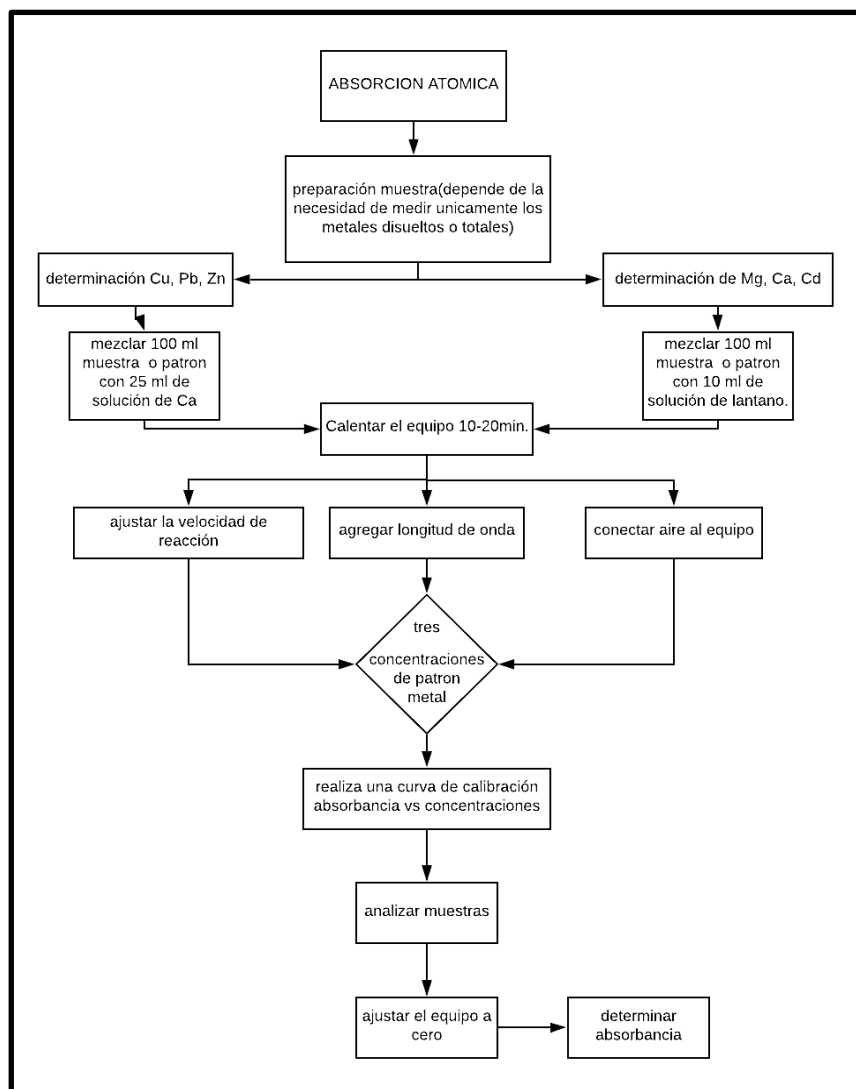
V final: volumen al que se llevó la alícuota a diluir.

V alícuota: mL tomados de alícuota de muestra

Cabe recordar que la espectrofotometría de absorción atómica tiene distintos métodos como: Directo de llama de óxido nitroso-acetileno, de vapor frío, continuo de generación de hidruros y directo llama de aire-acetileno que se usan para determinar distintos metales en especial pero el principio sigue siendo igual.

El proceso de análisis se rige a partir de los siguientes pasos presentados en el **Diagrama 10.**

Diagrama 10. Absorción atómica.



Fuente: elaboración propia.

2.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS ENTRE LOS MÉTODOS CONVENCIONALES Y EL EQUIPO Q-DRYING-KILN

En esta sección se explicará detalladamente el desarrollo técnico del presente proyecto donde empieza con un breve repaso y corroboración del origen de los recortes de perforación a estudiar dentro del campo “Llanos 34”. Por consiguiente, la explicación de la tabla comparativa y por ende el proceso de comparación entre el horno Q-Drying-Kiln y los métodos convencionales, por último, se menciona como se desarrollará el cálculo de la eficiencia que validen las ventajas en la deshidratación de recortes del mismo.

Las Tablas que a continuación serán presentadas, son documentos tomados de los archivos de Qmax para la respectiva correlación de pozos y la validez del origen de los recortes de perforación que entraran en estudio.

Los recortes de perforación de los pozos que entran en el estudio provienen de la misma cuenca geológica por lo tanto tienen la misma composición mineralógica y son comparables para el presente proyecto. Cabe resaltar que, por cuestiones de confidencialidad de parte de la operadora en el campo de operaciones, no es posible dar a conocer nombres ni estudios mineralógicos que confirmen la existencia de los recortes de perforación en el campo “Bloque Llanos 34”, en el **Anexo A** se remite a una carta donde la empresa de apoyo técnico-financiero para este proyecto apoya y valida que los recortes tienen la misma composición mineralógica, independientemente del pozo a estudiar se garantiza que los recortes que se someten a las respectivas pruebas de laboratorio tienen la misma composición mineralógica y los resultados de laboratorio a analizar de los recortes de perforación.

Para este caso, los pozos que se llamaran A, B, C, D, E, F, G, H e I son los que entraran al estudio mientras que los pozos con nombres propios no, esto es con el fin de hacer la correlación de los pozos aledaños y afirmar la existencia de los pozos que entran en el estudio y evitar algún fraude o una ruptura del contrato de confidencialidad.

En la **Tabla 3**. Se muestra la correlación de los pozos que entrarán en el estudio para los métodos convencionales.

Tabla 3. Correlación de pozos para los métodos convencionales.

Pozo	País		Bloque
A	Colombia		Llanos 34
Tigana Sur	Colombia		Llanos 34
B	Colombia		Llanos 34
D	Colombia		Llanos 34
C	Colombia		Llanos 34
Jacana	Colombia		Llanos 34
E	Colombia		Llanos 34
Jacamar	Colombia		Llanos 34
Guaco	Colombia		Llanos 34

Fuente: elaboración propia.

En la **Tabla 4**. Se puede apreciar los pozos que se utilizaran para el equipo Q-DRYING-KILN. Para esta investigación los pozos serán nombrados como: Pozo F, G, H, y I.

Tabla 4. Correlación de pozos con el equipo Q-DRYING-KILN.

Pozo	País	Bloque
F	Colombia	Llanos 34
G	Colombia	Llanos 34
H	Colombia	Llanos 34
I	Colombia	Llanos 34
A1	Colombia	Llanos 34
A2	Colombia	Llanos 34
Currucucu	Colombia	Llanos 34
A3	Colombia	Llanos 34

Fuente: elaboración propia.

2.3.1 Tabla Comparativa. Para el análisis de cada uno de los parámetros que se obtienen a través de las distintas pruebas mencionadas anteriormente y que son exigidos por la normativa ambiental, en este caso el protocolo Lousiana 29b y el decreto 4741 del 2005, se dispondrá de una tabla comparativa.

A continuación, se realizará una breve descripción de los elementos o aspectos que conforman la tabla comparativa:

- Parámetros de Lousiana 29b: Arsénico total, Bario Total, Cadmio total, Conductividad eléctrica, Cromo hexavalente, Cromo total, Grasas y aceites, Hidrocarburos Totales, Humedad natural, Mercurio Total, pH, Plata total, Plomo total, Porcentaje de sodio intercambiable (PSI) Relación de absorción de sodio, Selenio total, Zinc total.
- Parámetros de Decreto 4741 del 2005: TCLP (Arsénico, Bario, Cadmio, Cromo, Plata, Plomo, Selenio Y Zinc).
- Técnica empleada por el laboratorio contratado por la empresa Qmax.
- Pozos con Recortes tratados convencionalmente: A, B, C, D y E.
- Pozos con recortes tratados por el equipo Q-DRYING-KILN: F, G, H, e I.
- Límites y rangos estipulados por el Decreto 4741 del 2005 y el protocolo Lousiana 29b de cada uno de los parámetros a evaluar.

Se presenta el diseño de la tabla comparativa para los pozos convencionales. Ver **Figura.20.**

Figura 20. Método deshidratación convencional.

Parámetro/Pozo	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		

Fuente: elaboración propia.

El diseño que se manejara para los pozos con el equipo Q-DRYING-KILN. Ver **Figura. 21.**

Figura 21. Diseño de tabla comparativa para el equipo Q-DRYING-KILN.

Parámetro o /pozo	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		corte sin tratar	corte tratado	corte sin tratar	corte tratado	corte sin tratar	corte tratado	corte sin tratar	corte tratado		

Fuente: elaboración propia.

Adicional a estas tablas, en los parámetros que exista variación se realizara una gráfica para visualizar mejor los resultados.

2.3.2 Comparación. La comparación se hará por medio de la tabla de comparación mencionada anteriormente, allí se comparan los parámetros de estudio de los métodos de deshidratación de recortes de perforación convencionales contra el equipo Q-Drying-Kiln, teniendo como referencia valores estipulados con el Decreto 4741 del 2005 y el Protocolo Lousiana 29b y los resultados de los cortes, pero ahora sin tratamiento alguno de deshidratación. Esta comparación se realiza con el fin de definir cada parámetro teniendo en cuenta si cumple o no la normativa ya mencionada, además se analizará cada valor para estipular la eficiencia que tiene el equipo frente a los métodos convencionales de deshidratación de recortes.

2.3.3 Cálculo de la eficiencia. Para realizar el cálculo de la eficiencia del equipo, se tendrá en cuenta algunas especificaciones generales del funcionamiento del equipo.

Para definir la eficiencia se determinará los volúmenes respectivos antes de la entrada al equipo y después del proceso. Seguido a esto, se evaluará y se analizará una gráfica teniendo en cuenta los barriles producidos vs barriles dispuestos para los métodos convencionales y el equipo Q-DRYING-KILN.

Para definir la eficiencia en términos de resultados, se llegó a un acuerdo con la empresa Qmax, de lo que debería arrojar el proceso de deshidratación de cortes con el equipo Q Drying Kiln y corroborar su máximo desempeño para este

procedimiento mediante cálculos volumétricos a partir del coeficiente de variación de los parámetros que se evalúan en el proceso de deshidratación.

En especial se ha decidido con la empresa Qmax, que las variables más importantes a tener en cuenta para confirmar el rendimiento del equipo Q-DRYING-KILN deben ser los siguientes rangos de las variables que se presentan en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Parámetros evaluativos de la eficiencia en el equipo.

Parámetro	Limite %
Conductividad	< 40%
Grasas y aceite	< 5%
Humedad	70%-80%
pH	< 4
P.S.I.	< 30%
R.A.S.	< 30%

Fuente: elaboración propia.

Para verificar el cumplimiento de los límites propuestos anteriormente, se utilizará el coeficiente de variación, como se muestra en la **Ecuación 11**.

Ecuación 11. Coeficiente de variación.

$$CV = \frac{\text{desviacion estandar}}{\frac{X_n + X_{n-1}}{n}}$$

Fuente: elaboración propia.

Se realizará una gráfica teniendo en cuenta el parámetro fundamental para esta investigación que es la humedad relativa, los datos para esta grafica se obtendrán de los resultados obtenidos por muestras de laboratorio de los pozos F, G, H e I.

Finalmente se determinará el área para la disposición final de los recortes de perforación, teniendo en cuenta el volumen a disponer después de que los recortes han sido tratados por el equipo Q-DRYING-KILN.

2.4 PRUEBAS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS Y CUMPLIMIENTO DE LA NORMA AMBIENTAL.

Para dar cumplimiento a los parámetros estipulados por la normativa ambiental se harán apiques o sondeos dentro y alrededor de las zonas de disposición de los recortes previamente deshidratados por el equipo Q-DRYING-KILN.

2.4.1 Apiques. Este sondeo de suelo permite la observación directa del terreno de estudio y se utiliza para la toma de muestras y ensayos para la inspección de la estabilidad del suelo que pueden realizarse con retroexcavadora o manualmente. Entre estos estudios, los apiques examinan los estratos de roca, condiciones de nivel freático, interface del suelo y roca, discontinuidades y/o superficies de ruptura.

En la zona de estudio se va a realizar apique con una excavación de máximo 1.50 metros en profundidad y en cada apique se talla una especie de prismas en el fondo o laterales con dimensiones de 30x30 centímetros, y como producto de la excavación se tomará muestras inalteradas, es decir, porciones representativas del terreno que se extraen para la realización de ensayos de laboratorio donde se deben parafinar para determinar sus características originales entre ellas la humedad de la muestra.

Existen cinco tipos de ensayo:

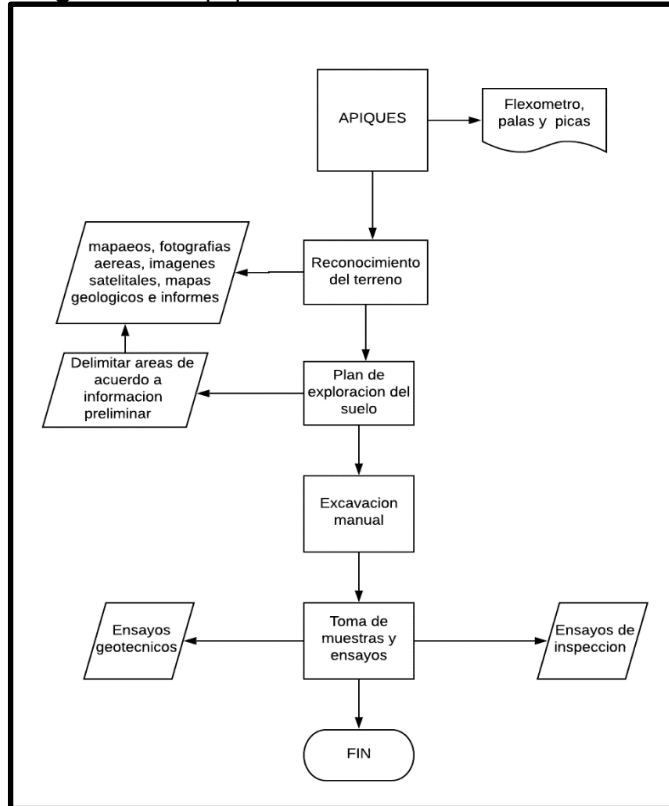
- Geotécnico: Pruebas realizadas para la determinación de las características como granulometría, límites, humedad, consolidación del suelo, etc.
- De inspección: Consiste en un reconocimiento del tipo de suelo mediante inspección visual, táctil y de olfato evaluados en forma cualitativa. Se debe incluir informes de los ítems indicados como color, olor, humedad, reacción con HCl y reactivos, estructura, entre otros.
- Granulométrico: Obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo, es la base para el análisis de los criterios de aceptación para utilización de carreteras y drenajes.
- Contenido de humedad: Se lleva una muestra de material húmedo y se seca hasta alcanzar una más constante. El cálculo se relaciona con la masa perdida de agua y la masa seca remanente.
- Relaciones Gravimétricas y volumétricas: Se determina el volumen del recipiente que será llenado por la muestra y agua, de allí se pesa la muestra seca y se le agrega agua hasta alcanzar el punto de saturación.

Para el presente proyecto se hará un ensayo tipo “contenido de humedad”.

Con estos apiques in-situ se analizarán los parámetros claves para esta investigación como lo son el pH, Humedad, entre otros, con el fin de verificar que los recorte cumplan con el protocolo de Louisiana 29b y decreto 4741 del 2005.

El procedimiento se puede ver reflejado en el **Diagrama 11**.

Diagrama 11. Apiques.



Fuente: elaboración propia

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis en la deshidratación de los recortes de perforación se divide en dos partes: Recortes deshidratados con métodos convencionales y recortes tratados con el equipo Q-DRYING-KILN. Para la primera parte se dispuso de 5 pozos ubicados en la región de los llanos orientales, A, B, C, D y E. En la segunda parte del análisis se disponen de 4 pozos diferentes, ubicados en la misma zona geográfica, F, G, H, y I. En dichos pozos se extrae un muestreo como se estipuló anteriormente y por consiguiente se hicieron las pruebas en el laboratorio.

3.1 MUESTREO

el muestreo se realizó de acuerdo con lo establecido en el procedimiento "PT-015 Toma de muestras de suelos" y la Res 0062 de 2007 del ideam. Existen cinco (5) tipos de diseño del muestreo probabilístico: Muestreo Aleatorio Simple, Muestreo Aleatorio Estratificado, Muestreo Sistemático, Muestreo de Rangos Fijos y Muestreo Secuencial. Para este estudio se utilizó el muestreo aleatorio estratificado compuesto en espacio y se hizo una aproximación estadística para la obtención de muestras representativas en sistema de cuadrícula triangular.

Para el campo llanos 34 se tiene como dato estadístico 8.200 barriles de cortes producidos por cada pozo perforado. Según esta estadística se procedió a calcular los volúmenes de material nativo y material de mezcla para establecer la zona de disposición final, Dados estos datos se identificaron las zonas de muestreo. La **Tabla 6** muestra el cálculo y los volúmenes totales que se utilizaron para construir el Zodmes y la piscina con geomembranas.

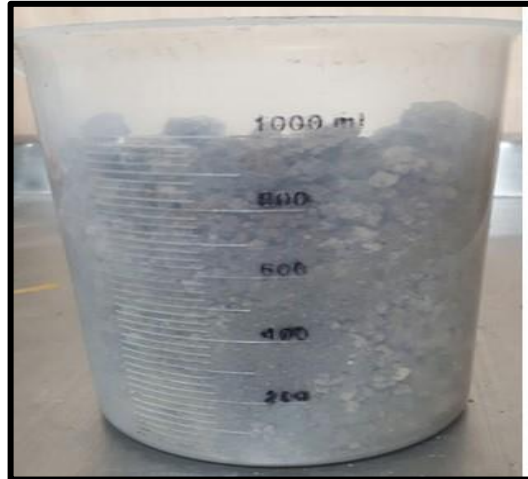
Tabla 6. Volúmenes Requeridos para los pozos.

		MEZCLA 1:2 DE MATERIAL NATIVO CON DISPOSICION EN PISCINAS	MEZCLA 1:2 DE MATERIAL NATIVO CON DISPOSICION EN ZODME	MEZCLA 1:0,75 DE MATERIAL NATIVO Y CAL VIVA CON DISPOSICION EN ZODME	SECADOR DE RECORTES Q-DRYING-KILN
	UNIDAD	TOTAL	TOTAL	TOTAL	TOTAL
VOLUMEN DE CORTE HUMEDO PRODUCIDO	BARRIL	8200	8200	8200	6092
NATIVO REQUERIDO PARA MEZCLA	BARRIL	16400	16400	6150	6150
VOLUMEN DE MATERIAL NATIVO REQUERIDO PARA	BARRIL	1250	N/A	N/A	N/A
MATERIAL REQUERIDO PARA JARILLONES	BARRIL	N/A	4478	3472	3472
TOTAL		25850	29078	17822	15714
VOLUMEN REQUERIDOS PARA LOS POZOS		129250	145390	89110	62856

Fuente: elaboración propia.

Una vez establecidos los volúmenes totales de barriles de recortes y los diseños de las piscinas y el Zodmes se hizo el muestreo de acuerdo con el procedimiento descrito en la metodología del proyecto. Se tomaron 10 muestras de una libra a los recortes que están en el Zodmes y a los que están confinados en la piscina similar a la **Figura 22**.

Figura 22. Muestra de recortes.



Fuente: elaboración propia.

Después del muestreo se hizo una compactación o compresión mecánica de los recortes que tiene como resultado el rompimiento de los agregados de suelo más grandes, y la reducción o eliminación de espacios entre las partículas de suelo. Tal como se muestra en la **Figura 23**.

Figura 23. Compactación de los recortes.



Fuente: elaboración propia.

3.2 RESULTADOS DE RECORTES TRATADOS POR METODOS CONVENCIONALES

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de los recortes de perforación tratados por métodos convencionales (estabilización con cal) y se procede a análisis y discusión de cada uno de los parámetros resultantes.

3.2.1 Arsénico. El Arsénico (As) es uno de los metales más tóxicos presentes en el medio ambiente y la distribución de éste depende de diversos factores químicos, físicos y biológicos debido a procesos naturales y antropogénicos, el riesgo que genera el As es su movilización hacia factores que puedan introducirse principalmente sobre aguas subterráneas.

Según Pérez²³ El contenido medio de la corteza terrestre es de 2,5 mg kg⁻¹ y el intervalo de arsénico en el suelo varía de 0,2 a 40 mg kg⁻¹. La exposición vía consumo de agua es la mayoritaria a escala global.

Como los autores aseguran, el arsénico se encuentra en formas insolubles, como un mineral en combinación con sulfuro y hierro no se considera tóxico. En cambio, cuando se encuentra en formas solubles es tóxico para los organismos vivos como en este caso se solubiliza con más de 100 elementos diferentes.²⁴ A continuación Ver **Tabla 7**.

Tabla 7. Arsénico Total.

Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
Arsénico Total	Digestión-AA-Generación de hidruros	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<10	-

Fuente: elaboración propia.

El arsénico tiene dos estados de oxidación, para este el caso el arsénico está en estado (III), lo cual es perfecto para usar la técnica de laboratorio de generación de hidruros que elimina posibles interferencias en lecturas muy bajas. De los resultados obtenidos en la **Tabla 7**, se puede apreciar que la concentración de arsénico en los

²³ PEREZ MINGUEZ, Ismael. ECOTOXICOLOGÍA DEL ARSÉNICO EN SUELOS DE LA COMUNIDAD DE MADRID. Trabajo de Grado para optar título de farmacología. Madrid.: 2015. Universidad Complutense. 6p.

²⁴ RANGEL MONTOYA, Edelweiss A, MONTAÑEZ HERNANDEZ, Lilia E, LUEVANOS ESCAREÑO, Miriam P y BALAGURUSAMY, Nagamani. Impacto Del Arsénico En El Ambiente Y Su Transformación Por Microorganismos. *Terra Latinoam* 2015, vol.33, n.2, pp.103-118. ISSN 2395-8030.

recortes de cada pozo, tienen un mínimo de 0.5 ppm, este valor indica que no hay liberación de aniones que hacen fácil su distribución y su solubilidad con otros metales tóxicos. Además, el valor pH que presentan estos recortes, tienen un valor mayor a siete (7), es decir, alcalino, por lo tanto, la concentración del arsénico depende de la acidez que se esté presentando en la zona; Es por esto que la concentración de arsénico después de que los recortes son deshidratados por las técnicas convencionales resultan con valores muy bajos. Esto quiere decir que tanto los recortes como el suelo donde se alojan, están bajo la normalidad según lo estipulado en el protocolo Louisiana 29b donde exige un límite de 10 ppm.

Esta situación permite asegurar el cumplimiento de dos condiciones primordiales: Cada conjunto de datos siguen una distribución normal y no difieren en forma significativa, en este caso, los recortes de los diferentes pozos en estudio.

3.2.2 Bario. El Bario se encuentra en la naturaleza en muchas formas diferentes llamadas compuestos de bario y está asociado a minerales de roca comunes, como los feldespatos y las micas presentes en el suelo. Algunos compuestos del Bario se disuelven fácilmente en agua y son encontrados en lagos, ríos y arroyos; Debido a sus solubilidades estos compuestos del Bario pueden alcanzar largas distancias desde sus puntos de emisión.

Según el Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU.²⁵ La mayoría del agua de superficie y suministros de agua pública contienen como promedio 0.030 partes o menos de bario por millón de partes de agua (ppm), pero puede alcanzar hasta 0.30 ppm en algunas regiones de Estados Unidos. La cantidad de bario que se encuentra en el suelo varía entre 15 y 3,500 ppm.

A continuación, en la **Tabla 8** se muestra los valores de bario obtenidos en cada pozo de estudio.

Tabla 8. Bario Total.

Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Louisiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
Bario Total	Digestión-AA- Llama Aire Acetileno	<100	<100	<100	<100	<100	<20000	-

Fuente: elaboración propia.

Los compuestos de bario tienen muchos usos importantes. El mineral de sulfato de bario es minado y usado en varias industrias, especialmente en la industria del petróleo y gas, este compuesto comúnmente llamado barita se usa en lodos de

²⁵ Resumen de salud pública: *Bario*. ATSDR. EE.UU.: Departamento de salud y servicios humanos. 2007. CAS#: 7440-39-3. p.6.

perforación como agente densificante. No cabe duda decir que por esta razón se encuentra dentro de los análisis. Sin embargo, se puede apreciar un valor menor a 100 ppm, este pequeño valor en su concentración debido a que los recortes han pasado anteriormente por un proceso de perforación donde en alguna etapa se ha usado la barita como material densificante o estabilizante en el pozo y por supuesto el debido control de sólidos, por eso la **Tabla 8** arroja valores mínimos que se encuentran muy por debajo del estándar de Louisiana 29b que es de 20000 ppm. Sin embargo, los niveles de bario en el medio ambiente son muy bajos por lo general.

Un factor relevante que actúa sobre el Bario es el pH, con un valor promedio de 8, siendo alcalino se puede decir que este escenario ayuda a que el bario no se solubilizara con algún otro compuesto y es por esto que no hubo una gran distribución en las zonas aledañas y mucho menos en fuentes de agua superficial. Un valor bajo de pH puede incrementar la solubilidad del Bario presente en el suelo y la absorción en las plantas comestibles puede ser mayor si el suelo tiene un pH menor a 6.0. El Bario es encontrado en la mayoría de los suelos en bajos niveles. Estos niveles pueden ser más altos en vertederos de residuos peligrosos²⁶.

Debido a que los valores son muy bajos se ha usado la técnica Espectrometría de absorción atómica por flama- Digestión ácido nítrico para mejorar la sensibilidad de la espectrofotometría donde se utiliza fuentes atomizadoras como el ácido nítrico que actúa como fuente energía.

3.2.3 Cromo Hexavalente y Total. El cromo se encuentra entre los primeros 20 elementos más abundantes en la corteza terrestre con una presencia de 100 ppm. Según Higinio²⁶, El cromo es un producto altamente ionizable y forma compuestos de estructura compleja, por lo tanto los estados de oxidación más comunes de los elementos de transición son +2,+3,+4,+5 y +6. El cromo ha sido ampliamente utilizado en una variedad de aplicaciones industriales, que incluyen la conservación de la madera, el refinado de petróleo y el curtido de cueros. Tanto las formas de Cr (III) y de Cr (VI) son lo suficientemente estables en el medio ambiente, sin embargo, se conoce que el estado de oxidación (III) es más estable, por lo cual, se requiere energía para convertirlo a estados de oxidación mayores.

Para poder encontrar el índice de calidad del suelo cuando entra en contacto con el cromo, se usa la técnica Colorimetría en Pasta de saturación y obtener resultados confiables y legibles. El método consiste en llevar la muestra de suelo hasta la saturación del cromo con agua destilada, por un tiempo mínimo de dos horas para que alcance el equilibrio. A partir de la tabla se pueden apreciar las concentraciones resultantes de cromo total y cromo hexavalente. A continuación, en la **Tabla 9** se

²⁶ JACINTO SOTO, Higinio. Potencial contaminación por cromo en el proceso de refinación del petróleo. Monografía para optar el título de ingeniero químico. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Lima, Peru: 2006. P. 60.

muestra los valores de cromo hexavalente y cromo total obtenidos en cada pozo de estudio.

Tabla 9. Cromo Hexavalente v Cromo Total

Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
Cromo Hexavalente	Colorimetría en pasta de saturación	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	-	-
Cromo Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<20	<20	24,5	<20,0	<20,0	<500	-

Fuente: elaboración propia.

Como recalca Sotelo²⁷, El uso intensivo de sales de Cr en diversas industrias ha generado una enorme demanda y por ende un gran problema ambiental pues la exposición a este metal y a sus residuos muestra efectos nocivos a los organismos siendo el más tóxico el Cr (VI). Durante el procesamiento de la cromita se generan compuestos de Cr (VI) o cromo hexavalente en las formas de cromato y dicromato, cuyos usos van dirigidos a las industrias.

A partir de la **Tabla 9**, se puede evidenciar que los valores dados como resultado de las pruebas antes mencionadas, indican un valor para el cromo hexavalente menor a 4 ppm y en el caso de cromo total menor a 25 ppm, si bien es un elemento abundante en la corteza terrestre para obtener una cantidad mayor de cromo hexavalente fundamentalmente debe tener un pH medio, de la presencia de condiciones aerobias o anaerobias (potencial redox) y de la temperatura del suelo. Por lo tanto, las actividades como la perforación y la utilización del lodo no afectan el comportamiento de este elemento y por ende, los procesos de deshidratación que se les ha dado a los recortes de perforación disminuyen aún más la presencia del cromo hexavalente. Estas prácticas son supervisadas bajo el contexto de lousiana 29b por su alto nivel de toxicidad que tiene el cromo hexavalente y por eso se necesita disminuir a como dé lugar este metal contaminante, por lo tanto, en el análisis de cromo total y cromo hexavalente, cumplen con el límite de lousiana 29b así que el control de cromo total automáticamente lidia con el hexavalente.

²⁷ SOTELO MUÑOZ, Adriana Paola. Especiación De Cromo En La Solución Del Suelo De Tres Suelos Enmendados Con Biosólidos Bajo Diferentes Condiciones Oxidoreductoras. Tesis De Grado Presentada Para Optar Al Título De Magíster En Ciencias-Geomorfología Y Suelos. Universidad Nacional De Colombia Sede Medellín. Medellín.; 2012. P.4.

3.2.4 Conductividad Eléctrica. La conductividad eléctrica mide la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica al aprovechar la propiedad de las sales, por lo tanto, cuando su valor es más alto permite que la corriente se mueva más fácil por el suelo por dicha cantidad de sales²⁸.

Hay que tener en cuenta que la conductividad tiene una clasificación, por lo tanto si este valor es mayor a 4 indica es que los recortes son salinos y por ende, para el medio ambiente sería perjudicial, porque al momento de restablecer la zona de disposición final de los recortes se va a ver afectado el ecosistema; si este valor es menos a 4 se clasifica como sódico²⁹.

A continuación, en la **Tabla 10** se muestra los valores obtenidos en cada pozo para este parámetro.

Tabla 10. Conductividad Eléctrica.

Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
Conductividad Eléctrica	Pasta de saturación, Electrometría	2,32	2,34	3,12	1,45	0,777	<4	-

Fuente: elaboración propia.

A partir de la **Tabla 10**, los valores de CE rondan entre 0.77-3.12 mmhos/cm, alcanzando los máximos valores en el pozo C de 3.12 mmhos/cm debido al incremento de las precipitaciones en la zona de estudio. Se aprecia el cambio en el registro de los menores valores de CE en los pozos D y E con 1.45mmhos/cm y 0.77 mmhos/cm respectivamente con 3% de exactitud en datos y una varianza del 1.21 mmhos/cm. Se puede observar que una baja conductividad eléctrica, la salinidad en el suelo no va a tener grandes repercusiones, los pozos A y B tienen una conductividad media-alta por lo que sus valores se encuentran en un rango de 2 a 2.5 mmhos/cm, lo que indica que no tiene muchas afectaciones al medio ambiente además según lousiana 29 b, este rango debe ser menor a 4 por lo tanto los 5 pozos de estudio en este proyecto están cumpliendo con esta normativa.

Se caracterizaron las principales afecciones sobre la CE del agua subterránea, descartando la intrusión marina por tratarse de un fenómeno prácticamente inexistente en las condiciones actuales. La variación de la CE en estos 5 pozos se da primeramente por consecuencia de la presencia de fertilizantes insolubles, como

²⁸ INTAGRI. 2017. La Conductividad Eléctrica del Suelo en el Desarrollo de los Cultivos. Serie Suelos. Núm. 26. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 5 p.

²⁹ Ibid., p 5.

los de liberación lenta y la incorporación de una cantidad de metales superior a las absorbidas o lixiviadas, es decir Cuando el sustrato o en este caso los metales pesados tienen una alta CIC (capacidad de intercambio catiónico) la conductividad tiende a aumentar. Los valores bajos de CE son debido a la pérdida de energía que sufren los electrones de los recortes de perforación al momento de entrar al proceso de deshidratación.

3.2.5 Grasas y Aceites. Los aceites y grasas son compuestos orgánicos constituidos, en este caso, por compuestos del petróleo. La determinación de los aceites y grasas implica evaluar la capacidad del suelo para funcionar sobre niveles de fertilidad, productividad potencial, sostenibilidad y calidad ambiental. Laura y María³⁰ sugieren que, “Algunos de los efectos de la presencia del petróleo y derivados en los recortes son la pérdida de la fertilidad del suelo, toxicidad en los organismos y afectaciones en propiedades físicas y químicas: cambios de pH, salinidad, compactación, reducción de nutrientes, pérdida de materia orgánica, etc.” Estas grasas y aceites se evaporan o simplemente son expulsados por la tercera fase (Hidrociclones), es decir, no hay oportunidad de que este parámetro se exceda o quede concentración alguna por el estricto funcionamiento y proceso de secado en que los recortes son sometidos. A continuación, en la **Tabla 11** se muestra los valores obtenidos en cada pozo para este parámetro.

Tabla 11. Grasas y Aceites.

Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
Grasas y Aceites	Extracción por Ultrasonido-Infrarrojo	0,804	0,191	0,509	0,195	0,012	<1	-

Fuente: elaboración propia.

Según Lousiana 29 b³¹, “Este residuo se recibe en la piscina de sólidos, los residuos que aún sean fluidos se les debe realizar un procedimiento de separación sólido líquido que permita bajar las concentraciones de líquidos (hidrocarburo y aguas) a valores por debajo de un 50%”.

³⁰ CABRERA LOBELO, Laura M. y UNIBIO SALCEDO, María T. Evaluación De La Remoción De Grasas Y Aceites En Suelo Contaminado Con Diésel B10 Y Biodiésel Aplicando La Tecnología Ose li Implementada Por Eom Consulting S.A.S. Proyecto De Grado Para Recibir El Título De Ingeniero Químico. Fundación Universidad De América. Bogota D.C.: 2019. P. 36.

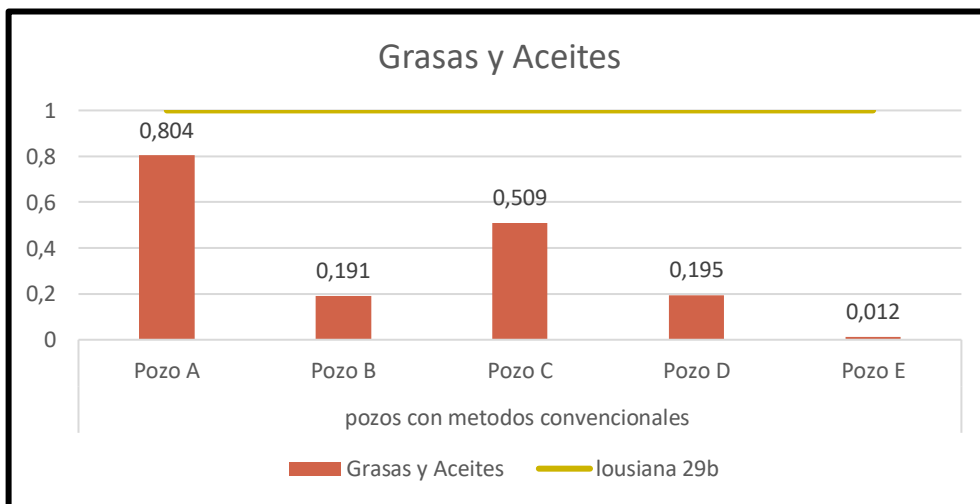
³¹ ESTADOS UNIDOS. Office of conservation. Título 43. (diciembre, 2005). Natural resources. Lousiana, 2005. P. 1-115.

Las altas temperaturas que se maneja en el horno deshidratador juegan un papel muy importante en la afectación o mejor, la erradicación de las grasas y aceites; puede afectar estrictamente la viscosidad y el pH de las grasas impregnadas a estos recortes, siguiendo este orden de ideas, es mucho más fácil remover este contaminante por efecto gravitacional y el movimiento que constantemente tienen estos recortes dentro del horno. Los valores deducidos fueron superiores a 0.050, sin efecto estadísticamente significativo por tanto en todos los datos obtenidos e investigados dan un nivel de confianza del 95%. Según esto, la concentración de grasas y aceites pueden bajar hasta un 50% como se observa en los recortes del pozo F, y de manera general, reducir al máximo estos valores.

Los recortes en el pozo F se obtuvo una disminución del 36%, en el pozo G la concentración de grasas y aceites decrece en un 15.8% y en el pozo I se reduce en un 1.6%, no obstante, en el pozo H se tiene un aumento considerable posiblemente a que estos cortes tuvieron contacto con algún hidrocarburo o derivados del petróleo que tienden a estar muy cercanos a los recortes de perforación al momento de depositarlos en el Zodme lo que causo este aumento en la concentración.

A partir de la **tabla 11**, Los resultados se expresan en porcentaje para el fácil análisis de acuerdo con el protocolo, y por la razón de que el contratista debe estar en capacidad de realizar frecuentemente los análisis de 1 por cada 100 barriles; se encuentran valores desde 0.012% hasta 0.8% que son relativamente bajos y se cumple con normativa propuesta por Louisiana 29b lo anteriormente nombrado se puede visualizar en el **Grafico 1**.

Gráfico 1. Resultados Grasas y Aceites



Fuente: elaboración propia.

Debido a lo anterior y para este análisis, son distintos orígenes que se les puede atribuir para que los recortes en estudio resulten con un porcentaje de grasas y

aceites: Tierra (corteza), rocas o recebo contaminado con hidrocarburo, proveniente de la limpieza de contrapozos o cunetas de los sistemas de aguas aceitosas de las baterías, Suelo contaminado por incidentes que involucren el escape de hidrocarburos al ambiente, Material vegetal herbáceo (exclusivamente material verde) proveniente de la limpieza de derrames de hidrocarburos.

3.2.6 Hidrocarburos Totales. De acuerdo con la agencia para sustancias toxicas y registro de enfermedades, los hidrocarburos totales de petróleo (TPH, por sus siglas en inglés) son una mezcla de muchos compuestos diferentes. Todo el mundo está expuesto a los TPH de diferentes fuentes, incluyendo gasolineras, aceite derramado sobre el pavimento, y sustancias químicas usadas en el hogar y en el trabajo.

Tal como dice Pons-Jiménez, Guerrero-Peña, Zavala-Cruz y Alarcón³² el análisis TPH depende del método analítico usado para su determinación, ya que la medida de TPH, es la concentración total de los hidrocarburos extraídos y medidos por un método específico, mismos que pueden corresponder a las fracciones ligeras, media y pesada del petróleo. A continuación, en la **Tabla 12** muestra los valores obtenidos en cada pozo para este parámetro.

Tabla 12. Hidrocarburos Totales.

Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
Hidrocarburos Totales	Extracción por Ultrasonido-Infrarrojo	0,585	0,14	0,318	0,187	0,006	<3	-

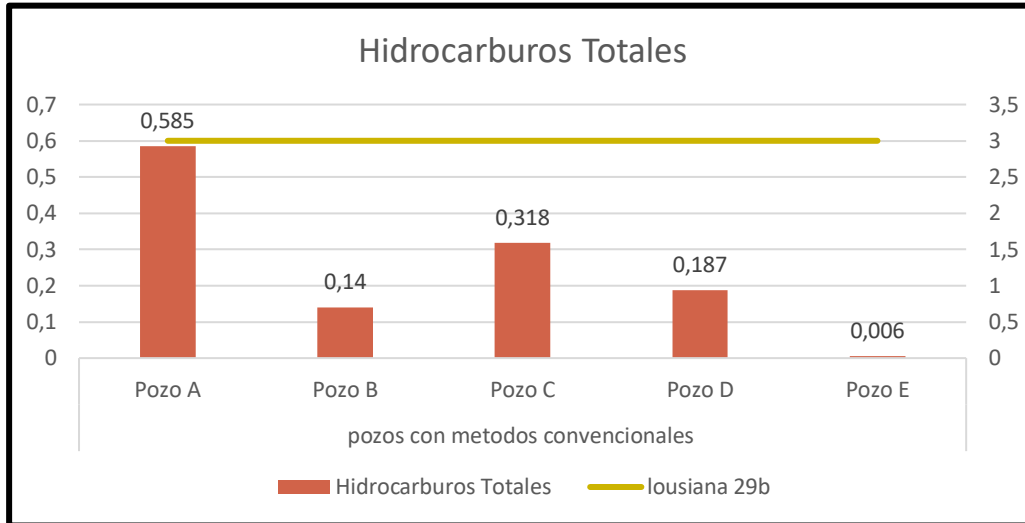
Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la **Tabla 12**, el análisis de hidrocarburos totales se toma en cuenta los diferentes factores que hacen que se utilice como parámetro de calidad del suelo o en este caso los recortes de perforación. Se aprecian valores que van del rango de 0.006% a 0.58% debido al historial de cada uno de los pozos y por ende su estricto tratamiento por donde los recortes han pasado. Se deduce que estos valores que están bajo valor guía del 3% en el protocolo de lousiana 29b y son consecuencia de que en los pozos de donde provienen estos recortes no se ha hecho algún trabajo de workover con algún derivado químico del petróleo y tampoco se ha usado lodos base aceite; cabe recordar que todos los recortes en estudio son

³² PONS JIMENEZ, M., GUERRERO PEÑA, A., ZAVALA CRUZ, J. y ALARCON, A. EXTRACCIÓN DE HIDROCARBUROS Y COMPUESTOS DERIVADOS DEL PETROLEO EN SUELOS CON CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS DIFERENTES. Instituto Mexicano del Petróleo. Tabasco: 2010. P. 2.

base agua, en el **Gráfico 2**, se puede apreciar los valores para este parámetro y el valor estipulado por Louisiana 29b.

Gráfico 12. Resultados de Hidrocarburos Totales



Fuente: elaboración propia.

También se le atribuye a un bajo contenido de materia orgánica que favorece la agregación de componentes texturales inorgánicos (arena, limo y arcilla) y orgánicos-biológicos muy estables, debido a las interacciones fisicoquímicas que presentan. Como tal este parámetro es de suprema supervisión porque es el que más abunda en las prácticas petrolíferas y obviamente un contaminante letal si no se controla.

3.2.7 Humedad Natural. Según Arturo³³, “Se denomina humedad natural o contenido de agua de un suelo, a la relación entre el peso de agua contenido en el mismo y el peso de su fase sólida y Se expresa como porcentaje.” Teniendo en cuenta la anterior descripción se puede decir que, entre mayor sea la fracción de humedad, mayor va a ser el porcentaje de agua que posee, en este caso, los recortes de perforación. Para el presente proyecto el parámetro más importante es la humedad, teniendo en cuenta este parámetro, se basa el proceso de deshidratación que se debe implementar para los recortes y así evitar que un porcentaje grande de humedad no afecte los parámetros antes vistos y por ende no ser el culpable de causar una posible lixiviación que es un tema muy delicado para el ambiente donde se está operando. A continuación, en la **Tabla 13** se presentan los resultados de humedad.

Tabla 13. Humedad Natural.

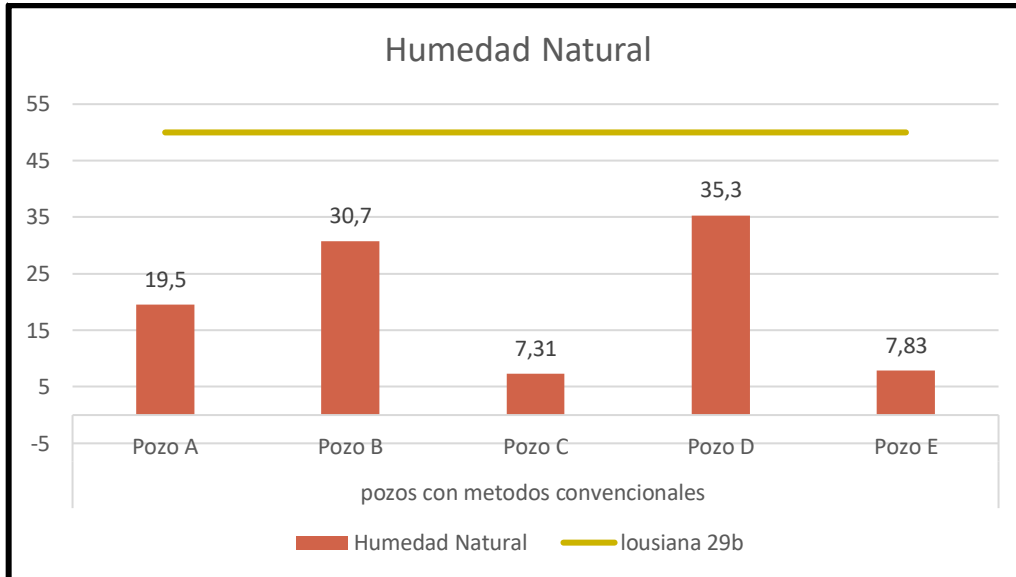
Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
Humedad Natural	Gravimétrico	19,5	30,7	7,31	35,3	7,83	<50	-

Fuente: elaboración propia.

Los recortes de perforación generalmente son recibidos inicialmente presentan una humedad entre el 60-80% en volumen y deben ser deshidratados para su disposición final. En los resultados se observa como la humedad varia en cada pozo y esto se da por distintos factores; Un factor importante para que la humedad aumente como en los casos de los pozos A, B y D es por el nivel freático de la zona de confinamiento en el que están, el nivel freático es donde la presión es igual a la presión atmosférica, es decir, el nivel freático es el lugar o zona donde agua subterránea supera los niveles de superficie, además las capas de geomembranas que están en la piscina de recortes se pueden desgastar o por algún trabajo externo se pueden romper, entonces el agua se filtra, humedece de nuevo los recortes y por eso la humedad tiende a aumentar. Para los casos de baja humedad como los casos en los pozos C y E, estos están confinados en el Zodmes donde muy rara vez existen estos problemas, pero por cuestiones meteorológicas o la deshidratación de estos no fue suficiente en el **Gráfico 3** se puede visualizar el comportamiento de cada pozo teniendo como referencia Lousiana 29b.

³³ UNNE. [sitio web]. Corrientes, Argentina: Apuntes, Trabajo Práctico De Laboratorio N° 2a Humedad Natural. [19-05-2020]. Disponible en: <http://www.ing.unne.edu.ar/assets/pdf/academica/alumnos/apuntes/geotecnia/I2-pi.pdf>. p.2.

Gráfico 3. Resultados Humedad Natural.



Fuente: elaboración propia

Esto podría tener consecuencias como en el suelo con una mayor saturación de agua que puede durar más de dos días, causando una reducción rápida de oxígeno y absorción de nutrientes y podrían aparecer pudriciones en la zona. Además, se puede producir una anoxia o suelo con baja porcentaje de oxígeno afectando proporcionalmente un elemento importante como el hidrogeno del suelo para abastecer la reforestación de la zona de operaciones. En términos generales se puede apreciar que la humedad también cumple con el protocolo Lousiana 29b, pero estos valores deben mantenerse muy bajos, pues la función de los métodos de deshidratación de los recortes es dejar el mínimo porcentaje de humedad posible.

Por causa de la humedad en la disposición final, se puede tener una mezcla heterogénea de granos en los recortes generando así una baja compactación entre ellos, por lo tanto, tiene un grado superior de afectación en el volumen de estos, es decir, se requiere de una mayor área o volumen para su adecuar la zona de disposición final y así generando más espacio y una mayor probabilidad de riesgo en contaminación tanto ambiental como visual.

3.2.8 Mercurio Total. Las especies de Hg (II) están sujetas a un amplio abanico de reacciones químicas y biológicas. Las condiciones del suelo (pH, temperatura, contenido en ácido húmico, etc.) son normalmente favorables para la formación de compuestos inorgánicos de Hg (II) como HgCl₂, Hg (OH)₂ y compuestos inorgánicos de Hg (II) complejados con aniones orgánicos. Aunque algunos compuestos inorgánicos de Hg (II) son bastantes solubles (y en consecuencia, móviles), suelen formar complejos con la materia orgánica (sobre todo ácidos fúlvicos y húmicos) y arcillas de los suelos³⁴. A continuación, en la **Tabla 14** se presentan los resultados de Mercurio Total.

Tabla 14. Mercurio Total.

Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
Mercurio Total	Espectrofotometría de absorción Atómica-Vapor frio	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<10	-

Fuente: elaboración propia.

Se evaluó la concentración de mercurio total en muestras descritas en la Tabla 14, El mercurio (Hg) es un metal noble que se caracteriza por encontrarse en estado líquido a temperatura ambiente, el 100% de las muestras analizadas registraron valores menores a 0.2mg/kg Hg (peso húmedo), esto quiere decir que el mercurio se caracteriza por encontrarse en estado líquido y se encuentra de manera natural en todos los recortes de perforación pero sin ninguna complejidad hacia la zona en estudio. Además, se puede evidenciar que el contenido de mercurio total está cumpliendo con lousiana 29b que dice que este parámetro debe ser menor a 10 mg/kg, este parámetro es muy importante porque debe existir en pequeñas proporciones debido a que es perjudicial para la salud de los seres vivos.

En la **Tabla 14** se puede evidenciar que el contenido de mercurio total en los pozos es menor a 0.2 por lo tanto está cumpliendo con lousiana 29b que dice que este parámetro debe ser menor a 10, este parámetro es muy importante porque debe existir en pequeñas proporciones debido a que es perjudicial para la salud de los seres vivos.

³⁴ GAONA MARTINEZ, XAVIER. El mercurio como contaminante global, Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente.tesis. Universitat Autònoma De Barcelona, Barcelona,2004 [23,mayo,2020].disponibleen:<http://grupsderecerca.uab.cat/gts/sites/grupsderecerca.uab.cat/gts/files/TESIS%20XG.pdf>.

3.2.9 pH. El pH es un parámetro principal e indispensable para el análisis de suelos y en este caso de los recortes de perforación, esta medida de alcalinidad da para concretar y dar un mejor análisis sobre la acidez que se pueda observar en el área de estudio, como se ha podido ver en cada uno de los parámetros anteriores el pH siempre ha tenido un papel como factor dominante o en otros casos se ve afectado como en el parámetro de hidrocarburos totales que suele aumentar. A continuación, en la **Tabla 15** se muestra los valores obtenidos.

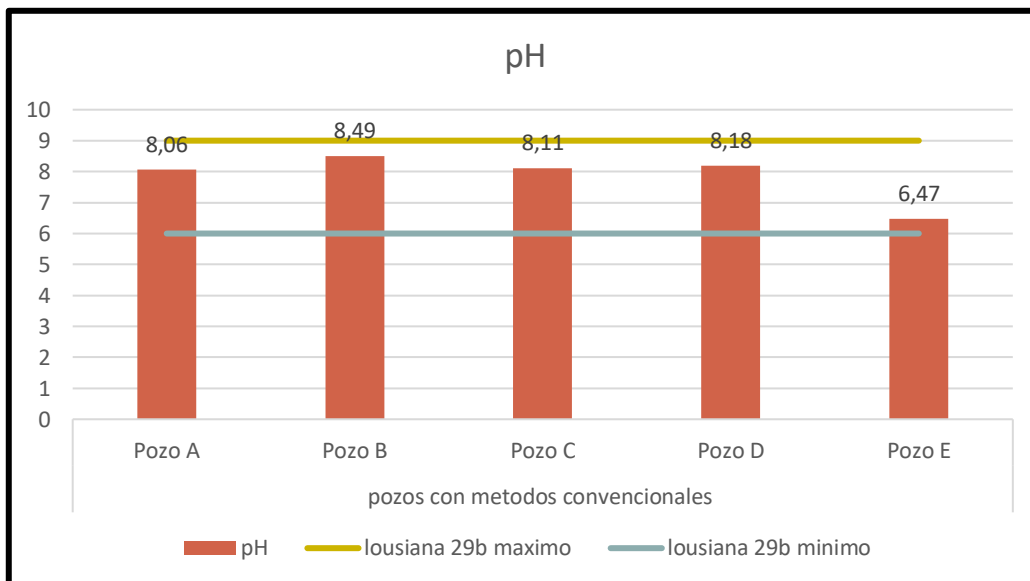
Tabla 15. pH.

Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
pH	Electrometría	8,06	8,49	8,11	8,18	6,47	6 A 9	-

Fuente: elaboración propia.

Dentro del análisis del pH de los recortes en estudio, se evidencia un promedio de pH de 8. Muchos suelos, en este caso, el suelo de los llanos orientales, tienen una gran cantidad de acidez no intercambiable que puede ser determinado con una solución de pH de 8, el cual no se puede reemplazar con sales neutras, esto quiere decir que está a punto de entrar en un escenario alcalino gracias al equilibrio que se origina cuando el suelo entra en contacto con los recortes de perforación, es decir, las variables químicas como el pH, pueden llegar a ser muy heterogéneas pero aun así pueden llegar a un punto de equilibrio. De acuerdo con el protocolo lousiana 29b que indica un valor de mínimo 6 y máximo de 9, el pH de los recortes que han pasado por la deshidratación convencional cumple con la normativa, estos parámetros se pueden visualizar en el **Grafico 4**. Dentro de este análisis se puede observar que el pH en condiciones ambiente puede llegar a ser muy alto en comparación con la normativa, esto se da porque no existe algún método o algún agente externo que ayude a que el pH esté en condiciones neutras, en este caso puede ser la temperatura; La temperatura también juega un factor fundamental para afectar el pH para que esté bajo niveles neutros que ayudan a que el suelo no sea contaminado. Por lo tanto, se debe dar un manejo especial a los demás parámetros para evitar modificación de este, pueda permanecer en un escenario alcalino y no cause una lixiviación que es uno de los retos de este proyecto. Más adelante se evidencia en como el pH juega un papel importante en cada uno de los parámetros y como se puede solucionar una supuesta acidez en los recortes de perforación.

Gráfico 4. Resultados del pH



Fuente: elaboración propia.

3.2.10 Plata Total. La plata total tiene bajo riesgo de contaminación en la cadena alimentaria, ya que no son absorbidos por las plantas al ser poco solubles en el suelo, lo que se traduce en una absorción y transferencia insignificante por la vegetación³⁵. Los resultados para la plata están presentados en la **Tabla 16**.

Tabla 16. Plata Total

Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
Plata Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<200	-

Fuente: elaboración propia.

En la **tabla 16** se puede observar los valores de plata total que son menores a 10 en todos los pozos por lo tanto están cumpliendo con lousiana 29b que tiene un límite de 200, sabiendo que la plata es un elemento básico que conforman el planeta, puede viajar por medio del aire y la lluvia por lo tanto es un elemento con el que se

³⁵ Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M. y Pennock, D. 2019. La contaminación del suelo: una realidad oculta. Roma, FAO.p 49.

convive a diario y la forma en la que se encuentre puede variar dependiendo de las condiciones ambientales a la que este expuesto.

Estos valores deben ser mínimos debido a que puede ser perjudicial para la salud en grandes cantidades ocasionando problemas respiratorios, irritación en los pulmones y la garganta³⁶.

3.2.11 Plomo. El parámetro de plomo total se encuentra en el grupo selecto de metales pesados y tóxicos al momento de analizar la estabilidad de suelos. El plomo se encuentra en forma natural en la corteza terrestre en un promedio de 16 mg/kg y hace parte de las diversas emisiones de procesos industriales donde intervienen compuestos de plomo como por ejemplo la combustión de carburantes fósiles. A continuación, en la **Tabla 17** se muestran los valores obtenidos en cada pozo para este parámetro.

Tabla 17. Plomo Total.

Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
Plomo Total	Digestión-AA- Llama Aire Acetileno	29,2	<20,0	<20,0	26,8	21	<500	-

Fuente: elaboración propia.

Tal como se recalca, el pH afecta al plomo, si este aumenta, entonces aumenta la materia orgánica y por ende se incrementa la interacción con el suelo. Se puede decir que al disminuir la interacción con el suelo aumenta la solubilidad del plomo y puede contaminar acuíferos. Esto es muy grave y por eso, aunque sean métodos convencionales de deshidratación se debe dar un control y enfoque a los metales pesados.

En la **tabla 17** se observa valores menores a 30 ppm. La causas principales de que haya plomo en los recortes pueden ser por el desgaste de la broca con el suelo al momento de perforar por la pintura que la broca tiene, es decir, algunas pinturas pueden contener plomo para evitar corrosión o que sean más estables al ambiente; También puede ser de origen natural por la formación donde se está operando o también el plomo se usa como antidetonante para gasolina diesel y puede ser por el uso de la grúa o camión que transporta estos recortes a su disposición final y allí pueden quedar contaminados con el plomo.

³⁶ Resumen de salud pública: *Plata*. ATSDR. EE.UU.: Departamento de salud y servicios humanos. 1990. CAS#: 7440-22-4. p.4.

Los recortes de perforación pueden ser contaminados por alguna soldadura que se hizo en el área donde están confinados, son muchas las variables que se le pueden atribuir para que el plomo contamine los recortes de perforación, sin embargo, las prácticas de deshidratación son muy necesarias para que los metales no contaminen los recortes y mucho menos el ambiente.

3.2.12 PSI y RAS. El parámetro de PSI (Porcentaje de sodio intercambiable) mide la concentración de sodio en complejo de cambio, es decir, el sodio adsorbido por las partículas del suelo, y el RAS (Relación adsorción sodio) es cuando se puede medir bien el sodio en la disolución con el suelo. Cuando se habla de sodicidad del suelo o en este caso en los recortes, intervienen ciertos factores como la combinación de sales, si se produce un exceso de este compuesto puede provocar deterioros para el área de operaciones y en sus propiedades fisicoquímicas generando un gran impacto al ambiente, afectando la estructura y la permeabilidad del suelo. A continuación, en la **Tabla 18** se muestran los valores obtenidos para cada pozo para estos parámetros.

Tabla 18. PSI Y RAS

Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
PSI	NaExtraído con AcNH ₄ , pH y capacidad de Intercambio Catiónico	2,77	4,63	3,68	4,73	1,25	<15	-
RAS	Solubles en pasta de saturación (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ y Na ⁺)	1,02	2,27	1,63	2,34	0,253	<12	-

Fuente: elaboración propia.

Los resultados apreciados en la Tablas 18, de PSI y RAS, según la tabla de valores guía dada por Robert N. Carrow & Ronny R. Duncan, donde indican los límites para establecer si el suelo en cuestiones generales es sódico o no, entonces de acuerdo con esto los valores dados en la tabla va de 2% a 5% esto quiere decir que en general el suelo y los recortes de perforación es salino, pero no es sódico, lo cual es una gran noticia. Un factor importante como se venía mencionando es el pH, un alto nivel de pH en los recortes de perforación, los carbonatos se convierten en la forma dominante de alcalinidad. Cuando el suelo se seca, el Calcio y el Magnesio se precipitan fuera de la solución del suelo. Como se ve en los resultados se identifica que el PSI Y el RAS, son proporcionales al aumento del pH, entonces se

debe tener en cuenta que el pH es de 8-9, entonces el trabajo del equipo Q-Drying Kiln debe ser deshidratar aún más estos recortes para que la capacidad sódica y la salinidad sean bajos y no generar problemas de fertilidad, con el fin de restablecer el entorno correspondiente al área de operaciones del campo.

La salinidad puede darse de forma natural en suelos bajos y planos, donde los recortes de perforación se disponen, tales como las piscinas con geomembranas que pueden ser inundados por lluvias que se presenten en la zona, es decir, hay proceso de acumulación de sales solubles con el agua y así generar un aumento en la salinidad. Existen variaciones como por ejemplo, el pozo B y el pozo A, donde el pozo A tiene un PSI DE 2.77% y el pozo B 4.63%, esto significa que en el pozo B en donde están alojados los recortes tiene más humedad con respecto al pozo A, también se destaca la forma en que son expuestos a condiciones meteorológicas más complicadas que en otras disposiciones finales, también cabe resaltar que algunos recortes están en Zodme y otros en piscina con geomembranas por lo tanto los recortes del pozo B están confinados en un Zodme mientras que los del pozo A y los del pozo E están en piscinas con geomembranas.

Basándose en el límite de los parámetros de Lousiana 29b se puede decir que los recortes de perforación cumplen con la normativa, teniendo en cuenta que el parámetro de PSI debe ser menor a 15%, los resultados obtenidos se encuentran en un rango de 1-5% y en el RAS debe ser menor a 12%, los resultados obtenidos se encuentran en un rango de 0.2 -2.5 % por lo tanto si cumplen con el límite de Lousiana 29b.

3.2.13 Selenio. El selenio está sumamente ligado al zinc y a los otros metales mencionados anteriormente, se puede decir que el selenio tiene casi las mismas ventajas y características del zinc en cuanto su comportamiento, por ejemplo, con el pH. A continuación, en la **Tabla 19** se muestra los valores obtenidos para cada pozo de este parámetro.

Tabla 19. Selenio Total.

Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
Selenio Total	Digestión-AA-Generación de hidruros	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<10	-

Fuente: elaboración propia.

El selenio depende de no solo el contenido total en el suelo sino de su composición química, el selenio se puede encontrar como selenato y selenito y se encuentra en mayores concentraciones en suelos de origen sedimentario, tal cual el área de operación bajo estudio en el presente proyecto. En los resultados de la Tabla 19

obtenidos el selenio presentan valores <0.5 ppm, es muy baja la concentración de selenio en los recortes de perforación, por cuestiones de que no se encuentra materia orgánica al alcance de estos además de que no hay lodos o agua residuales cerca, no hay combustión de componentes fósiles y ni siquiera volatilización. Entonces al comparar con el valor guía del suelo que tiene una media de 0.3 ppm, denota que el selenio que importante en el estudio toxicológico, para este caso es despreciable, no obstante, se encuentra cumpliendo el protocolo Lousiana 29b.

3.2.14 Zinc Total. Tal como afirma Casierra³⁷, “El zinc, (...) son nutrientes minerales esenciales a bajas concentraciones, pero son muy tóxicos en cantidades altas en el suelo.” Es por eso por lo que el zinc debe ser determinado como los otros metales tóxicos porque altera directamente a la biorremediación del ecosistema y más que todo a la permeabilidad del suelo.

Básicamente El contenido de Zn depende de gran medida de los cambios ambientales o condiciones meteorológicas, a los que estén expuestos los recortes de perforación como los siguientes: Transporte de polvo, incendios o cenizas volcánicas aportan para la presencia de Zn en los recortes. El zinc disponible en la solución del suelo es adsorbido especialmente por la materia orgánica del suelo.

A continuación, en la **Tabla 20** se muestran los valores obtenidos para cada pozo de este parámetro.

Tabla 20. Zinc Total.

Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
Zinc Total	Digestión-AA- Llama Aire Acetileno	76,1	46,3	67,6	47,6	67,2	<500	-

Fuente: elaboración propia.

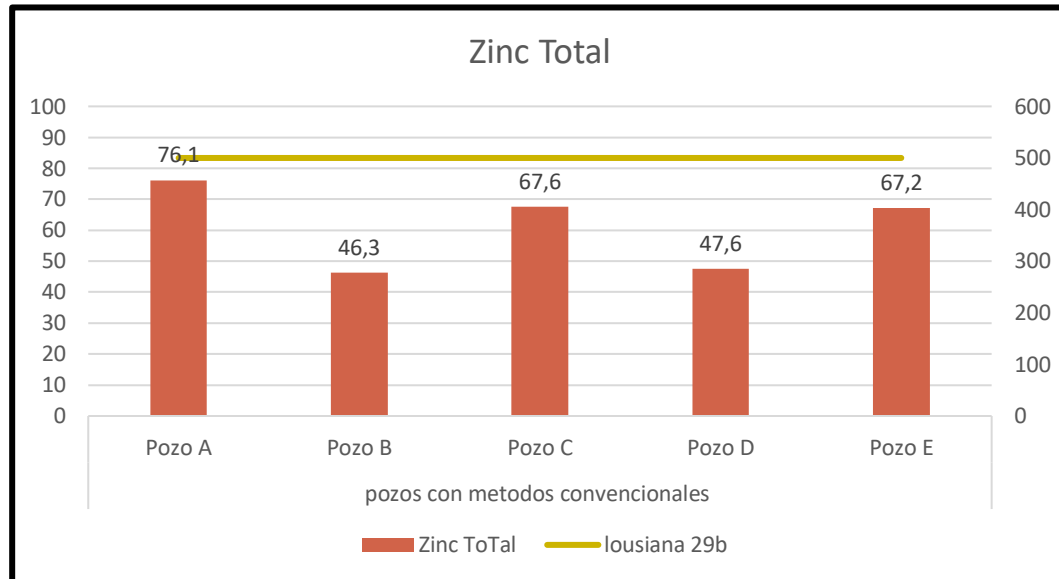
A partir de la **Tabla 20**, se muestran valores con un promedio de 69 ppm esta cantidad a comparación de la guía de un suelo contaminado con contenido de zinc esta entre 60 y 80 ppm según Riaño³⁸, y para este caso al momento de valorar el contenido de zinc permitido por lousiana 29b está muy por debajo de 500ppm, esto demuestra que el zinc se origina de manera natural y que las actividades industriales

³⁷ Suelos Fertilizacion y manejo de aguas: *La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en fresa (Fragaria sp. cv. Camarosa)*. Agronomía colombiana. Bogota D.C.: Agronomía Colombiana. Vol. 23 · No. 2. 2005. 283-289. P. 1.

³⁸ RIAÑO SALAS, Pablo. Biofrotificación agronómica con selenio y zinc sobre guisanteforrajero (*pisum sativum*) bajo condiciones de secano mediterráneas. Trabajo Fin de master en ingeniería agronómica. Universidad de Extremadura. Bajadoz.:2019. P. 6.

no intervienen mucho en su origen por lo tanto tiene una gran utilidad y es necesario para algunos organismos vivos, estos resultados se pueden visualizar en la **Gráfica 5**.

Gráfico 5. Resultados de Zinc Total



Fuente. elaboración propia.

Tal como recalca Riaño³⁹, La cantidad de zinc intercambiable disminuye con el aumento del pH y es muy bajo a partir de un pH 6 y por ende se desplaza fácilmente por la superficie. La disponibilidad de zinc es fuertemente influenciada por el pH y su contenido total en el suelo como también las reacciones redox con otros elementos, la actividad de microorganismos la estructura del metal y la materia orgánica.

3.2.15 Pruebas TCLP. El método Toxicity Characteristic Leaching Procedure Conocido como test TCLP, es la prueba de lixiviación más conocido, desarrollado a fines de la década del 80 en los Estados Unidos por la EPA (Environmental Protection Agency) para cuantificar la extractabilidad de compuestos tóxicos como metales, compuestos orgánicos volátiles, semi-volátiles y pesticidas bajo un conjunto de condiciones de laboratorio⁴⁰.

³⁹ *Ibíd.*, p. 8.

⁴⁰ REINEL MUÑOZ, MARISOL. Determinación de las características de toxicidad por lixiviación (TCLP) del ingrediente activo malatión en un plaguicida organofosforado mediante el procedimiento de TCLP [en línea].tesis. Universidad de la salle.Bogota.D.C.2009.[consultado 23,mayo,2020].Disponible en:https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1275&context=ing_ambiental_sanitaria

Tabla 21. TCLP

Parámetro	Técnica	pozos con métodos convencionales					Lousiana 29B	DECRET O 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
TCLP-Arsénico	Extracción, AA-Generación de hidruros	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	-	<5
TCLP-Bario	Digestión Ácido Nítrico- Espectrofotometría de Absorción Atómica con llama directa Oxido nitroso-Acetileno	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	<100
TCLP-Cadmio	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-	<1
TCLP-Cromo	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	<5
TCLP-Plata	Digestión de Absorción atómica con llama directa Aire-Acetileno	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	<5
TCLP-Plomo	Digestión Ácido Nítrico- Espectrofotometría de Absorción Atómica con llama directa Aire-Acetileno	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	<5
TCLP-Selenio	Digestión-AA-Generación de hidruros	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	-	<1
TCLP-zinc	Titulometría	<0,05	<0,05	0,13	0,24	<0,05	-	-

Fuente: elaboración propia.

A partir de La **Tabla 21**, es importante destacar el procedimiento de lixiviación (TCLP) que determina la movilidad de los contaminantes inorgánicos presentes en una muestra y si los filtrados generados dan lugar a clasificar el material como “peligroso”. Son relativamente bajos los valores porque la deshidratación de los recortes ha hecho que sustancias y metales solubles que se analizan dentro de esta práctica han disminuido, por lo tanto, no hay lugar para un posible análisis de lixiviación en zonas aledañas a la disposición final de los recortes. También se puede apreciar una constancia en todos los recortes en general no hay varianzas

entre pozos ni lugares de confinamiento, además se puede observar como todos los parámetros cumplen con el decreto 4741 del 2005.

3.2.16 Perfil de caracterización química con los métodos convencionales.

A continuación, se va a presentar el perfil químico completo de las pruebas realizadas para cada pozo en la **Tabla 22**.

Tabla 22. Perfil de caracterización química para los pozos con métodos convencionales

Parametro/Pozo	Técnica	pozos con metodos convencionales					Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		A	B	C	D	E		
Arsénico Total	Digestión-AA-Generación de hidruros	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<10	-
Bario Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<100	<100	<100	<100	<100	<20000	-
Cadmio Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<10	-
Conductividad Electrica	Pasta de saturación,Electrometría	2,32	2,34	3,12	1,45	0,777	<4	-
Cromo Hexavalente	Colorimetría en pasta de saturación	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	-	-
Cromo Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<20	<20	24,5	<20,0	<20,0	<500	-
Grasas y Aceites Hidrocarburos Totales	Extraccion por Ultrasonido-Infrarrojo	0,804	0,191	0,509	0,195	0,012	<1	-
	Extraccion por Ultrasonido-Infrarrojo Gravimétrico	0,585	0,14	0,318	0,187	0,006	<3	-
Humedad Natural		19,5	30,7	7,31	35,3	7,83	<50	-
Mercurio Total	Espectrofotometría de absorción Atómica-Vapor frio Electrometría	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<10	-
pH		8,06	8,49	8,11	8,18	6,47	6 A 9	-
Plata Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<200	-
Plomo Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	29,2	<20,0	<20,0	26,8	21	<500	-
PSI	NaExtraído con AcNH ₄ ,pH y capacidad de Intercambio Catiónico	2,77	4,63	3,68	4,73	1,25	<15	-
RAS	Solubles en pasta de saturación (Ca ²⁺ ,Mg ²⁺ y Na ⁺)	1,02	2,27	1,63	2,34	0,253	<12	-
Selenio Total	Digestión-AA-Generación de hidruros	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<10	-
Zinc ToTal	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	76,1	46,3	67,6	47,6	67,2	<500	-
TCLP-Arsénico	Extraccion, AA-Generación de hidruros	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	-	<5
TCLP-Bario	Digestión Ácido Nítrico-Espectrofotometría de Absorción Atómica con llama directa Oxido nitroso-Acetileno	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	<100
TCLP-Cadmio	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-	<1
TCLP-Cromo	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	<5
TCLP-Plata	Digestión de Absorción atómica con llama directa Aire-Acetileno	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	<5
TCLP-Plomo	Digestión Ácido Nítrico-Espectrofotometría de Absorción Atomica con llama directa Aire-Acetileno	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	<5
TCLP-Selenio	Digestión-AA-Generación de hidruros	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	-	<1
TCLP-zinc	Titulometría	<0,05	<0,05	0,13	0,24	<0,05	-	-

Fuente: elaboración propia.

3.3 RESULTADOS DE RECORTES TRATADOS POR EL EQUIPO Q-DRYING- KILN

Mediante el uso de retroexcavadora se transfieren los cortes almacenados en *catch tank* hacia la bomba de transferencia de cortes del Q-DRYING-KILN, cuya función principal es transportar los cortes desde la tolva hacia el sistema de calentamiento. Los cortes son alimentados a un cilindro rotatorio en donde son sometidos a llama directa, esto con el fin de incrementar la temperatura por encima del punto de ebullición del agua generándose la deshidratación del corte y una reducción de volumen proporcional al agua evaporada. Se realizará el análisis de cada parámetro y su respectiva comparación entre convencionales y el equipo Q-DRYING-KILN para cada pozo.

3.3.1 Arsénico. Como se puede apreciar el arsénico tiene la tendencia de bajar su concentración cuando existen ambientes de alta temperatura. Después de que los recortes son tratados por el horno, es decir, los recortes interactúan con la llama directamente, existe un proceso redox que va ligado al procesamiento del arsénico; La concentración del arsénico se ve afectado por la aireación que hay dentro del horno rotatorio, es decir, la velocidad de difusión del oxígeno es muy alto y por eso el movimiento de partículas se dispara por las altas temperaturas, por lo que el pH que es inversamente proporcional a la temperatura, resulta con valores bajos y la concentración de arsénico que es directamente proporcional al pH, también se reduce.

A continuación, en la **Tabla 23** se muestran los valores obtenidos para cada pozo de este parámetro.

Tabla 23. Arsénico

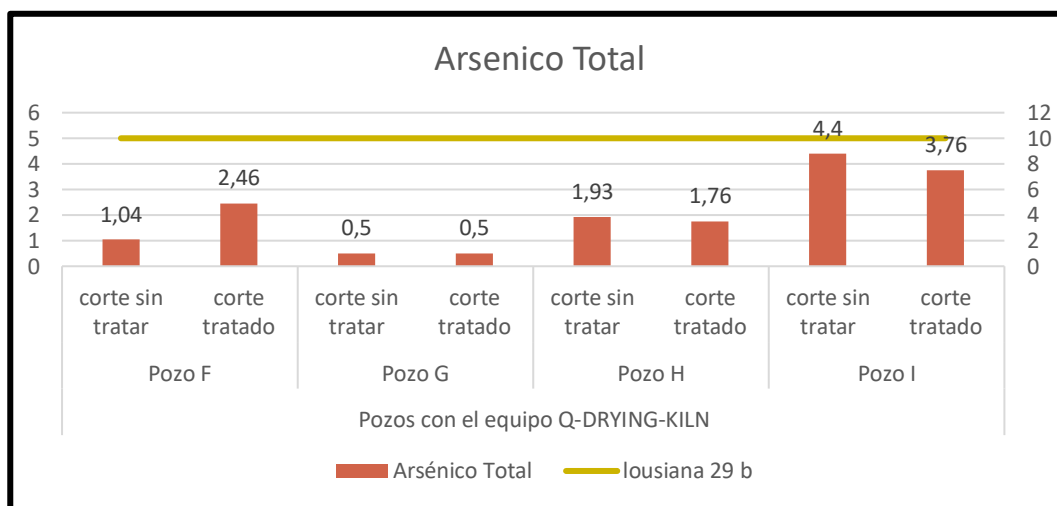
Parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Arsénico Total	Digestión-AA-Generación de hidruros	1,04	2,46	<0,5	<0,5	1,93	1,76	4,4	3,76	10	-

Fuente: elaboración propia.

A partir de la **Tabla 23** se puede observar el comportamiento del arsénico, en el pozo F aumenta considerablemente en un 57%, para el pozo G se mantiene estable por lo tanto no tiene ninguna complicación para el proceso, en el pozo H se presenta una variación de 6%, en el pozo I la concentración de arsénico disminuye en un 11%. Teniendo en cuenta las variaciones de concentración del arsénico en los

recortes de perforación de cada pozo, el equipo tiende a disminuir la cantidad del arsénico con una variación del 19%. Se pueden presentar excepciones como en el pozo F, que aumenta su concentración de arsénico esto se debe a que el pH está muy cerca de ser alcalino además que estos resultados se encuentran dentro del límite de Lousiana 29b, se pueden visualizar en el **Grafico 6**.

Gráfico 6. Resultados de Arsénico Total.



Fuente: elaboración propia.

3.3.2 Bario Total. El Bario es un elemento que se encuentra en bajos niveles en la corteza terrestre y su valor depende únicamente del pH. por lo tanto, hay factores que afectan al pH uno de ellos es la temperatura, al incrementar esta su pH va a variar y con ello la concentración del Bario va a disminuir o permanecer constante.

A continuación, se mostrará en la **tabla 24** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro.

Tabla 24. Bario Total

parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Bario Total	Digestión Acido Nítrico- Espectrofotometría de absorción Atómica con llama directa óxido nitroso-Acetileno	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	20000	-

Fuente: elaboración propia.

Al igual que en la deshidratación de recortes con los métodos convencionales, el equipo ayuda a que la barita que se usa en el lodo de perforación no se solubilice también con materia orgánica por eso la concentración del bario es de 100ppm. Sin embargo, este valor refleja que la barita y sus formas solubles no afectan a estos recortes y/o suelo bajo las condiciones de la prueba, considerando el bario como una sustancia atóxica. Los rangos de concentración en los que se observa la inhibición del bario sobre los recortes se hallan por encima de los valores de solubilidad de la barita, por lo que se deduce que el efecto del compuesto sobre la zona lo estaría forzando la barita más que el bario soluble.

Es difícil retirar los residuos de bario impregnados a los recortes, por más que intervengan agentes directos como la llama de calor directa que se utiliza en el horno y que interactúa con en los recortes de perforación o cualquier material que entre en estudio por cuestiones naturales y microscópicas, por lo tanto no afecta a la zona en estudio ni al ambiente pero aun así se debe seguir supervisando por su alto nivel toxico para que siga bajo los límites establecidos por el protocolo de lousiana 29b. Se desconoce cómo afectaría el flujo de liberación de bario con interacción directa con bacterias en los fondos marinos o en niveles tróficos, siguiendo el proceso de biomagnificación.

De acuerdo con la **tabla 24**, los valores de bario son menores a 100 ppm, estos resultados cumplen con lousiana 29b que indica que debe ser menor a 20.000 ppm.

3.3.3 Cadmio Total. El cadmio también está directamente relacionado con la materia orgánica presente y con la variación que tiene con respecto al pH. El cadmio reúne cuatro características que lo clasifican como toxico: tiene efectos adversos para el hombre y el medio ambiente, Bioacumulación, Persistencia en el medio ambiente y viaja a grandes distancias por medio del viento o del agua.⁴¹

Según Oliveira⁴², Este metal presenta variaciones por la capacidad adsorción de ácidos orgánicos que se puedan presentar en el medio.

A continuación, se mostrará en la **tabla 25** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro.

⁴¹ RAMIREZ, Augusto. Toxicología del cadmio. conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Lima:2002. Vol.63, N°1. p.2.

⁴² OLIVEIRA, clarice de; AMARAL-SOBRINHO, Nelson M.B.; MAZUR, Nelson; SOARES-DOS SANTOS, Fabiana. Solubilidad de cadmio y zinc en suelos agrícolas tratados con lodo residual enriquecido. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo. México:2003. vol. 21, núm. 3. E-ISSN: 2395-8030. p.355.

Tabla 25. Cadmio Total

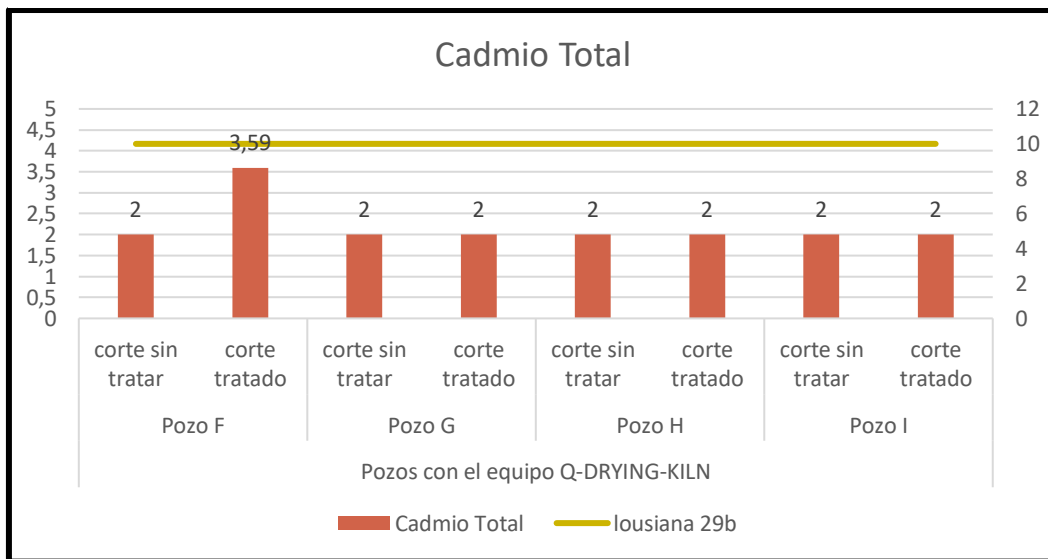
parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Cadmio Total	Digestión-AA- Llama Aire Acetileno	<2,0	3,59	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	10	-

Fuente: elaboración propia.

Tanto el cadmio como el arsénico son afectados fuertemente por el pH, su movilidad y solubilidad está fuertemente ligada a la variación de este. En la **tabla 25** se presentan valores menores a 2 ppm, esto es básicamente porque los recortes son alcalinos, es decir, tienen como resultado un pH alto lo que indica que los recortes no son de naturalidad ácidos y por eso, no ayuda a la solubilidad y movilización del cadmio en el medio, por lo tanto, En suelos alcalinos el cadmio precipita en forma de carbonatos y fosfatos insolubles, estos resultados cumplen con Lousiana 29b.

Los recortes del pozo F, después de pasar por la deshidratación con el horno se nota un aumento del 40%, esto se pudo generar porque el cadmio se encuentra también en el aire en forma de vapores provenientes de procesos de alta temperatura, esta variación se puede observar en el **grafico 7**.

Gráfico 7. Resultados del Cadmio.



Fuente: elaboración propia.

3.3.4 Calcio. El calcio en temas generales es un metal abundante en la corteza terrestre pero aun así no es toxico y se encuentra más que todo en forma sólida, el calcio entra a este análisis por distintos factores. A continuación, se mostrará en la **tabla 26** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro.

Tabla 26. Calcio Soluble

parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Calcio Soluble	Extracto con pasta de saturación--AA aire-acetileno	<20,0	23,625	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: elaboración propia

Como se aprecia en la **tabla 26**, los recortes del pozo G son los únicos que contienen cierta concentración de calcio con una variación del 11%, cabe resaltar que en los demás pozos no reportaron existencia calcio. Evidentemente no cabe l

duda decir que el calcio encontrado en los resultados es producto del tratamiento de deshidratación con cal viva, la cal viva o El óxido de calcio, es un material constructivo muy usado como agente deshidratante industrial. De acuerdo a ese orden de ideas, antes del tratamiento con el horno, los recortes fueron tratados o contaminados de alguna u otra forma con cal viva, entonces al momento que los recortes pasan por el horno y entran en contacto con la llama de calor y el proceso de alta temperatura, naturalmente el calcio como tal según estudios, puede ser un excelente catalizador en altas temperaturas y por lo tanto en este estudio⁴³, se puede observar que el calcio soluble aumenta después de entrar al horno y ser tratado térmicamente, en lousiana 29b no está especificado el límite de este parámetro, por tal razón solo se observa la presencia de calcio en un solo pozo para los demás fue un valor insignificante.

3.3.5 Conductividad Eléctrica. La conductividad eléctrica se ve afectada por el proceso del horno en su primera etapa, Los recortes se encuentran en un constante movimiento y por eso hay un mayor número de iones dispuestos a la conducción de energía, debido a la acción de fuerzas térmicas y de convección por la transferencia de calor que se presenta en el medio, en este caso, el horno. A continuación, se mostrará en la **Tabla 27** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro.

⁴³ Superficies y vacío: *Efecto del tratamiento térmico de cal hidratada sobre la producción de biodiesel empleando aceite quemado de soya y etanol*. Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales. Puebla, México: BUAP, Vol. 3 No. 1-2010. (S) 98-103. p.4.

Tabla 27. Conductividad Eléctrica

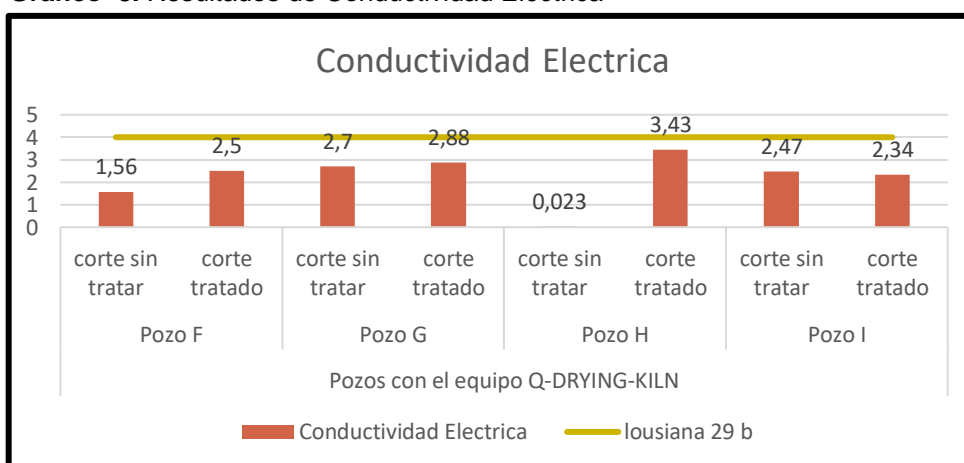
parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Conductividad Eléctrica	Pasta de saturación, Electrometría	1,56	2,5	2,7	2,88	0,023	3,43	2,47	2,34	4	-

Fuente: elaboración propia.

Al finalizar el proceso, estos recortes tienen una mayor conductividad eléctrica que al principio del proceso, se observa, que los resultados con los métodos convencionales son menores en relación con los del equipo. Hay que tener en cuenta que la conductividad después de que los recortes se encuentran en su disposición final llega a estabilizarse hasta el punto de equilibrio con el medio ambiente. Otra razón muy importante es que la conductividad eléctrica tiene una relación directa con la concentración del compuesto que se está analizando, mientras la concentración del compuesto aumenta también la conductividad tiende a aumentar.

En el pozo F tiene una variación del 32.7 %, el pozo G del 4.5%, el pozo H aumento considerablemente, y el pozo I del 3.8%; después de analizar la variación de todos los pozos se obtuvo una variación general del 36.7 %, por lo tanto se puede decir que por causa de la temperatura a la que se ven expuestos los recortes de perforación afecta radicalmente a la conductividad generando un aumento después del proceso; aunque el equipo aumente la conductividad eléctrica este parámetro sigue cumpliendo el protocolo de lousiana 29b. Esto se puede observar en el **Gráfico 8**.

Gráfico 8. Resultados de Conductividad Eléctrica



Fuente: elaboración propia.

3.3.6 Cromo Total y Hexavalente. El cromo tiene una absorción en la tierra, la absorción de cromatos aumenta con la disminución del pH, las tierras que contienen altas concentraciones de aluminio y óxidos de hierro presentan una gran absorción de Cr (VI), las especies de Cr (VI) compiten con los sulfatos (SO_4^{2-}) y el carbón inorgánico por los mismos sitios de adsorción⁴⁴. Cabe resaltar que la técnica utilizada es la colorimetría en pasta de saturación porque estos valores tienden a ser constantes llegando a límites mínimos, por ende, esta técnica ayuda al equilibrio y a erradicar una posible incertidumbre en los resultados. Este procedimiento presenta adecuadas características de desempeño, por lo que puede definirse como un método preciso. A continuación, se mostrará en la **Tabla 28** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro.

Tabla 28. Cromo Hexavalente y Cromo Total

parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Cromo Hexavalente	Extracción en pasta de saturación, Colorimetría	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	-	-
Cromo Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	500	-

Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver en la **Tabla 28** Se observa que el método no presenta tendencia alguna que indique sesgos ni errores sistemáticos apreciables con los resultados del cromo total y hexavalente. El cromo en su forma más general sigue constante y bajo la regulación de lousiana 29b. Las circunstancias externas que afectan al cromo, en este caso no son importantes para que este aumente. El cromo tiene una absorción en la tierra, la absorción de cromato aumenta con la disminución del pH y ayuda a que la reacción redox se mantenga en equilibrio para que no ceda electrones y que el nivel de oxígeno disminuya para que la biodisponibilidad del cromo no aumente, es decir, El cromo hexavalente que es mucho más toxico que el cromo total o cromo con estado (III), no se pueda solubilizar con la materia orgánica presente. La disminución del pH entonces va ligado sumamente a las altas temperaturas que se manejan en el horno, este parámetro es inversamente proporcional a la temperatura y es por esto que en comparación con los métodos convencionales ya no se presentan alteraciones y por ende las concentraciones permanecen constantes.

⁴⁴ CORTINA PALLÁS, José Luís. Evaluación de las tecnologías de tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con Cromo.[en línea].tesis.Universitat politecnica de catalunya.Barcelona.2006[consultado 24,mayo,2020].Disponible: <http://hdl.handle.net/2099.1/3153>

3.3.7 Grasas y Aceites. La alta temperatura que juega un papel muy importante puede afectar estrictamente la viscosidad y el pH de las grasas impregnadas a estos recortes, siguiendo este orden de ideas, es mucho más fácil de remover este contaminante por el efecto de gravitacional y el movimiento que constantemente tienen estos recortes dentro del horno. Estas grasas y aceites se evaporan o simplemente salir por la tercera fase que son los Hidrociclones, es decir, no hay oportunidad de que este parámetro se exceda o quede sobre los recortes porque anteriormente debe pasar por tres etapas de secado. A continuación, se mostrará en la **Tabla 29** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro.

Tabla 29. Grasas y Aceites.

parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Grasas y Aceites	Extracción por Ultrasonido- Infrarrojo	0,484	0,288	0,127	0,159	0,018	0,192	0,126	0,129	1	-

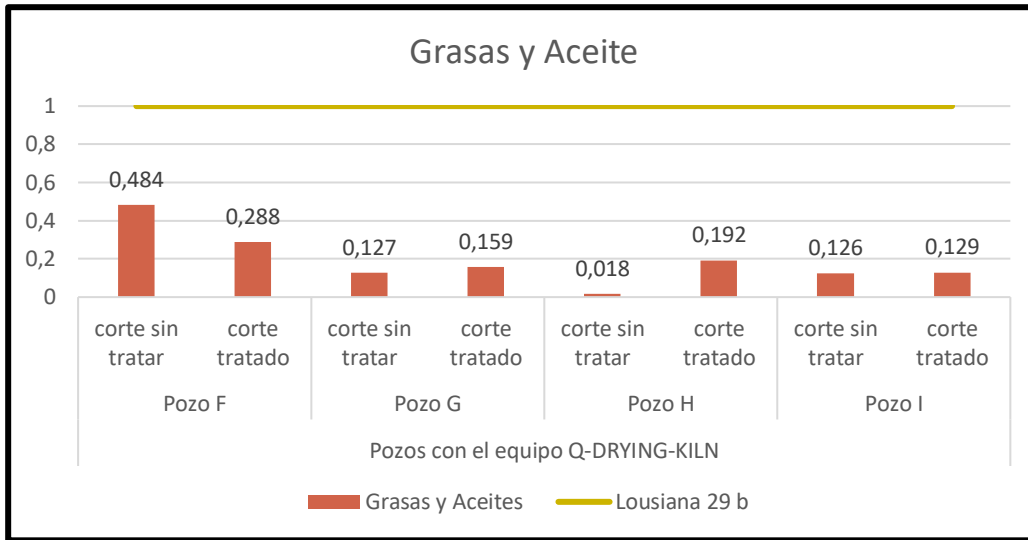
Fuente: elaboración propia.

Las altas temperaturas que se maneja en el horno deshidratador juegan un papel muy importante en la afectación o mejor, la erradicación de las grasas y aceites; puede afectar estrictamente la viscosidad y el pH de las grasas impregnadas a estos recortes, siguiendo este orden de ideas, es mucho más fácil remover este contaminante por efecto gravitacional y el movimiento que constantemente tienen estos recortes dentro del horno. Los valores deducidos fueron superiores a 0.050, sin efecto estadísticamente significativo por tanto en todos los datos obtenidos e investigados dan un nivel de confianza del 95%. Según esto, la concentración de grasas y aceites pueden bajar hasta un 50% como se observa en los recortes del pozo F, y de manera general, reducir al máximo estos valores.

Los recortes en el pozo F se obtuvo una disminución del 36%, en el pozo G la concentración de grasas y aceites decrece en un 15.8% y en el pozo I se reduce en un 1.6%, no obstante, en el pozo H se tiene un aumento considerable posiblemente a que estos cortes tuvieron contacto con algún hidrocarburo o derivados del petróleo que tienden a estar muy cercanos a los recortes de perforación al momento de depositarlos en el Zodme lo que causo este aumento en la concentración.

En la **gráfica 9** se puede observar aun la reducción en los valores de grasas y aceites. Este es uno de los parámetros más importantes para demostrar la eficiencia del horno Q Drying Kiln y se concreta que las concentraciones no tienen ningún motivo de contaminación y que cumplen con el protocolo lousiana 29b.

Gráfico 9. Grasas y Aceites



Fuente: elaboración propia.

3.3.8 Hidrocarburos Totales. “El tipo de suelo -arena, limo y arcilla- y la cantidad de materia orgánica existente determinan el destino de los hidrocarburos del petróleo y la extensión del daño a las plantas. La presencia de estos contaminantes ha dado lugar a la pérdida de la fertilidad del suelo, bajo rendimiento de cosechas, y posibles consecuencias perjudiciales para los seres humanos y el ecosistema entero”⁴⁵.

A continuación, se mostrará en la **tabla 30** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro.

Tabla 30. Hidrocarburos Totales

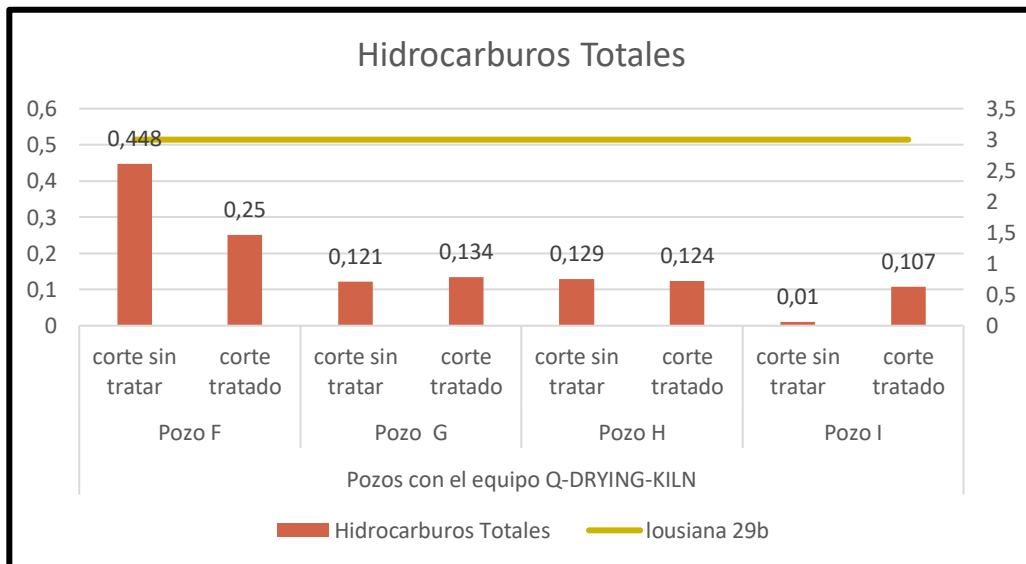
parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Hidrocarburos Totales	Extracción por Ultrasonido-Infrarrojo	0,448	0,25	0,121	0,134	0,129	0,124	<0,01	0,107	-	-

Fuente: elaboración propia.

⁴⁵ VELÁSQUEZ ARIAS, Johana Andrea. Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.UNAD.2017. Volumen 8 Número 1. ISSN 2145-6097.p.156.

En la interpretación de los resultados, los hidrocarburos totales tienen La saturación de las bases representa el porcentaje de los sitios de intercambio en el suelo y recortes ocupados por los compuestos refinados del petróleo que se encuentran en la zona. Los recortes del pozo F presentan una disminución del 40.1% cuando los recortes son deshidratados por el equipo, gracias a sus fases obligatorias de deshidratación la concentración de aceites se erradica por completo, gracias a que también el equipo es totalmente hermético, lo cual conlleva a pensar que hay un típico tratamiento al vacío donde el equipo succiona toda clase de impurezas que puedan impregnar los recortes de perforación, como también puede pasar con los recortes del pozo H que también reduce un 2.8%. En el pozo G aumenta un 7.2% y en el pozo I de 14% y se debe a que el corte tuvo contacto con un derivado del hidrocarburo lo que causo este aumento al momento de realizar el respectivo análisis de laboratorio, después de obtener esta variación por pozo se procedió a calcular promedio que es de 41.8% estos, al observar los resultados de cada pozo se observan valores por debajo de 0.7, estos cumplen con el protocolo de Louisiana 29 b que es menor a 3, estos resultados se pueden observar en el **Gráfico 10**.

Gráfico 10. Resultados de Hidrocarburos Totales



Fuente: elaboración propia.

3.3.9 Humedad Higroscópica. En los suelos, la humedad higroscópica se define como el contenido de agua que se obtiene al establecer la diferencia de peso entre un suelo seco al aire, y un suelo secado en estufa a 105 - 110 °C, referido al peso seco y expresado en porcentaje (Fairbridge, 1979). También se expresa como la máxima cantidad de agua que pueden absorber las partículas del suelo por medio de las fuerzas de adsorción, al ponerse en contacto con una atmósfera saturada de vapor de agua (humedad relativa del 100%), a una temperatura determinada. (Hillel, 1998)⁴⁶. A continuación, se mostrará en la **Tabla 31** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro

Tabla 31. Humedad Higroscópica

parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Humedad Higroscópica	Gravimétrico	1,2	1,07	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: elaboración propia.

En la **tabla 31** se puede observar como el pozo F es el único que reporta humedad higroscópica con una disminución de 8%, en los demás pozos este parámetro no se reporta debido a que es mínimo o insignificante para ser detectado.

3.3.10 Humedad Natural. A partir de este análisis se evidencia en primera plana una de las más importantes ventajas que el horno Q-Drying-Kiln frente a los otros métodos de deshidratación con respecto a su función principal que es remover un gran porcentaje de humedad a los recortes de perforación. A continuación, se mostrará en la **Tabla 32** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro.

Tabla 32. Humedad Natural

parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Humedad Natural (%)	Gravimétrico	86,1	7,22	68,6	13,4	71,6	12	72,7	13,5	50	-

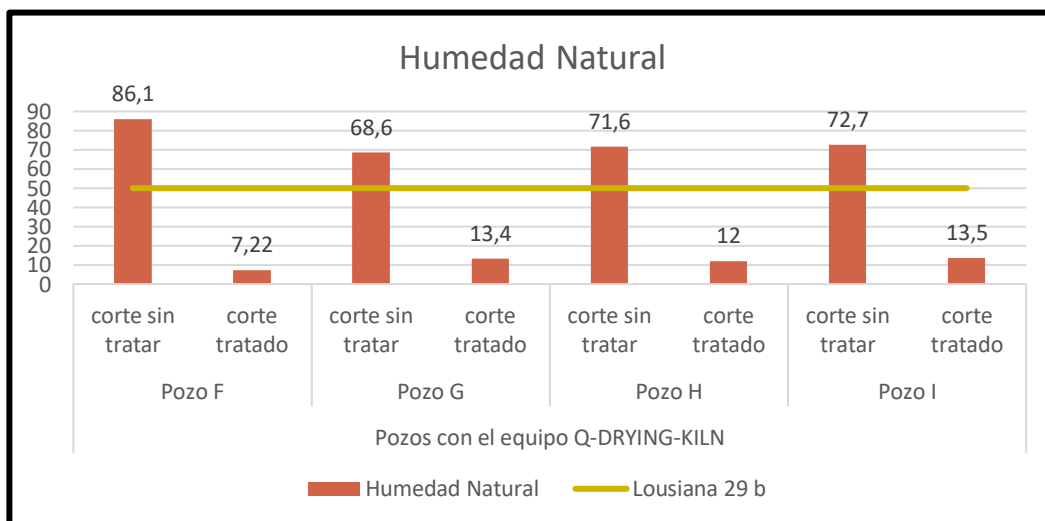
Fuente: elaboración propia.

⁴⁶ DÍAZ ORTIZ, Jaime Ernesto. Propuesta metodológica para determinar el potencial de humedad de un material granular a partir de la humedad relativa. Volumen.7, No. 1.2005.

Como se puede observar en la **Tabla 32**, el porcentaje de remoción de la humedad de estos recortes puede alcanzar hasta un 80%, es un valor nunca antes visto en la industria, generalmente los recortes antes de cualquier tratamiento llegan con un porcentaje de 70% de humedad y al momento de entrar al proceso de deshidratación con el horno, resultan con un máximo de 2% de humedad. Su eficiente desempeño para remover la humedad, se da gracias a lo que se menciona anteriormente, y es gracias a la llama de fuego que interactúa directamente con los recortes de perforación sin generar ninguna complicación o emisión de gases para el medio ambiente. Gracias al movimiento continuo y el Angulo de buzamiento del horno, ayuda a que los recortes tengan contacto físico en todo momento y así tratar estos recortes de forma específica. También incide mucho el tiempo en que estos recortes están el horno, mediante sensores o controladores que supervisan la temperatura y también el tiempo de instancia permiten que los cortes tengan un tiempo adecuado sin llegar sufrir algún exceso de incineración con el fin de que estos resulten lo más parecido a cenizas y sea más fácil confinarlos en su disposición final, además de reducir el área y volumen para su disposición debido a esta reducción.

En la **Gráfico 11** se puede observar como en los pozos F, G y H tienen una gran reducción en este parámetro, en el pozo F tiene una disminución del 100%, en el pozo G del 95% y el pozo H e I de 100%, se obtuvo un después de obtener estas variaciones se procedió a realizar este cálculo para obtener un valor general para los 4 pozos con una variación del 82%, por lo tanto este valor indica la efectividad que tiene el equipo con respecto a la humedad Natural además de que estos valores están cumpliendo con el protocolo de lousiana 29 b que expide un valor mínimo de 50%.

Gráfico 11. Resultados de Humedad Natural



Fuente: elaboración propia.

3.3.11 Magnesio soluble, Mercurio Total y Plata Total. Estos metales son perjudiciales para la salud y también en grandes cantidades puede contribuir a formar una lixiviación, esto se debe evitar por lo tanto sus cantidades deben ser mínimas. A continuación, se mostrará en la **Tabla 33** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro.

Tabla 33. Mercurio Total, Plata Total y Magnesio Soluble.

parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Magnesio Soluble	Extracto con pasta de saturación--AA aire-acetileno	<4,00	<4,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Mercurio Total	Espectrofotometría de Absorción atómica- Vapor frio	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	10	-
Plata Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	200	-

Fuente: elaboración propia.

En la **tabla 33** muestra que sus valores en cualquier método de deshidratación serán constantes y en algunos casos puede incrementar por la volatilización que el pH, por el momento se puede decir que estos parámetro no son de gran influencia para una posible contaminación, sin embargo se debe mantener supervisado y mantenerlo sobre muy bajos niveles respecto a lousiana 29b; El mercurio es una excepción pero debe estar en bajas proporciones también, porque como se conoce, el mercurio cuando tiene contacto con el suelo, por ejemplo cuando el Hg tiene contacto con ambientes reductores y/o suelos sulfuros se puede formar sulfuro de mercurio, que es un forma poco móvil y poco reactiva⁴⁷. Existen algunos factores que afectan al mercurio estos factores son el pH, el potencial redox, coloides del suelo (arcilla-materia orgánica), estos valores cumplen con el protocolo de lousiana 29 b.

⁴⁷ CAIZA CAIZA, Gisela F. Mercurio En El Suelo. Contaminación Y Remediación. Trabajo fin de grado. Universidad Complutense, Madrid: 2010. p. 9.

3.3.12 PH. Anteriormente se ha hablado de la importancia del pH en los metales y parámetros descritos y como los afecta. A continuación, se mostrará en la **Tabla 34** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro.

Tabla 34. pH

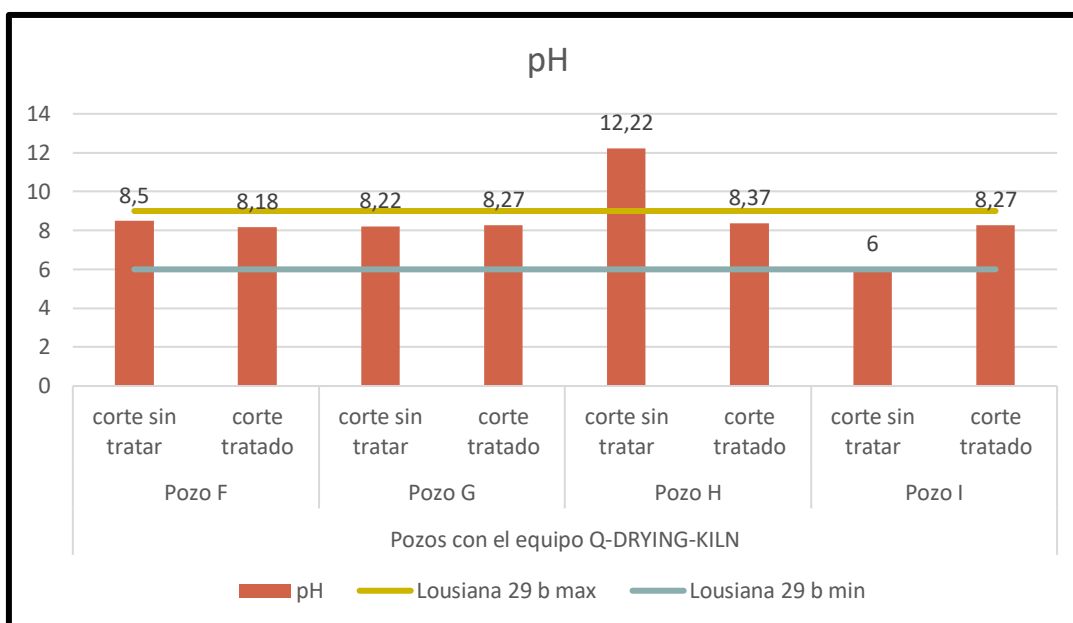
parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
pH	Electrometría	8,5	8,18	8,22	8,27	12,22	8,37	6	8,27	6 a 9	-

Fuente: elaboración propia.

A partir de la **Tabla 34** se puede evidenciar la tendencia a que el pH baje después de que los recortes son tratados por el equipo. El pH tiene una relación inversamente proporcional con la temperatura, cuando la temperatura aumenta las moléculas de hidrogeno y oxigeno se separan lo cual su potencial de hidrogeno disminuye. En algún caso puede aumentar como en el caso del pozo I debido a la forma en la que los recortes puedan añadirse a la materia orgánica presente, sin embargo, el aumento del pH en todo el caso es mínimo por lo tanto se puede considerar constante y recomendable para la práctica porque están bajo el límite del protocolo de lousiana 29b.

En el pozo F se obtuvo una disminución de 2.7%, el pozo G fue de 0.4%, el pozo H de 26.4% y en el pozo I se presentó un aumento de 22.4% y es debido a que donde se alojan los recortes son sistemas con altos valores de acidez intercambiable y ricos en Ca y Mg que corresponden a metales que se encuentran de forma natural; También el aumento es debido a que la interacción con materia orgánica aumenta porque se puede dar el caso que los recortes que aún no han sido deshidratados tienen un contacto tanto directo como indirecto y esto puede ocasionar un aumento de potencial de oxígeno e hidrogeno por el ambiente aeróbico en donde están depositados. Después se procedió a calcular una varianza de los cuatro pozos para tener un valor más acertado para este parámetro y la variación fue de 13%. Cuando se observa los resultados de este parámetro, estos encuentran dentro del límite del protocolo de lousiana 29b como se puede observar en el **Grafico 12**.

Gráfico 12. Resultados del pH



Fuente: elaboración propia.

3.3.13 Plomo total. Los minerales de plomo se encuentran en muchos lugares del mundo. El mineral más rico es la galena (sulfuro de plomo) y constituye la fuente principal de producción comercial de este metal. Otros minerales de plomo son: la cerusita (carbonato), la anglesita (sulfato), la corcoita (cromato), la wulfenita (molibdato), la piromorfita (fosfato), la mutlockita (cloruro) y la vanadinita (vanadato).⁴⁸ A continuación, se mostrará en la **Tabla 35** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro.

Tabla 35. Plomo Total.

parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Plomo Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	45,9	54,6	500	-

Fuente: elaboración propia.

⁴⁸ MD, John Finklea, COPPÉE, Georges H, HUNT, Vilma R, S. KRAUS, Richard, LAURIG, Wolfgang, MESSITE, Jacqueline, L. SAUTER, Steven, SPIEGEL, Jerry, L. SOSKOLNE, Colin, TERRACINI, Benedetto, L. MYERS, Melvin. metales: propiedades químicas y toxicidad. EN: enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. 1ª edición. Madrid. Chantal Dufresne, BA. 2001. 63.39.

En la **Tabla 35** se puede observar los resultados para cada pozo, en los pozos F, G y H los valores son menores a 20 ppm por lo tanto son muy pequeños y en el pozo I tiene una particularidad porque este valor aumenta después que el corte ha sido tratado por el equipo, hay que tener en cuenta que este parámetro puede verse afectado por condiciones externas al proceso como por ejemplo la lluvia, aire que transporta a este elemento. A pesar de esta excepción los valores cumplen con el protocolo de lousiana 29b.

3.3.14 PSI y RAS. Inicialmente el PSI y el RAS de los recortes estaban entre 6% y 15% lo que afectaba de manera desfavorable el suelo donde estaban y por lo tanto un alto potencial osmótico, es decir, la sodicidad de estos pueden llegar a afectar el entorno si no se hace algún tratamiento. A continuación, se presentan en los resultados obtenidos en la **Tabla 36**.

Tabla 36. PSI y RAS

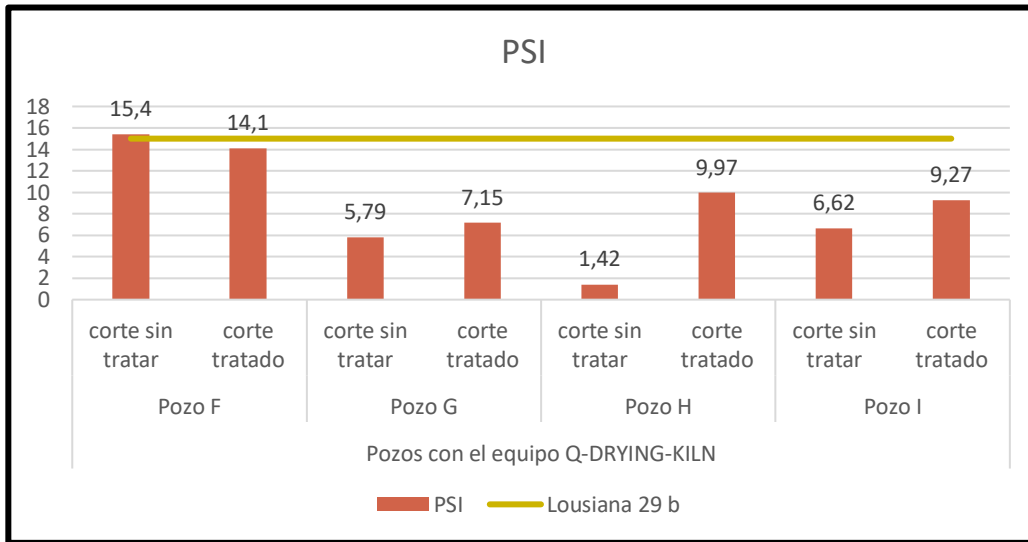
parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
PSI	Calculo	15,4	14,1	5,79	7,15	1,42	9,97	6,62	9,27	15	-
RAS	Solubles en pasta de saturación (Ca ⁸⁺ ,Mg ²⁺ y Na ⁺)	11,2	10	3,21	4,23	0,101	6,46	3,64	4,41	12	-

Fuente: elaboración propia.

Al momento que los recortes entran al horno, se puede observar en la **Tabla 36** que los valores disminuyen potencialmente, esto se da porque el pH de los recortes baja en un 10%, que es muy bueno. Es importante mantener los niveles de sodio siempre bajos, evitar que los poros del suelo se cierren y ocurra pérdida de minerales en la zona. Estos dos parámetros están muy ligados al pH y por lo tanto Cuando el suelo se seca, el Calcio y el Magnesio se precipitan fuera de la solución del suelo. Gracias a la alta temperatura con la que trabaja el horno, no permite que haya alteración de minerales o alguna actividad biológica en los recortes y no hay intercambio catiónico con otros metales.

En el parámetro de PSI (Porcentaje de sodio Intercambiable) para el pozo F se obtuvo una disminución del 6.2%, en el pozo G tuvo una reducción de 14.8%, en el pozo H tuvo un aumento considerable y para el pozo I un incremento del 23.5%; generando así una variación general de este parámetro de 37.7%. Teniendo estas variaciones respecto al corete sin tratar y tratado con el equipo, se observa en el **Grafico 13** como estos resultados cumplen con el protocolo lousiana 29b.

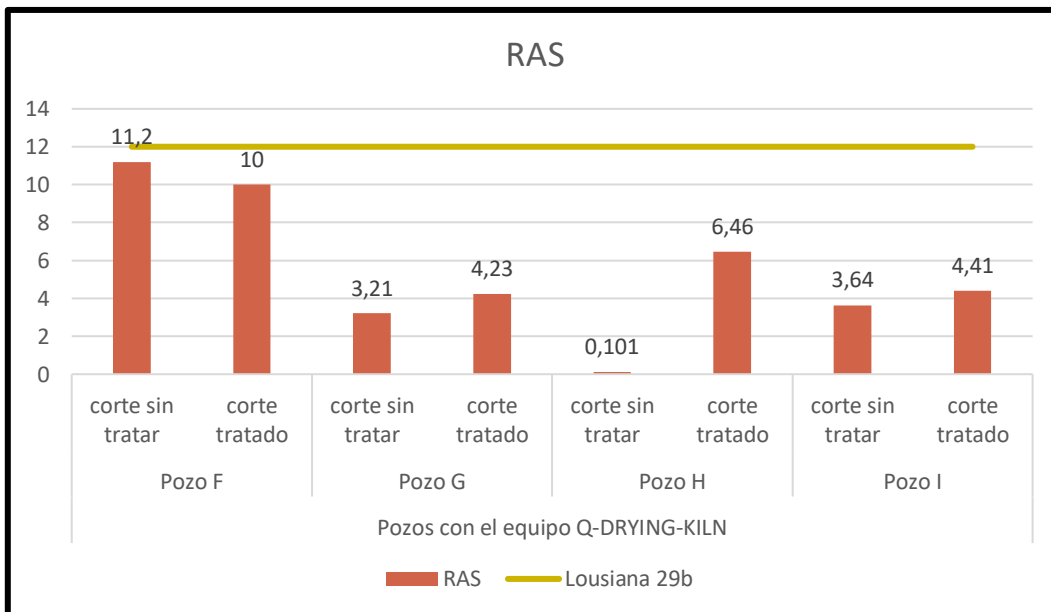
Gráfico 13. Resultados PSI



Fuente: elaboración propia.

Para el caso del RAS, el pozo F tuvo una reducción de 8%, el pozo G aumento un 19%, en el pozo H se incrementó en un 100% y en el pozo I aumento considerablemente en 13.5%, para obtener una variación total de los cuatro pozos de 44.5%. en el **Gráfico 14** se puede observar los resultados de este parámetro que cumplen con el protocolo de lousiana 29 b.

Gráfico 14. Resultados de RAS



Fuente: elaboración propia.

3.3.15 Selenio Total. El selenio ocurre naturalmente en el ambiente y puede ser liberado desde procesos tanto naturales como de manufactura, el polvo de selenio puede entrar al aire al quemar carbón y petróleo. Este polvo de selenio se depositará eventualmente sobre la tierra y el agua, también entra al agua desde las rocas y el suelo, y desde desperdicios agrícolas e industriales. Algunos compuestos de selenio se disolverán en el agua y algunos se depositarán en el fondo en forma de partículas⁴⁹. A continuación, se mostrará en la **Tabla 37** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro.

Tabla 37. Selenio Total

parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Selenio Total	Digestión-AA- Generación de hidruros	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	10	-

Fuente: elaboración propia.

Para la interpretación de resultados se usó la técnica de digestión AA y se lleva a cabo en la muestra filtrada para determinar los metales solubles en este caso el selenio, o en la muestra sin filtrar sometida a digestión ácida. En la **tabla 37**, se puede observar que los resultados de Selenio Total son menores a 0.5 ppm y se infiere que no hay diferencias significativas. La temperatura ambiente ayuda a que la concentración del selenio no tenga solubilidad con los demás componentes y metales porque las temperaturas bajas y/o estables previenen la interacción de iones de Selenato y así no haya la suficiente energía de interacción. Además, hay que recordar que las grandes concentraciones del Selenio se encuentran en rocas limolitas, en este estudio el tipo de roca es sedimentaria, por lo tanto, sus valores también tienden a disminuir. Existe un comportamiento simétrico en las distribuciones de los datos de concentración, lo que indica que existe una leve variación espacial de los contenidos de selenio; esto es de esperarse si se tienen en cuenta que estos suelos No varían en su composición ni en su grado de evolución. En todos los pozos se presenta un valor estable antes y después de este por lo tanto el equipo no afecta este parámetro, además de que estos valores cumplen con el protocolo de lousiana 29b.

⁴⁹ Resumen de salud pública: *Selenio*. ATSDR. EE.UU.: Departamento de salud y servicios humanos. 2003. CAS#: 7782-49-2. p.2.

3.3.16 Zinc Total. El Zinc es uno de los metales menos comunes en la corteza terrestre, la presencia del zinc se le atribuye más que todo a causas no naturales, por ejemplo, practicas industriales en donde la excepción no es la de los hidrocarburos. A continuación, se mostrará en la **Tabla 38** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro.

Tabla 38. Zinc Total

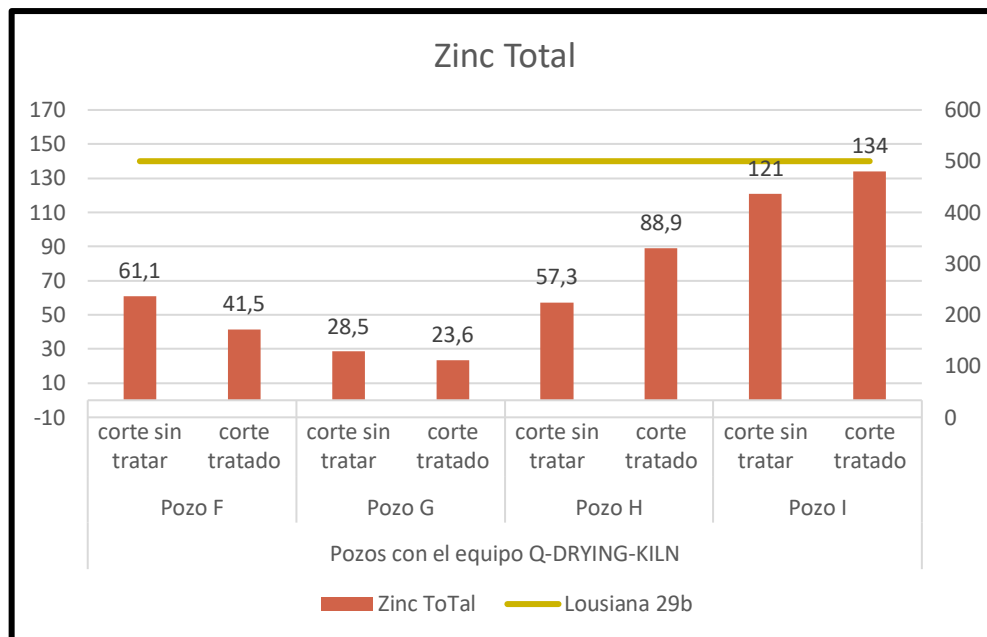
parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Zinc Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	61,1	41,5	28,5	23,6	57,3	88,9	121	134	500	-

Fuente: elaboración propia.

Para analizar este parámetro, en la **Tabla 38** se puede apreciar en dos resultados diferentes. En el primer reporte que son los pozos F Y G, se encuentra una disminución del zinc cuando es tratado por el horno. Por otra parte, se observa que en los pozos H e I, la concentración del zinc aumenta. De acuerdo con este orden de ideas, uno de los factores que afecta la concentración del zinc es la relación con la materia orgánica, que aumenta la fracción residual de ambos, indicando que decreció la solubilidad de los metales. La alta concentración de Zn se le atribuye a la incorporación de compuestos inorgánicos. En el pozo F disminuyo un 27 %, el pozo G tuvo una reducción del 13.3%, en el pozo H aumento 30.5% y en el Pozo I se incrementó 7.2 % esto se debe a las causas mencionadas anteriormente, para los cuatro pozos se obtienen una variación general de 19.5%.

En el **Grafico 15** se puede observar los resultados obtenidos para el Zinc, y también se puede ver que los valores cumplen con el protocolo de lousiana 29b.

Gráfico 15. Resultados Zinc Total



Fuente: elaboración propia.

3.3.17 TCLP. Los metales que se extraen por TCLP no sufren algún cambio después del tratamiento con el horno, Lo importante en este caso es que su concentración este muy por debajo de los límites establecidos por el decreto 4741 del 2005, además, no permitir que los recortes no tengan alguna relación con materia orgánica y mucho menos que después en el confinamiento final, la humedad no aumente por cuestiones meteorológicas en la zona y sea el culpable de una posible lixiviación. Por el momento los factores como la alta temperatura y el movimiento rotatorio no influyen ni afectan para remover el restante de metales que quedan adheridos a los recortes de perforación. A continuación, se mostrará en la **Tabla 39** los resultados obtenidos para cada pozo en este parámetro.

Tabla 39. TCLP.

Parámetro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
TCLP-Arsénico	Extracción, AA-Generación de hidruros	<0,00250	<0,00250	<0,00250	<0,00250	<0,00250	<0,00250	0,012	0,004	-	5
TCLP-Bario	Digestión Acido Nitríco-Espectrofotometría de absorción Atómica con llama directa oxido nitroso-Acetileno	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	100
TCLP-Cadmio	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-	1
TCLP-Cromo	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	5
TCLP-Mercurio	Digestión, AA-Vapor Frío	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	0,2
TCLP-Plata	Digestión de Absorción Atómica con llama directa Aire-Acetileno	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	5
TCLP-Plomo	Digestión Acido Nitríco-Espectrofotometría de absorción Atómica con llama directa oxido nitroso-Acetileno	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	5
TCLP-Selenio	Digestión-AA-Generación de hidruros	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	-	1

Fuente: elaboración propia.

3.3.18 Perfil de caracterización química para los pozos con el equipo Q-DRYING-KILN.

Tabla 40. Perfil de caracterización química para los pozos con el equipo Q-DRYING-KILN.

parametro	Técnica	Pozos con el equipo Q-DRYING-KILN								Lousiana 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
		F		G		H		I			
		C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T	C.S.T	C.T		
Arsénico Total	Digestión-AA-Generación de hidruros	1,04	2,46	<0,5	<0,5	1,93	1,76	4,4	3,76	10	-
Bario Total	Digestión Acido Nitrico-Espectrofotometría de absorción Atómica con llama directa oxido nitroso-Acetileno	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100	20000	-
Cadmio Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<2,0	3,59	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	10	-
Calcio Soluble	Extracto con pasta de saturación-AA aire-acetileno	<20,0	23,625	-	-	-	-	-	-	-	-
Conductividad Electrica	Pasta de saturación,Electrometría	1,56	2,5	2,7	2,88	0,023	3,43	2,47	2,34	4	-
Cromo Hexavalente	Extracion en pasta de saturación,Colorimetria	<4,00	<4,00	<4,00	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	<4,0	-	-
Cromo Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	500	-
Grasas y Aceites	Extracción por Ultrasonido-Infrarrojo	0,484	0,288	0,127	0,159	0,018	0,192	0,126	0,129	1	-
Hidrocarburos Totales	Extracción por Ultrasonido-Infrarrojo	0,448	0,25	0,121	0,134	0,129	0,124	<0,01	0,107	-	-
Humedad Higroscopica	Gravimétrico	1,2	1,07	-	-	-	-	-	-	-	-
Humedad Natural	Gravimétrico	86,1	7,22	68,6	13,4	71,6	12	72,7	13,5	50	-
Magnesio Soluble	Extracto con pasta de saturación-AA aire-acetileno	<4,00	<4,00	-	-	-	-	-	-	-	-
Mercurio Total	Espectrofotometría de Absorción atómica- Vapor frio	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	10	-
pH	Electrometría	8,5	8,18	8,22	8,27	12,22	8,37	6	8,27	6 a 9	-
Plata Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	<10,0	200	-
Plomo Total	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	<20,0	45,9	54,6	500	-
PSI	Calculo	15,4	14,1	5,79	7,15	1,42	9,97	6,62	9,27	15	-
RAS	Solubles en pasta de saturación (Ca8+,Mg2+ y Na+)	11,2	10	3,21	4,23	0,101	6,46	3,64	4,41	12	-
Selenio Total	Digestión-AA-Generación de hidruros	<0,500	<0,500	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	10	-
Zinc ToTal	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	61,1	41,5	28,5	23,6	57,3	88,9	121	134	500	-
TCLP-Arsénico	Extracción,AA-Generación de hidruros	<0,00250	<0,00250	<0,00250	<0,00250	<0,00250	<0,00250	0,012	0,004	-	5
TCLP-Bario	Digestión Acido Nitrico-Espectrofotometría de absorción Atómica con llama directa oxido nitroso-	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	-	100
TCLP-Cadmio	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-	1
TCLP-Cromo	Digestión-AA-Llama Aire Acetileno	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	5
TCLP-Mercurio	Digestión, AA- Vapor Frio	<0,001	<0,001	<0,0010	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	0,2
TCLP-Plata	Digestión de Absorción Atómica con llama directa Aire-Acetileno	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	5
TCLP-Plomo	Digestión Acido Nitrico-Espectrofotometría de absorción Atómica con llama directa oxido nitroso-	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	5
TCLP-Selenio	Digestión-AA-Generación de hidruros	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	<0,0025	-	1

Fuente: elaboración propia.

3.3.19 Resumen de los parámetros que tuvieron variación. Después de analizar los resultados obtenidos de los pozos que se deshidrataron con los métodos convencionales (Estabilización con Cal viva) y los recortes deshidratados con el equipo Q-DRYING-KILN se determinó los parámetros que tienen variación, en verde los que tienen una mejoría y en azul los valores que permanecen constantes según el protocolo de Lousiana 29b y el decreto 4741 del 2005. A continuación, se podrá observar las **tablas 41 y 42** con lo anteriormente mencionado.

Tabla 41. Parámetros de Lousiana 29b

PARAMETROS DE LOUSIANA 29B			
Arsénico Total	Cromo Hexavalente	Magnesio Soluble	PSI (Porcentaje sodio Intercambiable)
Bario Total	Cromo Total	Mercurio Total	RAS (relación de Sodio)
Cadmio Total	Grasas y Aceites	pH	Selenio Total
Calcio Soluble	Hidrocarburos Totales	Plata Total	Sodio Soluble
Conductividad Eléctrica	Humedad Natural	Plomo Total	Zinc Total

Fuente: elaboración propia.

Tabla 42. Parámetros del decreto 4741 del 2005.

Decreto 4741 del 2005	
TCLP-Arsénico	TCLP-Mercurio
TCLP-Bario	TCLP-Plata
TCLP-Cadmio	TCLP-Plomo
TCLP-Cromo	TCLP-Selenio

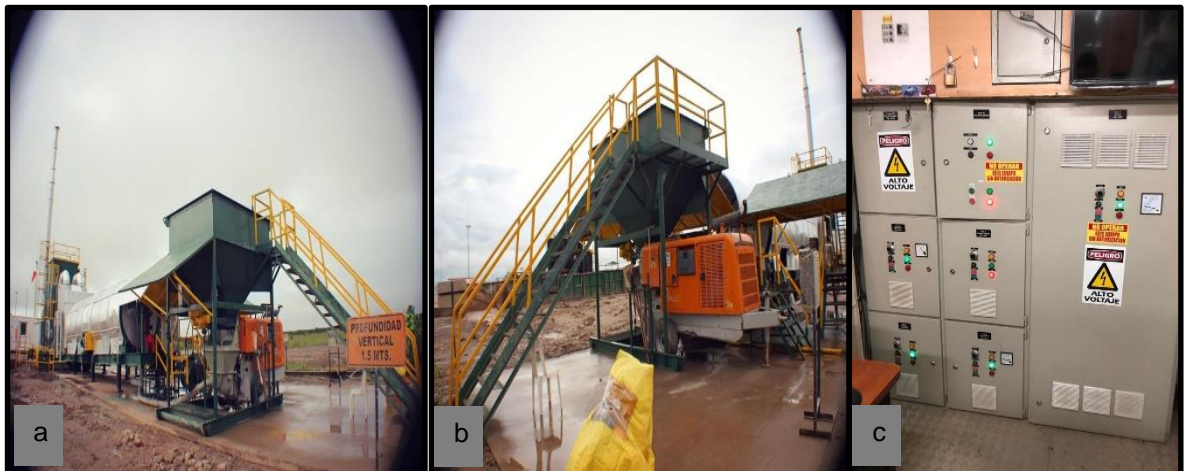
Fuente: elaboración propia.

3.4 EFICIENCIA EN LA DESHIDRATACION DE LOS CORTES DE PERFORACIÓN.

A continuación, se presentará el cálculo de la eficiencia del equipo Q DRYING KILN. Este capítulo se constituye de una breve descripción del equipo y la forma en cómo trabaja para deshidratar los recortes de perforación. Seguido de cálculos volumétricos para destacar la reducción de áreas y volúmenes y por último el cumplimiento a los límites destacados por Qmax.

3.4.1 Descripción general del Equipo Q-DRYING-KILN. El equipo Q-Drying-Kiln (**Figura 24a**), Mediante la bomba de transferencia que se encuentra en la **Figura 24b**. Recibe partículas de hasta de 1.5 pulgadas de diámetro con capacidad de bombeo de 40 m³/h y 1200 psi. Maneja tres velocidades óptimas de desempeño que funcionan en automático, semi-manual y manual para el manejo de los motores como se ve en la **Figura 24c**, contando con un aislamiento de temperatura mediante anillos, que hacen girar perfectamente sobre los cojinetes. Se basa en el principio de los hornos rotatorios convencionales de cementación.

Figura 24. Descripción General del Equipo



Fuente: elaboración propia.

3.4.1.1 Funcionamiento. Antes de que los recortes entren al equipo, una retroexcavadora realiza un proceso de homogeneización a los recortes, en la primera fase del proceso los recortes de perforación entran a la tolva, esta tiene en la parte superior una malla para evitar que entren impurezas al proceso además cuenta con un sistema de vibración para evitar que los recortes se acumulen, estos recortes son descargados en la bomba.

En la parte inferior de la tolva se encuentra una bomba, la función principal de esta es bombear los recortes hacia la entra del horno rotatorio.

El horno rotatorio tiene en su interior aspas, lo que facilita la movilización de los recortes y cuenta con una inclinación para asegurar que los recortes pasen por toda la longitud de este, en la entrada del horno tiene una llama directa que es alimentada por gas metano.

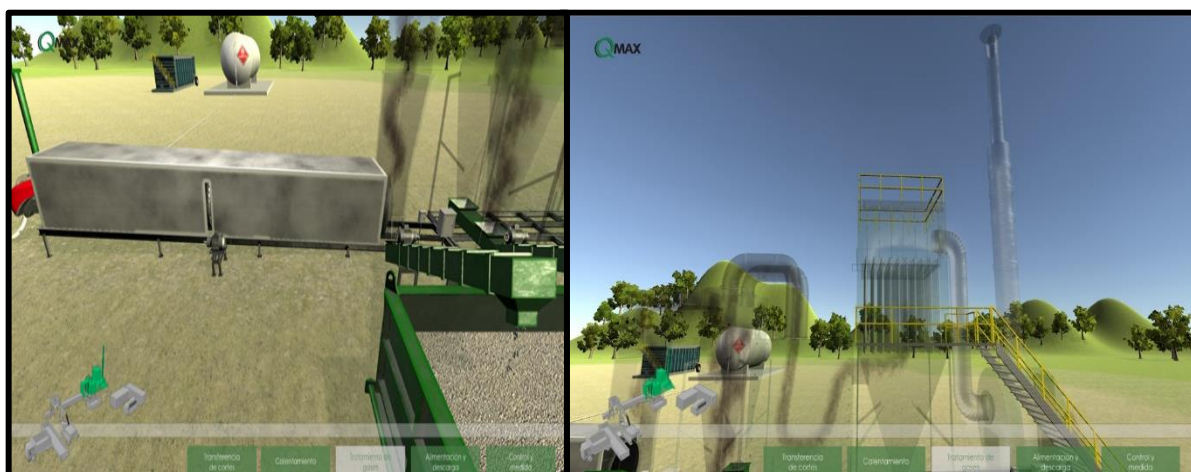
Después de que los recortes pasan por el horno rotario se encuentran con unos tornillos y se depositan en un cash tank, estos recortes son llevados por volquetas a su respectiva disposición final.

Teniendo en cuenta que todo el sistema es hermético, después de que los cortes pasan por el horno rotatorio se forma gas debido a la combustión generada por la llama directa y por ende queda material particulado más pequeño, la segunda fase del equipo está conformada por Hidrociclones, el material particulado más pesados son decantados y caen en un segundo tornillo para ser depositados en el cash tank, y el material particulado que no fue decantado por fuerzas centrifugas siguen a una tercera fase por tubos que se comunican con un sistema de mangas, las cuales retienen este material particulado.

Al final del proceso se cuenta con una bomba para despresurizar el sistema, luego de que las mangas retienen el material particulado. El gas y aire que se generó al principio del proceso es expulsado por una chimenea, este gas es descargado sin ningún material particulado y cumpliendo los parámetros atmosféricos.

A continuación, en el **Figura 25** se puede observar el proceso que tiene el material particulado en el equipo Q-DRYING-KILN.

Figura 25.Funcionamiento del Equipo Q-DRYING-KILN



Fuente: elaboración propia, con base en: software QMAX

El tiempo de residencia del corte en el horno depende de la humedad y el caudal de alimentación, este sistema posee una capacidad de procesamiento de 50 barriles por hora, de cortes de hasta 80% de humedad.

3.4.2 Eficiencia de los métodos convencionales. Se tuvo en cuenta la humedad de los cortes después de su proceso de deshidratación con los métodos convencionales, se conoce que la humedad natural de los cortes antes de ser tratados es de 80% como se puede observar en la **Tabla 43** se utilizó Cal Viva.

Tabla 43. Volúmenes producidos y tratados con métodos convencionales.

POZO	BARRILES PRODUCIDOS (BBL)	BARRILES DISPUESTOS (BBL)	HUMEDAD PROMEDIO ANTES DEL PROCESO (VOL%)	HUMEDAD PROMEDIO DESPUÉS DEL PROCESO (VOL%)
Pozo A	8200	5740	80	19,5
Pozo B	8200	4428	80	30,7
Pozo C	8200	4756	80	7,3
Pozo D	8200	4920	80	35,3
TOTAL	32800	14924	-	-
PROMEDIO		4961	80	23,2

Fuente: elaboración propia

En la **Tabla 43** se presenta los valores de los barriles producidos y los barriles dispuestos por cada pozo después de realizar el proceso de deshidratación. Se evidencia que la capacidad de reducción de volúmenes en los métodos convencionales se encuentra en el rango del 30-40%, obteniendo un total de 19.844 de barriles a disponer en su disposición final. La humedad es directamente proporcional al volumen, por lo tanto, esta presenta valores relativamente altos, la humedad promedio para estos pozos es del 20.1%.

3.4.3 Eficiencia del Equipo Q-DRYING-KILN. Para empezar el cálculo de la eficiencia se debe calcular los volúmenes de recortes de entrada y salida del tratamiento, teniendo en cuenta que el promedio de producción de recortes en los pozos del campo llanos 34 es de 8200 barriles por pozo, como se ve en la **Tabla 44**.

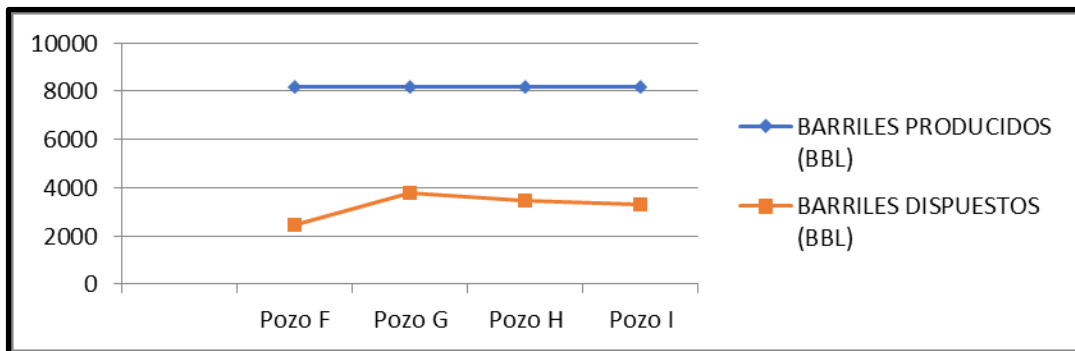
Tabla 44. Volúmenes producidos y tratados por el equipo Q-DRYING-KILN.

POZO	BARRILES PRODUCIDOS (BBL)	BARRILES DISPUESTOS (BBL)	HUMEDAD PROMEDIO ANTES DEL PROCESO (VOL%)	HUMEDAD PROMEDIO DESPUÉS DEL PROCESO (VOL%)
Pozo F	8200	2460	86,10	7,22
Pozo G	8200	3772	68,60	13,4
Pozo H	8200	3444	71,60	12,0
Pozo I	8200	3280	72,70	13,5
TOTAL	32800	12956	-	-
PROMEDIO		3239	75	12

Fuente: elaboración propia.

Según la **Tabla 44** El equipo Q-Drying-Kiln es un equipo de fácil operación, con altos estándares de HSEQ y se diseñó para obtener una reducción del volumen final máximo del 70%. en el **Gráfico 16** se puede evidenciar como se tiene una disminución del volumen de barriles tratados con respecto al volumen de barriles producidos.

Gráfico 16. Volúmenes producidos y tratados.



Fuente: elaboración propia.

La eficiencia, además, Se basa a partir de ciertos límites de contenido de algunos parámetros como: Conductividad, Grasas, TPH, Humedad, pH y PSI/RAS. Para esto, se calcula el coeficiente de variación con la **ecuación 11**, que estos puedan tener antes y después del tratamiento con el equipo usando los datos y la información anterior. El fin es cumplir con los límites acordados por la empresa Qmax Tal como se muestra en la **Tabla 45**.

Tabla 45. Límites de variación para el equipo.

PARAMETRO	ANTES	DESPUES	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE DE VARIACION (%VOL)	LIMITE (%VOL)
HUMEDAD NATURAL	59,75	12,08	33,71	93,85	70-80
CONDUCTIVIDAD	1,69	2,79	0,78	34,73	<40
pH*	8,74	8,27	0,33	3,85	<4
GRASAS Y ACEITES	0,19	0,19	0	1,21	<5
TPH	0,18	0,15	0,02	9,94	<15
PSI	7,31	10,12	1,99	22,84	<30
RAS	4,54	6,28	1,23	22,72	<30

Fuente: elaboración propia.

* Para el caso del pH la empresa definió este valor menor o igual a 9.

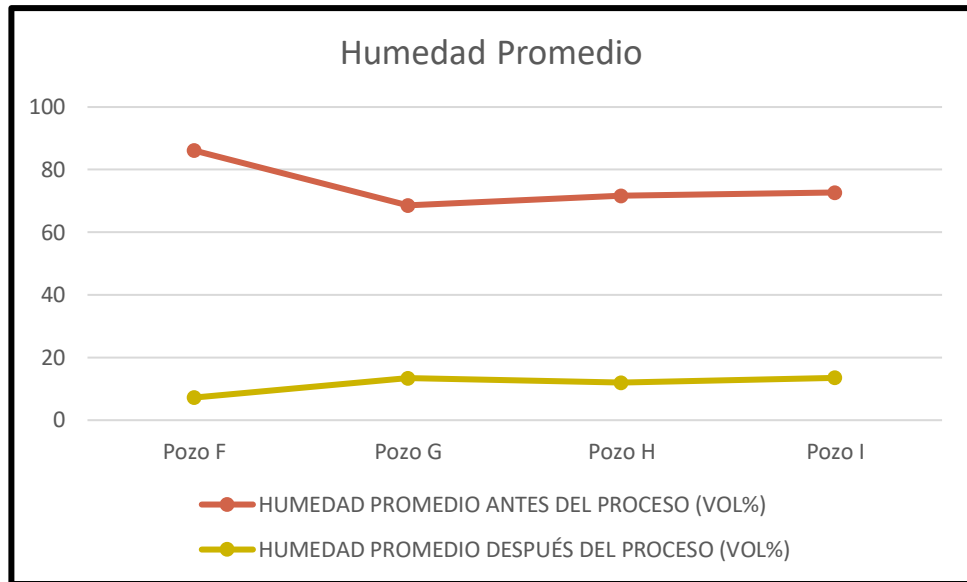
Ecuación 11. Coeficiente de variación.

$$CV = \frac{\text{desviacion estandar}}{\frac{X_n + X_{n-1}}{n}}$$

Fuente: elaboración propia.

Según la tabla anterior, los valores cumplen con el estándar acordado por la empresa y cabe destacar que en el caso de la humedad supera el límite en 14%. En el **Grafico 17** se puede observar como la humedad promedio antes del proceso se encuentra en un rango de 60 a 85% y después de realizar el tratamiento con el equipo Q-DRYING-KILN, se logra disminuir a un rango de 10 a 18%.

Gráfico 17. Humedad Promedio.



Fuente: elaboración propia.

A partir de la **Figura 26** se evidencia el aspecto de los recortes antes y después.

Figura 26. Aspecto de los recortes antes y después de pasar por el equipo.



Fuente: elaboración propia.

Para finalizar, se procede a disponer los recortes tratados por el equipo al Zodme, por medio de remolques esto se puede evidenciar en la **Figura 27**.

Figura 27. Disposición en el Zodme.

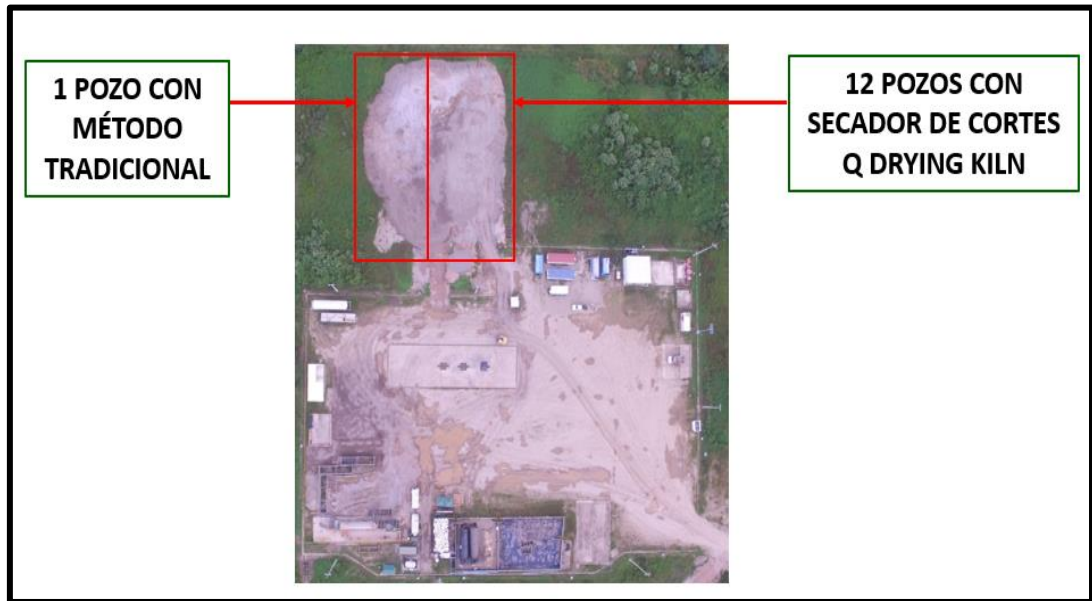


Fuente: elaboración propia.

En relación con lo anterior, el equipo no solamente favorece a la deshidratación de recortes, además, hace posible que los volúmenes de los recortes y las áreas de la disposición final se reduzcan de manera potencial, siendo más eficiente en la operación y transporte de los recortes y dar más beneficios a las operadoras.

Teniendo en cuenta la reducción en el porcentaje de humedad promedio, se analizó el volumen requerido para la disposición final de los recortes, este volumen se vio afectado porque como se muestra en la **figura 28**, con los métodos tradicionales o convencionales se requiere más área para esta disposición, en cambio con el equipo se puede utilizar la misma área para aproximadamente 12 pozos.

Figura 28. Área de disposición final de los recortes



Fuente: elaboración propia, con base en: QMAX.

A continuación, en la **Tabla 46**, se presenta el cálculo del área requerida para la disposición final, comparando los requerimientos que se necesitan para confinar los recortes de perforación después de que son tratados por medio de métodos convencionales.

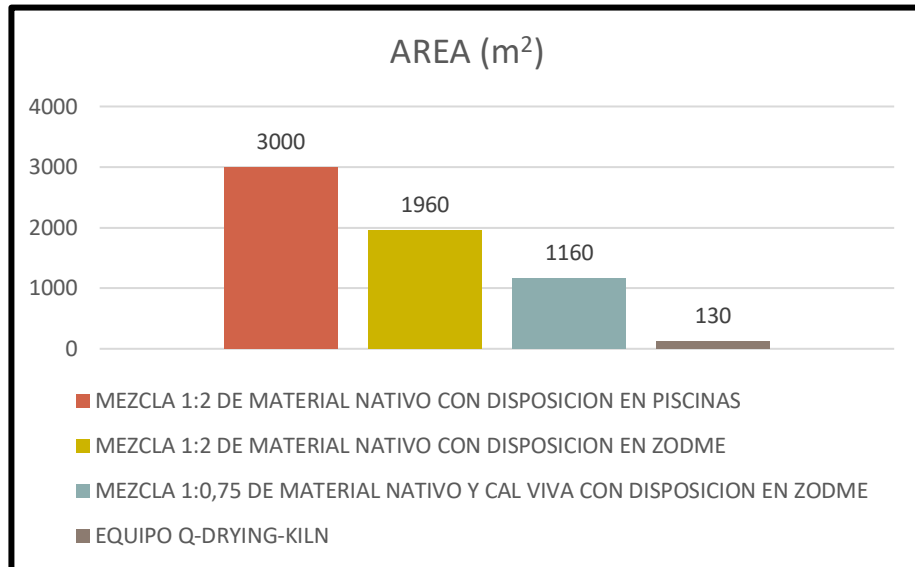
Tabla 46. Cálculo de área para disposición

	UNIDAD	MEZCLA 1:2 DE MATERIAL NATIVO CON DISPOSICION EN PISCINAS	MEZCLA 1:2 DE MATERIAL NATIVO CON DISPOSICION EN ZODME	MEZCLA 1:0,75 DE MATERIAL NATIVO Y CAL VIVA CON DISPOSICION EN ZODME	EQUIPO Q-DRYING-KILN
CORTE TRATADO	BARRIL	8200	8200	8200	8200
DIMENSIONES DE LAS PISCINAS CONTRUIDAS	METROS	40 X 25 X1,5	N/A	N/A	N/A
DIMENSIONES DEL ZODME	METROS	N/A	40 X 49 X 2	40 X 29 X 2	40 X 3,25 X 2
NUMERO DE PISCINAS REQUERIDAS	UNIDAD	2	N/A	N/A	N/A
VOLUMEN REQUERIDO PARA LA CONSTRUCCION DE PISCINAS	METROS CUBICOS	4500	N/A	N/A	N/A
AREA SUPERFICIAL REQUERIDA PARA LA DISPOSICION FINAL	METROS CUADRADOS	3000	1960	1160	130
CAL VIVA REQUERIDA	TONELADAS	N/A	N/A	56	N/A

Fuente: elaboración propia.

Se observa en la **Tabla 46** los valores de área superficial requerida para la disposición final, cuando se utiliza piscinas con una relación de 1:2 de material nativo como disposición final de los recortes es de 3000 m², para la disposición con Zodme en una relación de 1:2 con material nativo es de 1960 m², con una relación de 1:0.75 de material nativo es de 1160 m² y para el equipo Q-DRYING-KILN es de 130 m², por lo tanto, el área requerida se reduce en un mínimo del 12% el cual es un valor muy bueno para la operadora y para las prácticas que se llevan a cabo, y por ende reduce impacto visual y ambiental en la zona de operación.

Grafico 18. Resultados del área

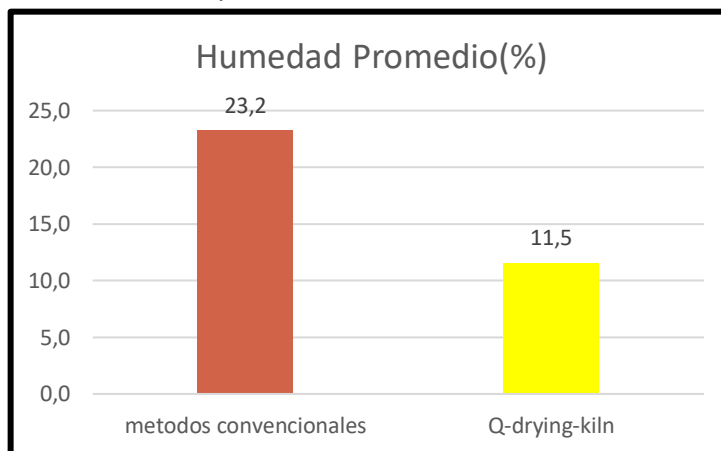


Fuente: elaboración propia.

En el **Grafico 18** se puede observar las variaciones en términos de área que tiene el equipo con respecto a las disposiciones finales que se llevan a cabo con los métodos convencionales, con un promedio de 93% en la reducción de área que tiene el equipo.

3.4.4 Comparación de la eficiencia con los métodos convencionales. Con los resultados anteriormente calculados, se procede a comparar la humedad promedio, volumen dispuesto y el área requerida para dar un mejor enfoque de los beneficios que ofrece el equipo Q-DRYING-KILN. A continuación, se presentan los **gráficos 19,20 y 21** con esta comparación.

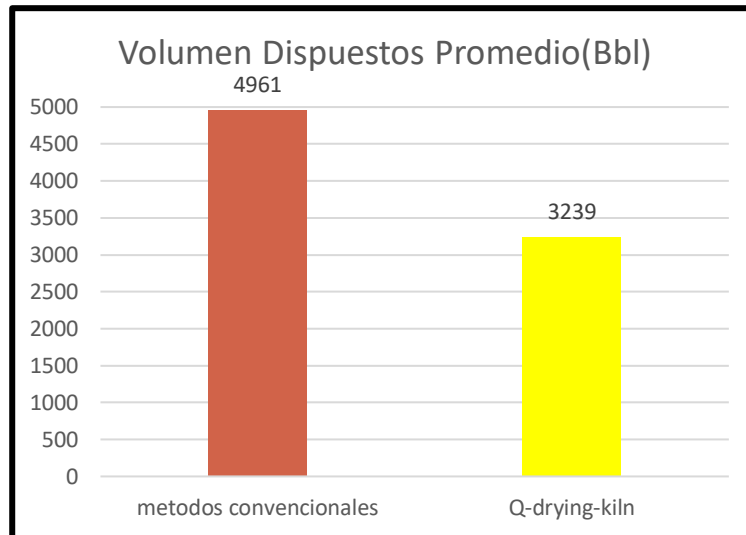
Gráfico 19. Comparacion de la humedad Promedio.



Fuente: elaboración propia.

En el **Grafico 19** se puede observar cómo se disminuyó la humedad promedio con una diferencia del 8% con respecto a los métodos convencionales, por lo tanto, el equipo tiene una eficiencia del 85% y en los métodos convencionales del 75 %.

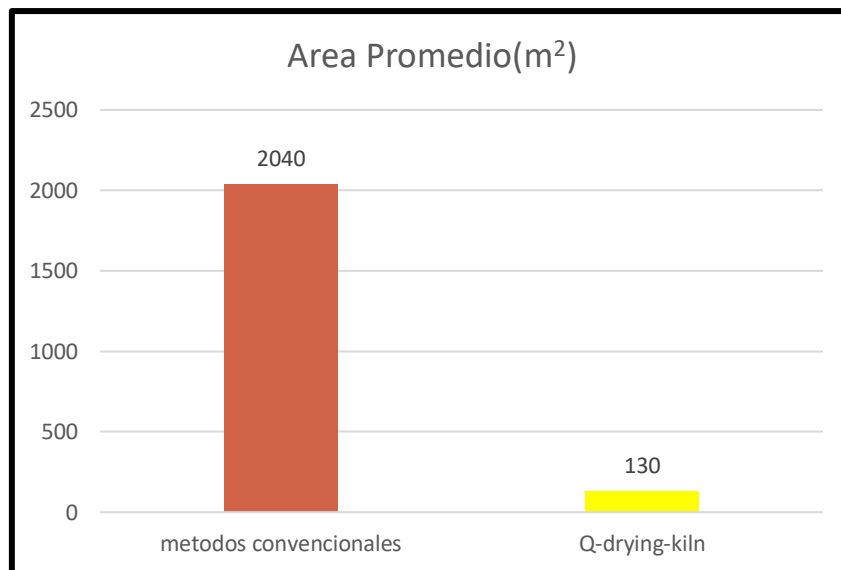
Gráfico 20. Comparación de volumen dispuesto.



Fuente: elaboración propia.

En el **Grafico 20** se puede observar cómo se reduce los volúmenes dispuestos para esta operación con una diferencia de 1722 Bbl, esto es significativo porque se disminuye la contaminación visual y ambiental.

Gráfico 21. Comparación de Área



Fuente: elaboración propia.

En el **Grafico 21** se evidenciar como se reduce el área promedio de disposición final de los cortes en un 98%, esto genera un beneficio óptimo para la empresa en cuestiones de costos y ambientalmente, porque se puede utilizar para más pozos

3.5 PRUEBAS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Para el desarrollo de las pruebas de estabilización de suelos in situ, se tomaron recortes de perforación correspondientes a 3 pozos diferentes de los que estaban anteriormente en estudio. Por cuestiones de confidencialidad (ver **Anexo A**), se procedió a cambiar los nombres de estos pozos, nombrándolos de la siguiente manera: A1, A2 y A3 correspondientes al campo “Bloque llanos 34”.

Cabe recordar, que estos recortes han sido tratados por el equipo Q-Drying-Kiln y confinados en el Zodme. Posteriormente se presentarán los volúmenes tratados por cada pozo en la **Tabla 47**.

Tabla 47. Barriles de recortes tratados.

POZO	BARRILES TRATADOS(BBL)
A1	5403
A2	6025
A3	6651
TOTAL	18079

Fuente: elaboración propia.

Se realizó un apique con una excavación de 1.50 metros en profundidad. Formando una especie de prisma con dimensiones de 30x30 centímetros, y se tomó porciones representativas del terreno para la realización de pruebas de laboratorio y determinar resultados de los siguientes parámetros mostrados en la **Tabla 48**.

Tabla 48. Pruebas de estabilización in situ.

PARÁMETRO	UNIDAD	POZO A1	POZO A2	POZO A3	LOUISIANA 29B	DECRETO 4741 DEL 2005
Arsénico Total	mg/kg ss	<0,5	<0,5	<0,5	10	-
Bario Total (Ba)	mg Ba/kg ss	<100	<100	<100	20000	-
Cadmio Total	mg/kg ss	<2,0	<2,0	<2,0	10	-
Conductividad Electrica	mmhos/cm	2,29	2,88	2,17	4	-
Cromo Hexavalente	mg/kg ss	<4,0	<4,0	<4,0	-	-
Cromo Total	mg/kg ss	<20,0	<20,0	<20,0	500	-
Grasas y Aceites	%	0,425	0,272	0,28	1	-
Hidrocarburos totales (TPH)	%	0,222	0,27	0,278	-	-
Humedad Natural	%	22	20,8	14,3	50,00	-
Mercurio Total	mg/kg ss	<0,2	<0,2	<0,2	10	-
Ph	Und de pH	9,11	8,65	8,17	6 a 9	-
Plata Total	mg/kg ss	<10,0	<10,0	<10,0	200	-
Plomo Total	mg/kg ss	<20,0	<20,0	39,5	500	-
PSI	%	13,3	13,8	1,28	15	-
RAS	Sin Und	9,28	9,69	6,73	12	-
Selenio Total	mg/kg ss	<0,5	<0,5	<0,5	10	-
Zinc Total	mg/kg ss	56,7	72,3	19,8	500	-
TCLP-Arsénico	mg As/L	<0,0025	<0,0025	<0,0025	-	5
TCLP-Bario	mg Ba/L	<0,5	<0,5	<0,5	-	100
TCLP-Cadmio	mg Cd/L	<0,0100	<0,0100	<0,0100	-	1
TCLP-Cromo	mg Cr/L	<0,100	<0,100	<0,100	-	5
TCLP-Mercurio	mg Hg/L	<0,0010	<0,0010	<0,0010	-	0,2
TCLP-Plata	mg Ag/L	<0,05	<0,05	<0,05	-	5
TCLP-Plomo	mg Pb/L	<0,1	<0,1	<0,1	-	5
TCLP-Selenio	mg /L	<0,0025	<0,0025	<0,0025	-	1

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la **Tabla 48**, el pH tiene altos valores indicando alta alcalinidad. La primera razón para atribuir al aumento del pH, es por condiciones meteorológicas en la zona donde hay poca probabilidad de lluvia, por lo tanto, en suelos formados con poca lluvia tienden a ser más alcalinos.⁵⁰ Cuando se utiliza el método para determinar el pH de relación 1:1 de suelo y agua, se toma una muestra heterogénea de recortes para diluir con agua; Esto crea una suspensión que afecta directamente el pH de los recortes por el efecto de dilución y puede generar un aumento en el pH. Otro factor importante que afecta el pH es la materia orgánica, el alto contenido de materia orgánica puede provocar el efecto de suspensión. Y por último, no menos importante, es el tipo de muestra que se ha hecho a los recortes, el muestreo compuesto es la combinación de muestras individuales recogidas en el mismo punto pero diferente tiempo⁵¹, según “No se debe emplear muestras compuestas para la determinación de componentes o características sujetas a cambios significativos e inevitables durante el almacenamiento (...) los cambios en componentes como oxígeno o dióxido de carbono disueltos, pH, o temperatura, pueden producir cambios secundarios.”

Además de estos factores que pueden afectar al pH, la empresa tuvo en cuenta el pH de la zona de trabajo, los llanos orientales cuentan con un pH máximo de 6.5 por lo tanto sería ácido, se recomendó realizar la mezcla con los recortes de perforación para que el pH se estabilizara y no generara ningún daño ambiental.

De acuerdo con lo anterior, a pesar de que el pH es alto, no afecta los demás parámetros, por lo tanto, los parámetros que por lo general el pH altera como el PSI, RAS, Arsénico, Bario etc. Tienen valores similares en comparación con los análisis de los parámetros anteriormente estudiados, y cumplen con el protocolo Louisiana 29b y el decreto 4741 del 2005. De acuerdo con este orden de ideas, no hay riesgo de lixiviación o impacto a la zona de operaciones.

⁵⁰ HOME & GARDEN INFORMATION CENTER. [Sitio Web]. California del sur: Clemson, Cambiando el pH del suelo. [25-05-2020]. Disponible en: <https://hgic.clemson.edu/factsheet/cambiando-el-ph-del-suelo/>.

⁵¹ DOCTOR CALDERON LABS. [Sitio web]. Bogotá D.C.: Análisis de aguas, tomas y preservación de muestras. [25-05-2020]. Disponible en: <https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?id=2389&termino=muestra+compuesta>.

4. CONCLUSIONES

- Se determino que los métodos convencionales (Estabilización con Cal viva), tienen una eficiencia de remoción de la humedad promedio de los recortes del 23%, el volumen promedio de recortes a disponer para la disposición final es de 4.961 Bbl y el área superficial requerida para los recortes es de 2040 m², lo cual aumenta los costos para la adquisición de tierras, afectando la contaminación visual.
- Se determinó que el equipo Q-DRYING-KILN tiene una eficiencia en la deshidratación de los recortes del 12.1% con un coeficiente de variación del 93% generando mejores resultados a lo acordado por la empresa que es del 80%, un volumen promedio de recortes requerido para la disposición final de 3239 Bbl y el área superficial utilizada equivale al 4% con respecto a una disposición final en piscinas con los métodos convencionales.
- Se evidencio la diferencia de la humedad promedio entre los métodos convencionales (Estabilización con Cal viva) y el equipo Q-DRYING-KILN que equivale a un 11%, lo que conlleva a una reducción de costos de operaciones.
- La humedad es directamente proporcional al volumen requerido para la disposición final (Zodme). El equipo genera una reducción de 1722 Bbl con respecto a los métodos convencionales, por lo tanto, genera beneficios económicos a la operadora al momento de adquirir estos terrenos.
- Se evidenció que los parámetros definidos con la empresa Qmax para el cálculo de la eficiencia del equipo Q-DRYING-KILN, cumplieron con las expectativas esperadas y con la normativa (Lousiana 29b y Decreto 4741 del 2005). La conductividad no superó el límite de 40% con un valor de 35%, el índice de grasas y aceites con 1.21% de variación no alcanzó al 5%, en los hidrocarburos totales estuvo muy por debajo del 15% con un índice de variación de 10% y en cuanto al Psi y Ras estuvieron por debajo del 30% de variación.
- Se observo en los resultados de los recortes tratados por métodos convencionales y del equipo Q-DRYING-KILN cumplen con todos los parámetros estipulados en el protocolo 29b y el decreto 4741 del 2005, con una mejoría del 80 % en la humedad relativa cuando se utiliza el equipo.
- Se realizo el perfil de caracterización química completo para los pozos con los métodos convencionales y el equipo Q-DRYING-KILN.

5. RECOMENDACIONES

- Realizar apiques en las zonas aledañas e in-situ, en la zona de estudio para corroborar el cumplimiento a la normativa y monitorear posibles lixiviados.
- No hacer un muestreo compuesto porque complica o altera algunas propiedades de los parámetros en estudio de los recortes de perforación y realizar un muestreo simple.
- Dar alternativas para que el horno funcione para recortes de perforación base aceite.
- Implementar el estudio hecho en otro campo de interés dentro de la cuenca de los Llanos orientales.
- Comparar otro método de deshidratación de recortes diferente al tratamiento con cal viva como Desorción térmica.
- Realizar cálculos para hallar el calor requerido para deshidratar los recortes en función del tiempo y volúmenes de entrada.
- Realizar un análisis financiero mediante los siguientes indicadores (VPN y TIR) para estimar la viabilidad de la implementación del equipo Q-Drying-Kiln.

BIBLIOGRAFIA

BALLESTEROS VILLEGAS, Adriana Cristina. Evaluación de diferentes sistemas para el tratamiento de residuos de perforación en el Campo Tarapoa Petroleum S.A. trabajo de grado de ingeniería de petróleos. Guayaquil, Ecuador. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 2007.

CABRERA LOBELO, Laura M. y UNIBIO SALCEDO, María T. Evaluación de la Remoción de Grasas y Aceites en Suelo Contaminado con Diésel B10 y Biodiésel Aplicando La Tecnología Implementada por Eom Consulting S.A.S. Proyecto De Grado Para Recibir El Título De Ingeniero Químico. Fundación Universidad De América. Bogotá D.C.: 2019.

CAIZA CAIZA, Gisela F. Mercurio En El Suelo. Contaminación y Remediación. Trabajo fin de grado. Universidad Complutense, Madrid: 2010.

CASIERRA-POSADA, FANOR. POVEDA, JEIMY. Superficies y vacío: *Efecto del tratamiento térmico de cal hidratada sobre la producción de biodiesel empleando aceite quemado de soya y etanol*. Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales. Puebla, México: BUAP, Vol. 3 No. 1-2010. (S) 98-103.

COLOMBIA. Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial. Decreto 4741. (30, diciembre, 2005). Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Bogotá D.C.: El ministerio, 2005. P. 1-50.

CORDOBA RIOS, Ingrid Carolina y VALLEN VARGAS, Yenyfer Yamile. Estudio De Factibilidad De La Biorremediación De Cortes De Perforación En Lodos Base Agua De Pozos Estratigráficos Profundos. Trabajo de grado para optar el título de Ingenieras de Petróleos. Bucaramanga, Santander: Universidad Industrial De Santander, 2013.

CORNELL UNIVERSITY. Suelos saludables, comunidades saludables Metales en suelos de jardines urbanos. [Sitio Web]. New York.: Departamento de ciencias agrícolas. [11-mayo-2020]. Disponible en: https://www.health.ny.gov/environmental/outdoors/garden/docs/metales_jardinesurbanos.pdf. p.4.

CORTINA PALLÁS, José Luís. Evaluación de las tecnologías de tratamiento de aguas subterráneas contaminadas con Cromo. [En línea] .tesis. Universitat politècnica catalunya. Barcelona.2006 [consultado 24,mayo,2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2099.1/3153>.

DÍAZ HERNÁNDEZ, Yusdel. Diseño de un horno rotatorio para la fabricación de cemento. Trabajo de grado para optar el título de ingeniero mecánico. Universidad tecnológica de la habana. Habana: 2016.

DÍAZ ORTIZ, Jaime Ernesto. Propuesta metodológica para determinar el potencial de humedad de un material granular a partir de la humedad relativa. Volumen.7, No. 1.2005.

DOCTOR CALDERON LABS. [Sitio web]. Bogotá D.C.: Análisis de aguas, tomas y preservación de muestras. [25-05-2020]. Disponible en: <https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=2389&termino=muestra+compuesta>.

EL-SEVED Abdullah, ABU EL-NAGA Kamal H. Treatment of drill cuttings. Belayim Petroleum Company (Petrobel).SPE,2001. SPE 66530.

ESTADOS UNIDOS. Office of conservation. Titulo 43. (Diciembre, 2005). Natural resources. Lousiana, 2005. P. 1-115.

GAONA MARTINEZ, XAVIER. El mercurio como contaminante global, Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente. tesis. Universitat Autònoma De Barcelona, Barcelona, 2004 [consultado 23, mayo, 2020].disponible en: <http://grupsderecerca.uab.cat/gts/sites/grupsderecerca.uab.cat.gts/files/TESIS%20XG.pdf>

GOMEZ, Alexander. WOLFGANG, Klose. Procesos de transporte de biomasa y carbonizados en hornos rotatorios. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. 2016. P 6-7. ISBN 978-3-86219-950-1.

HMV INGENIEROS LTDA-PCA. Informe del Diseño de ZODMES. Bogotá, Mayo de 2011. Informe: 2361-00-EV-RP-001-1

HOME & GARDEN INFORMATION CENTER. [Sitio Web]. California del sur: Clemson, Cambiando el pH del suelo. [25-05-2020]. Disponible en: <https://hgic.clemson.edu/factsheet/cambiando-el-ph-del-suelo/>.

IGAC, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Guía de Muestreo. Bogotá D.C.: El instituto, 2018.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. [Sitio web]. Bogotá D.C.: IDEAM, instructivo de ensayo. Psi Determinación De Alcalinidad Por Potenciometría [14-12-2017]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155.pdf> .

_____. [Sitio web]. Bogotá D.C.: IDEAM, instructivo de ensayo para la determinación de metales pesados totales con digestión acida y solubles lectura directa por espectrometría de absorción atómica. [23-07-2014]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155.pdf>.

_____. [Sitio web]. Bogotá D.C.: IDEAM, instructivo de ensayo para la determinación de grasa, aceites e hidrocarburos por infrarrojo de partición. [01-10-2018]. Disponible en: <http://sgi.ideam.gov.co/documents/412030/35488871.pdf>.

_____. [Sitio web]. Bogotá D.C.: IDEAM, instructivo de ensayo. determinación de nitritos por colorimetría. sm 4500 no2. b. [14-12-2017]. Disponible en: <http://sgi.ideam.gov.co/documents/412030/35488871.pdf>

INTAGRI. 2017. La Conductividad Eléctrica del Suelo en el Desarrollo de los Cultivos. Serie Suelos. Núm. 26. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 2017.

JACINTO SOTO, Higinio. Potencial contaminación por cromo en el proceso de refinación del petróleo. Monografía para optar el título de ingeniero Químico. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Lima, Perú: 2006.

MD, John Finklea, COPPÉE, Georges H, HUNT, Vilma R, S. KRAUS, Richard, LAURIG, Wolfgang, MESSITE, Jacqueline, L. SAUTER, Steven, SPIEGEL, Jerry, L. SOSKOLNE, Colin, TERRACINI, Benedetto, L. MYERS, Melvin. Metales: propiedades químicas y toxicidad. EN enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. 1ª edición. .Madrid. Chantal Dufresne, BA.2001.63.39.

MENDOZA GENEY Libardo Enrique. Pirolisis de biosólidos en horno rotatorio. Tesis de grado como requisito para optar al título de: Doctor en Ingeniería - Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. 2016.

OLIVEIRA, clarice de; AMARAL-SOBRINHO, Nelson M.B.; MAZUR, Nelson; SOARES-DOS SANTOS, Fabiana. Solubilidad de cadmio y zinc en suelos agrícolas tratados con lodo residual enriquecido. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo. México: 2003. Vol. 21, núm. 3. E-ISSN: 2395-8030.

PEREZ MINGUEZ, Ismael. ECOTOXICOLOGÍA DEL ARSÉNICO EN SUELOS DE LA COMUNIDAD DE MADRID. Trabajo de Grado para optar título de farmacología. Universidad Complutense. Madrid.: 2015.

PONS JIMENEZ, M., GUERRERO PEÑA, A., ZAVALA CRUZ, J. y ALARCON, A. Extracción De Hidrocarburos Y Compuestos Derivados Del Petróleo En Suelos Con Características Físicas Y Químicas Diferentes. Instituto Mexicano del Petróleo. Tabasco: 2010.

RAMIREZ, Augusto. Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Lima: 2002. Vol. 63, N° 1. p. 2.

RANGEL MONTOYA, Edelweiss A, MONTAÑEZ HERNANDEZ, Lilia E, LUEVANOS ESCAREÑO, Miriam P y BALAGURUSAMY, Nagamani. Impacto Del Arsénico En El Ambiente Y Su Transformación Por Microorganismos. *Terra Latinoam* 2015, vol. 33, n. 2, pp. 103-118. ISSN 2395-8030.

REINEL MUÑOZ, MARISOL. Determinación de las características de toxicidad por lixiviación (TCLP) del ingrediente activo malatión en un plaguicida organofosforado mediante el procedimiento de TCLP [en línea]. tesis. Universidad de la Salle. Bogotá. D.C. 2009. [consultado 23-mayo-2020]. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1275&context=ing_ambiental_sanitaria.pdf.

Resumen de salud pública: *Bario*. ATSDR. EE.UU.: Departamento de salud y servicios humanos. 2007. CAS#: 7440-39-3.

Resumen de salud pública: *Plata*. ATSDR. EE.UU.: Departamento de salud y servicios humanos. 1990. CAS#: 7440-22-4.

Resumen de salud pública: *Selenio*. ATSDR. EE.UU.: Departamento de salud y servicios humanos. 2003. CAS#: 7782-49-2.

RIAÑO SALAS, Pablo. Biofrotificación agronómica con selenio y zinc sobre guisante forrajero (*pisum sativum*) bajo condiciones de secano mediterráneas. Trabajo Fin de master en ingeniería agronómica. Universidad de Extremadura. Badajoz.: 2019.

Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M. y Pennock, D. 2019. La contaminación del suelo: una realidad oculta. Roma, FAO.

SÁNCHEZ-CANTÚ, M, PÉREZ-DÍAZ, L.M. APREZA-SIES, A. DÁVILA-HUERTA, A. BECERRIL-FRAGOSO, I. ROSALES-IZTETZI, R. Suelos Fertilización y manejo de aguas: *La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en fresa (Fragaria sp. cv. Camarosa)*. Agronomía colombiana. Bogotá D.C.: Agronomía Colombiana. Vol. 23 · No. 2. 2005. 283-289.

SOTELO MUÑOZ, Adriana Paola. Especiación De Cromo En La Solución Del Suelo De Tres Suelos Enmendados Con Biosólidos Bajo Diferentes Condiciones Oxidoreductoras. Tesis De Grado Presentada Para Optar Al Título De Magister En Ciencias-Geomorfología Y Suelos. Universidad Nacional De Colombia Sede Medellín. Medellín.; 2012.

UNNE. [sitio web]. Corrientes, Argentina: Apuntes, Trabajo Práctico De Laboratorio N° 2a Humedad Natural. [19-05-2020]. Disponible en: <http://www.ing.unne.edu.ar/assets/pdf/academica/alumnos/apuntes/geotecnia/l2-pi.pdf>.

VELÁSQUEZ ARIAS, Johana Andrea. Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.UNAD.2017. Volumen 8 Número 1. ISSN 2145-6097.

ZULUAGA BELTRÁN Ana María. Estudio de viabilidad del uso de los recortes de perforación en la creación de mampostería estructural. Tesis de ingeniería de petróleos. Bogotá D.C. Fundación Universidad de América, 2019.

ANEXO A CARTA DE CONFIDENCIALIDAD



Calle 100 No. 8A-49 Torre B Of. 1018
Ed. World Trade Center
PBX: 57-1-6168022; [Fax 57-1-2180270](tel:57-1-2180270)
Bogotá - Colombia
e-mail: colombia.qmax@qmaxsolutions.com

Bogotá, D. C., Junio del 2020

A quien corresponda.

Ref.: Soporte de confidencialidad.

Estimados Señores:

De acuerdo a la petición por parte de la universidad sobre el proyecto que lleva como título: "EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LA DESHIDRATACIÓN DE RECORTES DE PERFORACIÓN DE LODO BASE AGUA COMPARANDO TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES CON EL SECADOR DE CORTES EQUIPO Q-DRYING-KILN BAJO EL MARCO AMBIENTAL COLOMBIANO (LOUISIANA 29b Y Decreto 4741 del 2005)." La empresa QMAX SOLUTIONS COLOMBIA en calidad de: Empresa de soporte Técnico-Financiero, garantiza que los recortes de perforación y sus respectivos resultados pertenecen al área de estudio y la misma cuenca geológica, sin embargo no es posible dar a conocer la composición original ni especificación alguna de dichos recortes por términos de confidencialidad de parte de la operadora que administra el área de operaciones.

Cordialmente,

Firma(s):

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jorge Iizarazo' with a stylized flourish at the end.

Director del proyecto Ing. Jorge Iizarazo

