

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

SELECCIÓN DE UN SISTEMA ADECUADO DE CONTROL DE SÓLIDOS DE DESCARGA PARA EL MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE PERFORACIÓN DE POZOS HORIZONTALES EN EL CAMPO SAN CRISTÓBAL, DISTRITO SAN TOMÉ.

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo
Por la Br. García González, Verónica del Pilar.

Caracas, Octubre del 2003.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

SELECCIÓN DE UN SISTEMA ADECUADO DE CONTROL DE SÓLIDOS DE DESCARGA PARA EL MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE PERFORACIÓN DE POZOS HORIZONTALES EN EL CAMPO SAN CRISTÓBAL, DISTRITO SAN TOMÉ.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Freddy Paz.

TUTORES INDUSTRIALES: Ing. Asdrúbal Medina.

Ing. Henry Chiquito.

Trabajo especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título
De Ingeniero de Petróleo
Por la Br. García González, Verónica del Pilar

Caracas, Octubre de 2003

García G., Verónica del P.

**SELECCIÓN DE UN SISTEMA ADECUADO DE CONTROL DE SÓLIDOS
DE DESCARGA PARA EL MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE
PERFORACIÓN DE POZOS HORIZONTALES EN EL CAMPO SAN
CRISTÓBAL, DISTRITO SAN TOMÉ.**

Tutor Académico: Prof. Paz, Freddy. Tutor Industrial: Ing. Medina, Asdrúbal.

**Tesis. Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de
Petróleo. 2003, 235 Pág.**

Palabras Claves: Sistema de Control de Sólidos, Equipos de Control de Sólidos, Sólidos de Perforación, Fluido de Perforación, Pozo Horizontal.

RESUMEN. El presente trabajo consistió en la propuesta de un sistema de control de sólidos adecuado para el proceso de perforación de 12 pozos horizontales en el campo San Cristóbal, distrito San Tomé basado en los tipos de formaciones a perforar, tipo de fluidos de perforación a utilizar, y el conocimiento previo de campañas de perforación realizadas en campos petroleros con características similares a las del campo San Cristóbal. De este modo se determinó que el principal problema a enfrentar durante la ejecución de las perforaciones, será la presencia de formaciones altamente arcillosas y el exceso de gumbo, el cual es el causante de la mayor parte de los problemas operacionales asociados con sólidos de perforación. Posteriormente mediante análisis comparativo operacional y económico de varias propuestas de sistemas de control de sólidos de perforación, se seleccionó el sistema que presentaba una combinación de mejor eficiencia de remoción y menor costo. Para llevar a cabo dichas comparaciones se recolectó algunos programas de evaluación de comportamiento de eficiencia y de evaluación económica los cuales fueron analizados minuciosamente y adaptados a los propósitos de este proyecto. En tal sentido se propone la incorporación de nueva tecnología en equipos de control de sólidos dentro del sistema seleccionado, ya que el aporte tanto operacional como económico de estos nuevos equipos es realmente significativo para la economía del proyecto.

DEDICATORIA

DEDICATORIA

Le dedico esta investigación y todo mi esfuerzo en primer lugar a mi Dios, que me concedió la fuerza de voluntad necesaria para llevar a cabo dicha empresa, y porque más que una protección fue mi fiel amigo y compañero en los momentos cuando más lo necesité, tanto en alegrías como en desazones. Y en segundo lugar, pero no menos importante a mi hermano y mis padres, porque con su cariño, preocupación y sabios consejos fueron la columna principal de mi fortaleza, la que me sostuvo y me brindó apoyo de todo tipo, siendo motivo de inspiración y ejemplo de constancia con el cual aprendí a ver la vida de una perspectiva totalmente nueva y prometedora.

Las palabras no bastan para expresarles todo el amor y admiración que siento por Uds.

Gracias.

Verónica.

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar debo y quiero agradecerles a dios y mi familia por haberme acompañado durante este periodo tan importante para mí, y por brindarme todo su apoyo. Gracias y los adoro.

Al Ing. Asdrúbal Medina por su ayuda y apoyo desde que comencé la tesis, y durante el desarrollo de la misma a pesar de las adversidades y de los contra tiempos, en Ud. siempre encontré una guía y un ejemplo a seguir, Ud. es casi un papá para mí. Gracias por haberme ayudado a conseguir el tema de tesis y por siempre estar pendiente de mí. Le aseguro que sin Ud. a mi lado todo hubiese sido muy diferente y mucho más difícil de lo que fue. Un besote y lo quiero mucho Sr. Asdrúbal.

Al Sr. Andrés Eloy Blanco por haberme tratado siempre con tanto cariño y por siempre haber estado allí para mis compañeros y para mí cuando nos sentíamos a la deriva. También gracias por confiar en mis capacidades y por ayudarme conseguir mi tesis en aquella PDVSA que me recibió con los brazos abiertos y en donde aprendí muchas cosas importantes para mi formación como profesional y como persona.

Al Ing. Alejandro Coa que me ayudo en cada paso que di para desarrollar mi tesis orientándome, enseñándome todo lo referente a la parte técnica y operacional de mi trabajo, siendo un amigo y sin temor a equivocarme la persona a la que más fastidie durante todo este tiempo. Gracias Alejandro por no abandonarme nunca y por soportarme tanto, sin ti estoy segura que no hubiese podido hacer este trabajo tan importante y exigente, y te aseguro que no hubiese quedado tan bien. De igual manera agradezco profundamente a la gente de TBC Brinadd y en especial al Ing. Oscar Salazar por haberme brindado todo su apoyo y ayuda para desarrollar parte de mi trabajo dentro de TBC.

Al Ing. Henry Chiquito por haberme adoptado cuando por causas ajenas a nuestra voluntad me quede huérfana en PDVSA y que sin pensarlo dos veces acepto la responsabilidad de hacerse cargo de mi y de mi trabajo. Gracias por estar pendiente de todo y estar siempre dispuesto a ayudarme en lo que fuese necesario, por su apoyo y solidaridad cuando más lo necesité.

Al Ing. Rodolfo Quesada por haberme ayudado a buscar y encontrar la información correspondiente a mi área de estudio y por el tiempo que dedicó para ayudarme a resolver los problemas que se me fueron presentando a lo largo de la investigación. De igual modo muchísimas gracias al Ing. Larry Ottos y a toda la gente de perforación en San Tomé que me brindo su ayuda desinteresada.

A mi amiga del alma y hermanita ucevista la Ing. Karina Gil, por tantas cosas que hiciste por mi, primero por que me ayudaste a conseguir mi tesis, por tantas veces que me abriste las puertas de tu casa y me brindaste un techo cuando no tenía a más nadie en Puerto la Cruz, y porque siempre estuviste allí en la buenas y las malas, dándome ánimos y

AGRADECIMIENTOS

siendo un apoyo grandísimo, y aún sigues siendo una de mis mejores amigas. Gracias Kari sin tu compañía y la de Kelly todo hubiese sido bien triste y aburrido.

A mi mejor amigo y una de las personas mas importantes que ha pasado por mi vida, a ti John Méndez que a pesar de todas las dificultades siempre estuviste para mí, en todo momento me dabas aliento y apoyo cuando más lo necesitaba. Gracias por todos los favores, diligencias, cartas que entregaste, por todo lo que te hice correr en Caracas mientras yo estaba en Puerto la Cruz, gracias por estar pendiente de todas mis cosas, de preocuparte por mi, por oírme cuando necesitaba hablar, por protegerme, y por sobre todo por ser tu y por estar a mi lado a pesar de la distancia y las circunstancias. Te adoro y definitivamente tú eres y espero que sigas siendo MI ANGEL.

A mi amiga puertorra Ambar González, alias bamby, sin ti me hubiese sentido demasiado sola en Puerto, le doy gracias a dios y a la virgen por haberte puesto en mi camino y por hacerme dar cuenta de que todavía existen personas como tu dispuestas a ser una amiga verdadera y desinteresada, dispuesta a ayudarme en cuanto estuviera en tus manos hacer por mi. Quiero que sepas que espero que nuestra amistad sea duradera y que a pesar de la distancia siempre tendrás en mi a una amiga de verdad e incondicional. Gracias por abrirme las puertas de tu casa y por prácticamente hacer de tu familia la mía. Igual gracias a Antonio por siempre estar pendiente de mi y ayudarme tanto, a la Sra. Dora por tratarme como parte de la familia, y a Leo y Yuli por haberme aceptado entre ellos, y sobre todo a las niñas Ambar y Andrea por darme tanto cariño y dulzura. Gracias a todos y de verdad se les quiere muchísimo.

A mi amiga y confidente la Ing. Kelly Ramírez, por siempre estar pendiente de mí y ser más que mi amiga, mi otra hermana ucevista y pegoste inseparable mientras estuvimos en Puerto. Gracias por tus consejos, tu apoyo, tu amistad, por todo lo pendiente que siempre has estado de mí, por tus regaños y por más de una vez hacerme poner los pies en la tierra. Quiero que sepas que en ti he encontrado a una excelente amiga que no pienso perder por nada de este mundo y que espero que siempre seas parte de mi vida.

A las personas que me abrieron las puertas de su casa y con las cuales compartí varios meses de convivencia. Muchísimas gracia Paty, Nataly y Sr. Ramiro y Sra. Francis alias la gaviota por permitirme ser parte de sus vidas por ese corto tiempo. Y a Paty y Nataly por convertirse en mis buenas amigas.

A mis amigos Cesar Muzziotti por siempre estar dispuesto a ayudarme cuando lo he necesitado y al Ing. José Francisco Romero por siempre brindarme su amistad, abrirme las puertas de su casa en San Tomé y siempre estar pendiente de mi cuando viajaba para allá.

A mis amigos del Rugby de la UCAB que siempre estuvieron pendientes de mi cuando estuve lejos José Ignacio Egan mi hijo por cariño y que como se dice popularmente me a salvado la vida más de una vez, Carlos Bugarín, Diego Rodríguez, Adelfa Manrique, Miriam Manrique, Natalie Millán, Cesar Moncada, M^a Fernanda Urbina, y con quienes he compartido tantas cosas buenas y que han sido más que mis compañeros de equipo mis amigos sinceros.

AGRADECIMIENTOS

A mis amigos de la universidad Luis Armando, Naty la catira, Dayanna, Diego Rodríguez y Diego Maya, Maryuli, Angélica, Lisbeth, Mary Gaby, Sergio, Iván, Dalila, Jorge Jiménez, Brenda, Ninosca, Fernando, Cesarin y Juan Carlos Pacheco, Marcos, y sobre todo a Diomar por siempre oírme y ser mi buena amiga durante los tiempos buenos y los difíciles y a Roberto por ser mi amigo más que incondicional y siempre estar allí para mí y ayudarme siempre desde todo punto de vista.

A la profesora Griselda Zorrilla de Mora que a pesar de la distancia siempre ha estado pendiente de mí y me ha tratado con tanto cariño. Gracias por estar a mi lado y darme tanto apoyo y por haberme enseñado tanto en el poco tiempo que compartimos juntas, profesoras como Ud. hacen que la estadía en la universidad sea interesante y un reto, pero al final la cosecha que recogemos es de excelente calidad, profesionales y seres humanos completos e integrales.

A los profesores de la universidad que siempre me ayudaron en la medida de lo posible, y sobre todo al Ingeniero y profesor Freddy Paz por haberme aceptado como su tesista a última hora cuando una vez más me quede huérfana, pero esta vez por parte de tutor académico.

Y por último gracias al destino por haberme colocado en mi bellísima casa de estudio la Universidad Central de Venezuela, "La Casa que Vence las Sombras" UCV, por recibirme en su seno y haberme permitido realizar mis sueños en la mejor casa de estudio del país y sus alrededores.

Lista de Tablas.	i
Lista de gráficas y Figuras.	v
Introducción.	1
Capítulo 1: Fundamentos Teóricos.	3
1.1 Conceptos Básicos del Control de Sólidos.	3
1.1.1 Efectos de la Acumulación de Sólidos de Perforación.	3
1.1.2 Clasificación del Tamaño de Partículas en un Fluido de perforación.	8
1.1.3 Tipos de Sólidos Presentes en el Fluido de Perforación.	10
1.1.4 Determinación del porcentaje y Tipo de Sólidos Presentes en el Fluido de Perforación Mediante Mediciones de Laboratorio.	11
1.2 Conceptos Básicos de Pozos Horizontales.	17
1.2.1 Definición de pozos Horizontales.	17
1.2.2 Diferencias Básicas entre Pozos Verticales y Horizontales.	18
1.2.3 Ventajas y Desventajas de los pozos Horizontales.	20
1.2.3.1 Ventajas de los pozos Horizontales.	20
1.2.3.2 Desventajas de los pozos Horizontales.	21
1.2.4 Clasificación de los pozos Horizontales.	22
1.2.5 Técnicas de Completación de Pozos Horizontales.	24
1.3 Antecedentes del Control de Sólidos.	27
1.4 Proceso de Control de Sólidos.	34
1.4.1 Separación Mecánica: Métodos primarios.	36
1.4.1.1 Divisor de Flujo.	36
1.4.1.2 Tanque de asentamiento o Trampa de Arena.	37
1.4.1.3 Zarandas Vibratorias.	38
1.4.2 Separación Mecánica: Clasificación Húmeda.	51
1.4.2.1 Hidrociclones.	52
1.4.2.2 Desarenadores y Deslimadores.	58
1.4.2.3 Acondicionadores de Lodo.	60
1.4.2.4 Tres en Uno y Acondicionadores de lodo.	63
1.4.2.5 Sistemas de Centrifugación.	66
1.4.3 Dilución y Métodos Alternativos de Control de Sólidos.	72
1.4.3.1 Dilución.	73
1.4.3.2 Descarte y Dilución.	73
1.4.3.3 Inhibición por Encapsulamiento.	74

INDICE GENERAL

Capítulo 2: Descripción del Campo.	75
2.1 Ubicación Geográfica del Campo San Cristóbal.	75
2.1.1 Cuenca Oriental de Venezuela.	76
2.1.2 Faja del Orinoco.	77
2.2 Características del Campo.	80
2.2.1 Estratigrafía del Área.	81
2.2.1.1 Formaciones Locales.	82
2.2.2 Caracterización Energética y de los Fluidos.	84
Capítulo 3: Proyecto San Cristóbal.	89
3.1 Características del Proyecto.	89
3.1.1 Diseño Básico de la Arquitectura del Pozo.	91
3.1.1.1 Diseño de la Completación de los Pozos.	93
3.1.1.2 Diseño de Fluidos de Perforación.	94
3.1.2 Análisis de Construcción de los Pozos.	97
Capítulo 4: Metodología.	98
4.1 Descripción del Trabajo.	98
4.2 Metodología del Trabajo.	100
4.2.1 Revisión Bibliográfica.	101
4.2.2 Recopilación de la Información.	102
4.2.3 Evaluación Operacional y Económica del Proyecto.	103
4.2.4 Selección del mejor Sistema de Control de Sólidos.	107
Capítulo 5: Análisis y Discusión de Resultados	109
5.1 Problemas Operacionales que se pueden Presentar Durante la Perforación De Pozos Horizontales en el Campo san Cristóbal.	109
5.1.1 Identificación de los Principales Problemas Operacionales.	109
5.1.2 Problemas Operacionales Relacionados con Sólidos de Perforación.	113
5.2 Sistemas de Control de Sólidos Propuestos para el Campo San Cristóbal.	119
5.2.1 Descripción y Especificaciones de los equipos que Conforman los Diferentes Sistemas.	119
5.2.2 Sistemas de Control de Sólidos Propuestos.	122
5.2.3 Eficiencia de Remoción de Cada Sistema y Costo de Alquiler.	127
5.3 Generación del Programa para el Análisis Económico del proceso de Control de Sólidos.	129
5.3.1 Balance de Masas para el Análisis Económico.	129
5.4 Análisis Comparativo de los Sistemas Propuestos.	134
5.4.1 Hoyo de Superficie.	135
5.4.2 Hoyo Intermedio.	137
5.4.3 Hoyo de Producción.	140

INDICE GENERAL

5.4.4	Discusión de Resultados del Análisis Comparativo.	142
5.4.5	Discusión Operacional del Sistema Seleccionado.	144
5.5	Disposición de los equipos de Control de Sólidos.	149
5.5.1	Guía General para la Disposición del Sistema de Control de Sólidos.	150
	Conclusiones.	152
	Recomendaciones.	154
	Referencias Bibliográficas.	156
	Nomenclatura.	158
	Glosario de Términos.	159
	Apéndice A: Porcentaje en Volumen de los Sólidos en el Fluido.	164
	Apéndice B: Cálculo de la Capacidad de Azul de Metileno.	166
	Apéndice C: Metodología del Cálculo del Contenido de Arena.	168
	Apéndice D: Selección de las Mallas para las Zarandas.	169
	Apéndice E: Base de Datos de Posibles Problemas Operacionales.	171
	Apéndice F: Análisis Porcentual de los Tiempos de Perforación.	175
	Apéndice G: Sistemas Propuestos y Especificaciones Técnicas.	185
	Apéndice H: Validación del programa Económico.	202
	Apéndice I: Comportamiento del Sistema de Remoción de Sólidos.	204
	Apéndice J: Regulaciones Ambientales.	207
	Apéndice K: Guía de Operación y Mantenimiento de los Equipos.	211

TABLA 1.1.1	Efecto del porcentaje de sólidos en la ROP.	4
TABLA 1.1.2	Clasificación de los Sólidos Según su Tamaño.	8
TABLA 2.2.1	Información Exploratoria del Campo San Cristóbal.	80
TABLA 2.2.2	Resultados de RFT Aplicado a las Arenas E y G.	85
TABLA 2.2.3	Propiedades del Crudo @ 145 °F (Temperatura del Yacimiento). Arena E.	85
TABLA 2.2.4	Propiedades del Gas @ 145 °F (Temperatura del Yacimiento). Arena E.	85
TABLA 2.2.5	Análisis composicional. Arena E.	86
TABLA 2.2.6	Resultados de RFT Aplicado a las Arenas E y G.	87
TABLA 2.2.7	Propiedades del Crudo @ 142 °F (Temperatura del Yacimiento). Arena H.	87
TABLA 2.2.8	Propiedades del Gas @ 142 °F (Temperatura del Yacimiento). Arena H.	88
TABLA 2.2.9	Análisis Composicional Arena E.	88
TABLA 3.1.1	Coordenadas de Subsuelo de las 12 Localizaciones.	90
TABLA 3.1.2	Diseño de las Secciones a Perforar.	93
TABLA 3.1.3	Propiedades del Fluido Agua – Gel.	94
TABLA 3.1.4	Formulación del Sistema Lignosulfonato.	95
TABLA 3.1.5	Propiedades del Lodo Requeridas para esta Fase.	95
TABLA 3.1.6	Propiedades del Fluido de Perforación Lignosulfonato con KCOOH.	95
TABLA 3.1.7	Formulación del Sistema Polimérico.	96
TABLA 3.1.8	Propiedades del Fluido de Perforación Polimérico.	96
TABLA 3.1.9	Escenarios de Construcción de Pozos. Tiempos de Perforación.	97
TABLA 5.1.1	Base de Datos de los Potenciales Problemas Operacionales que Pueden Ocurrir en San Cristóbal.	110
TABLA 5.2.1	Equipos que Conforman los Sistemas Propuestos.	119
TABLA 5.2.2	Parámetros para las Centrifugas.	122
TABLA 5.2.3	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 1.1.	123
TABLA 5.2.4	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 1.1.	124
TABLA 5.2.5	Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 1.1.	124
TABLA 5.2.6	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 1.2.	124
TABLA 5.2.7	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 1.2.	124
TABLA 5.2.8	Especificaciones para la Centrifuga Dual (Baja y Alta) en el Caso 1.2.	124
TABLA 5.2.9	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 1.3.	124

LISTA DE TABLAS

TABLA 5.2.10	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 1.3.	125
TABLA 5.2.11	Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 1.3.	125
TABLA 5.2.12	Costos y eficiencia de Cada Sistema Planteado.	128
TABLA 5.3.1	Parámetros Económicos del Balance.	129
TABLA 5.3.2	Parámetros Operacionales del Balance.	130
TABLA 5.4.1	Datos Generales de l Pozo Modelo Requeridos para el Programa Económico.	134
TABLA 5.4.2	Datos del Pozo Modelo Para el Hoyo de Superficie.	135
TABLA 5.4.3	Costos Involucrados en el Proceso de Control de Sólidos para el Hoyo de Superficie.	136
TABLA 5.4.4	Costos Definitivos y Selección del Mejor Sistema para el Hoyo de Superficie.	137
TABLA 5.4.5	Datos del Pozo Modelo Para el Hoyo Intermedio.	137
TABLA 5.4.6	Costos Involucrados en el Proceso de Control de Sólidos para el Hoyo Intermedio.	139
TABLA 5.4.7	Costos Definitivos y Selección del Mejor Sistema para el Hoyo Intermedio.	139
TABLA 5.4.8	Datos del Pozo Modelo Para el Hoyo de Producción.	140
TABLA 5.4.9	Costos Involucrados en el Proceso de Control de Sólidos para el Hoyo Intermedio.	141
TABLA 5.4.10	Costos Definitivos y Selección del Mejor Sistema para el Hoyo de Producción.	142
TABLA 5.4.11	Sistema Seleccionado por Sección Perforada y Costos Asociados.	142
TABLA 5.4.12	Costos Definitivos de los Sistemas Clave en el Análisis Comparativo.	144
TABLA 5.4.13	Comparación entre el Sistema Base y el Sistema Seleccionado.	145
TABLA E.1	Base de Datos de los Potenciales Problemas Operacionales.	171
TABLA G.10	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 2.1.	188
TABLA G.11	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 2.1.	188
TABLA G.12	Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga de en el Caso 2.1.	188
TABLA G.13	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 2.2.	188
TABLA G.14	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 2.2.	189
TABLA G.15	Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 2.2.	189
TABLA G.16	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 2.3.	189
TABLA G.17	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 2.3.	189
TABLA G.18	Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 2.3.	189
TABLA G.19	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 3.1.	190
TABLA G.20	Especificaciones para la Unidad gMAX en el Caso 3.1.	190
TABLA G.21	Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 3.1.	190
TABLA G.22	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 3.2.	190
TABLA G.23	Especificaciones para la Unidad gMAX en el Caso 3.2.	190
TABLA G.24	Especificaciones para la Centrifuga Dual (Baja y Alta) en el Caso 3.2.	191

LISTA DE TABLAS

TABLA G.25	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 3.3.	191
TABLA G.26	Especificaciones para la Unidad gMAX en el Caso 3.3.	191
TABLA G.27	Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 3.3.	191
TABLA G.28	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 4.1.	192
TABLA G.29	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 4.1.	192
TABLA G.30	Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 4.1.	192
TABLA G.31	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 4.2.	192
TABLA G.32	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 4.2.	192
TABLA G.33	Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 4.2.	193
TABLA G.34	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 4.3.	193
TABLA G.35	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 4.3.	193
TABLA G.36	Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 4.3.	193
TABLA G.37	Especificaciones para el Scalper en el Caso 5.1.	194
TABLA G.38	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 5.1.	194
TABLA G.39	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 5.1.	194
TABLA G.40	Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 5.1.	194
TABLA G.41	Especificaciones para el Scalper en el Caso 5.2.	194
TABLA G.42	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 5.2.	194
TABLA G.43	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 5.2.	195
TABLA G.44	Especificaciones para la Centrifuga Dual (Baja y Alta) en el Caso 5.2.	195
TABLA G.45	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 5.3.	195
TABLA G.46	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 5.3.	195
TABLA G.47	Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 5.3.	195
TABLA G.48	Especificaciones para el Scalper en el Caso 6.1.	196
TABLA G.49	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 6.1.	196
TABLA G.50	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 6.1.	196
TABLA G.51	Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga de en el Caso 6.1.	196
TABLA G.52	Especificaciones para el Scalper en el Caso 6.2.	196
TABLA G.53	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 6.2.	196
TABLA G.54	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 6.2.	197
TABLA G.55	Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 6.2.	197
TABLA G.56	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 6.3.	197
TABLA G.57	Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 6.3.	197
TABLA G.58	Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 6.3.	197

LISTA DE TABLAS

TABLA G.59	Especificaciones para el Scalper en el Caso 7.1.	198
TABLA G.60	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 7.1.	198
TABLA G.61	Especificaciones para la unidad gMAX en el Caso 7.1.	198
TABLA G.62	Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 7.1.	198
TABLA G.63	Especificaciones para el Scalper en el Caso 7.2.	198
TABLA G.64	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 7.2.	199
TABLA G.65	Especificaciones para la unidad gMAX en el Caso 7.2.	199
TABLA G.66	Especificaciones para la Centrifuga Dual (Baja y Alta) en el Caso 7.2.	199
TABLA G.67	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 7.3.	199
TABLA G.68	Especificaciones para la unidad gMAX en el Caso 7.3.	199
TABLA G.69	Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 7.3.	199
TABLA G.70	Especificaciones para el Scalper en el Caso 8.1.	200
TABLA G.71	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 8.1.	200
TABLA G.72	Especificaciones para la unidad gMAX en el Caso 8.1.	200
TABLA G.73	Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 8.1.	201
TABLA G.74	Especificaciones para el Scalper en el Caso 8.2.	201
TABLA G.75	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 8.2.	201
TABLA G.76	Especificaciones para la unidad gMAX en el Caso 8.2.	201
TABLA G.77	Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 8.2.	201
TABLA G.78	Especificaciones para las Zarandas en el Caso 8.3.	201
TABLA G.79	Especificaciones para la unidad gMAX en el Caso 8.3.	202
TABLA G.80	Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 8.3.	202
TABLA H.1	Datos y Cálculos de Parámetros Operacionales del Ejemplo de Validación.	203
TABLA H.2	Datos y Cálculos de Parámetros Económicos del Ejemplo de Validación.	204
TABLA I.1	Parámetros para el Cálculo de la Eficiencia del Sistema de Control de Sólidos.	205
TABLA I.2	Datos de Cada Hoyo para el Cálculo de la Eficiencia por Sección Perforada.	207

LISTA DE GRÁFICAS Y FIGURAS

GRAFICO 1.1.1	Efecto del Tamaño de las Partículas en las Propiedades del Lodo.	8
GRÁFICO 1.4.1	Tamaño de Malla vs. Abertura en Micrones.	39
GRÁFICO 1.4.2	Curva de Separación Potencial.	43
GRAFICO 1.4.3	Relación entre Conductancia y % Área abierta para diferentes Mallas.	44
GRÁFICO 1.4.4	Comportamiento Típico de un Hidrociclón.	57
GRÁFICO 1.4.5	Efecto de la Centrifuga sobre la Remoción de sólidos y la Razón de Área Removida.	66
GRAFICO 5.1.1	Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0638, Bare.	112
GRÁFICO 5.1.2	Porcentaje de Incidencia de Problemas Operacionales Relacionados con Sólidos que Pueden Ocurrir Durante la Perforación de Pozos Horizontales.	114
GRÁFICO 5.1.3	Fracción del Tiempo Total de Perforación que corresponde a Tiempos Improductivos Ocasionados por Problemas Operacionales Relacionados con Sólidos.	115
GRAFICO F.1	Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo NZZ-161, San Cristóbal.	175
GRAFICO F.2	Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB- 0609, Bare.	176
GRAFICO F.3	Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB- 0611, Bare.	177
GRAFICO F.4	Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB- 0618, Bare.	178
GRAFICO F.5	Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB- 0620, Bare.	179
GRAFICO F.6	Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB- 0632, Bare.	180
GRAFICO F.7	Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB- 0636, Bare.	181
GRAFICO F.8	Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB- 0640, Bare.	182

LISTA DE GRÁFICOS Y FIGURAS

GRAFICO F.9	Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0623, Bare.	183
GRAFICO F.10	Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0637, Bare.	183
GRAFICO F.11	Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0639, Bare.	184
FIGURA 1.1.1	Clasificación del tamaño de Partículas.	9
FIGURA 1.1.2	Efecto del Tamaño de la Partícula en el Área Superficial.	10
FIGURA 1.1.3	Retorta.	12
FIGURA 1.1.4	Papel Filtro de la Prueba MBT.	14
FIGURA 1.1.5	Kit de Porcentaje de Arena o Zanahoria.	16
FIGURA 1.2.1	Figura de un Pozo Horizontal.	17
FIGURA 1.2.2	Dirección del Desplazamiento de los Fluidos y K_H y K_V en un Pozo Vertical.	19
FIGURA 1.2.3	Dirección del Desplazamiento de los Fluidos y K_H y K_V en un Pozo Horizontal.	20
FIGURA 1.2.4	Tipos de Pozos Horizontales.	24
FIGURA 1.3.1	Diagrama del Trommel.	28
FIGURA 1.3.2	Criba Trommel Thompson.	28
FIGURA 1.3.3	Zaranda McNeely Modelo E.	29
FIGURA 1.3.4	Desarenador Thompson.	30
FIGURA 1.3.5	Primera Centrífuga Decantadora.	31
FIGURA 1.3.6	Limpiador de Lodos.	32
FIGURA 1.3.7	Zaranda de movimiento lineal.	33
FIGURA 1.4.1	Clasificación de los Tamaños de Partículas.	34
FIGURA 1.4.2	Divisor de Flujo.	36
FIGURA 1.4.3	Tanque de asentamiento con capacidad de 500 bbl.	37
FIGURA 1.4.4	Diferentes Tipos de Zarandas Vibratorias.	38
FIGURA 1.4.5	Tipos de Mallas.	45
FIGURA 1.4.6	Tipos de Mallas.	46
FIGURA 1.4.7	Zaranda de Movimiento Circular.	49
FIGURA 1.4.8	Zaranda de Movimiento Elíptico Desbalanceado.	50
FIGURA 1.4.9	Zaranda de Movimiento Elíptico Balanceado.	50
FIGURA 1.4.10	Zarandas de Movimiento Lineal.	51
FIGURA 1.4.11	Funcionamiento de un Hidrociclón.	53
FIGURA 1.4.12	Tipo de Descarga de un Hidrociclón.	55

LISTA DE GRÁFICOS Y FIGURAS

FIGURA 1.4.13	Desarenador Serie DSR4H-10. Fluid Systems, Inc.	59
FIGURA 1.4.14	Deslimador Series SSR16HIL-14. Fluid Systems, Inc.	60
FIGURA 1.4.15	Acondicionador de lodos de Doble Cabezal. Serie 5000 BDHC.	61
FIGURA 1.4.16	Unidades “Tres en Uno”	64
FIGURA 1.4.17	Series 5000 gMAX™ the eLIMINATOR™. Fluid Systems, Inc.	65
FIGURA 1.4.18	Estructura Interna de una Centrifuga Decantadora	67
FIGURA 1.4.19	Centrifugas Decantadoras.	68
FIGURA 1.4.20	Sistema de Doble Centrifuga.	71
FIGURA 1.4.21	Sistema de Floculación.	72
FIGURA 2.1.1	Ubicación y Extensión del Campo San Cristóbal.	75
FIGURA 2.1.2	Ubicación Cuenca Oriental de Venezuela.	76
FIGURA 2.1.3	Faja del Orinoco y sus Principales Divisiones.	78
FIGURA 2.2.1	Columna Estratigráfica del Campo San Cristóbal.	81
FIGURA 2.2.2	Comportamiento de producción del pozo NZZ-35X reacondicionado en agosto del 2000 y cerrado en marzo del 2002.	86
FIGURA 3.1.1	Mapa Isópaco Estructural del las Arenas Basales de la Formación Oficina.	90
FIGURA 3.1.2	Vista 3-D del Plan Direccional Anticolisión.	91
FIGURA 3.1.3	Vista Vertical del Plan Direccional Anticolisión.	92
FIGURA 3.1.4	Vista de Planta del Plan Direccional Anticolisión.	92
FIGURA 4.2.1	Esquema de las Fases que Componen la Metodología de Trabajo.	100
FIGURA 4.2.2	Pantalla Principal del DFW™.	104
FIGURA 4.2.3	Sumario de Operaciones Diarias.	104
FIGURA 4.2.4	Programa para la Selección de las Mallas de los Tamices.	106
FIGURA 5.3.1	Ventana de Excel con los Datos de Entrada del PAE.	133
FIGURA 5.3.2	Ventana de Excel con los Cálculos que Realiza el PAE.	133
FIGURA 5.4.1	Datos de entrada del Programa Económico para el Hoyo de Superficie.	135
FIGURA 5.4.2	Cálculos del Programa Económico para el Hoyo de Superficie.	136
FIGURA 5.4.3	Datos de entrada del Programa Económico para el Hoyo Intermedio.	138
FIGURA 5.4.4	Cálculos del Programa Económico para el Hoyo Intermedio.	138
FIGURA 5.4.5	Datos de entrada del Programa Económico para el Hoyo de Producción.	140
FIGURA 5.4.6	Cálculos del Programa Económico para el Hoyo de Producción.	141
FIGURA D.1	Programa para la Selección de las Mallas en el Hoyo de Superficie.	169
FIGURA D.2	Programa para la Selección de las Mallas en el Hoyo Intermedio.	170
FIGURA D.3	Programa para la Selección de las Mallas en el Hoyo de Producción.	170

Durante las campañas de perforación desarrolladas en los campos Bare y Melones, los cuales presentan características muy similares entre si y con el campo San Cristóbal, se observó que los altos volúmenes de sólidos de perforación generados durante el proceso de perforación de estos pozos, representan un problema a la hora de ser manejados por los equipos de control de sólidos de descarga tanto desde el punto de vista operacional como económico.

En vista de que se tiene previsto desarrollar un proyecto de perforación de doce (12) localizaciones horizontales en el campo San Cristóbal, Distrito San Tomé, se ha tomado la previsión de realizar esta investigación, la cual persigue disminuir los riesgos inherentes a los problemas operacionales asociados a los sólidos de perforación (llamados comúnmente ripios) que aparecen con más frecuencia durante las perforaciones en la zona del distrito San Tomé. Dichos problemas son identificados mediante un análisis estadístico de la aparición de los mismos en pozos que fueron perforados en campos vecinos al campo San Cristóbal. Estos problemas pueden conllevar a incrementos de los costos operacionales y retrasos significativos que posteriormente pueden comprometer la rentabilidad y viabilidad del proyecto. La remoción de sólidos durante la perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal es uno de los aspectos más importantes en el control del sistema del fluido de perforación ya que tiene un impacto directo en la eficiencia de la perforación. Por lo tanto, es preferible invertir en equipos y nueva tecnología para prevenir problemas, que invertir en la resolución de los mismos, ya que resulta mucho más costoso el remediar la situación que prevenirla.

En tal sentido, se puede decir que el objeto principal de este estudio es el de seleccionar un sistema de control de sólidos de descarga que permita manejar de manera eficiente los grandes volúmenes de sólidos de perforación que se espera se generen en el campo San Cristóbal como consecuencia de las actividades de perforación de pozos horizontales en la zona, sobre todo debido a que se está en presencia de formaciones altamente lutíticas. De esta manera se busca evitar o minimizar los atrasos y costos adicionales que implican el mal manejo y/o disposición de estos sólidos para el proyecto.

La realización del estudio se llevó a cabo mediante varias fases de trabajo en donde se cumplieron una serie de actividades las cuales facilitaron el desarrollo de la investigación.

La primera fase es la Revisión Bibliográfica, y en esta se recabó toda la información básica necesaria para la comprensión de los análisis y evaluaciones requeridas en esta investigación. Dicha información incluye los conceptos básicos del proceso de control de sólidos, una descripción breve

INTRODUCCIÓN

de los principales equipos de control de sólidos y su funcionamiento, la descripción y ubicación del campo y características del proyecto, y las regulaciones ambientales para la zona en estudio.

En la segunda fase, se llevó a cabo la Recopilación de Información respecto a la geología y estratigrafía de las formaciones a atravesar, información sobre los equipos usados para el control de sólidos así como las especificaciones técnicas, de mantenimiento y operacionales de los mismos y sus costos de alquiler. Todo esto mediante visitas a áreas de campo y operacionales y a las compañías de servicio especializadas.

La tercera fase comprende todo lo relativo a la Evaluación Operacional y Económica de los sistemas de control de sólidos que fueron propuestos en este estudio, para lo cual se identificaron los principales problemas operacionales que pueden afectar los tiempos de perforación y se creó un programa en Excel para realizar un análisis económico de los beneficios que aportará la incorporación de los equipos seleccionados.

Finalmente en la cuarta fase se realizó la Selección Final del Sistema de Control de Sólidos que será implementado en el proyecto San Cristóbal, para lo cual se llevó a cabo un análisis comparativo entre los sistemas propuestos con el programa generado en la fase anterior, y posteriormente se plantearon las conclusiones y las posibles soluciones y/o recomendaciones a las implicaciones ambientales y problemas secundarios que pueda causar la implementación de dichos equipos de control de sólidos.

CAPITULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE CONTROL DE SÓLIDOS.

Se puede definir el proceso de control de sólidos como aquel en el cual se persigue la eliminación y remoción de la mayor cantidad posible de los sólidos indeseables generados durante dicho proceso, mediante la utilización de equipos especializados para tal fin, en función del tamaño y tipo de sólido.

El objetivo principal de un sistema de control de sólidos, es la remoción de los fragmentos y/o cortes de la formación generados durante un proceso de perforación. Este es uno de los aspectos más importantes dentro de un proyecto de este tipo debido a que es una medida directa de la eficiencia del proceso, ya que la inversión realizada para el control de sólidos y para la solución de problemas relacionados a los mismos, representan una parte significativa de los costos de perforación (aproximadamente entre un 10 y 15%).

1.1.1 EFECTOS DE LA ACUMULACIÓN DE SÓLIDOS DE PERFORACIÓN

El no controlar los sólidos generados durante la perforación apropiadamente, repercute directamente sobre factores tales como Tasa de Perforación (ROP), hidráulica o vida útil de la mecha, propiedades y costo del lodo, trayendo como consecuencia problemas como pega diferencial, pérdida de circulación, inestabilidad del hoyo, taponamiento de la línea de flujo, embolamiento de la mecha y por supuesto contaminación del fluido de perforación. A demás estos problemas influenciarán la vida de las bombas y otros equipos mecánicos del sistema de circulación, debido a que aceleran el desgaste de los mismos.

Durante las operaciones de perforación un exceso de sólidos afecta de la siguiente manera:

- **Tasa de Penetración (ROP):** a medida que aumenta el porcentaje de sólidos presentes en el sistema la ROP tiende a disminuir, sobre todo dependiendo del tamaño de las partículas, ya que

mientras más pequeño sea el tamaño de las mismas más se reducirá la ROP. Lo anteriormente mencionado se sustenta mediante la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{ROP_{lodo}}{ROP_{agua}} \right) = 1 - 0,0133 * F - 0,00114 * C \dots\dots\dots \text{Ecuación 1.1.1}^{[1]}$$

donde:

C= Porcentaje de partículas del fluido de perforación con diámetro mayor a 1 micrón.

F= Porcentaje de partículas del fluido de perforación con diámetro menor a 1 micrón.

La ecuación anterior se dedujo de estudios en operaciones de campo con fluidos base agua en base a los datos de la siguiente tabla:

TABLA 1.1.1 Efecto del porcentaje de sólidos en la ROP^[1]

FLUIDOS	%SÓLIDOS	% Por debajo de 1 micrón (μ)	% Por encima de 1 micrón (μ)	ROP (ft/hr)
Lodo A	8,6	1,4	7,2	16,5
Lodo A Disperso	11,6	5,7	5,9	6
Lodo B Disperso	6,2	5,2	1	8,5
Agua	0	0	0	23
Polímero A	7,1	0	7,1	21,5
Polímero B	2,8	0	2,8	22,4

De la ecuación anterior se observa que las partículas menores a 1 micrón tendrán un efecto 11,6 veces mayor sobre la ROP que las partículas mayores a 1 micrón, por lo tanto, se torna de primordial importancia la remoción de los sólidos cuando estos aún tienen un tamaño mayor a 1 micrón, y antes de que se desintegren formando así partículas mas pequeñas.

- **Vida Útil de las Mechas^[2]:** Mientras mayor sea el contenido de sólidos y materiales abrasivos menor será el tiempo de vida útil de las mechas debido a la fricción causada por el exceso de sólidos en el sistema con el metal. El tiempo de vida de una mecha es directamente proporcional a la velocidad rotatoria y el peso sobre la misma. La ecuación resulta como sigue:

$$TB = \left(\frac{b}{N * W^s} \right)$$

.....Ecuación 1.1.2^[2]

donde:

TB = Vida de la Mecha

N = Velocidad Rotatoria

W = Peso sobre la Mecha

b = Constante (depende de las propiedades del fluido de perforación)

s = Factor de Sólidos (depende de las propiedades del fluido de perforación)

por lo tanto, la remoción de los sólidos indeseables del sistema de lodo prolongaría considerablemente la vida de la mecha y en especial de los cojinetes de la misma.

- **Vida Útil de los Equipos de Superficie:** Mientras más limpio el fluido menos desgaste mecánico ocurre y el costo de mantenimiento del taladro disminuye proporcionalmente. El desgaste en los pistones y camisa de la bomba va a ser afectado por los sólidos de perforación abrasivos al igual que en los cojinetes de la mecha. Cuando se habla de materiales abrasivos se consideran a los que son mayores que la malla 200, según la definición API de arena, tales como cuarzo no caliza.

Sobre el fluido de perforación también se observaran efectos adversos debido a la presencia de sólidos indeseables en el sistema de lodo. Las propiedades del fluido de perforación que se ven mas afectadas debido a un exceso de sólidos, son las siguientes:

- **Densidad del Lodo:** A medida que aumenta el porcentaje de sólidos aumenta la densidad del lodo. Este aumento se da debido a una alteración del balance de materiales en el sistema de lodo, ya que aumenta el contenido sólido del mismo mientras que el contenido líquido permanece constante. La densidad y sus variaciones se pueden definir según la siguiente ecuación:

$$\rho = \rho_{BASE} * (1 - \%S) + \rho_{SOLIDOS} * (\%S) \dots \dots \dots \text{Ecuación 1.1.3}^{[1]}$$

donde:

ρ = Densidad del lodo con un porcentaje de sólidos determinado, lpg.

$\%S$ = Fracción de sólidos dentro del sistema.

ρ_{BASE} = Densidad del fluido base, lpg.

$\rho_{SOLIDOS}$ = Densidad de los sólidos dentro del sistema, lpg.

Se debe tener mucho cuidado en controlar adecuadamente esta propiedad ya que un aumento significativo en esta puede traer como consecuencia pérdidas de circulación importantes hacia la formación.

- **Espesor del Revoque y Pérdida de Filtrado:** A mayor cantidad de sólidos en el sistema, el revoque formado por el fluido de perforación será más grueso debido a la presencia de sólidos de mayor tamaño. Estos sólidos de mayor tamaño, se arreglarán de manera tal, que harán que el revoque sea más permeable, debido a que al disponerse los sólidos en capas sobre el revoque, el espacio entre una partícula y otra será mayor. Por lo tanto, el revoque dejará escapar una mayor cantidad de la fase continua del fluido hacia la formación. Al tener un revoque más grueso, la probabilidad de que ocurra un atascamiento diferencial de la tubería será mucho mayor, ya que hay una reducción del espacio anular, a demás de generar un torque y arrastre excesivo. Por otro lado, la excesiva pérdida de filtrado traerá como consecuencia que

los sólidos presentes en el filtrado obstruyan los poros de la formación permeable creando un daño importante a la formación.

- **Viscosidad Plástica:** Se incrementa debido al aumento de la fricción mecánica entre los sólidos presentes en el lodo y entre los sólidos y el líquido, y por ende, aumenta la resistencia a fluir por parte del fluido de perforación. De las propiedades reológicas esta es la que más afectada se ve por la presencia de sólidos indeseables. El aumento de la viscosidad se debe evitar desde todo punto de vista, debido a que mientras más alta sea ésta, se requiere mas presión de bombas para mover el fluido a través de la tubería de perforación y el espacio anular, lo cual trae consigo un gran riesgo de pérdida de circulación del fluido hacia la formación, ya que la presión ejercida por el lodo sobre la formación sobrepasa la presión de la misma.

En general, otras propiedades reológicas como el punto cedente y los geles, también aumentan con el aumento del porcentaje de sólidos, sin embargo, estos valores no son mas que una consecuencia de los aumentos de la viscosidad plástica, y se observa que mientras más aumentan dichos valores, mayor es la tendencia del fluido a la floculación. La consecuencia más notable que traen consigo estos problemas, es por supuesto, la de índole económica ya que estos implican costos adicionales en el tratamiento químico al fluido de perforación.

En el gráfico 1.1.1 que se muestra a continuación se da un ejemplo de las variaciones que se presentan en propiedades como la viscosidad plástica y el punto cedente según el tamaño del material que se añada al fluido de perforación. En este caso en particular, se muestran dichas variaciones con la adición de sólidos de perforación ultra finos, arcillas y partículas de barita menores a los 3 μ , y con sólidos mayores a los 3 μ y barita API (tamaño de partículas de la Barita API: Máximo 3% de 74 μ , máximo 5% de 44 μ , y el resto debe ser menor a 20 μ .)

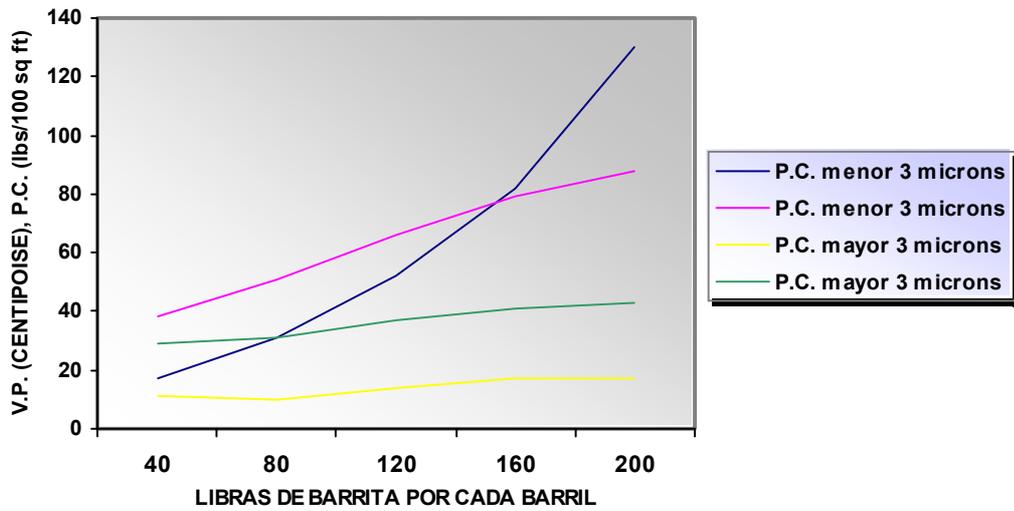


GRAFICO 1.1.1 Efecto del Tamaño de las Partículas en las Propiedades del Fluido de Perforación^[3]

1.1.2 CLASIFICACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS EN UN FLUIDO DE PERFORACIÓN^[4]

Las partículas en el fluido de perforación pueden variar desde arcillas muy pequeñas (menores a 1/25.400avo de pulgada), hasta cortes de perforación muy grandes (mayores a una pulgada). Debido a lo extremadamente pequeño de las partículas, los tamaños son expresados en unidades de micrones. Un micrón es la millonésima parte de un metro (1/1.000.000 o 1×10^{-6} m). De esta manera 1 pulgada es igual a 25.400 micrones.

Los sólidos de perforación están clasificados según el tamaño en las siguientes categorías:

TABLA 1.1.2 Clasificación de los Sólidos Según su Tamaño

CATEGORÍA	TAMAÑO	EJEMPLO
Coloidal	2 μ o menos	Bentonita, arcillas y sólidos de perforación ultra finos
Limo	2 - 74 μ	Barita, limo y sólidos de perforación finos.
Arena	74 – 2.000 μ	Arena y sólidos de perforación
Grava	Mayores a 2.000 μ	Sólidos de perforación grava, guijarro

La clasificación de los sólidos de acuerdo al tamaño, no toma en cuenta las propiedades físicas del material. Así, dentro de la clasificación limo se incluyen a las calizas, arena fina, carbonatos finos y la barita. Los sólidos de la clasificación arena pueden incluir partículas de arena, caliza, carbonatos, sólidos de perforación, y partículas de barita gruesa. Finalmente, los sólidos de la clasificación coloidal incluyen a la bentonita y otras arcillas, sólidos de perforación muy finos como la caliza, arena y carbonatos, y barita fina. En la figura 1.1.1 se esquematiza la clasificación de las partículas.

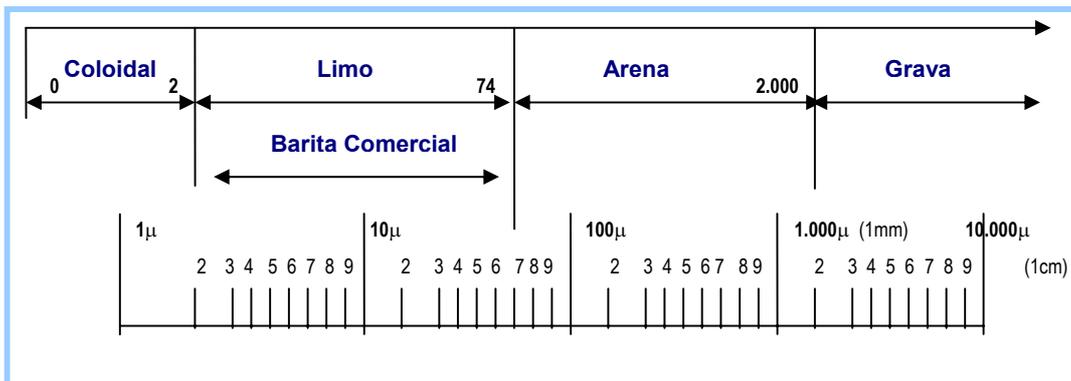


FIGURA 1.1.1 Clasificación del tamaño de Partículas.

Generalmente, el término arcilla, es usado para describir al mineral de arcilla premium, como la bentonita de Wyoming, la cual se añade para incrementar la viscosidad del fluido y para obtener un revoque delgado. Sin embargo, los cortes de perforación, como la barita y otros sólidos, también aumentarán la viscosidad, especialmente si el tamaño de la partícula se degrada al tamaño coloidal. La figura 1.1.2 ilustra como el tamaño de la partícula influye en el área superficial de un sólido de un volumen dado.

Si un sólido de perforación originalmente es un cubo de 40μ de longitud, éste tendría un área superficial de 9.600 micrones cuadrados. Si se permite que este cubo se degrade en cubos de 1μ de longitud, ahora el número de partículas serían 64.000 y el área superficial aumentaría a 384.000 micrones cuadrados, lo cual es 40 veces el área original. En un fluido de perforación, la viscosidad aumenta proporcionalmente con el área superficial de los sólidos, por ende es de suponerse que las partículas coloidales producen la mayor parte del aumento de la viscosidad. Cabe destacar que durante esta partición el volumen del sólido no cambia. Esto se visualiza en la Fig. 1.1.2

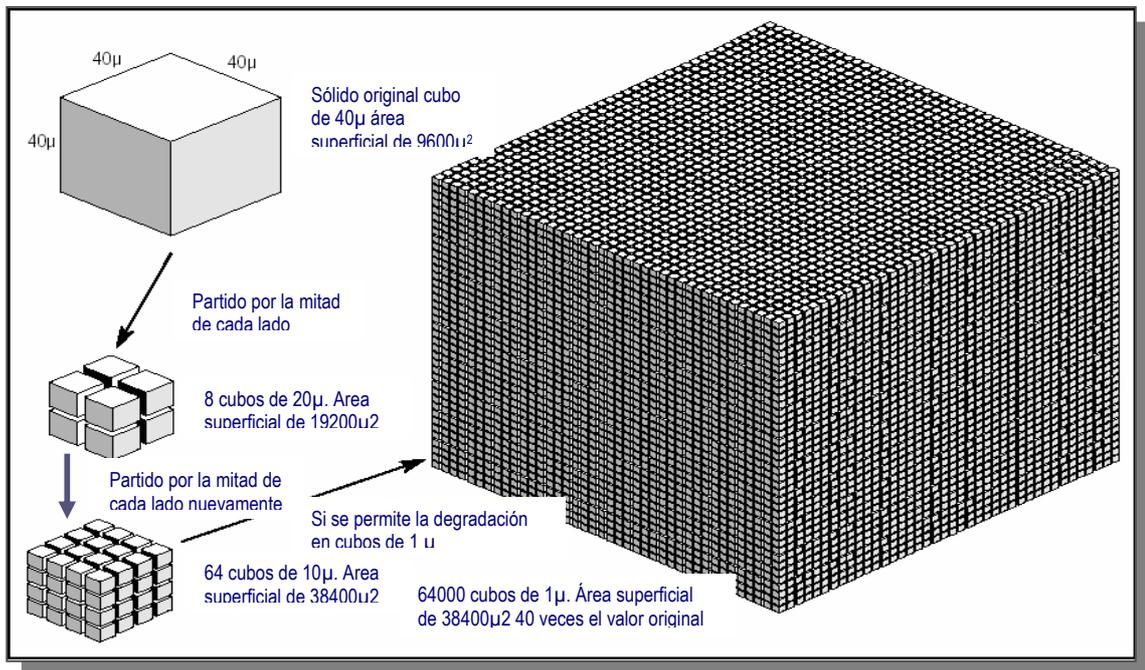


FIGURA 1.1.2 Efecto de la Acumulación de los Sólidos de Perforación

1.1.3 TIPO DE SÓLIDOS PRESENTES EN EL FLUIDO DE PERFORACIÓN

Básicamente se pueden clasificar los sólidos presentes en un fluido según su reactividad, o, la presencia o no de cargas eléctricas en su superficie. Por ejemplo, los sólidos que tienen numerosas cargas eléctricas de superficie, como las arcillas, se denominan **sólidos activos o reactivos**. Estos sólidos pueden ser agregados como aditivo al lodo, como la bentonita, o ser agregados de la formación, como lo que sucede cuando se perfora una lutita. Mientras que los **sólidos no reactivos o inertes**, son aquellos que no reaccionan con ningún componente del fluido debido a que no están cargados eléctricamente en su superficie, como por ejemplo la barita (sulfato de bario), y la mayoría de los materiales que se utilizan para densificar el lodo, y algunos sólidos perforados como la arena, caliza, sílice y dolomita.

Además, los sólidos de perforación pueden ser separados en dos categorías: **Sólidos de Baja Gravedad Específica (SBG)**, los cuales se encuentran entre valores de 2,3 a 2,8 de gravedad específica, y los **Sólidos de Alta Gravedad Específica (SAG)**, los cuales tienen gravedad específica mayor a 4,2. Los materiales densificantes como la barita o la hematita (óxido de hierro),

caen dentro de la categoría de SAG, y son utilizados para alcanzar densidades de lodo mayores a los 10 lpg. Y, por otro lado, los sólidos de perforación, arcillas y otros aditivos de los fluidos, caen la categoría de SBG y frecuentemente son utilizados para alcanzar densidades de lodo menores a los 10 lpg. Dependiendo del tipo de material utilizado para densificar el fluido de perforación, se dice que el fluido es **densificado** (con densificante de alta gravedad específica) o **no densificado** (con densificante de baja gravedad específica).

La inestabilidad de un lodo aumenta a medida que aumenta el porcentaje de sólidos presentes en él, sin embargo un buen tratamiento químico puede incrementar la capacidad de un fluido para tolerar sólidos, pero solo hasta cierto punto.

1.1.4 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE Y TIPO DE SÓLIDOS PRESENTES EN EL FLUIDO DE PERFORACIÓN MEDIANTE MEDICIONES DE LABORATORIO.^[5]

Durante el proceso de perforación, es de primordial importancia la verificación de las propiedades del fluido de perforación luego de cada recorrido de éste a través del sistema de lodos, lo que se denomina cada circulación, debido a que a través de estas mediciones se determina en que condición se encuentra el fluido de perforación y se pueden inferir posibles problemas en el subsuelo, y por ende buscar las soluciones más viables.

En el caso de los sólidos presentes en el lodo, mediante estas mediciones se puede concluir que tipo de sólidos y porcentaje de los mismos se encuentra en el sistema, y si estos son perjudiciales o no para el proceso. Las mediciones que se realizan al fluido para determinar la cantidad y tipo de sólidos presentes en el sistema del fluido de perforación se nombran a continuación:

- **Porcentaje en Volumen de los Sólidos.**
- **Capacidad de Intercambio Catiónico o Prueba de Azul de Metileno (MBT)**
- **Porcentaje de Arena.**

Porcentaje en Volumen de los Sólidos:

Este porcentaje se calcula mediante una técnica recomendada por el API mediante la cual se conoce la cantidad de sólidos presentes en el fluido de perforación, así como también la cantidad de líquido existente en el mismo. Esta técnica consiste en la destilación de una cantidad determinada de lodo en un equipo llamado Retorta (Figura 1.1.3). El lodo se coloca en un cilindro metálico de volumen determinado (generalmente equivale a 10cc de lodo), y se calienta en la retorta durante un tiempo estipulado, el cual es controlado por el mismo equipo. Este tiempo es el suficiente para que los líquidos presentes en el lodo se evaporen. Estos vapores son recogidos por un condensador que se coloca dentro de la retorta, y se recogen en forma líquida en un cilindro graduado, mediante el cual se determinará el volumen de líquido existente en el sistema.



FIGURA 1.1.3 Retorta

Dependiendo de la base del fluido, es decir, base agua o base aceite, se puede saber que cantidad o porcentaje en volumen hay de cada uno de los mismos en el fluido de perforación, además del porcentaje de sólidos presentes en el mismo. Si el fluido es base agua, se observará, o se deberá observar solo agua, y si no es así, se puede inferir que hay invasión de los fluidos de la formación hacia el pozo. Si el fluido es 100% base aceite, se debería observar solo aceite en la fase líquida, y, si hay presencia de agua, se deduce que hay influjo de agua hacia el pozo. De esta manera se puede supervisar lo que sucede con el fluido, ya que en el caso de un 100% base aceite, el porcentaje máximo tolerable de agua por el sistema es del 5%. Por otro lado, si el fluido es una

emulsión inversa, mediante la prueba de la retorta se puede verificar la relación aceite/agua (O/W), y hacerle un seguimiento a los cambios que ésta presente.

La relación mediante la cual se calcula el porcentaje de agua, aceite y sólidos al realizar la prueba de la retorta, es como sigue:

$$\%Sólidos = 100 - \%Aceite - \%Agua \dots\dots\dots \text{Ecuación 1.1.4}$$

Cuando se obtenga el líquido condensado en el cilindro graduado (el cual generalmente es de 10cc), la lectura que se haga es directamente el porcentaje presente de líquido en el sistema, y la diferencia será el porcentaje de sólidos. Si por ejemplo se tiene un fluido base agua, y se observa que en el cilindro hay 8,5cc de líquido, entonces esta lectura equivaldrá a una presencia de 85% de agua en el sistema, mientras que se tendrá un 15% de sólidos en el mismo. De igual manera se realizan los cálculos para fluidos 100% base aceite y para emulsiones inversas. El procedimiento para la realización de la prueba de ésta prueba se muestra en detalle en el Apéndice A.

El porcentaje de sólidos determinado mediante esta prueba incluye sólidos en suspensión (materiales densificantes y sólidos de baja gravedad específica) y materiales disueltos (sales).

Capacidad de Intercambio Catiónico o Prueba de Azul de Metileno (MBT):

Mediante la prueba de capacidad de azul de metileno del lodo se tiene un indicativo de la cantidad de arcillas reactivas (bentonita y/o sólidos de perforación) presentes en el sistema de lodo, lo que quiere decir, que se obtiene un estimado de la capacidad de intercambio de cationes totales (CIC) de los sólidos de perforación.

Esta prueba consiste en tomar una muestra de fluido a la cual se le va a añadir peróxido de hidrógeno y va a ser acidificada con H_2SO_4 , para así evitar que materiales orgánicos, tales como lignosulfonatos, lignitos, polímeros celulósicos, poliacrilatos, etc., interfieran en los resultados de la prueba, además de estimar el contenido de bentonita del lodo sin interferencia de otros materiales

absorbentes. Posteriormente, se satura la muestra con azul de metileno con el propósito de hacer que los materiales reactivos que se encuentran dentro de las arcillas lo absorban. Se toma una gota de esa solución con un agitador y se coloca sobre un papel filtro, de manera tal que se note la formación de un “halo” seco alrededor de una gota de sólidos en suspensión. (Figura 1.1.4).

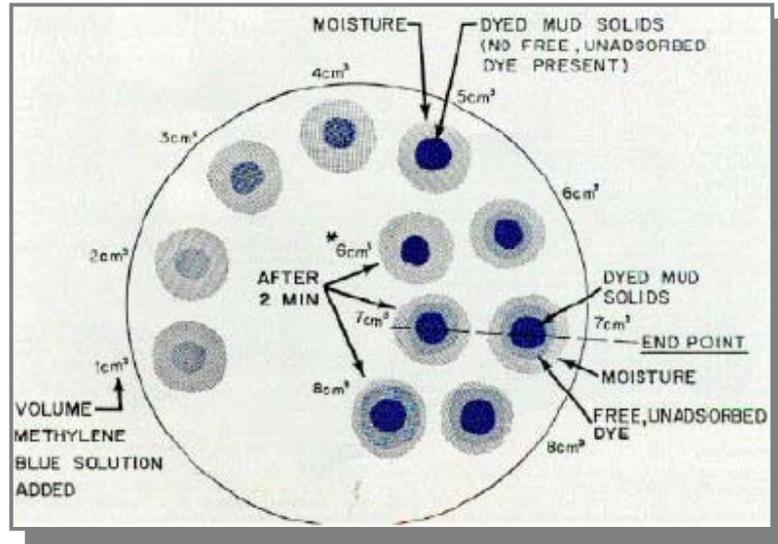


FIGURA 1.1.4 Papel Filtro de la Prueba MBT

Durante la prueba se lleva control de cuantos centímetros cúbicos (cm³) de azul de metileno son utilizados, para cierta cantidad, en cm³, de lodo. El equipo utilizado y el procedimiento, se encuentran descritos en el Apéndice B.

Se calcula el intercambio de cationes del fluido, conocido como la capacidad de azul de metileno, según la siguiente ecuación:

$$MBT = \frac{cm^3 \text{ de Azul de Metileno}}{cm^3 \text{ de Lodo}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 1.1.5}$$

donde:

MBT= Capacidad de azul de metileno

También se calcula la cantidad de bentonita equivalente presente en el sistema en lb/bbl mediante la siguiente ecuación:

$$Bentonita \left(\frac{lb}{bbl} \right) = 5 \times MBT = 5 \times \frac{cm^3 \text{ de Azul de Metileno}}{cm^3 \text{ de Lodo}} \quad \dots \text{ Ecuación 1.1.6}$$

Se consideran a valores mayores de 20 lb/bbl de bentonita, como valores altos de MBT, por lo cual al obtenerse estos valores se puede inferir lo siguiente:

- Presencia de sólidos de perforación dispersos como bentonita, ó,
- Presencia de sólidos de perforación ultra – finos.

Porcentaje de Arena.

El kit de porcentaje de arena, también conocida como prueba de la zanahoria, consiste en colocar una cantidad determinada de fluido en un recipiente de vidrio graduado (zanahoria, calibrada de 0 a 20%), al cual se le añade agua, se agita y luego se hace pasar por un tamiz de malla 200 y de 2,5 pulgadas de diámetro, unido a un embudo (Figura 1.1.5). En el tamiz quedan los sólidos contenidos en el fluido, los cuales se vierten nuevamente con agua en la zanahoria con la ayuda del embudo. Se deja reposar por unos minutos y se hace la lectura. Esta lectura se expresa directamente en porcentaje de arena contenido en el lodo de perforación.

El contenido de arena dentro del fluido causa daños considerables a los equipo de superficie como las bombas, manguera, válvulas, etc. Siempre está presente el peligro que la arena pueda sedimentarse en el hoyo y aprisionar la tubería cuando se paran las bombas. También el contenido de arena aumenta la densidad del fluido y esto es de mucho riesgo en formaciones someras donde hay tendencia a perder circulación. Se debe controlar el contenido de arena a un máximo de 1% del volumen, ya que esto es considerado generalmente buena práctica. El procedimiento se encuentra explicado en el Apéndice C.



FIGURA 1.1.5 Kit de Porcentaje de Arena o Zanahoria

Una consideración importante con respecto al fluido de perforación y a los ripsos, son las regulaciones ambientales de la zona, las cuales establecen los parámetros y factores claves para evitar incurrir en faltas graves que puedan atentar contra el equilibrio del medio ambiente circundante.

1.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE POZOS HORIZONTALES^[6, 7]

Esta sección esta enfocada a tener una breve referencia de lo que es un pozo horizontal y algunos fundamentos inherentes a los mismos.

1.2.1 DEFINICIÓN DE POZOS HORIZONTALES.

Son aquellos pozos que son perforados paralelamente a los planos de estratificación de un yacimiento, con la finalidad de navegar dentro del mismo (figura 1.2.1). Este término también se refiere a pozos altamente inclinados (con ángulo no menor a los 86°) y no solo a pozos con ángulo de inclinación de 90° respecto a la vertical. Estos pozos semejan una fractura de conductividad finita donde la altura de la fractura es el diámetro de la sección horizontal. Esta sección horizontal puede variar desde unos cientos de pies hasta unos miles, dependiendo de la extensión del yacimiento, el área de drenaje del mismo y la continuidad de la arena. También se consideran pozos horizontales a los pozos de reentrada, los cuales son pozos viejos a los cuales por alguna u otra razón se les debe desviar de su trayectoria inicial.

Este tipo de pozos debido a su longitud, permite establecer una mayor área de contacto con la arena petrolífera, y por lo tanto mayor exposición al flujo, lo cual ha permitido aumentar la eficiencia y economía en el recobro de petróleo con respecto a un pozo vertical. Otro objetivo de este tipo de pozos es reducir la producción de gas y agua en comparación con un pozo vertical, ya que la capacidad de manejo de grandes cantidades de fluidos indeseables del yacimiento es limitada.

La desviación fortuita del hoyo, resultante de las condiciones geológicas de las formaciones y de los factores mecánicos de la perforación, hizo tomar nota a los petroleros de la utilidad de hacer intencionalmente un pozo desviado, técnica que se comenzó a perfeccionar desde 1930 y se utiliza ventajosamente para determinadas situaciones. La utilización de la técnica más avanzada de perforación y terminación horizontal del pozo ha traído adelantos y cambios con respecto al pozo vertical, y por lo tanto una serie de diferencias, ventajas y desventajas que se deben tener en cuenta en el momento de realizar la planificación de proyectos de perforación.

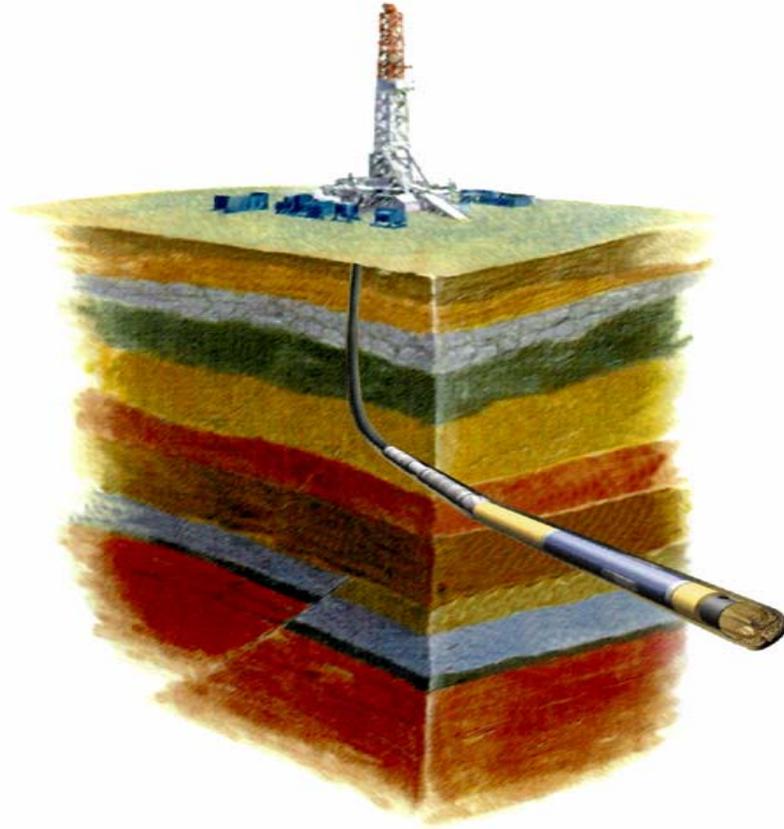


FIGURA 1.2.1 Figura de un Pozo Horizontal

1.2.2 DIFERENCIAS BÁSICAS ENTRE POZOS VERTICALES Y HORIZONTALES.

- El pozo vertical atraviesa todo el espesor de la formación, mientras que en el horizontal la barrena penetra por el centro del espesor de la formación hasta la longitud que sea mecánicamente aconsejable.
- El ángulo de penetración del hoyo horizontal en la formación tiene que ver con la facilidad de meter y sacar la sarta de perforación del hoyo.

- En el hoyo vertical, el desplazamiento del flujo del gas y/o petróleo del yacimiento hacia el pozo es radial; la permeabilidad horizontal (K_H) y la permeabilidad vertical (K_V) se miden en la dirección indicada en la Figura 1.2.2. Mientras que en el hoyo horizontal hay un giro de 90° con

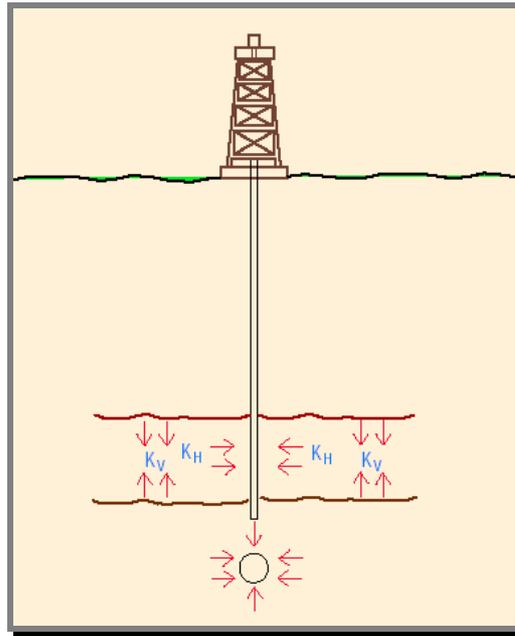


FIGURA 1.2.2 Dirección del Desplazamiento de los Fluidos y K_H y K_V en un Pozo Vertical

respecto a lo que sería un hoyo vertical y las designaciones de permeabilidad radial y horizontal cambian de sentido. Esta situación plantea nuevas apreciaciones y aplicaciones de metodología para calcular reservas extraíbles, potencial y tasa de producción; comportamiento de la presión de flujo y la estática; desarrollo de las relaciones gas/petróleo, agua/petróleo; manera y procedimiento para hacer pruebas de flujo, limpieza, rehabilitación o reacondicionamiento del pozo; posible utilización del pozo para otros fines (Figura 1.2.3).

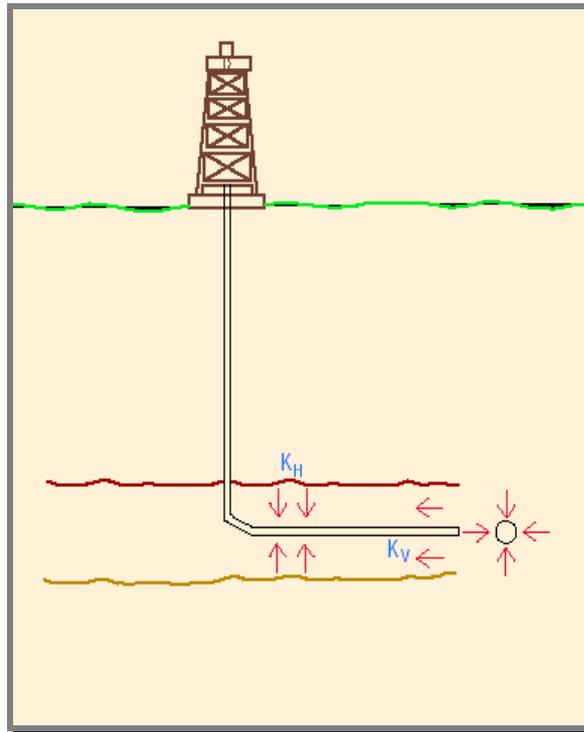


FIGURA 1.2.3 Dirección del Desplazamiento de los Fluidos y K_H y K_V en un Pozo Horizontal

- A medida que la longitud del hoyo horizontal se prolonga, la longitud y el peso de la sarta que descansa sobre la parte inferior del hoyo son mayores. Esto crea más roce, más fricción, más esfuerzo de torsión y arrastre al extraer la sarta de perforación.
- Condiciones similares de esfuerzos se presentan durante la corrida y cementación del revestidor de terminación o integrantes de la sarta de perforación y durante la toma de registros o perfiles.

1.2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS POZOS HORIZONTALES.

1.2.3.1 Ventajas de los Pozos Horizontales.

- Mejora en la eficiencia de barrido.
- Incrementa la productividad del yacimiento y mejora el recobro final del mismo.

- Reducción de la conificación y adedamiento de los fluidos viscosos.
- Posibilidad de explotar yacimientos con bajos porcentajes de recobro de hidrocarburos.
- Incremento del área de drenaje.
- La sección horizontal puede ser perforada a lo largo del tope de la arena productora, lo cual permite optimar la distancia entre el intervalo perforado y el contacto agua – petróleo o gas – petróleo.

La productividad de un pozo horizontal puede ser mayor a la de un pozo vertical por muchas razones, entre las cuales se tienen:

1. Los pozos horizontales tienen mayor área expuesta al flujo en el yacimiento.
2. Los pozos horizontales pueden ser perforados perpendiculares a la orientación de las fracturas naturales.
3. Incremento de la productividad por sus altas tasas de producción, siendo éste obviamente el principal beneficio.

1.2.3.2 Desventajas de los Pozos Horizontales.

- Altos costos de perforación, debido a que se gasta mayor tiempo en la perforación y al incremento del riesgo a presentar problemas operacionales.
- La permeabilidad vertical limita la eficiencia del barrido vertical.
- Las opciones de recompletación son limitadas, sobre todo cuando se trata de alto corte de agua o alta relación gas – petróleo.
- Requieren de fluidos especiales y libres de sólidos para prevenir el daño a la formación.

A demás la perforación horizontal se hace más difícil operacional y técnicamente que la vertical, debido a los múltiples esfuerzos actuantes, como los que se nombran a continuación:

1. El peso de la sarta, el cual es ligeramente menos impartido sobre la mecha.

2. El peso de las rocas suprayacentes, que provoca el derrumbe continuo de los estratos superiores del pozo.
3. El peso de la gravedad que origina que los ripios más grandes se depositen en la parte inferior del pozo.
4. El radio de curvatura el cual contribuye vectorialmente a minimizar las fuerzas de rotación de la mecha.
5. Mecánica de la roca y deposición de los estratos.

1.2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS POZOS HORIZONTALES.

Los pozos horizontales se clasifican según su desplazamiento horizontal y según la tasa de incremento del ángulo de desviación, y dependiendo de su clasificación se requiere de un ensamblaje especial de la sarta de perforación para alcanzar el grado de desviación máximo hasta el objetivo. Los pozos horizontales se clasifican de la siguiente manera:

- **Pozos de Radio Ultra – Corto.**

El radio de curvatura es de 1 a 2 pies, entre 45 y 60 grados por pie de desviación y un desplazamiento horizontal máximo de 100 pies. Este tipo de pozos se utiliza para perforar varios pozos horizontales a partir de un mismo pozo vertical para drenar yacimientos multicapas, y es de útil aplicación en formaciones poco consolidadas. Sin embargo, a partir de este tipo de pozos no se puede tomar núcleo ni realizar actividades de perfilaje debido a lo abrupto del radio de curvatura, se completa únicamente a hoyo desnudo, tienen muy poco radio de drenaje, y son de diámetro del hoyo pequeño.

- **Pozos de Radio Corto.**

El radio de curvatura es de 20 a 45 pies, entre 1 y 3 grados por pie de desviación y un desplazamiento horizontal de 100 a 500 pies. Al ser pozos de poca desviación y por lo general de poca profundidad, son útiles en formaciones con litología compleja, a demás de ser recomendados para yacimientos pequeños. Este tipo de pozo es bueno en proyectos donde se

busca mejorar la recuperación de petróleo en pozos viejos debido a que se construye en base a pozos convencionales o de reentrada, e incluso brindan la posibilidad de poder aislar zonas problemáticas inmediatas a la zona productora. Los pozos de radio corto presentan las mismas limitaciones que los de radio ultra – corto, no se puede tomar núcleo ni realizar actividades de perfilaje debido a lo abrupto del radio de curvatura, se completa únicamente a hoyo desnudo, tienen muy poco radio de drenaje, y son de diámetro de hoyo pequeño.

- **Pozos de Radio Medio.**

El radio de curvatura es de 300 a 1000 pies, entre 20 y 40 grados cada 100 pies de desviación. Tienen un desplazamiento horizontal de 500 a 4000 pies. Una curvatura de radio medio para este tipo de pozos requiere menos de 500 pies de hoyo desviado. Con estos pozos se pueden realizar actividades de toma de núcleo y perfilaje debido a que se pueden completar normalmente, se puede perforar completamente la zona objetivo debido a su longitud, y presentan menor torque y arrastre que los pozos de las clasificaciones anteriores ya que el diámetro es mayor a los de radio ultra - corto y corto, pero menor a 6 1/8 “.

- **Pozos de Radio Largo.**

El radio de curvatura oscila entre 1000 y 3000 pies, con un ángulo de desviación de 1 a 7 grados por cada 100 pies. Se alcanzan distancias entre los 4000 y 6000 pies. Este tipo de pozo se usa para perforaciones de desarrollo, y en el se pueden aplicar métodos de levantamiento artificial, considerando los riesgos que implica la colocación de los mismos en la sección de alta curvatura, y los requerimientos para lograr que los equipos levanten la columna de fluidos. La longitud del radio esperado es la que determina cual debe ser la profundidad del pozo para alcanzar la inclinación deseada. En los pozos de radio largo se utiliza un equipo de perforación convencional y revestidores standard y se pueden realizar actividades de perfilaje y toma de núcleos, pero es de esperarse que el daño causado a la formación sea mucho mayor debido al tamaño de las secciones perforadas, y más aún, que sea mucho más costoso en cuanto a lo que se refiere a revestidores, cementación, fluidos de perforación y equipos de superficie.

En la figura 1.2.3 se esquematizan los tipos de pozos horizontales y sus características relevantes.

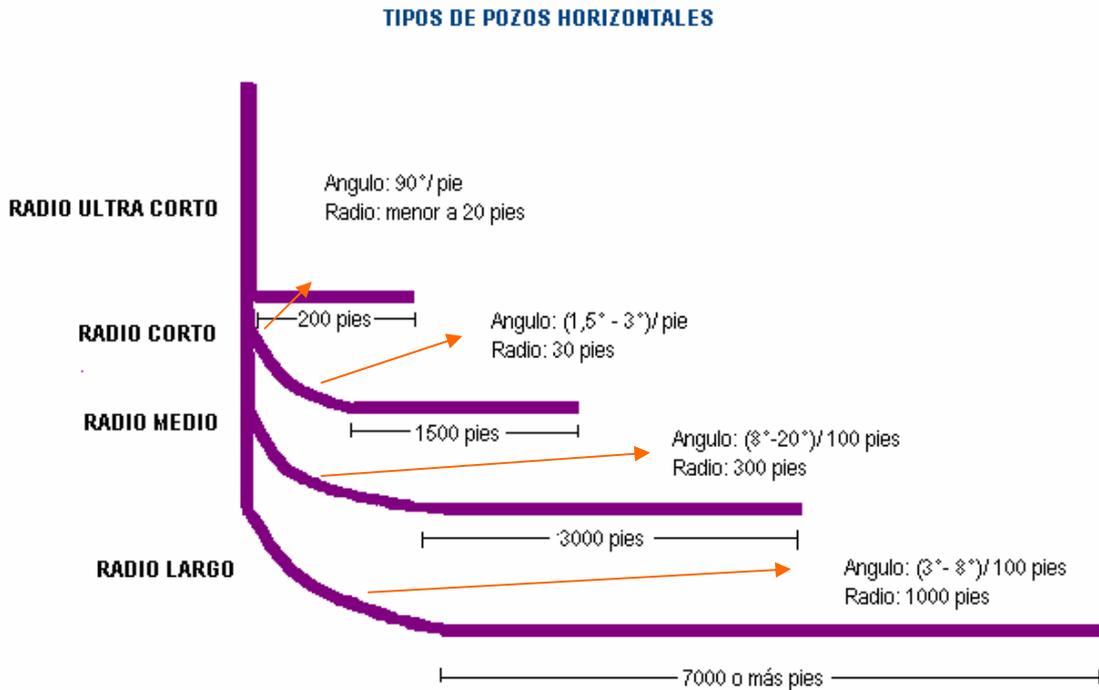


FIGURA 1.2.4 Tipos de Pozos Horizontales

1.2.5 TÉCNICAS DE COMPLETACIÓN DE POZOS HORIZONTALES

El tipo de completación que se va a implementar en un pozo horizontal depende de muchos factores tales como la estabilidad y tipo de la formación a atravesar, sobre todo si se considera la perforación a hoyo abierto, el daño causado a la formación, limpieza del hoyo, y el hecho de que los procesos de estimulación se recomiendan en pozos completados con revestidor cementado, ya que las diferentes secciones a tratar pueden ser aisladas a lo largo de la longitud del pozo.

También se debe tener en cuenta el tiempo de perforación del pozo, ya que en pozos horizontales se emplea mucho más tiempo que en los verticales. Estos largos tiempos de exposición de la formación al lodo de perforación, traen como consecuencia mayor daño a la formación por invasión de filtrado. Por lo tanto se debe procurar utilizar fluidos poliméricos y/o con bajo contenido de sólidos. La planificación y rendimiento de pozos horizontales depende directamente del tipo de completación que se vaya a realizar, y el tipo de completación a su vez depende de las observaciones y datos que

se tengan de la zona a desarrollar. A continuación se presentan los tipos de completación que se llevan a cabo en pozos horizontales.

- **Completación a Hoyo Abierto.**

Esta es la opción más económica, sin embargo solo se puede perforar bajo estas condiciones si la formación se considera lo suficientemente estable. En este tipo de pozos no se puede emplear estimulaciones directamente ya que no se puede controlar a los fluidos inyectores.

- **Completación con Forro Ranurado.**

Se utiliza en pozos donde existe el riesgo de colapso del pozo, ya que proporciona un control limitado en la producción de arena, sin embargo es susceptible al taponamiento. Se puede utilizar en formaciones no consolidadas empleando empaques con grava. Con este tipo de completación se puede introducir herramientas de subsuelo.

- **Completación con Forro Ranurado y Empacadura Externa**

Es el mismo revestidor ranurado, pero con empacaduras externas ubicadas a lo largo de la sección horizontal, las cuales facilitan los trabajos de estimulación y controla la producción del pozo. Sin embargo, se presentan problemas al introducir los forros con las empacaduras debido a que generalmente la inclinación de la sección no es totalmente horizontal, y a demás, las empacaduras pueden no encajar totalmente en la formación.

- **Completación con Revestidor Cementado y Perforado.**

Se emplea en pozos horizontales de radio medio y largo. Para este tipo de completación se debe utilizar un cemento especial y formulado bajo las normas API, el cual debe ser libre de partículas sólidas para garantizar cierta homogeneidad alrededor del revestidor, y con contenido de agua libre y filtrado mucho menor que el de los cementos convencionales, para evitar la formación de canales a través del cemento en la sección horizontal.

Durante la perforación de pozos horizontales es importante tomar en cuenta ciertos parámetros operacionales como lo son la estabilidad del pozo y el torque y arrastre de la sarta de perforación.

En lo que a la estabilidad del hoyo se refiere, este parámetro se vuelve crítico en ángulos pronunciados y sobretodo con la presencia de lutitas hidratables que puedan hincharse al contacto con el fluido de perforación. El ensanchamiento de las capas de lutitas no solamente implica pega de la tubería y dificultad de manejo de fluidos, sino también acumulación de ripios y sólidos de perforación en la parte inferior del pozo, aumento de presiones en el hoyo y posible derrumbe de las secciones superiores. Para evitar estos problemas se recomienda utilizar lodos poliméricos o base aceite para obtener un revoque más liso, delgado y que no permita la hidratación de las lutitas. También se recomienda vigilar la velocidad del fluido en el anular de manera de garantizar una buena limpieza sin correr el riesgo de socavar la formación.

En un pozo de inclinación pronunciada, las fuerzas laterales entre la sarta y la pared del pozo son bastante altas, y estas se ven afectadas por parámetros como el tipo de formación, tortuosidad de la trayectoria del pozo, eficiencia de limpieza, superficie de contacto y el tipo de fluido de perforación.

Por lo tanto es de vital importancia tener conciencia de la magnitud de las fuerzas que se generan durante la perforación debido a los movimientos de la sarta y cuando se realizan viajes hacia adentro y afuera del pozo, ya que estas fuerzas crean tensiones sobre la sarta de perforación. Para minimizar estas fuerzas se recomienda el uso de fluidos de perforación base aceite, ya que estos forman una película lubricante entre la sarta y las paredes del pozo, y si el fluido es base agua se recomienda añadir lubricantes que tengan el mismo efecto que los fluidos base aceite.

1.3 ANTECEDENTES DEL CONTROL DE SÓLIDOS^[8]

Lo que hoy conocemos como tecnología de control de sólidos, fue un proceso evolutivo que se dio a través de muchos años, el cual se basó en métodos rudimentarios que buscaban darle una pronta solución a problemas que fueron surgiendo a medida que el proceso de perforación se iba perfeccionando. El método más rudimentario fue la utilización de fosas de sedimentación del fluido para el control de sólidos. Sin embargo, en vista de las implicaciones económicas y ambientales que traían estas fosas, la industria petrolera adoptó los métodos de separación ya existentes en la industria de la minería y el carbón, pero con algunas modificaciones y adaptaciones al área petrolera. Una vez que se observaron los beneficios que traía la remoción de sólidos del fluido de perforación, las grandes compañías petroleras comenzaron a crear laboratorios de investigación para estudiar las soluciones a las comunes aplicaciones de perforación de pozos y entonces comenzaron a mejorar los métodos disponibles para la industria. Las principales compañías petroleras, junto con los proveedores de servicios, unieron fuerzas para desarrollar mejores equipos y métodos de control de sólidos con el fin de reducir los costos de perforación y minimizar problemas en el pozo relacionados con la contaminación de sólidos.

A mediados de los años 1800's, el uso de fluidos de perforación se introdujo para suspender los ripios perforados hasta que el hoyo fuera vaciado, enfriar la mecha de perforación y suspender los ripios para su remoción.

La primera forma de control de sólidos fue un sistema de fosas y canales que eran excavados en el sitio, donde los ripios eran separados del fluido por gravedad conforme el lodo fluía desde el tubo campana a través de las fosas y canales de sedimentación hacia una fosa de succión. El fluido "limpio" era levantado por una bomba y recirculado. Con el tiempo, en estas fosas llenas con ripios, el fluido llegaba a ser demasiado viscoso para ser bombeado. Para resolver este problema, parte del fluido era bombeado hacia una fosa de reserva y el remanente era diluido con agua para reducir su viscosidad lo suficiente para reanudar la perforación.

A finales de los años 1920's y comienzos de los 1930's vino la introducción de la tecnología de separación de las industrias de procesamiento de minerales y del carbón. Dos ideas, llamadas cribas

de tambor rotatorio o cribas rotatorias, ganaron aceptación en la perforación de pozos. Estas cribas, llamadas tromeles, fueron ampliamente utilizadas en los equipos con subestructura de baja altura donde fueron incorporadas dentro de la línea de flujo. Estas primeras máquinas utilizaban telas de 4 a 12 mallas (4.75 a 1.70 mm) y fueron populares porque no requerían de energía para operar. Las unidades eran conducidas por una rueda grande de potencia que rotaba la criba tambor utilizando el flujo de lodo del pozo perforado. Esta rueda de potencia proporcionaba toda la energía requerida para rotar la criba tambor mediante el uso de bandas-V y engranes.

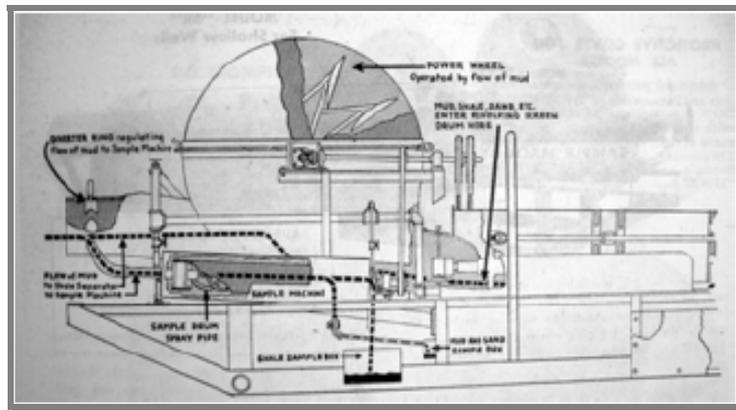


FIGURA 1.3.1 Diagrama del Trommel

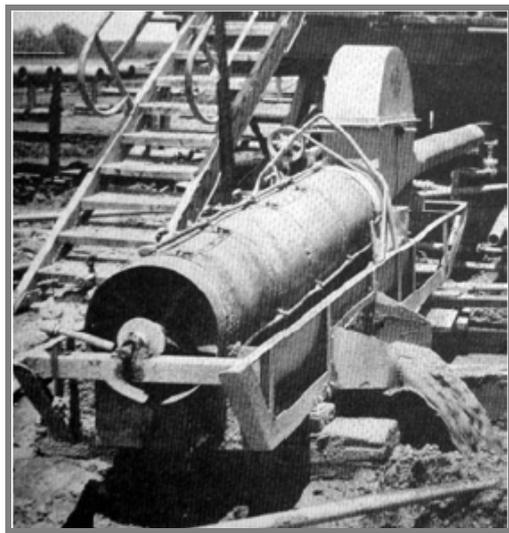


FIGURA 1.3.2 Criba Trommel Thompson

Las cribas vibratorias, “zarandas”, también fueron adaptadas a las aplicaciones de perforación de pozos petroleros y por muchos años llegaron a ser el único equipo utilizado en el taladro para el control de sólidos. Las primeras máquinas fueron cribas vibratorias diseñadas para trabajar en seco, adaptadas y modificadas para trabajar con fluidos de perforación. El nombre de “zarandas” fue dado con el propósito de distinguirlas de las cribas vibratorias utilizadas en la minería, aunque los mismos fabricantes proporcionaban máquinas para ambas industrias.

Algunas de las modificaciones efectuadas para el uso en el control de sólidos, incluyen las mallas estilo gancho de 4 pies x 5 pies (1.22 metros x 1.52 metros), las cuales eran tensadas por los lados utilizando pernos para apretarlas. El movimiento de éstas máquinas era elíptico y las canastas tenían una inclinación cuesta abajo, utilizando la gravedad para asistir en la descarga de los ripios. Las telas eran limitadas hasta 30 mallas (590 micrones).

Este tipo básico de máquina continuó siendo la principal forma de control de sólidos hasta finales de los años 1960's y hasta cierto punto, con algunas mejoras, sigue siendo utilizada.

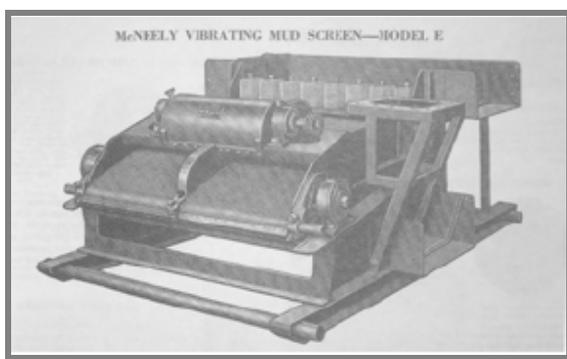


FIGURA 1.3.3 Zaranda McNeely Modelo E

A medida que el proceso se hacía más complejo se observó que mientras más pequeños eran los ripios que se dejaban en el fluido se afectaba el progreso de la perforación en forma negativa. Y es a principios del año 1930, que en búsqueda de soluciones para esta situación y gracias al esfuerzo de las grandes compañías petroleras, se introdujo otra tecnología utilizada en la industria minera, el

hidrociclón, o mejor conocido como cono. El principio de operación de este “nuevo” dispositivo fue la separación de partículas pesadas y gruesas del fluido por la acción centrífuga sobre los sólidos transportados por el fluido dentro del ciclón, donde los sólidos son forzados hacia la periferia del cono y las partículas más pesadas salen por el fondo del cono, el fluido más limpio asciende hacia la parte superior del cono y se descarga como efluente. Estos desarenadores (desanders) estaban en el rango de 6 a 12 pulgadas (15.2 a 30.5 cm) y eran capaces de remover partículas mayores de 60 micrones (230 mallas).

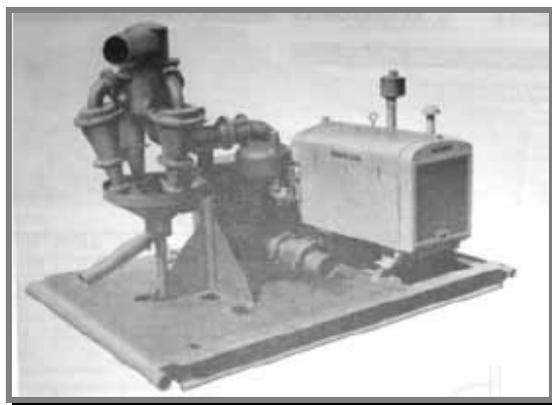


FIGURA 1.3.4 Desarenador Thompson

A pesar del uso de los desarenadores, aún existían problemas de atascamiento en las paredes de los pozos, los cuales se atribuían a lo grueso de los revoques, ya que quedaba un remanente de sólidos demasiado finos en el fluido de perforación. Para la remoción de estos sólidos, un cono desarenador de 4 pulgadas (10.2 cm.) se introdujo a principio de los años 1960's. Estos pequeños hidrociclones eran capaces de remover partículas mucho más pequeñas, de hasta 20 a 30 micrones, y llegaron a ser conocidos como “deslimadores” (desilters), dando como resultado un incremento en la vida de la mecha, reduciendo los costos de reparación de las bombas, incrementado las ratas de penetración y disminuyendo los costos del fluido de perforación.

Investigaciones posteriores llevadas a cabo por las principales compañías petroleras, encontraron que las partículas ultra finas, menores de 10 micrones, en el fluido de perforación, obstruían grandes cantidades de líquido y creaban problemas de viscosidad que podían solo resolverse mediante

dilución. Entonces, a principios de los años 1950's, el uso de las centrifugas, las cuales habían sido utilizadas en otras industrias por muchos años, fueron introducidas y adaptadas para su uso en el campo petrolero. Su primer uso fue el de remoción y descarga de partículas de tamaño coloidal en fluidos pesados. Solo en años recientes, estas han sido utilizadas en fluidos no pesados para reducir y desechar los sólidos ultra finos.

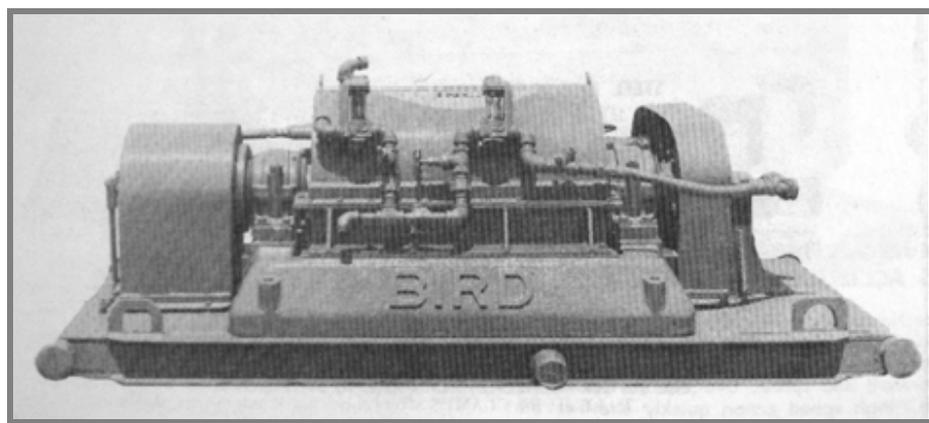


FIGURA 1.3.5 Primera Centrifuga Decantadora

A principio de los años 1970's el "limpiador de lodos" (mud cleaner), fue desarrollado con objeto de reducir la descarga de la costosa fase líquida de los fluidos de perforación causada por el desarenamiento y deslimamiento de los conos. Esta innovación hizo uso de la funcionalidad del hidrociclón e incorporó una zaranda con malla fina capaz de eliminar los sólidos de hasta malla 200 (74 micrones), permitiendo que la fase líquida y la barita retornaran al sistema. Innovaciones más recientes son las zarandas de movimiento lineal, las cuales son capaces de hacer separaciones más finas que los tipos de zarandas previas y con mayores capacidades. Estas máquinas tienen la capacidad de ser inclinadas cuesta arriba, lo cual reduce la pérdida de la fase líquida sobre la malla. Debido a las ventajas tecnológicas de este tipo de zaranda, esta ha llegado a ser el tipo standard de zaranda utilizada en los sistemas de control de sólidos. Después de la introducción de las zarandas de movimiento lineal, una versión modificada del concepto de limpiador de lodos comenzó a evolucionar, donde la zaranda convencional utilizada en el limpiador de lodos fue reemplazada por una zaranda lineal, y el nombre de la unidad llegó a ser conocido como "Acondicionador de Lodo".



FIGURA 1.3.6 Limpiador de Lodos

Todas estas mejoras tienen los mismos objetivos generales, **reducir la cantidad de residuos de perforación que sean desechados**. Otra adaptación es la “secadora”, donde los sólidos que son descargados por el equipo de control de sólidos son recolectados y transportados a otra zaranda lineal con telas más finas (de hasta 450 mallas) para recuperar el exceso de fluido de perforación antes de la disposición de los sólidos removidos. Una posterior evolución de este concepto es la “Secadora de alta fuerza G”. Los sólidos desechados de este tipo de sistemas están semi-secos y pueden ser dispuestos en el sitio o trasladados a otro lugar para su disposición.

Otras innovaciones utilizadas para remover y manejar grandes ripios frágiles y grumos de arcilla conocidos como “Gumbo”, son las “cadenas gumbo” o “mallas gumbo” (Scalper), las cuales sirven con el propósito de remover éstos sólidos antes de que impacten las mallas de la zaranda, donde tienen la tendencia de tapar las mallas, por lo que reducen la capacidad de manejo volumétrico del sistema de control de sólidos.



FIGURA 1.3.7 Zaranda de movimiento lineal

1.4 PROCESO DE CONTROL DE SÓLIDOS.

Principalmente se utilizan dos tipos de control de sólidos en los fluidos de perforación: dilución y separación mecánica. La dilución es la disminución de la concentración de sólidos en el fluido con lodo fresco (bajo contenido de sólidos), a demás requiere tratamiento químico adicional y genera excesivos volúmenes de fluido que tienen que ser almacenados o desechados, lo cual es particularmente difícil y costoso en áreas ambientalmente sensitivas.

La remoción de sólidos que se lleva a cabo mediante la utilización de una diversidad de equipos, se denomina separación mecánica. Estos equipos cumplen una función específica dentro del sistema de separación. La mejor combinación, o, combinación más óptima de los mecanismos de separación depende del tamaño y tipo de partícula a separar. En la figura 1.4.1 se muestra el tamaño de partícula y el equipo de control de sólidos que removerá un tamaño de partícula dada.

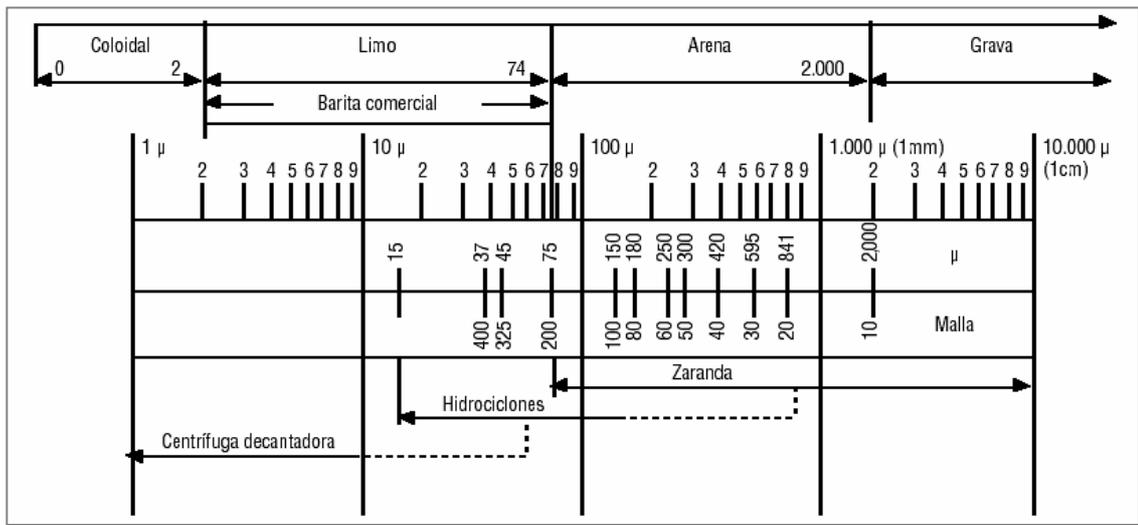


FIGURA 1.4.1 Clasificación de los Tamaños de Partículas

Algunos de los métodos básicos de separación mecánica utilizados con más frecuencia en el proceso de control de sólidos son los siguientes:

- Asentamiento
- Zarandas vibratorias

- Hidrociclones
- Centrifugas

Sin embargo, dentro de lo que se denomina separación mecánica podemos subdividir la misma en separación mecánica por métodos primarios y la clasificación húmeda. Los métodos primarios son los métodos que tienen como principio fundamental el asentamiento gravitacional, mientras que la clasificación húmeda, se refiere a los métodos en donde el asentamiento de las partículas se lleva a cabo mediante aceleración centrífuga.

Todos los métodos se rigen según las mismas leyes físicas, así que si el fluido se mantiene en movimiento, el asentamiento de las partículas está gobernado por la ley de Stoke, la cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$V_S = \frac{G \cdot D_S^2 \cdot (\rho_S - \rho_L)}{463 \cdot \mu}$$

..... Ecuación 1.4.1^[4]

Donde:

V_S = Velocidad de asentamiento (pies/sec)

G = Fuerza Gravitacional (pies/sec²)

D_S = Diámetro del Sólido (pies)

ρ_S = Densidad del sólido (lb/pies³)

ρ_L = Densidad del Líquido (lb/pies³)

μ = Viscosidad del Líquido (cP)

Esta ecuación es una expresión matemática de eventos comúnmente observados. Por ejemplo a medida que la diferencia entre las densidades aumenta, más rápida será la velocidad de asentamiento de la partícula, y de igual manera mientras mayor sean D_S y μ .

La Fuerza G (G) es la aceleración gravitacional que es capaz de generar el equipo y es función de la longitud de esfuerzo recíprocante (Stroke) y el cuadrado de las RPM.

$$G = \text{Longitud (pulg.)} \cdot \frac{\text{RPM}^2}{70.400} \dots\dots\dots \text{Ecuación 1.4.2}^{[8]}$$

Mediante observaciones de campo, se ha verificado que con una combinación de baja viscosidad del fluido y bajas tasas de bombeo del mismo, se asentarán los sólidos más grandes y pesados. Por otro lado, para remover sólidos de perforación y arena es preferible el asentamiento o aplicación de fuerzas centrífugas. Sin embargo, se debe tener cuidado con la barita que se encuentra en el fluido, ya que ésta también tiende a asentarse y ser removida del sistema.

1.4.1 SEPARACIÓN MECÁNICA: MÉTODOS PRIMARIOS

A continuación se describirán brevemente los principales métodos de separación mecánica que normalmente se emplean en cualquier proyecto de perforación, tomando en cuenta el tipo de sólidos que maneja cada uno de ellos, así como también sus características y limitaciones operacionales.

1.4.1.1 Divisor de Flujo^[8]

Este equipo distribuye uniformemente el fluido de perforación junto con los ripios a la entrada de las zarandas primarias, permitiendo el uso de mayores tasas de circulación y así mejorar la relación de área de malla disponible con respecto al volumen total de fluido procesado (Figura 1.4.2).

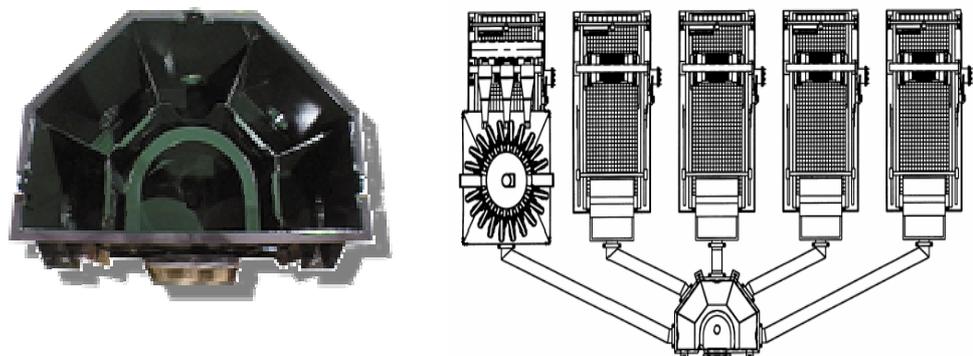


FIGURA 1.4.2 Divisor de Flujo^[8]

1.4.1.2 Tanque de asentamiento o Trampas de Arena

De acuerdo a la ley de Stoke, la velocidad de asentamiento de una partícula depende de su densidad, forma y tamaño, de la viscosidad y densidad del fluido, y de la fuerza de gravedad. En control de sólidos de perforación la técnica del asentamiento se puede utilizar de dos formas, Asentamiento Gravitacional, y, Asentamiento Gravitacional Acelerado. Con la utilización de los tanques de asentamiento o trampas de arena, se está aplicando la técnica de Asentamiento Gravitacional.

El asentamiento de las partículas en estos tanques depende también del régimen del fluido y del tiempo de estadía del fluido en el tanque. Se tendrá un asentamiento efectivo solo cuando el fluido se encuentre en régimen laminar y con baja viscosidad y fuerza de gel. Los tanques de fluido de perforación se colocan generalmente cuando no se cuenta en el taladro con zarandas de primera calidad, para remover algunos de los sólidos que no fueron eliminados por estas, y a demás mantener el fluido agitado. Estos tanques son rara vez utilizados en las operaciones de perforación modernas, sin embargo se encuentran de vez en cuando.



FIGURA 1.4.3 Tanque de asentamiento con capacidad de 500 bbl.

1.4.1.3 Zarandas Vibratorias

Las zarandas vibratorias son la primera línea de defensa contra el aumento del contenido de sólidos en el fluido de perforación. Se puede describir a una zaranda vibratoria como un separador vibratorio con tamices o pantallas, usada para remover sólidos de perforación del fluido. Las máquinas tienen un depósito debajo del panel vibrador para recolectar el fluido de perforación limpio y retornarlo al sistema de lodo. Mientras tanto, los sólidos se quedan retenidos por las aberturas de las mallas del tamiz, las cuales son más pequeñas que el diámetro de los sólidos de mayor tamaño, para posteriormente ser descargados y desechados luego de pasar por la zaranda.

El fluido es transportado hasta los vertederos o lo que se conoce como los divisores de flujo, donde estos reparten el fluido equitativamente entre el número de zarandas principales. Debido a que los fluidos fluyen a las zarandas desde el pozo por gravedad, existe muy poca degradación mecánica de los sólidos perforados antes de que estos alcancen la superficie del tamiz. Esta es la mejor oportunidad de remover los sólidos más frágiles del fluido de perforación antes de que estos generen partículas pequeñas por la acción de los agitadores y bombas centrífugas^[9].



a) Zaranda Lineal de 500 bbl.

b) Unidad en Cascada Series.

FIGURA 1.4.4 Diferentes Tipos de Zarandas Vibratorias

Se dice que la zaranda vibratoria es la técnica más importante en un sistema de control de sólidos, debido a que a diferencia del resto de los equipos, ellas por si solas remueven casi el 100% de las partículas mayores e iguales a un tamaño en particular según la abertura de los orificios de la malla. Por ejemplo, si se tiene un tamiz cuadrado de 200 mallas, la zaranda será capaz de remover el 100% de los sólidos de tamaño mayor o igual a 74 micrones. En el gráfico 1.4.1 se ilustra la relación existente entre el número de la malla del tamiz y el tamaño de la abertura de los orificios, o el tamaño de partícula que se espera remover^[4].

Varios tipos diferentes de zarandas pueden ser combinados “en cascada” para producir la mejor eficiencia de remoción de sólidos. Las zarandas de movimiento circular a veces son usadas como zarandas “de separación preliminar” para eliminar los grandes sólidos pegajosos. Luego el fluido pasa por una zaranda elíptica o lineal que produce una fuerza más alta para eliminar los sólidos más finos.

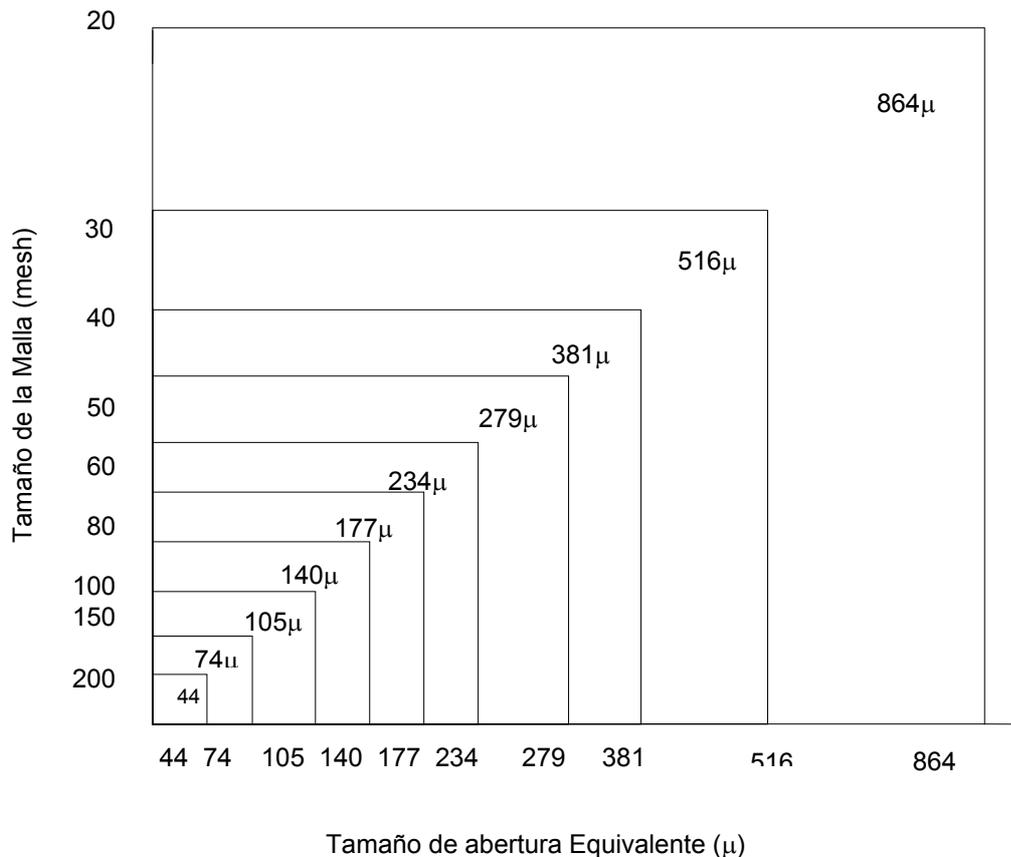


GRÁFICO 1.4.1 Tamaño de Malla vs. Abertura en Micrones^[4]

Las zarandas previenen que los sólidos de mayor tamaño sean recirculados y degradados, de esta manera 90% de los sólidos generados pueden ser removidos por ellas. El 10% restante corresponde a partículas del tamaño limo y coloidal, las cuales son removidas por el resto de los equipos que conforman el sistema y/o por dilución.

El funcionamiento de las zarandas depende de varios factores que influyen de una manera u otra en la eficiencia de remoción de éstas. Sin embargo, cuando se habla del rendimiento y funcionamiento de las zarandas se debe hablar principalmente de la calidad y tipo de tamiz, tipo de fluido de perforación, tasa de bombeo, y del efecto de la localización del vibrador respecto al centro de gravedad de la máquina (tipo de zarandas), ya que estos son los parámetros que más afectan la eficiencia de las mismas. A continuación se describen dichos parámetros.

A.- Tamiz y Mallas.

La cantidad de sólidos removidos por las zarandas depende completamente de la malla del tamiz, ya que mientras más fina la malla habrá más remoción de sólidos. Por lo tanto las zarandas vibratorias son tan buenas como lo sean el tamaño de la malla y la calidad del tamiz. Todas las características de rendimiento de la zaranda llegan a ser insignificantes si la malla no transmite la vibración y las fuerzas G a los ripios y al fluido de perforación.

Frecuentemente la selección del tamiz está basada en la experiencia previa combinada con el conocimiento de los diferentes tipos de tamiz, con sus diferencias en diseño y capacidades. De esta manera la selección del tamiz se realizará en función de una serie de consideraciones y términos que generalmente se utilizan para describirlo^[4].

A.1 Vida del Tamiz:

Está determinada por el diámetro del alambre del tamiz y el soporte del mismo en la cama vibratoria. La malla generalmente se elabora con alambres que se encuentran en un rango de 0.028 mm a 0.710 mm, y son de acero inoxidable de grado 304 o 316. En cuanto al tamaño de la malla, van desde malla 8 (2360 micrones) hasta malla 400 (37 micrones).

La vida del tamiz depende en gran medida de la frecuencia de vibración de la cama vibratoria. Las frecuencias de vibración generalmente disponibles para las aplicaciones de perforación son de 1200 VPM (vibraciones por minuto), 1500 VPM y 1800 VPM. Considerando la frecuencia y amplitud de la vibración, se obtiene como resultado una fuerza G. Esta fuerza G o “factor G”, para el caso de las zarandas, puede ser expresada mediante la siguiente fórmula.

$$G = a \cdot \left[\frac{RPM^2}{1.788 \cdot 160} \right] \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 1.4.3}^{[9]}$$

La medida de la amplitud **a** en milímetros, y de las **RPM** de la máquina, nos permite establecer el factor G de la zaranda. Las máquinas de hoy varían desde 3.5 G's hasta 10 G's, dependiendo de las aplicaciones. Generalmente hablando, conforme es mayor el factor G, mayores son las capacidades volumétricas de la zaranda. También lo inverso aplica para las mallas, conforme el factor G se incrementa, la vida de la malla llega a ser más corta particularmente si esta fuerza es mayor a 5 G's.

A.2 Tamaño de la Malla:

Se refiere al número de aberturas que se tienen en el tamiz por pulgada lineal. La descripción del tipo de tamiz se hace en función de este número y según él se conoce el tipo de malla a utilizarse. Si se tiene un tamiz cuadrado de malla 30x30, quiere decir que tiene 30 aberturas a lo largo de una pulgada en ambas direcciones. Mientras que con un tamiz oblongo de malla 70x30 (abertura rectangular), se quiere decir que se tiene 70 aberturas a lo largo de una pulgada en una dirección, y 30 en la otra (perpendicularmente). Según el fabricante se puede conocer el mismo tipo de tamiz bajo diferentes nombres, y muchas veces se nombra un tamiz según su área cuadrada equivalente, para intentar describir una malla rectangular.

A.3 Área de Abertura:

Se refiere al área efectiva abierta de la malla, o, el área total de la malla que no está bloqueada por los alambres o la estructura de soporte. Es una medida de cual porcentaje de esa área está procesando fluido.

$$\% \text{Área Abierta} = \left(\frac{1}{\text{malla}} - \phi_{\text{alambre}} \right) \cdot (\text{malla})^2 \cdot 100 \dots \dots \dots \text{Ecuación 1.4.4}^{[3]}$$

A.4 Eficiencia de Separación o Punto de Corte:

El punto de corte se conoce como la relación existente entre el tamaño de una partícula y el porcentaje de esa partícula removida del sistema según el tamaño de abertura. Se denota con una letra "D" con un subíndice que indica el porcentaje de remoción de un tamaño de partícula en específico, y de las partículas de mayor tamaño. Por ejemplo un punto de corte D_{50} de partículas de 40 micrones, significa que el 50% de las partículas de este tamaño son removidas y el otro 50% se mantiene en el sistema. Además, se puede decir que una malla puede estar etiquetada con un punto de corte de D_{75} de malla 150 (106 micrones), lo que quiere decir que este tamiz remueve el 75% de los sólidos mayores a malla 150 inclusive, y el 25% restante permanece en el sistema.

Existen unos puntos de corte de referencia D_{84} y D_{16} , con los cuales se mide cual es el tamaño de partícula en el cual se remueve del sistema el 84% y 16% respectivamente. La razón entre el tamaño D_{84} y el D_{16} , da una idea de la eficiencia de remoción, y un rango estimado de separación en el cual todos los sólidos mayores a un tamaño en específico son removidos, pero no los de menor tamaño. Lo deseable es tener un tamiz con una razón de separación D_{84}/D_{16} igual a la unidad (1), lo cual significa todos los valores de tamaño de partícula son iguales entre sí, y a las aberturas de la malla del tamiz, por lo tanto la eficiencia de remoción es muy cercana al 100%. En el gráfico 1.4.2 se muestra la curva de separación potencial de una malla según el volumen de sólidos acumulado.

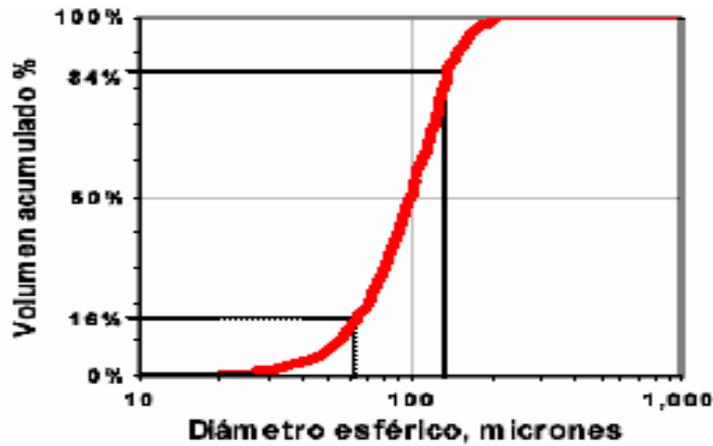


GRÁFICO 1.4.2 Curva de Separación Potencial.^[9]

A.5 Conductancia de la Malla.

Es una medida de la capacidad de manejo volumétrico de una malla, es decir, es una medida de la facilidad del flujo a través de la malla, o su permeabilidad. Se denota con la letra “**C**”, y se expresa en unidades de tasa de flujo o permeabilidad por unidad de espesor del tamiz, kilodarcy/cm (kD/cm), pero pueden variar según el fabricante a kD/mm, y se puede calcular según la siguiente ecuación:

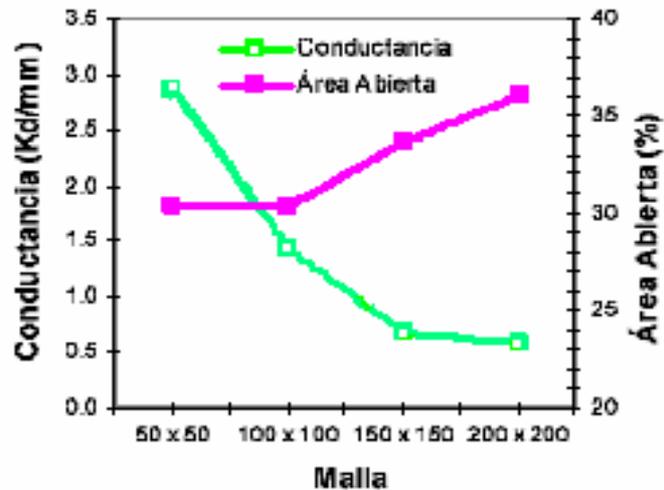
$$C = 0.014375 \cdot Q \cdot \left[\frac{\mu}{A \cdot \Delta P} \right] \dots\dots\dots \text{Ecuación 1.4.5}$$

Donde:

- Q = Flujo volumétrico (GPM)
- μ = Viscosidad del fluido (centipoise)
- A = Área de la malla (pies²)
- ΔP = Caída de presión a través de la malla (lb/plg²)

Cuando se tiene una malla de tres capas la conductancia total (**C_t**) es la suma de la conductancia de las capas individuales (**C_i**).

A medida que los alambres de las mallas son más finos, la conductancia aumenta, y con ella la capacidad volumétrica de la malla, pero de igual manera, la vida de la malla disminuye de manera continua. En el gráfico 1.4.3 se relaciona conductancia con porcentaje de área abierta.



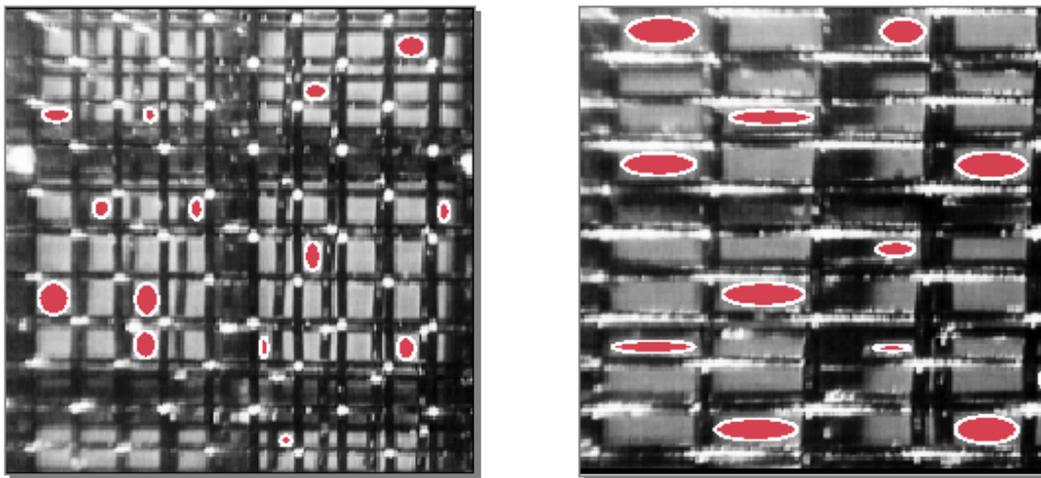
GRAFICA 1.4.3 Relación entre Conductancia y % Área abierta para diferentes Mallas

El número **C**, medido en galones por minuto por pie cuadrado de tamiz, es particularmente importante a la hora de determinar el tipo de malla que se va a utilizar basándose en la cobertura del área de la malla por el fluido de perforación.

A.6 Tipos de Tamiz

Los tamices que se utilizan hoy en día se diferencian según la construcción o diseño, y finura de la malla. La finura de la malla determinará el porcentaje de área abierta, mientras que según su diseño las mallas se construyen de tipo bidimensional y tridimensional. Los tamices bidimensionales se pueden clasificar en:

- a) Tamiz de paneles, con dos o tres capas unidas en cada lado por una tira de una pieza en gancho doblada en dos.
- b) Tamiz de chapas perforadas, con dos o tres capas unidas a una chapa metálica perforada que proporciona sostén y es fácil de reparar. A continuación se muestran los tipos de tamiz.



a) Malla Tipo Panel Intercalada

b) Malla Convencional

● Sólidos

FIGURA 1.4.5 Tipos de Mallas.

Los tamices tridimensionales son mallas de chapa perforada con una superficie corrugada que corre paralelamente al flujo del fluido. Esta configuración proporciona mayor área de separación que la configuración de la malla bidimensional. Los diferentes tipos de tamices tridimensionales son:

- a) Pirámide
- b) Meseta

Además del diseño del tamiz, se debe considerar el tipo de tejido de la malla, ya que se cuenta con tejidos de mallas standard utilizados específicamente para la industria petrolera, tales como

el Tejido cuadrado simple, Tejido cuadrado cruzado, Tejido rectangular simple y Tejido rectangular especial. Por otra parte, el tamiz puede ser configurado en una sola capa, con respaldo o en múltiples capas con respaldo. La combinación de todas estas diferentes configuraciones de mallas y capas se efectúa con el propósito de maximizar las características de separación potencial y manejo volumétrico de la malla. En la Fig. 1.4.6 se muestran los tipos de mallas.

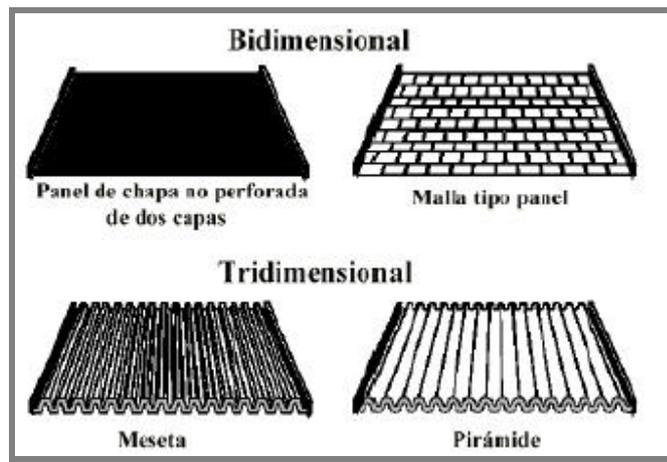


FIGURA 1.4.6. Tipos de Mallas

A.7 Inclinación de la Canasta:

Para obtener la mayor remoción de partículas del sistema, se debe extender la mayor cantidad posible de fluido sobre la superficie del tamiz, para lo cual se utilizan unas compuertas de control de alimentación que se encuentran entre el “Falso Vientre” y la superficie del tamiz. Sin embargo, para lograr una remoción efectiva de partículas, la canasta de la zaranda debe tener una inclinación óptima, buscando que el fluido de retorno se extienda hasta dentro de un pie del extremo del tamiz, ya que ésta es la condición ideal para lograr la mayor remoción de sólidos indeseables. Los cambios en la inclinación de la canasta afectan la velocidad de marcha del fluido y el tiempo de retención. Según la posición de la canasta se obtienen las siguientes características en la remoción de sólidos:

- a) Aumento de la inclinación: Si la inclinación es cuesta abajo, aumenta la velocidad de marcha del fluido y disminuye el tiempo de retención, por lo cual los rípios se descargan más húmedos y se maneja un mayor caudal de fluido. Si la inclinación es cuesta arriba (se recomienda máximo 3 grados), el sólido se mueve lentamente hacia delante y el sólido se descarga más seco, lo cual favorece a la degradación de tamaño de sólido a partículas de menor tamaño.
- b) Disminución de la inclinación: Mientras más cercana es la posición horizontal, se reduce la velocidad de avance del fluido y aumenta el tiempo de retención, por lo cual el rípio se descarga más seco, pero a su vez se maneja un menor caudal de fluido.

Se recomienda antes de realizar algún cambio en el tamiz de una zaranda por problemas de caudal, ajustar primero la inclinación del mismo para ver si se puede solucionar el problema.

De vez en cuando se observa que los rípios pueden ser del mismo tamaño que la abertura de las mallas y por lo tanto estas se obstruyen. Esto genera una reducción en la capacidad de manejo del tamiz, y en consecuencia, pérdida de una porción significativa de fluido. Para solucionar este tipo de problemas se recomienda la sustitución inmediata del tamiz por uno de malla más fina. De esta manera se retienen los rípios para que puedan ser transportados hacia el final de la zaranda.

La selección del tamiz depende de la experiencia del seleccionador, y por supuesto, de las condiciones observadas en la locación y del caudal del fluido en circulación. Por lo cual la acción más recomendable cuando los volúmenes manejados sobrepasan la capacidad de los tamices, o si la cobertura de los mismos por el fluido no es la adecuada, es cambiar el tamaño de la malla del tamiz.

B. Tipos de Fluido de Perforación.

El tipo de fluido de perforación que se utiliza durante el proceso de perforación, es un factor determinante a la hora de seleccionar el tipo de zaranda y tamiz de la misma que se va a utilizar. Si

se está en presencia de un lodo de baja densidad, se pueden utilizar tamices de malla muy pequeña para remover la mayor cantidad de sólidos indeseables. Mientras que si el fluido es de alta densidad, una consecuencia de utilizar tamices de mallas muy pequeñas, será la pérdida de la mayor parte del material densificante. Se debe tener presente que la barita (principal aditivo densificante en los fluidos de perforación), tiene un tamaño comprendido entre los 2 y 74 micrones, y más de un 90% de las partículas son menores a los 20 micrones, por lo cual se hace prácticamente imposible usar mallas muy finas para la remoción de sólidos ya que se perdería gran parte de la barita.

Otra consideración importante en la selección del tipo de zaranda que se va a utilizar es la cantidad de sólidos presentes en el sistema, ya que dependiendo del volumen de los mismos, se seleccionará el equipo que tenga la capacidad de manejar dichos volúmenes. Además, la eficiencia de separación de las zarandas viene determinada por otros factores tales como la forma de las partículas, viscosidad del fluido, y cohesión de las partículas.

C. Tasa de Bombeo

Este viene a ser un factor importante en la selección de las zarandas, debido a que las mismas deben contar con mallas capaces de manejar los volúmenes de fluido bombeado desde el pozo hacia las líneas del sistema de fluido, para evitar el desbordamiento del mismo sobre la superficie de las zarandas, y en consecuencia la pérdida considerable de gran parte del fluido de perforación. En este sentido se puede decir que el tamaño de los tamices es proporcional a la tasa de bombeo.

D. Tipo de Movimiento de las Zarandas Vibratorias.

Las diferencias básicas en el diseño de las zarandas son atribuidas al tipo de movimiento, frecuencia y amplitud de la vibración y la configuración de la cama de la malla.

El efecto de la localización del vibrador de las zarandas, con respecto al centro de gravedad de las mismas, dicta el tipo de movimiento producido por la máquina. Los tres tipos básicos de zarandas utilizadas hoy en día son:

D.1 Zarandas de Movimiento Circular.

Producen la menor fuerza centrífuga, o fuerza G. Un vibrador simple es colocado cerca del centro de gravedad, de modo tal que el movimiento de transporte sería el mismo en todos los puntos de la zaranda. En este tipo de zaranda se puede inclinar el tamiz tanto cuesta arriba como cuesta abajo, aunque lo más recomendable es la posición cuesta abajo.

El transporte de los ripios se hace de manera muy rápida con este tipo de movimiento, y principalmente funciona con sólidos de tipo arcilloso, ya que reduce el impacto de estos en la superficie del tamiz. Sin embargo, este tipo de zarandas posee una muy baja capacidad para secar los ripios, por lo cual se descarga gran cantidad de sólidos húmedos.

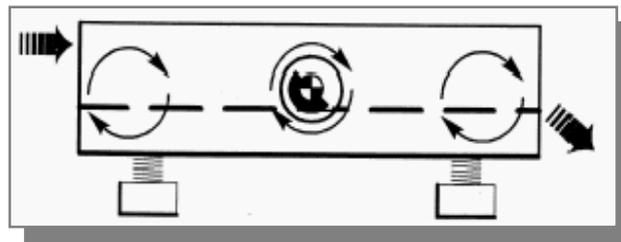


FIGURA 1.4.7 Zaranda de Movimiento Circular

D.2 Zarandas de Movimiento Elíptico

Son una modificación de las zarandas de movimiento circular, donde la fuente de vibración se encuentra localizada por encima del centro de gravedad, por lo tanto el movimiento de transporte no será el mismo en todos los puntos de la zaranda, generándose un movimiento elíptico, este tipo de movimiento se llama elíptico desbalanceado. Esta característica provee una pobre descarga de los sólidos, y por lo tanto su acumulación al final de la zaranda, motivo por el cual se debe inclinar el tamiz cuesta abajo para obtener una descarga de sólidos eficiente.

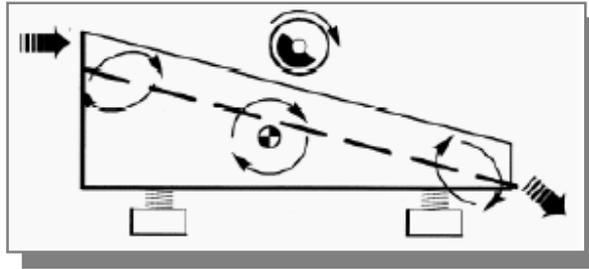


FIGURA 1.4.8 Zaranda de Movimiento Elíptico Desbalanceado

Existe un tipo de zaranda de movimiento elíptico balanceado, en la cual se colocan dos vibradores que se mueven en un mismo sentido en el centro de gravedad de la zaranda, lo que produce un movimiento y un transporte igual en todos los puntos de la zaranda. En consecuencia no es necesaria una inclinación del tamiz.

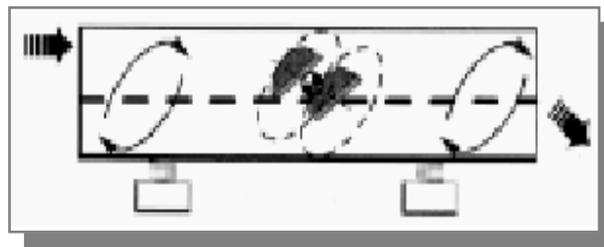


FIGURA 1.4.9 Zaranda de Movimiento Elíptico Balanceado

Las zarandas de movimiento elíptico generan una fuerza G moderadamente alta y un transporte lento en comparación con las de movimiento circular y las de movimiento lineal. Produce el mejor secado de ripios, de manera que tiene aplicación en fluidos densificados como un acondicionador de lodos.

D.3 Zarandas de Movimiento Lineal

Utiliza dos motores de movimiento circular montados en el mismo punto, pero colocados de tal manera que rotan en sentidos opuestos, para producir una fuerza G hacia abajo y una hacia arriba cuando los movimientos son complementarios, pero no genera ninguna fuerza G cuando la rotación es opuesta. Esta fuerza G es variable entre 3 y 8 G .

Estas zarandas de movimiento lineal, son las más versátiles, ya que producen una fuerza G alta y un transporte potencialmente rápido dependiendo de la velocidad de rotación, ángulo de inclinación y posición del vibrador.

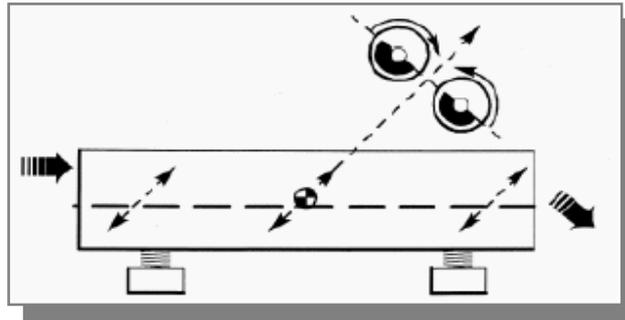


FIGURA 1.4.10 Zarandas de Movimiento Lineal

Las zarandas de movimiento elíptico balanceado y de movimiento lineal son solo dos diseños que permiten una inclinación cuesta arriba de la canasta vibradora, debido a que los rípios son transportados mediante vibración en lugar de la fuerza de gravedad. Las zarandas de movimiento lineal también proporcionan el mayor impacto de cualquier zaranda en el mercado, y por consiguiente, tienen una mayor capacidad de manejo volumétrico en comparación con las antiguas zarandas convencionales.

1.4.2 SEPARACIÓN MECÁNICA: CLASIFICACIÓN HÚMEDA^[4].

Se llama clasificación húmeda a la separación de los sólidos del fluido de acuerdo a la masa de la partícula, tamaño y densidad, mediante equipos diferentes a las zarandas vibratorias. Todos los equipos de clasificación húmeda se basan en la ley de Stoke para la separación de los rípios, y en función de esta ley existen ciertos factores que gobiernan la clasificación húmeda:

- 1) Entre partículas de igual gravedad específica, tendrá mayor velocidad de asentamiento aquellas que sean de mayor tamaño.
- 2) Entre partículas de igual tamaño, tendrá mayor velocidad de asentamiento aquellas que sean de mayor gravedad específica.
- 3) La tasa de asentamiento disminuye a medida que se incrementan la viscosidad y densidad del lodo.

Entre los equipos de clasificación húmeda utilizados con mayor frecuencia para la remoción de ripios, encontramos a los hidrociclones y las centrifugas. Estos equipos operan en función de la densidad y viscosidad del fluido y de la generación de una fuerza gravitacional acorde con los requerimientos de remoción de cada caso. Dichos equipos incrementan el asentamiento y la tasa de procesamiento, mediante el aumento de la fuerza G que actúa sobre las partículas.

A continuación se dará una breve descripción de algunos de los equipos de clasificación húmeda, así como su utilización y características operacionales.

1.4.2.1 Hidrociclones.

Los hidrociclones son recipientes de forma cónica en los cuales la energía de presión es transformada en fuerza centrífuga. El fluido es alimentado, por medio de una bomba centrífuga, a través de una entrada que lo envía tangencialmente en la cámara de alimentación. Una corta tubería llamada tubo vórtice se extiende hacia abajo en el cuerpo del cono forzando a la corriente en forma de remolino a dirigirse hacia abajo en dirección del extremo delgado del cono, donde la abertura del fondo debe ser menor que la abertura del vórtice. Las fuerzas centrífugas que se desarrollan en esas circunstancias multiplican la velocidad de sedimentación de los sólidos más pesados (de igual manera sucede con las partículas de líquido más denso), forzándolos hacia fuera contra la pared del cono. Las partículas más livianas se dirigen hacia adentro y hacia arriba como un vórtice espiralado que las lleva hacia el orificio de la descarga superior o del afluyente^[2].

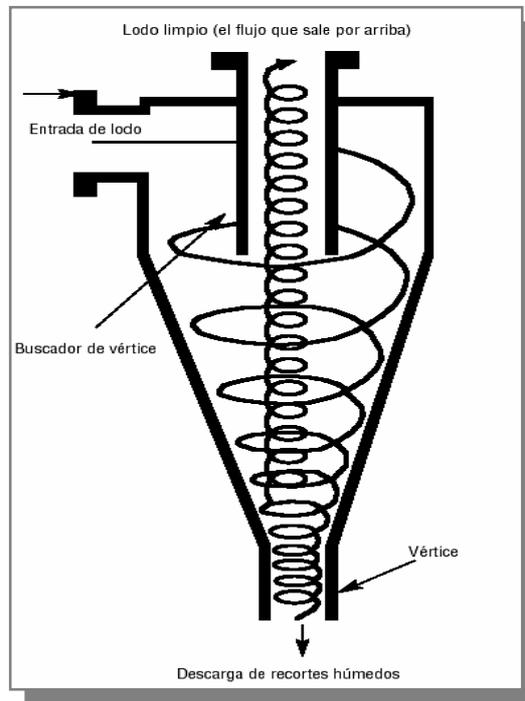


FIGURA 1.4.11 Funcionamiento de un Hidrociclón

Los hidrociclones están diseñados para descargar un fluido muy pesado el cual es generalmente de 1 a 4 lpg más pesado que el fluido del sistema original. Estos suelen ser utilizados en todos los fluidos base agua de baja densidad, y no son recomendados en sistemas de fluidos densificados, debido a que la mayor parte de la barita es descargada. Los hidrociclones presentan una gran ventaja en cuanto a su simplicidad y funcionamiento poco costoso, a demás de procesar altas tasas de fluido, sin embargo es difícil dar un punto de corte preciso con los hidrociclones.

La operación y mantenimiento apropiados de los hidrociclones, aseguran la remoción de una gran cantidad de sólidos extremadamente finos a un bajo costo, pero para alcanzar este comportamiento eficiente de los equipos se debe tener en consideración ciertos parámetros indispensables para la selección y manejo de los mismos, como lo son la cantidad apropiada de cabeza hidrostática, el tipo de descarga generada, y las dimensiones de los conos según el tipo de fluido y caudal manejados. Estos parámetros se describen a continuación.

A. Cabeza hidrostática

Cuando se utiliza la cantidad adecuada de cabeza hidrostática, lo cual se traduce como presión, el resultado es un movimiento del fluido como el de un tornado o ciclón, este es el principio de operación básico de todos los hidrociclones, por lo tanto es un parámetro determinante en el funcionamiento de los mismos. La cabeza hidrostática está relacionada con la presión de la siguiente manera:

$$CH = \left(\frac{P}{0.052 \times \rho} \right) \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 1.4.6}$$

Donde:

CH = Cabeza Hidrostática (pies)

P = Presión (lpc)

ρ = Densidad del Lodo (lpg)

La cabeza hidrostática debe ser medida en la entrada de la válvula, debido a que disminuirá entre la bomba y la válvula del hidrociclón, Si se tiene menos cabeza hidrostática de la necesaria se obtendrán pequeños volúmenes de fluido procesado y un punto de corte mayor al deseado. Por otro lado una cantidad muy alta de cabeza hidrostática también es perjudicial debido a que una gran cantidad de sólidos permanece en el sistema de lodo.

La mayoría de los fabricantes recomiendan 75 pies de cabeza hidrostática a la entrada de la válvula, debido a que esta genera la presión generalmente requerida para crear las fuerzas centrífugas dentro del hidrociclón que permitirán la separación de los sólidos del líquido.

Para la operación de los hidrociclones se recomienda que las presiones deben encontrarse en el rango de 50 a 100 pies de cabeza hidrostática.

B. Tipo de descarga

La operación eficiente de los hidrociclones depende en gran parte del tipo de descarga inferior que se genere, por lo tanto debe ser tomada muy en cuenta. El tipo de descarga deseada es del tipo spray, es decir, en forma de una aspersion fina, y con una ligera succión de aire en el centro. También se puede obtener una descarga en forma de chorro sin succión de aire, la cual no es deseable debido a que la remoción de sólidos será deficiente y por ende se obtendrán altos puntos de corte.

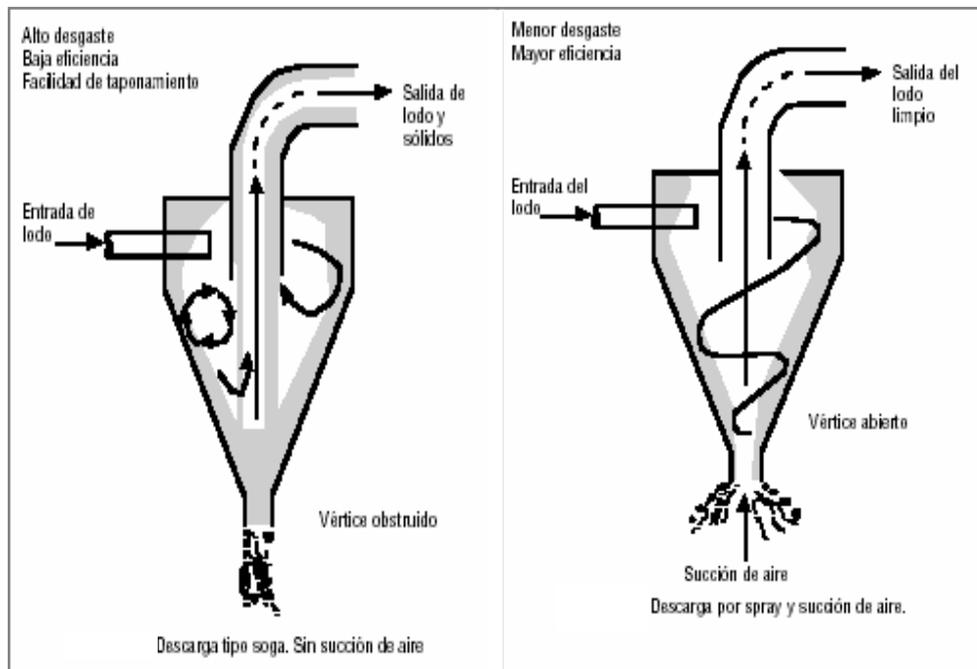


FIGURA 1.4.12 Tipo de Descarga de un Hidrociclón

La única situación en la que se tolera este tipo de descarga en forma de chorro, es cuando se está perforando rápidamente en un pozo de gran diámetro, ya que la alimentación a los equipos puede encontrarse sobrecargada, y en dicho caso, es peor desconectar la unidad y no tener ningún tipo de control de sólidos. Por el contrario si se tiene este tipo de descarga y no se está perforando bajo las condiciones anteriormente mencionadas, se debe ajustar el tamaño del

vórtice para que de una descarga en forma de aspersion, por medio de un ajustador o por algún otro dispositivo similar. Si a pesar de estas acciones el problema persiste, lo más probable es que la capacidad de los conos sea muy pequeña para la cantidad de sólidos a remover del sistema. También se debe tener especial cuidado con la limpieza del orificio de descarga para evitar taponamientos en el equipo.

C. Tipos de hidrociclones según sus dimensiones y usos

El tamaño de los conos es determinante para establecer el tamaño de partícula a separar. Por lo tanto el tamaño y cantidad de los hidrociclones dependerán del uso y aplicación que se les da. Por ejemplo los hidrociclones utilizados como desarenadores usualmente son de 6 a 12 pulgadas de largo, donde lo más frecuente es utilizar dos unidades de 12", los deslimadores son de 4 a 6" de largo y se utilizan generalmente 12 o más hidrociclones de 4", y con los microclones o eyectores de arcilla que son de 2" de largo se utilizan alrededor de 20 unidades. La capacidad de manejo obviamente esta relacionada con el tamaño del hidrociclón, así mientras más pequeño sea el mismo, más cantidad de unidades serán necesarias para una cantidad específica de fluido. A continuación se presenta una gráfica en la cual se representa la eficiencia de remoción para ciertos tamaños de hidrociclones en función de los puntos de corte.

Para hidrociclones trabajando con una cabeza hidrostática de 75 pies se aplican las siguientes capacidades según el tamaño de los mismos:

- Conos de 4", 50 gpm/cono
- Conos de 5", 75 gpm/cono
- Conos de 6", 100 gpm/cono
- Conos de 8", 150 gpm/cono
- Conos de 10", 450 gpm/cono
- Conos de 12", 500 gpm/cono

En el gráfico 1.4.4 se muestra el comportamiento de remoción típica de un hidrociclón.

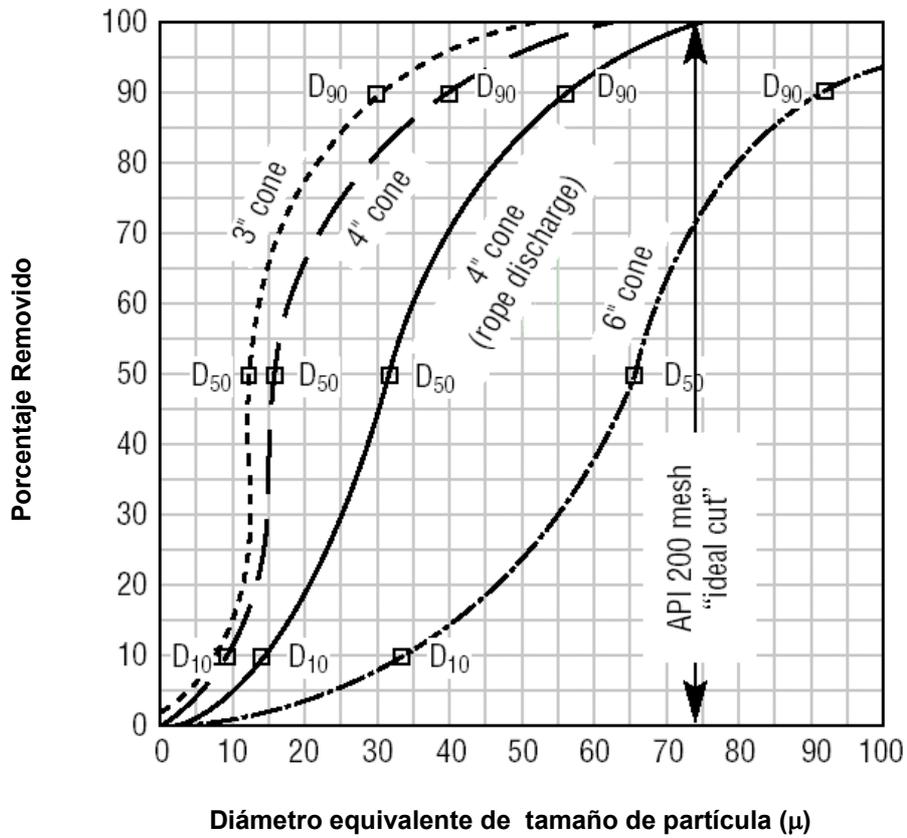


GRÁFICO 1.4.4 Comportamiento Típico de un Hidrociclón

Una vez seleccionado el tamaño de hidrociclón a emplearse, se procede a situarlos apropiadamente, para lo cual se debe calcular el número de hidrociclones necesarios mediante la siguiente ecuación:

$$C_n = \left(\frac{Q_{CT} \cdot 1.1}{Q_{FC}} \right) \dots\dots\dots \text{Ec. 1.4.7}$$

Donde

- C_n = Numero de conos necesarios
- Q_{CT} = Tasa de circulación del taladro (gpm)
- Q_{FC} = Tasa de flujo de cada cono (gpm)

La capacidad de los hidrociclones es generalmente afectada por la reducción de presiones en la entrada de la válvula, y se manifiesta como una disminución en la capacidad de manejo de volumen del equipo. Este comportamiento se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q_N = Q_A \cdot \left(\frac{CH_A}{CH_N} \right)^{0,5} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 1.4.8}$$

Donde

Q_N = Nueva capacidad de flujo del equipo (gpm)

Q_A = Antigua capacidad de flujo del equipo (gpm)

CH_N = Nueva altura de cabeza hidrostática (pies)

CH_A = Antigua altura de cabeza hidrostática (pies)

En cuanto a la colocación o ubicación de los hidrociclones, estos deben ser colocados de manera tal que tomen succión de un compartimento corriente arriba y la descarga se realice en un compartimento corriente abajo

1.4.2.2 Desarenadores y Deslimadores

Los desarenadores son necesarios para prevenir la sobrecarga de los deslimadores, para lo cual se utilizan generalmente una unidad de dos hidrociclones de 12" con capacidad de 500gpm/cono. La ventaja de estos conos es su gran capacidad de manejo volumétrico, pero tienen un alto punto de corte comprendido en el rango de 45 a 74 micrones.

Los desarenadores (figura 1.4.13) deben ser utilizados en fluidos ligeramente densificados en los cuales no se pueden utilizar zarandas de malla muy fina, pero en donde el contenido de arena debe ser reducido. Durante la utilización de los desarenadores como equipo de control de sólidos, el peso del lodo y el contenido de barita deben ser monitoreados cuidadosamente, debido a que gran parte

de la barita podría ser removida por el equipo. En las figuras 1.4.13 y 1.4.14 se muestran un desarenador y un deslimador respectivamente.



FIGURA 1.4.13 Desarenador Serie DSR4H-10.

Para alcanzar la máxima eficiencia de remoción, el fluido debe ser desarenado antes de pasar por el equipo deslimador. Normalmente se utiliza una unidad de 12 hidrociclones o más de 4" cada uno, los cuales manejan un volumen de 75 gpm/cono, con los que se logra un punto de corte D_{50} en partículas entre 15 y 35 micrones, y D_{90} en partículas mayores a 40 micrones. Debido a que la barita cae dentro del rango anteriormente mencionado, los deslimadores son rara vez utilizados en fluidos con densidad mayor a los 12,5 lpg, debido a que remueven gran parte de la barita.

Los desarenadores y deslimadores deben ser colocados secuencialmente y no en paralelo. El desarenador debe normalmente, tomar succión del compartimiento de descarga del desgasificador (si lo hay), y descargar en el siguiente compartimiento corriente abajo. Mientras que el deslimador (figura 1.4.14) debe tomar succión del compartimiento de descarga de los desarenadores y descargar, de igual manera, en el siguiente compartimiento corriente abajo



FIGURA 1.4.14 Deslimador.

La capacidad volumétrica apropiada para los desarenadores y los deslimadores debe ser igual a un rango de 115 a 150% de la tasa de circulación del fluido. Ambos, desarenadores y deslimadores, deben ser utilizados principalmente mientras se está perforando hoyos de superficie, y cuando se estén utilizando fluidos ligeramente densificados.

La industria ha emigrado a dos tamaños básicos, el ciclón standard deslimador de 4" (10,2 cm), y el ciclón desarenador de 10" (25,4 cm). En algunas aplicaciones un ciclón más pequeño de 2" (5,1 cm), conocido como el "micro cono", está aun siendo utilizado. Estos ciclones son capaces de efectuar separaciones por debajo de los 10 micrones, pero son muy susceptibles al taponamiento del ápex si materia gruesa entra al ciclón.

1.4.2.3 Acondicionadores de Lodo

Los acondicionadores de lodo son instalados para funcionar como una segunda etapa en el sistema de control de sólidos, debido a que estos funcionan como un dispositivo de respaldo para las

zarandas o sistema de zarandas, cuando las propiedades del fluido y las condiciones de perforación no permiten el uso de mallas más finas requeridas sobre las zarandas.

Consisten en una batería de conos desarenadores (también pueden ser deslimadores), generalmente de 10", posicionados de manera tal que el subflujo, o material de descarga, es cernido sobre la superficie de una zaranda vibratoria, logrando así que los sólidos de tamaño arena sean removidos por la unidad de hidrociclones, y la descarga de los mismos cae sobre el tamiz vibratorio de malla fina. El fluido que se recupera luego del cernido de los sólidos es retornado al sistema de fluidos, mientras que los sólidos removidos tanto de la unidad de hidrociclones como de la zaranda son desechados. El tamaño de malla de los tamices varía entre 100 y 325, pero generalmente lo más común es trabajar con mallas tamaño 150 (105 micrones), sobre todo cuando el acondicionador de lodos trabaja continuamente, debido a que estas garantizan una limpieza eficiente del fluido y una recuperación considerable de la barita hacia el sistema. Dado que el 97% de la barita es de tamaño inferior a los 74 micrones, esta es procesada por los hidrociclones y descargada hacia las zarandas, pero luego esta pasa a través de la malla del tamiz y es reincorporada al sistema de lodo. En la figura 1.4.15 se muestra un acondicionador de lodo.



FIGURA 1.4.15 Acondicionador de lodos de Doble Cabezal.

La cantidad de barita descargada por un acondicionador de lodos puede ser calculada mediante la realización de un balance del peso del lodo, y mediante la prueba de retorta, la cual se realiza a una porción del fluido que es retornado al sistema de fluido luego de pasar por el tamiz del acondicionador.

Los acondicionadores de lodo son utilizados cuando existen problemas de contaminación de arena en fluidos densificados para garantizar la recuperación de la barita, sin embargo también son utilizados cuando se necesita una limpieza extra en los fluidos poco densificados, caso en el cual el acondicionador de lodos es utilizado como deslimador, y se colocan mallas mucho más finas a la malla 150 normalmente utilizada. Otro uso importante de los acondicionadores de lodo, es para la conservación de la fase continua de fluidos en los cuales dicha fase es muy costosa (sintéticos, aceites o petróleo, etc.), caso en el cual se utilizan mallas finas para garantizar el secado de los sólidos y la recuperación de la mayor cantidad de fase continua posible. Una ventaja muy particular es que el material descargado por la zaranda se desecha tan notablemente seco, que en muchas ocasiones se disminuye el volumen y humedad del material de desecho y disminuye el costo por disposición de dichos materiales.

Los acondicionadores modernos caen dentro de tres categorías básicas:

1. El acondicionador de lodos desarenador, el cual es un múltiple de hidrociclones con conos de 10" (25,4 cm) montados sobre una zaranda de movimiento lineal.
2. El acondicionador de lodos deslimador, el cual es un múltiple de hidrociclones con conos de 4" (10,2 cm) montados sobre una zaranda de movimiento lineal.
3. El Doble Cabezal, también llamada unidad "tres en uno", que consta de 2 múltiples, un desarenador y otro deslimador, montados sobre una zaranda de movimiento lineal.

Debido a los incrementos del nivel de fluido, se debe tener especial cuidado con la sobre carga de sólidos del tamiz, y a que estos pueden taponar la malla. Si existe la sobrecarga de sólidos, se

recomienda remover tantos conos como sea necesario para evitar la descarga excesiva de fluido, pero siempre se debe tener en cuenta que el acondicionador debe ser capaz de procesar al menos la tasa de circulación del fluido del taladro. Durante las operaciones de adición de barita, se debe observar la descarga de la misma sobre el tamiz de la zaranda, y si es excesiva, se recomienda apagar la unidad durante una o dos circulaciones hasta que se vuelva a la normalidad de operación del sistema. Esta es la única situación en la cual el acondicionador no opera de manera constante, de resto debería trabajar constantemente.

La correcta localización del acondicionador es en paralelo con los deslimadores del taladro, y como los deslimadores, debe tomar succión del compartimento de descarga de los desarenadores y descargar en el siguiente compartimento aguas abajo.

Los desarenadores y deslimadores convencionales, en los cuales la descarga inferior es enviada a las fosas de desecho, están siendo lentamente reemplazados por los acondicionadores de fluido con el fin de reducir las descargas de líquidos generadas por el sistema de control de sólidos. Sin embargo, a menos que el acondicionador de lodo este descargando una cantidad significativa de sólidos, las bombas centrifugas que alimentan los deslimadores causaran la degradación de las partículas a tamaños inferiores. Si se están empleando zarandas vibratorias de malla 200 o más finas como equipo principal del sistema de control de sólidos, y las mismas están operando eficientemente, sin sobre flujo de lodo sobre las zarandas, el acondicionador de lodos no traería ningún beneficio adicional. Además, para que un acondicionador aporte un servicio eficiente de control de sólidos el tamaño de la malla del tamiz del acondicionador debería ser menor a la malla de las zarandas principales.

1.4.2.4 Tres en Uno y Acondicionadores de Lodos.

El tres en uno esta compuesto por dos múltiples, uno con ciclones de 10" y otro con ciclones de 4", ambos montados sobre una zaranda vibratoria de movimiento lineal (Fig. 1.4.16). La ventaja es el diseño compacto del equipo que requiere solo una zaranda para ambos múltiples de conos y de menos espacio para su instalación. La desventaja es que este tipo de unidad requiere de dos

bombas centrífugas para alimentar el lodo al respectivo múltiple de ciclones. El segundo problema es que la descarga inferior de ambos múltiples de ciclones cae sobre la misma malla, y muy frecuentemente, causan que la zaranda se sobrecargue debido a las diferencias en separación hechas por los dos tipos de ciclones.



FIGURA 1.4.16 Unidades “Tres en Uno”

Este equipo debe ser utilizado en situaciones donde hay un alto contenido de arena, en ese caso se debe usar un tamaño de malla lo suficientemente grande para separar la arena, y el fluido recuperado debe ser tratado por una centrífuga. En la perforación de hoyos superficiales se recomienda utilizar desarenadores. En los hoyos intermedios y productores se debe utilizar cuando las zarandas tanto primarias como secundarias no sean suficientes para remover los sólidos generados en la perforación.

Una alternativa para el uso de los tres en uno es la utilización de unos hidrociclones capaces de procesar grandes volúmenes de fluido de perforación a la vez que efectúan una separación mas fina. Estos hidrociclones emplean una geometría variable única en su diseño y son conocidos como los super conos o ciclones gMAX™. Un super cono de 10” (25,4 cm), tiene una capacidad de procesamiento de 114 m³/hora (500 gpm), y es capaz de hacer la misma separación que un ciclón

típico de 4" (10,2 cm) que procesa 11m³/hora (50 gpm). De esta manera se ha desarrollado un acondicionador de lodos altamente eficiente que es igual de compacto que el tres en uno, pero solo requiere de un múltiple con ciclones gMAX™ de 10", el cual tiene una capacidad de procesamiento de 341 m³/hora (1500 gpm) para lo cual solo necesitarán 3 ciclones en lugar de 30 ciclones convencionales de 4" (Fig. 1.4.17). La incorporación de una unidad de alto volumen de acondicionamiento de lodo en el sistema de control de sólidos, incrementará la eficiencia del sistema total debido a que la cantidad de sólidos finos en el sistema de lodos, resultante de la atracción de partículas debida a los agitadores, bombas centrífugas, bombas de fluido e inyectores de chorro en el taladro, se mantendrá en un mínimo. Al mantener la concentración de sólidos finos (menores a 74 micrones) en un mínimo, se reducirán los requerimientos de dilución, así como la acumulación de partículas coloidales que son perjudiciales a las propiedades del fluido.

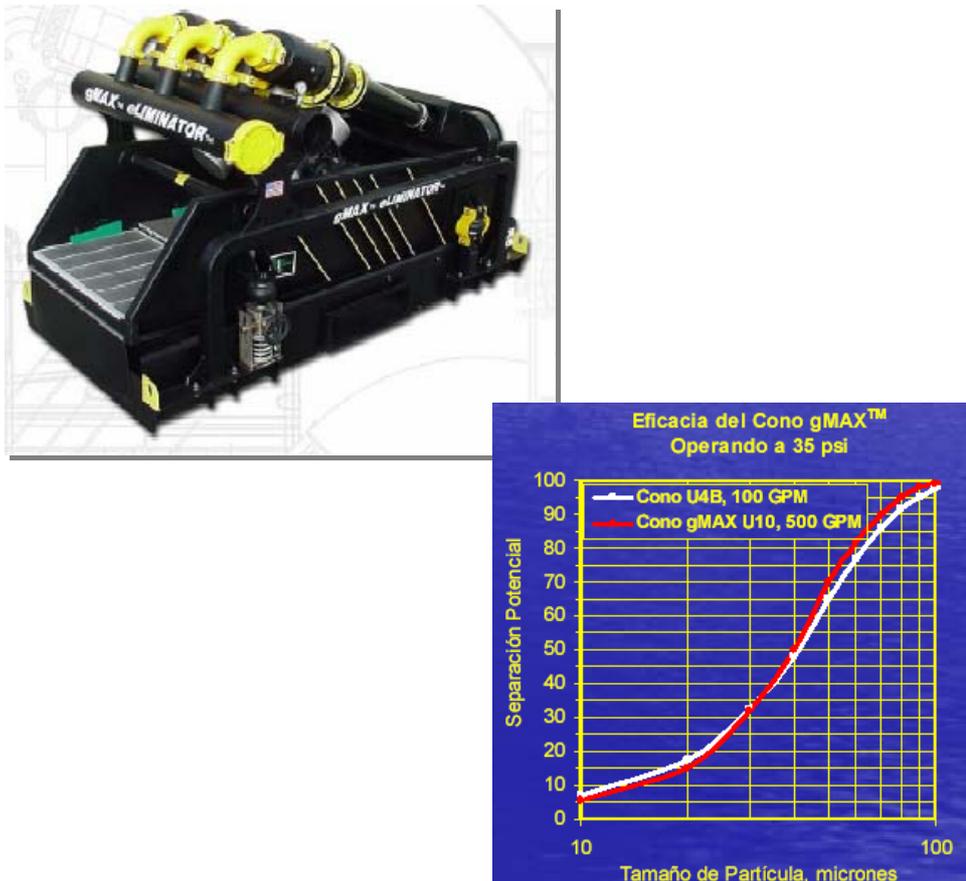


FIGURA 1.4.17 Series 5000 gMAX™ Super Conos.

1.4.2.5 Sistemas de Centrifugación.

La necesidad de las centrifugas llegó a ser evidente por el hecho de que, por cada partícula de 74 micrones, que no es removida por las zarandas y acondicionadores de lodos, se generarán 3 millones de partículas, una vez que una de ellas se haya degradado en partículas de 0,5 micrones, con un aumento acompañado del área superficial de 143 veces el área original. En el siguiente gráfico se muestra el comportamiento de remoción de una centrifuga.

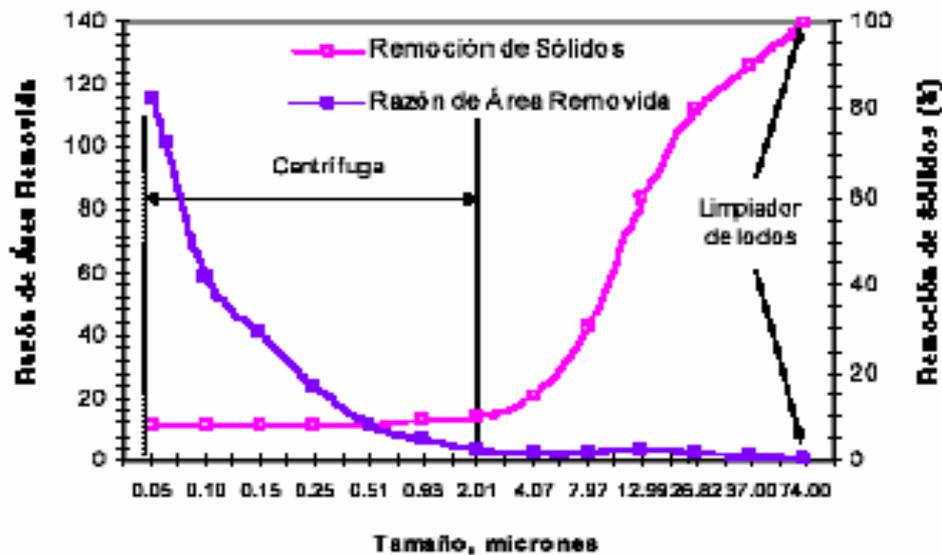


GRÁFICO 1.4.5 Efecto de la Centrifuga sobre la Remoción de sólidos y la Razón de Área Removida.

Así, con el propósito de realizar una separación eficiente, existen dos tipos diferentes de centrifugas disponibles:

1. El separador centrífugo de rotor perforado, conocido como Separador de Fluidos de Rotaria.
2. Centrifuga decantadora de tazón sólido, conocida como Decantadora.

La centrifuga de rotor perforado consiste en un tambor cilíndrico perforado con numerosos orificios de media pulgada uniformemente distribuidos. Este tambor rota dentro de una cámara cilíndrica estacionaria en posición horizontal. La cámara tiene empaques o retenes en cada extremo para

permitir el paso de los ejes al rotor. Este tipo de centrífuga casi ha desaparecido y ya no está mas en uso, debido a que ahorra menos material densificante que la centrífuga decantadora, aun que presentaba como única ventaja que es de muy fácil transporte y que puede colocarse en cualquier sitio accesible al taladro^[2].

Con la utilización de las centrífugas de decantación aumenta la velocidad de sedimentación de los sólidos mediante el reemplazo de la fuerza de gravedad, la cual es más débil, por la fuerza de la centrífuga. La centrífuga de decantación consiste en una cámara cónica horizontal de acero, que rota a alta velocidad, con un doble transportador de tipo tornillo en su interior (ver figura 1.4.18 y 19). Este transportador rota en la misma dirección que la cámara externa pero a una velocidad menor. El fluido es inyectado en el eje hueco del transportador, pasando al espacio comprendido entre la cámara cónica y el tornillo, y mediante el movimiento de rotación a alta velocidad de la cámara y la acción de las hojas del tornillo transportador, se logra que los sólidos de mayor gravedad específica se adhieran a las paredes de la cámara, y a medida que en ésta se sedimentan los mismos van siendo transportados hacia la zona denominada playa o estanque de la cual los sólidos secos son descartados. A medida que se remueven los sólidos, el líquido es empujado hacia la zona de líquido para ser recuperado y reincorporado al sistema de lodo. El nivel de este estanque es determinado por la altura de la compuerta de salida del líquido en el extremo mayor.^[2]

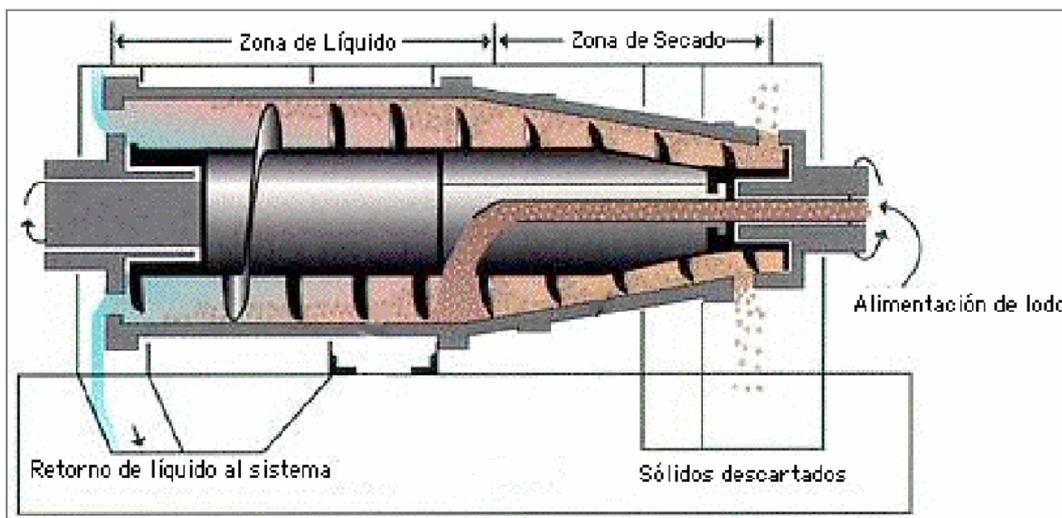


FIGURA 1.4.18 Estructura Interna de una Centrífuga Decantadora

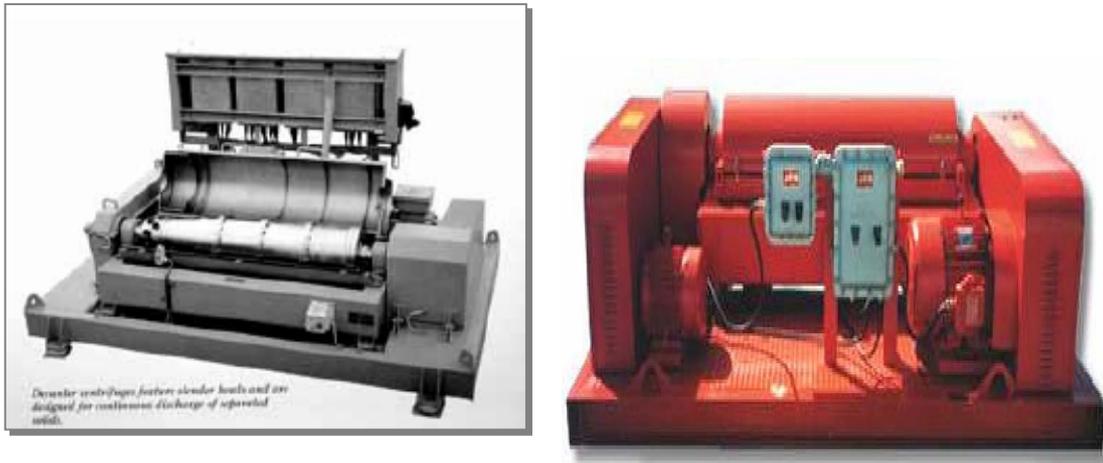


FIGURA 1.4.19 Centrifugas Decantadoras

- **Desempeño de las centrifugas decantadoras**

El desempeño óptimo de las centrifugas decantadoras depende de factores tales como las dimensiones del equipo, la velocidad de rotación, viscosidad del fluido y el tipo de sólido de alimentación a la máquina. Dependiendo de estos parámetros se obtendrá un punto de corte alto según los requerimientos de cada caso, y por lo tanto una remoción eficiente de los sólidos.

El tamaño o dimensión de las centrifugas determina la capacidad de procesamiento de fluido por parte de la unidad, ya que mientras más grande sea la centrifuga mayor será su capacidad de manejo volumétrico. Por otro lado, la velocidad de rotación (RPM), es proporcional a la fuerza G aplicada sobre el fluido (ver Ec. 1.4.2), lo cual según la ley de Stoke, indica que a mayor fuerza G, mayor será la velocidad de asentamiento de las partículas, generando así mayor eficiencia de separación (ver Ec. 1.4.1) Sin embargo, la velocidad de asentamiento también es proporcional al tamaño o diámetro de la partícula, y a la densidad de la misma, en consecuencia mientras mayores sean el diámetro y la gravedad específica de un sólido en particular se favorecerá el asentamiento del mismo. Caso contrario se presenta con la viscosidad del fluido que entra en la centrifuga, ya que mientras mayor sea la viscosidad del fluido, se tendrá una menor velocidad de

asentamiento, por esto se hace necesario la dilución del fluido a medida que entra en la centrifuga.

El aspecto más importante en el desempeño de las centrifugas es la dilución de la lechada o fluido que entre en la máquina. Mediante esta dilución se busca reducir la viscosidad del fluido que entra en la centrifuga para lograr una eficiencia alta de separación de las partículas. Mientras mayor sea la viscosidad del fluido mayor será la dilución necesaria (generalmente 2 a 4 galones por minuto). El punto de referencia a seguir es que la viscosidad Marsh del fluido dentro de la centrifuga no debe ser mayor a 37 seg/gt (segundos por cada cuarto de galón), ya que hay menor velocidad de asentamiento de las partículas, pero tampoco debe ser menor a 35 seg/gt, ya que se está añadiendo agua en exceso, causando turbulencia en la cámara por exceso de velocidad del afluente. Si se está fuera del rango disminuye la eficiencia de remoción, por lo tanto se debe estar atento a la recomendación de los fabricantes.

- **Aplicaciones de las centrifugas.**

La acumulación de sólidos finos de perforación incrementará la viscosidad y fuerzas de gel en el fluido, lo cual indica la necesidad de una centrifuga. Sin embargo el uso de una centrifuga descargará algunos aditivos sólidos necesarios para el fluido, como la bentonita y lignitos. Por lo tanto se deben realizar tratamientos al fluido para compensar la pérdida de dichos materiales y mantener unas optimas propiedades del fluido de perforación, ya que de no hacerlo se generarán problemas como pega diferencial de la tubería, a demás de una formación inadecuada del revoque en las paredes del hoyo. De esta manera se recomienda la utilización de tratamientos químicos y dilución luego de que el fluido haya pasado por los equipos de separación para mantener las propiedades del mismo. El hecho de utilizar una centrifuga no quiere decir que se debe eliminar la opción de la dilución en el sistema de fluidos en un 100%. Según la situación y el tipo de fluido las centrifugas tienen diferentes aplicaciones:

1. En fluidos densificados la centrifuga es utilizada para la recuperación de barita, removiendo la mayor cantidad posible y luego devolviéndola al sistema, mientras se descarga la fase

líquida remanente conteniendo el resto de los sólidos finos y de tamaño coloidal. La porción líquida es reemplazada por líquido de dilución o nuevo volumen. Debido a la baja capacidad de las centrífugas, solo una pequeña porción del volumen en circulación es procesada, así que se deben ajustar las propiedades del fluido mediante dilución y tratamientos químicos.

2. En los fluidos poco densificados, la centrífuga es normalmente utilizada para la recuperación de líquido, ya que es ajustada para separar y descargar partículas de tamaño limo y retornar la fase líquida al sistema de fluido. De este modo la descarga de la centrifuga son sólidos secos con un pequeño porcentaje de agua libre. La fase líquida limpia aún contiene algunos sólidos ultra-finos y coloidales, que no representan grandes daños para el sistema. La aplicación de la centrifugas en este caso incluye: Fluidos con una fase líquida muy costosa (base aceite, sintéticos, sales saturadas, etc.) y en donde la disposición de desperdicios es costosa, como en las zonas de cero descarga de perforación.
3. La centrífuga es igualmente utilizada para procesar la descarga proveniente de los hidrociclones. De esta manera se secan aún más los sólidos descargados por los hidrociclones y el líquido recuperado es retornado al sistema de fluido. Esto es particularmente beneficioso cuando la fase líquida del fluido es muy costosa, o se debe tener especial cuidado con la descarga de los ripios de perforación.

Las fuerzas G de asentamiento recomendadas por centrífuga dependiendo de su aplicación son las siguientes:

- Fluido no densificado (Bajo Volumen)..... 800 a 1200 G
- Fluido no densificado (Alto Volumen)..... 1000 a 2100 G
- Fluido densificado (Bajo Volumen)..... 600 a 800 G

Al utilizar centrífugas decantadoras que efectúan separaciones de hasta 2 o 3 micrones (D_{50}) para barita regresándola al sistema de fluidos mientras se desecha el remanente, los sólidos de baja

gravedad, junto con la barita que es menor de 3 micrones es desechada. Pero en el caso de las centrifugas, debido a sus bajas capacidades sólo una porción del fluido es tratada por las mismas. Típicamente sólo de 5 a 10% del volumen de circulación total se procesa en un sistema de centrifugas. La selección de los equipos debe basarse en su comportamiento, eficiencia -- costo y tipo de servicio para el cual esta diseñada.

En la actualidad es común la utilización de un sistema de doble centrifugas (Fig. 1.4.20), las cuales son diseñadas para eliminar las partículas coloidales en la primera etapa donde la descarga inferior que consiste mayormente de barita, es retornada al sistema activo y el afluente es recolectado en un tanque y es bombeado a la centrifuga secundaria, generalmente operando a mayores velocidades y produciendo elevadas fuerzas G (de 2000 G) donde los sólidos finos son removidos y la fase líquida es removida al sistema activo. La centrifuga secundaria recupera la fase líquida del fluido.

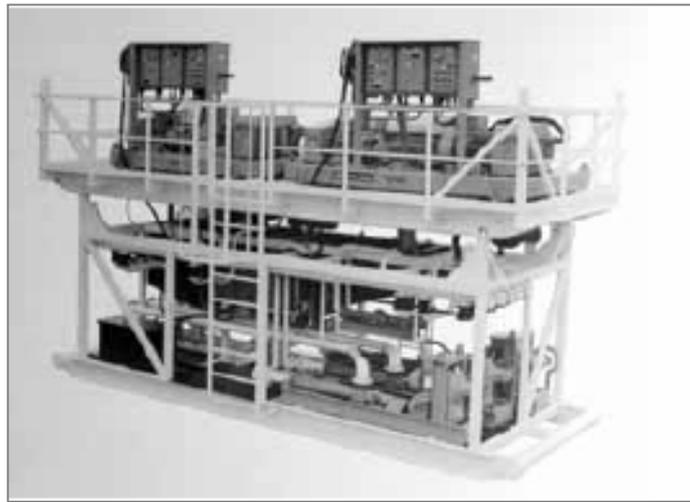


FIGURA 1.4.20 Sistema de Doble Centrifuga

En el caso de que el fluido sea base agua, las fuerzas G disponibles en la industria no son suficientes para remover todos los sólidos suspendidos en el fluido, por lo cual se deben añadir coagulantes y floculantes al fluido de manera de encapsular las partículas más pequeñas y así remover los sólidos suspendidos en el fluido. Estos sistemas son conocidos como unidades

floculantes o “Desaguadoras” (Fig. 1.4.21), y se utilizan para evitar la contaminación del afluente que se retorna al sistema activo, sin embargo, estas químicas pueden llegar a ser algo costosas. En caso de que los fluidos sean base aceite o sintéticos, la centrífuga secundaria remueve los sólidos suspendidos estrictamente mediante las fuerzas G generadas en el tazón centrífugo. En ambos casos la eficiencia de separación de los sistemas, es mayormente afectada por la velocidad de alimentación del fluido a la centrífuga, debido a que el tiempo de estadía del fluido en la misma es crítico para la eficiencia del proceso.



FIGURA 1.4.21 Sistema de Floculación

1.4.3 DILUCIÓN Y MÉTODOS ALTERNATIVOS DE CONTROL DE SÓLIDOS

De un 80% a 90% de los sólidos generados pueden ser removidos por el equipo de control de sólidos dependiendo de su efectividad. Sin embargo los sólidos de tamaño fino y ultra fino que no son eliminados pueden ocasionar problemas para mantener la densidad y las propiedades reológicas del fluido en el rango óptimo de operación. Es necesario por ende reducir este porcentaje de sólidos mediante simple dilución, dilución con desplazamiento y/o Inhibición por encapsulamiento.

1.4.3.1 Dilución

La dilución simple implica disminuir la concentración de sólidos indeseables y que deben ser reemplazados. Luego de cada circulación del fluido a través de los equipos de control de sólidos, un alto porcentaje de los sólidos de perforación presentes en el fluido, es removido por los equipos, creando un faltante de volumen en los tanques de fluido el cual debe ser reemplazado. Este reemplazo se realiza mediante la preparación de fluido nuevo con las mismas propiedades del lodo original, llevando así los tanques de lodo a sus niveles correctos de llenado. El añadir fluido nuevo al sistema ayuda a restablecer las propiedades reológicas efectivas del mismo y a disminuir la concentración de sólidos presentes en el fluido de perforación.

La cantidad de agua requerida para la dilución se puede calcular de la siguiente manera:

$$B_A = \frac{B_L (F_{STB} - F_{SOB})}{F_{SOB} - F_{SD}} \dots \text{Ec. 1.4.9}$$

Donde:

- B_A: Barriles de agua requeridos
- B_L: Barriles de fluido en el sistema
- F_{STB}: Fracción, porcentaje total de sólidos de baja gravedad en el sistema
- F_{SOB}: Fracción, porcentaje óptimo de sólidos de baja gravedad
- F_{SD}: Fracción, porcentaje de sólidos deseables (bentonita y otros aditivos químicos).

1.4.3.2 Descarte y Dilución

Una manera de mantener los sólidos de perforación en un nivel manejable es la dilución con descarte o desplazamiento parcial, la cual consiste en desechar un volumen de fluido que contenga

una porción de la cantidad de sólidos que vayan a ser removidos antes de añadir el agua o el fluido base de sustitución que contenga los sólidos y químicos deseables en su correcta concentración. Esto normalmente es muy costoso, de manera que es necesario utilizar equipos mecánicos eficientes. Si el equipo mecánico no remueve una porción significativa de los sólidos de perforación reportados en la superficie, la dilución se vuelve crítica desde el punto de vista estratégico en el manejo de estos sólidos. Así, la cantidad del nuevo fluido de reemplazo depende de la efectividad de los equipos de remoción de sólidos.

Los barriles de fluido de reemplazo se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$B_{AL} = \frac{B_L (F_{STB} - F_{SOB})}{F_{STB} - F_{SD}} \dots\dots\dots \text{Ec. 1.4.10}$$

Donde:

BAL : Barriles de agua o de fluido a ser desplazados

En cuanto a los beneficios económicos que trae este procedimiento, el ingeniero Mark Morgan, Gerente de Servicios Técnicos de Derrick Equipment Co., Houston, comenta. “En muchos de los casos, se puede justificar el costo de los mejores equipos de remoción de sólidos disponibles, debido al ahorro sustancial que se logra en los costos de dilución, aditivos del fluidos y disposición del material de desecho.”

1.4.3.3 Inhibición por Encapsulamiento

Por medio de este mecanismo se inhibe la dispersión de los ripios utilizando polímeros encapsuladores como el poliacrilato de sodio, la poliacrilamida parcialmente hidrolizada (PHPA) y la celulosa polianiónica (PAC). Estos polímeros forman una película protectora alrededor de los ripios, minimizando su desintegración o dispersión a medida que ascienden a la superficie, lo cual facilita su separación sobre los cernidores.

DESCRIPCIÓN DEL CAMPO^[10]**2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL CAMPO SAN CRISTOBAL**

El área de San Cristóbal (Zuata Norte) se encuentra en el flanco Sur de la Cuenca Oriental de Venezuela está ubicada en la parte media central de la faja petrolífera del Orinoco y tiene una superficie aproximada de 800 Km².

Se ubica a unos 18 km. de Paríaguán. Se extiende en una faja de dirección Este-Oeste que abarca parte de los Municipios Santa María de Ipire, Miranda y Monagas. Está limitada al Norte por el área tradicional de Liviano (campos Budare y Socororo), al Sur por el área operada por Petrozuata; mientras que al Este y el Oeste áreas libres o nación (ver figura 2.1.1).

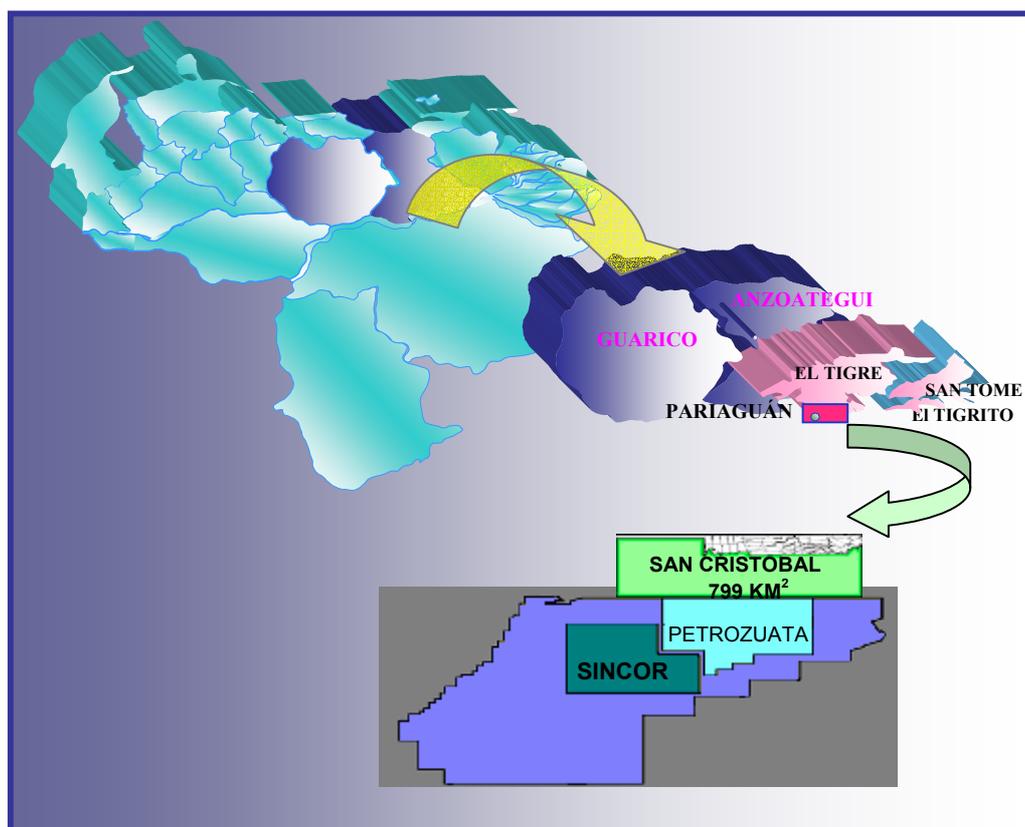


FIGURA 2.1.1 Ubicación y Extensión del Campo San Cristóbal.

2.1.1 CUENCA ORIENTAL DE VENEZUELA.

La Cuenca Oriental se encuentra en la parte Centro- Oriental del país. Esta depresión tiene una longitud en sentido Oeste – Este de aproximadamente 800 Km, un ancho promedio de Norte – Sur de 200 Km., lo cual representa un área de 160.000 Km². Ocupando los estados Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro, además de una menor extensión del estado Sucre. (Figura 2.1.2.)

La Cuenca Oriental de Venezuela puede definirse estructuralmente como una gran depresión asimétrica limitada al sur por el borde septentrional del Cratón de Guayana; al norte por el cinturón móvil de las Serranías del Interior, Central y Oriental, y al oeste por el levantamiento del Baúl; y al este la cuenca continúa por debajo del Golfo de Paria, incluyendo la parte situada al sur de la Cordillera Septentrional de la Isla de Trinidad y se hunde en el Atlántico al este de la Costa del Delta del Orinoco. Está considerada como la segunda concentración de yacimientos de hidrocarburos más importante del país, después de la Cuenca del Lago de Maracaibo, si se excluyen las reservas estimadas para la parte meridional o Faja Petrolífera del Orinoco.

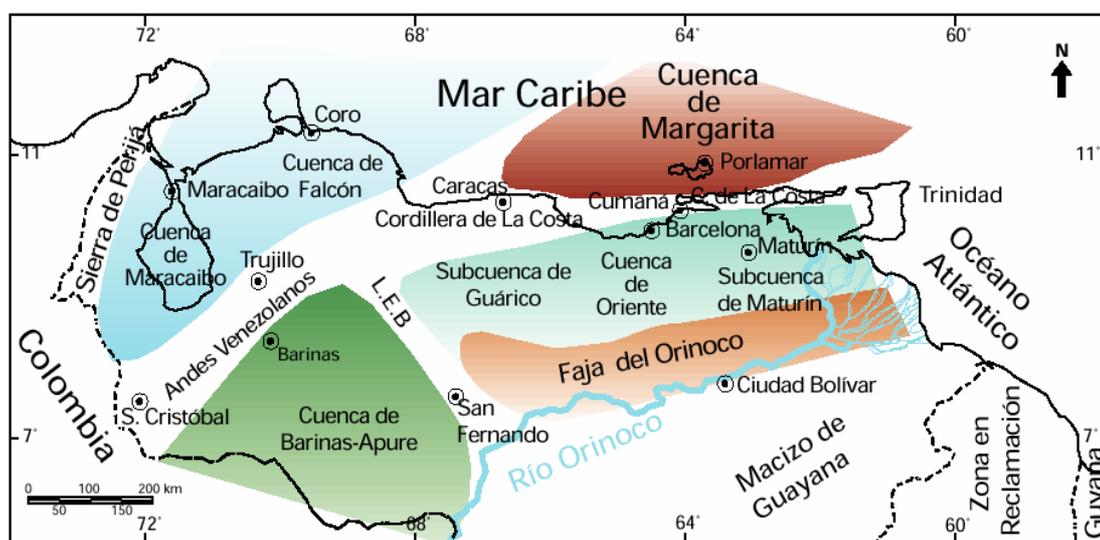


FIGURA 2.1.2. Ubicación Cuenca Oriental de Venezuela (WEC, 1997)

Desde el punto de vista estructural la cuenca tiene un flanco sur formado por un suave homoclinal de buzamiento norte, caracterizado por un sistema de fallas normales y un flanco norte con un estilo tectónico compresivo donde las estructuras más frecuentes son fallas inversas y pliegues.

La Evolución Sedimentaria la Cuenca Oriental de Venezuela desde el punto de vista de su desarrollo petrolífero pudiera considerarse como un evento exclusivamente Terciario causado por transgresiones y regresiones extensas, con escasa producción obtenida hasta la fecha de las formaciones Cretácicas.

Hacia el sur de la cuenca, en los campos de Oficina en Anzoátegui y sus equivalentes orientales en Monagas, los yacimientos de más importancia se encuentran en las Formaciones Merecure y Oficina, con sellos de lutitas extensas dentro de estas mismas unidades; la suprayacente Formación Freites también constituye un sello regional de gran importancia. En el límite sur, la cuenca también incluye la Faja del Orinoco, con yacimientos neógenos y roca madre Cretácica.

Respecto al tipo de crudo, en los campos de El Furrial son frecuentes los crudos medianos; en Quiamare- La Ceiba se llegó a producir con promedios de 41° API; en los campos de Oficina se encuentran crudos livianos, medianos y pesados; en la Faja del Orinoco, los crudos pesados y extrapesados constituyen la característica esencial. En general los crudos más pesados se encuentran hacia los márgenes de la subcuenca y hacia los yacimientos más someros: la Faja del Orinoco, en el flanco sur, y los campos de Quiriquire y Guanoco en el flanco norte.

2.1.2 FAJA DEL ORINOCO

La Faja del Orinoco está ubicada en la parte Sur de la Cuenca Oriental de Venezuela, al Sur de los Estados Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro, paralela al curso del Río Orinoco, con una extensión aproximada de 54.000 Km². Los límites de la Faja del Orinoco son: Las áreas de Las Mercedes, Oficina y Temblador en el Norte, el Río Orinoco al Sur, la región Deltana hacia el Este y el límite Oeste lo constituye el acuñamiento o truncamiento de las formaciones productoras contra el Arco del Baúl.

La Faja del Orinoco es un inmenso depósito de bitumen, crudos pesados y extrapesados, con reservas recuperables calculadas en unos 270 mil millones de barriles de petróleo.

La industria petrolera llevó a cabo, entre finales de 1978 y 1983, un extraordinario esfuerzo exploratorio con el fin de cuantificar la magnitud de los recursos de la faja, y para facilitar este trabajo en el área de la Faja del Orinoco, esta fue dividida en cuatro sectores, o cuatro acumulaciones gigantescas que yacen en arenas no consolidadas de origen fluvio-deltaico como se indican a continuación:

- Machete, ubicada al Centro – Sur del Estado Guárico.
- Zuata, ubicada al Sur – Este del Estado Guárico y al Sur – Oeste del Estado Anzoátegui.
- Hamaca, ubicada al Centro – Sur del Estado Anzoátegui.
- Cerro Negro ubicada en la zona Centro – Sur de Monagas y Sur – Este del Estado Anzoátegui.



FIGURA 2.1.3. Faja del Orinoco y sus Principales Divisiones

Inicialmente conocida como Faja Bituminosa, su nombre fue cambiado a Faja Petrolífera debido a que las investigaciones realizadas sobre el área indicaron que parte del crudo es móvil a condiciones de yacimiento. La gravedad del crudo varía entre 7 y 18 °API. La Faja Petrolífera del Orinoco, constituye una de las acumulaciones de hidrocarburos más grandes del mundo. La mayoría de los yacimientos son arenas no consolidadas del Oligoceno/Mioceno con porosidades promedio de 30% llegando en algunos casos hasta 38-40%.

2.2 CARACTERÍSTICAS DEL CAMPO

El campo San Cristóbal forma parte de la Faja Petrolífera del Orinoco, geológicamente esta ubicado en el flanco sur de la Cuenca Oriental de Venezuela, al noroeste del área mayor de Oficina, las arenas objeto del estudio corresponden a las arenas Básales de la Formación Oficina de edad Mioceno Inferior. La información oficial del campo reporta los siguientes valores (PDVSA Evaluación Exploratoria de la Faja Petrolífera del Orinoco 1983):

TABLA 2.2.1 Información Exploratoria del Campo San Cristóbal.

Rango de Espesor de las Arenas	15 – 60 pies
Gravedad API	13° - 17°
Porosidad Promedio	31,5 %
Presión Inicial	1200 lpc
Permeabilidad	100 – 3000 mD
Saturación de Petróleo Promedio	71,3 %
Reservas Remanentes	14011 MMBIs
Reservas Recuperables	14011 MMBIs
POES	140.095 MMBIs

Esta información fue recopilada luego de la perforación de dos pozos exploratorios, el SC-2X y el NZZ-35X, y 10 pozos estratigráficos, de los cuales se tomó información como sísmica de pozos y pruebas de presiones. En el área del pozo NZZ-35X se perforaron seis (6) pozos mostrando la continuidad de la arena E (13.5 °API) y la aparición de la arena H (17,4° API) ambos con espesores mayores de 60 pies. En el área del pozo SC-2X, se perforaron cuatro (4) pozos estratigráficos mostrando las arenas E y H con espesores superiores a los 50' de ANP, siendo estas las de mayor potencialidad. Además de las arenas antes mencionadas, ambas áreas (NZZ-35X y SC-2X) muestran las arenas G y F, reportando gravedades de 16 a 17°.

2.2.1 ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA

Mediante las actividades de desarrollo que se han llevado a cabo en la Faja del Orinoco desde el año 1976, se logró identificar el área de Zuata norte, y más específicamente el área de San Cristóbal como un área con arenas de alta potencialidad petrolífera. Se determinó que el área de San Cristóbal estaba constituida por unidades litológicas que se encuentran entrampadas geológicamente, ratificando la presencia de las Formaciones Mesa, Freites, Oficina y Merecure, e identificando como mejor prospecto a las arenas Basales de la Formación Oficina Inferior.

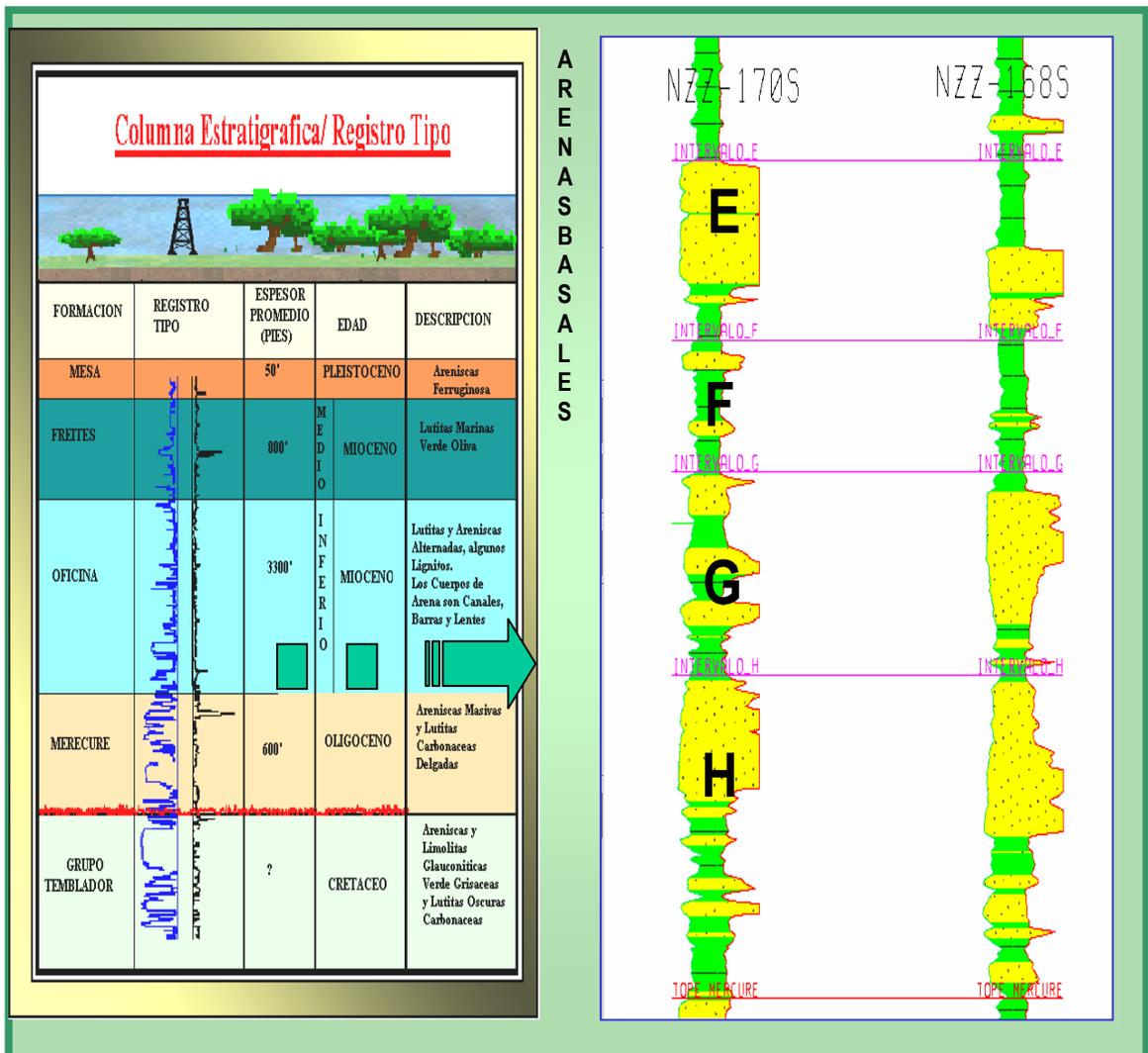


FIGURA 2.2.1 Columna Estratigráfica del Campo San Cristóbal

2.2.1.1 FORMACIONES LOCALES.

▪ **Estratigrafía**

El área de estudio se encuentra ubicada en el Área Mayor de Oficina, la columna estratigráfica comprende rocas que varían en edad desde el Grupo Temblador del Cretáceo, y las Formaciones Terciarias Merecure, oficina y Freites. La Formación Mesa del Pleistoceno completa la secuencia estratigráfica.

La zona de interés comprende los ambientes de sedimentación fluvio-deltaico, de edad geológica Oligoceno a Mioceno Medio, contenidos en la columna estratigráfica. A continuación ahondaremos un poco más en las características de dichas Formaciones.

Formación Merecure (Terciario: Oligoceno-Mioceno Inferior).

Se presenta en Anzoátegui y Monagas en las áreas de Anaco, Oficina y Temblador. Se ha citado un espesor máximo de 1900 pies en el Área Mayor de Oficina. Su contacto inferior es discordante con el Grupo Temblador o con el Grupo Santa Anita, o directamente con el basamento hacia la parte sur de la Cuenca Oriental. El contacto superior es concordante con la Formación Oficina.

Información Litológica: caracterizadas por areniscas de grano grueso a medio con prospectividad petrolífera e intercalaciones lutíticas. Se compone de un 50 % de areniscas mal estratificadas y lenticulares, duras, incluso conglomerática, con estratificación cruzada y variabilidad infinita de porosidad y permeabilidad. El tope de esta formación constituye un reflector regional en toda la cuenca debido a la alternancia que existen entre arenisca-lutita. El ambiente es típico de clásticos basales transgresivos depositados por corrientes fluviales entrelazadas, por condiciones deltáicas. Su edad es Mioceno Temprano para el intervalo Merecure-Oficina.

Formación Oficina (Terciario: Mioceno Inferior a Medio).

La extensión geográfica de la Formación Oficina en el subsuelo se extiende hacia todo el flanco sur de la Cuenca Oriental de Venezuela, en los estados Anzoátegui y Monagas, dicha Formación no

está expuesta en la superficie. La Formación Oficina de edad Mioceno Inferior a Medio se designa a una localidad del área de El Tigre, al sur del Estado Anzoátegui.

Consiste de una alternancia de arenas y lutitas con alternancia de horizontes ligníticos. Los cuerpos de arena son lenticulares, pero son correlacionadas por distancias considerables. Se considera que esta Formación se sedimentó en un intenso complejo Fluvio-Deltaico, donde son comunes las arenas lenticulares y de relleno de canales de ríos. Está caracterizada por areniscas, lutitas y limolitas, desarrollándose paquetes de arenas, con prospectividad petrolífera, superiores a 30 pies de espesor. En general, las areniscas se hacen más abundante, de mayor espesor y de grano más grueso hacia la base de la formación.

Debido a que las arenas de esta formación son los yacimientos más ricos en petróleo, se les ha asignado una nomenclatura informal detallada. En general, se reconocen tres (3) grupos de yacimientos: las Áreas Mayor de Anaco, Mayor de Oficina y Mayor de Temblador, cada una con su nomenclatura individual.

Formación Freitas (Terciaria: Mioceno Medio)

Con el nombre de Formación Freitas de edad Mioceno Medio se conoce a los sedimentos del subsuelo en el Campo Petrolífero de Oficina, Distrito Freitas del Estado Anzoátegui. La extensión geográfica comprende el flanco sur de la Cuenca de Maturín, área meridional de los Estados Anzoátegui y Monagas.

Información Litológica: caracterizada litológicamente por lutitas (color verde-gris) dispuestas en bloques moderadamente compactos y muy hidratable. Consiste en areniscas en el tope y la base, presentando aproximadamente 100 mts de lutitas intercaladas con areniscas, de grano medio a grueso. Suprayace concordantemente a la Formación Oficina. Representa un ambiente marino somero en su proporción inferior, pasando en la parte media por ambientes de aguas algo profundas y en la parte superior a ambientes de aguas someras. El espesor varía de 825 a 3000 pies.

Formación Mesa (Pleistoceno).

Se conoce esta formación como la columna de sedimentos que corona la extensa mesa fisiográfica característica en la Cuenca Oriental de Venezuela. Se localiza en el Estado Anzoátegui, con una extensión geográfica que comprende los Llanos Orientales y los Estados Guárico, Anzoátegui y Monagas.

Está caracterizada por sedimentos mal consolidados que incluyen arenas, areniscas y arcillas. Consiste en arenas de grano grueso, gravas (muy duras) y conglomerados, con estratificación cruzada; además contiene lentes discontinuos de arcilla fina y arenosa y lentes de limolita. Su edad es de Pleistoceno-Reciente producto de una sedimentación fluvio-Deltaica. Su espesor no supera los 180 pies

▪ Estructura

En cuanto a la estructura en el Area Mayor de Oficina el fallamiento principal es de tipo normal de rumbos este-oeste y noreste-suroeste, con buzamiento más frecuente hacia el sur. Estas fallas estuvieron activas durante la sedimentación y formaron las mayores trampas del Area Mayor de Oficina. Los tipos de trampa más comunes son la estructural-estratigráfica, las cuales son las más abundantes en la Formación Oficina (entrampamiento lateral por acuñamiento de la arena); y la estructural en la cual las acumulaciones están limitadas por fallas inversas y/o normales.

2.2.2 CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA Y DE LOS FLUIDOS.

Toda la columna estratigráfica de la Formación Oficina fue perforada en los pozos del área, el espesor promedio de la misma es de 2500 pies. En el área de San Cristóbal la parte Basal de la Fm. Oficina es la que presenta interés económico. Se separó en intervalos E, F, G y H (ver perfiles de las arena basales en la Fig. 2.2.1).

En el área de ubicación de los pozos NZZ-35X y SC-2X, se tomaron muestras de fluidos con el objetivo de determinar sus principales propiedades físicas (arenas E, G y H principalmente). Además se midieron los niveles de energía en los pozos estratigráficos perforados en el área.

Arenas E y G

En el área del pozo NZZ-35X, fueron perforados seis (6) pozos estratigráficos: NZZ-162S; NZZ-163S; NZZ-164S; NZZ-165S; NZZ-167S y NZZ-170S, cuyo objetivo era la obtención de data. En el pozo NZZ-163S se tomó RFT (prueba de presión medidas) en las arenas E y G con la finalidad de determinar gradiente de presión y permeabilidad absoluta arrojando los siguientes Resultados:

TABLA 2.2.2 Resultados de RFT Aplicado a las Arenas E y G

Lente	Presión(LPC)	Gradiente (LPC)	K (mD)
E	1200	0.39	3134
G	1288	0.39	1463

Las propiedades de fluidos, fueron definidas en el pozo NZZ-35X, pozo reacondicionado y reactivado a producción en Agosto del año 2000 en la arena E. En este pozo se tomó la información de PVT y potencialidad de la arena, obteniéndose los siguientes resultados:

TABLA 2.2.3 Propiedades del Crudo @ 145 °F (Temperatura del Yacimiento). Arena E

Presión de burbuja	575 lpc
Rs (Solubilidad del Gas)	64 PCN/BN
Bo (Factor Volumétrico)	1.0457 BY/BN
Viscosidad	109 cP
Densidad del petróleo	0.8582 Gr/cm ³
°API	13,4
Compresibilidad Petróleo	5,07 E -06 lpc ⁻¹

TABLA 2.2.4 Propiedades del Gas @ 145 °F (Temperatura del Yacimiento). Arena E

Gravedad específica	0.5772
Factor Z	0.9529
Bg (Factor Volumétrico)	0.03293 PCY/PCN

TABLA 2.2.5 Análisis composicional. Arena E

Componentes	% Molar
Nitrógeno	0.011
Dióxido de carbón	1.488
Metano	18.236
Etano	0.094
Propano	0.003
Iso - butano +	80.168

La potencialidad el pozo NZZ-35X fue evaluada durante el periodo Agosto 2000 @ Marzo del 2002 utilizando como mecanismo de levantamiento artificial bombeo mecánico (Figura 2.2.3)

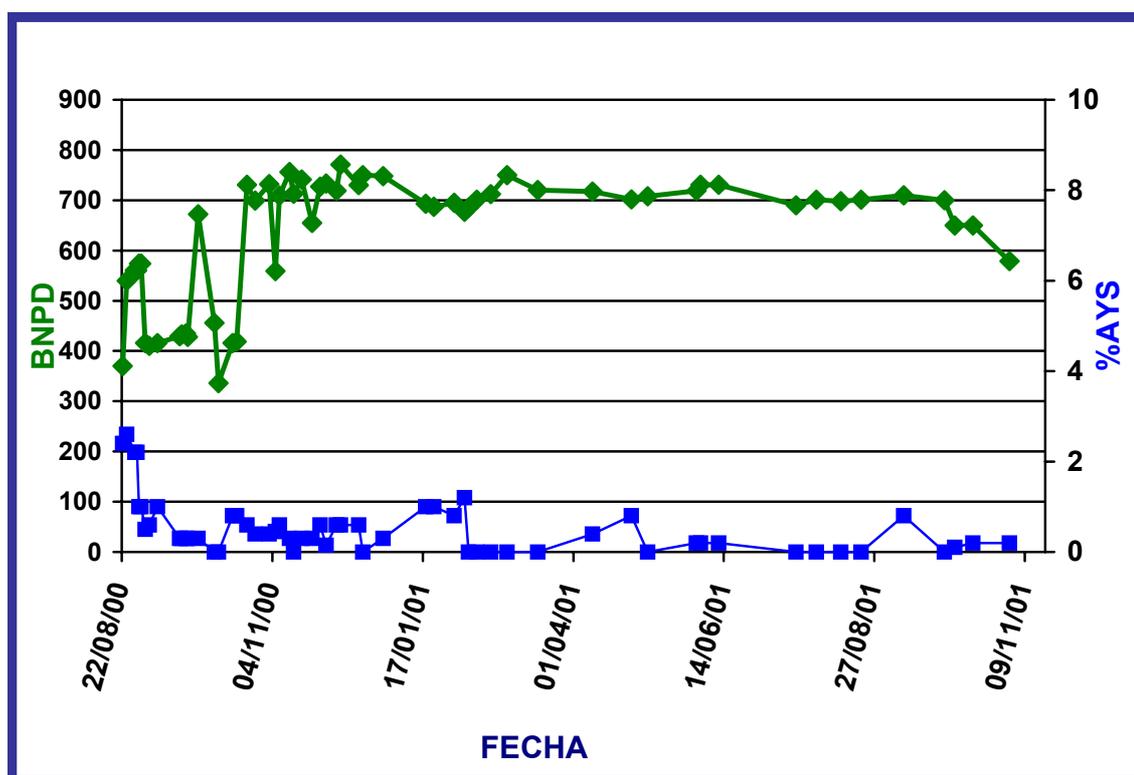


FIGURA 2.2.2 Comportamiento de producción del pozo NZZ-35X reacondicionado en agosto del 2000 y cerrado en marzo del 2002

Arena H

En el área del pozo SC-2X, fueron perforados 4 pozos estratigráficos: NZZ-166S; NZZ-168S; NZZ-169S; NZZ-171S; adicionalmente se perforó un pozo reemplazo al SC-2X denominado NZZ-161. El mismo se evaluó durante el período Diciembre 2001 al mes de Marzo del 2002.

En los pozos NZZ-169S y NZZ-161 se tomó RFT en las arenas D, E, G, H pertenecientes a las arenas Básales de la Formación Oficina con la finalidad de determinar gradiente de presión y permeabilidad absoluta arrojando los siguientes Resultados:

TABLA 2.2.6 Resultados de RFT Aplicado a las Arenas D, E, G y H

Lente	Presión(LPC)	Gradiente (LPC)	K (mD)
D	1167	0.41	456
E	1245	0.38	1195
G	1281	0.39	277
H	1297	0.39	2779

En el pozo NZZ-161, perforado entre Octubre y Noviembre del 2001 y puesto a producción durante el periodo Diciembre - Marzo 2002 se tomó información de PVT en la arena H., obteniéndose los siguientes resultados:

TABLA 2.2.7 Propiedades del Crudo @ 142 °F (Temperatura del Yacimiento). Arena H

Presión de burbuja	495 lpc
Rs(Solubilidad del Gas)	61 PCN/BN
Bo(Factor Volumétrico)	1.0685 BY/BN
Viscosidad	27.86 cP
Densidad del petróleo	0.8685 Gr/cm ³
°API	17,4
Compresibilidad Petróleo	8.86 E -06 lpc ⁻¹

TABLA 2.2.8 Propiedades del Gas @ 142 °F (Temperatura del Yacimiento). Arena H

Gravedad específica	0.5708
Factor Z	0.9686
B _g (Factor Volumétrico)	0.04710 PCY/PCN

TABLA 2.2.9 Análisis Composicional Arena E

Componentes	% Molar
Nitrógeno	0.071
Dióxido de carbón	1.795
Metano	27.449
Etano	1.795
Propano	2.991
Iso - butano	0.593
n- butano	0.240
Iso-pentano	0.562
n-pentano	0.161
Iso-hexano	0.138
n-hexano	0.102
Heptanos	0.102
Octanos	0.015
Nonanos ⁺	63.986

CAPITULO 3

PROYECTO SAN CRISTÓBAL^[11]

3.1 CARACTERISTICAS DEL PROYECTO

Para dar una breve descripción de lo que será el proyecto San Cristóbal, se presentará a continuación un resumen de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología VCD, Visualización, Conceptualización y Definición, en lo que a la planificación del proyecto se refiere.

Actualmente la Unidad de Explotación Liviano del Distrito San Tomé inicia un Plan de Explotación en el Campo San Cristóbal que constará de la perforación de doce pozos horizontales (Fig.3.1.1) para el año 2003, agregando a esto cuatro pozos estratigráficos para definir la continuidad de las arenas para planes futuros de explotación en esa área. Se tiene previsto con el desarrollo de este campo:

- Confirmar la prospectividad del área teniendo como volumen inicial de crudo una producción de 10 MBD, provenientes de los yacimientos correspondientes a las Arenas Basales (Arena E, G y H) de la Formación Oficina Inferior con gravedades API que varían desde 13° y 17° (tabla 3.1.1).
- Presentar la mejor propuesta al Distrito basada en la consolidación de información que sirva de insumo al equipo de perforación integrado principalmente por el Ingeniero de Planificación y Diseño adscrito a la mesa de construcción de los pozos a desarrollar y generando así el mejor esquema de Diseño de los pozos en el área de interés, guiado por la metodología VCD.

El objetivo principal del proyecto es en principio dar comienzo a la perforación de cuatro (4) Pozos Estratigráficos (los cuales proveerán información más certera de la zona) y doce (12) pozos horizontales ubicados en las áreas de los pozos NZZ-35X, perteneciente a la trampa **NZZ-35X** y SC-2X perteneciente a la trampa **SC-2X**. La perforación de los doce (12) pozos horizontales se realizará bajo el arreglo de macolla en superficie, dos (2) ubicadas en el área del pozo NZZ-35X y la construcción de un pozo horizontal en el área del pozo SC-2X. Dichos pozos serán completados para la explotación de las Arenas Basales de la Formación Oficina de la edad Mioceno Inferior (arenas E, G y H) con gravedades que varían de 13° a 17° API, en donde para la **arena E** se tiene

un espesor de arena neta petrolífera de +/- 50 pies, la **arena G** presenta 3 lentes de espesores promedios 20, 12 y 12' respectivamente y para la **arena H** una arena de 70 pies de ANP.

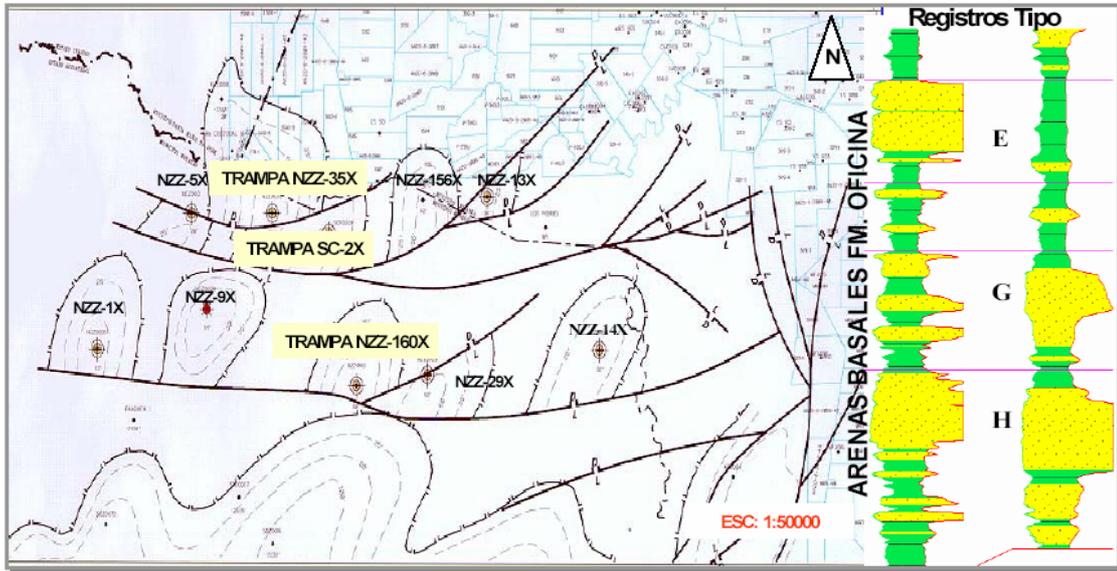


FIGURA 3.1.1 Mapa Isopaco Estructural del las Arenas Basales de la Formación Oficina

TABLA 3.1.1 Coordenadas de Subsuelo de las 12 Localizaciones

CLUSTER	LOCALIZACIÓN	ARENA
NZZ-35X	NZZ-U	E
	NZZ-T	E
	NZZ-V	E
	NZZ-W	E
	NZZ-S	G
CLUSTER	LOCALIZACIÓN	ARENA
ZAMURITO	NZZ-Z	H
	NZZ-AB	H
	NZZ-AD	E
	NZZ-AA	E
	NZZ-AC	E
	NZZ-Y	E
CLUSTER	LOCALIZACIÓN	ARENA
SC-2X	NZZ-AK	H

3.1.1 DISEÑO BÁSICO DE LA ARQUITECTURA DEL POZO

Las trayectorias de los pozos y coordenadas de localización, fueron diseñadas de acuerdo, a los criterios de ingeniería establecidos, y así se ajustaron las coordenadas de fondo; dichos criterios son descritos a continuación:

- Máxima tasa de construcción de ángulo antes del punto de ubicación de la bomba de producción: **2.8°/100'**
- Tangente para ubicación de la bomba: **inclinación 45°- 50°, 100 pies de longitud y 250 pies (TVD) del tope de la arena objetivo.**
- Máxima tasa de construcción de ángulo entre la base de la tangente para la bomba y el tope de la arena objetivo: **6.8°/100'**
- Ubicación del punto horizontal para la navegación: **definido por la unidad de explotación.**
- Longitud de arena efectiva: **1000 pies a partir del tope de la arena objetivo.**

Adicionalmente Se realizó un análisis de *Anticolisión* preliminar (figuras 3.1.2, 3 y 4), para prevenir la colisión entre pozos y minimizar el riesgo asociado a una interferencia en su trayectoria, ya que los mismos son horizontales, presentándose la situación de que algunos parten de la misma plataforma. Los resultados de este análisis son mostrados a continuación.

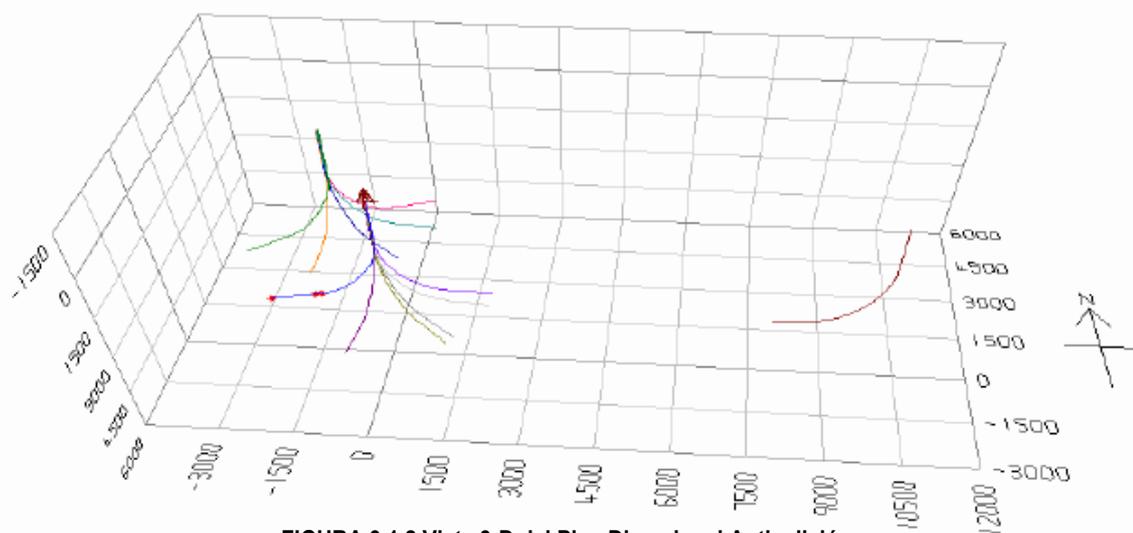


FIGURA 3.1.2 Vista 3-D del Plan Direccional Anticolisión

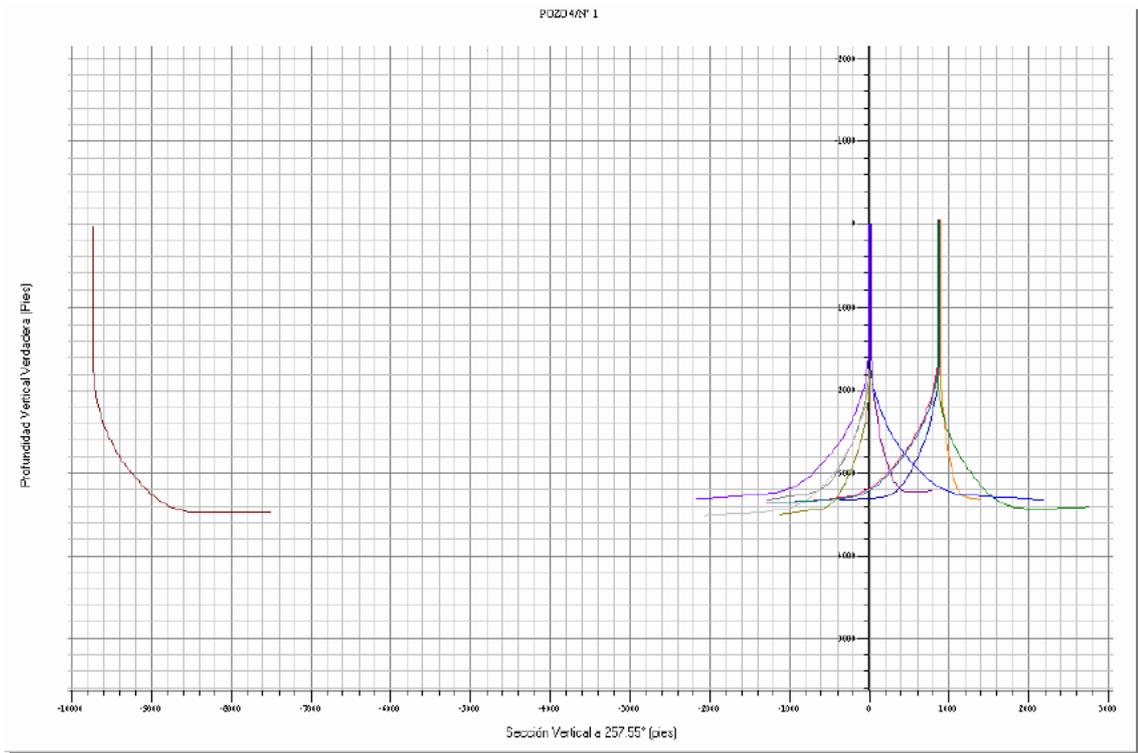


FIGURA 3.1.3 Vista Vertical del Plan Direccional Anticolisión

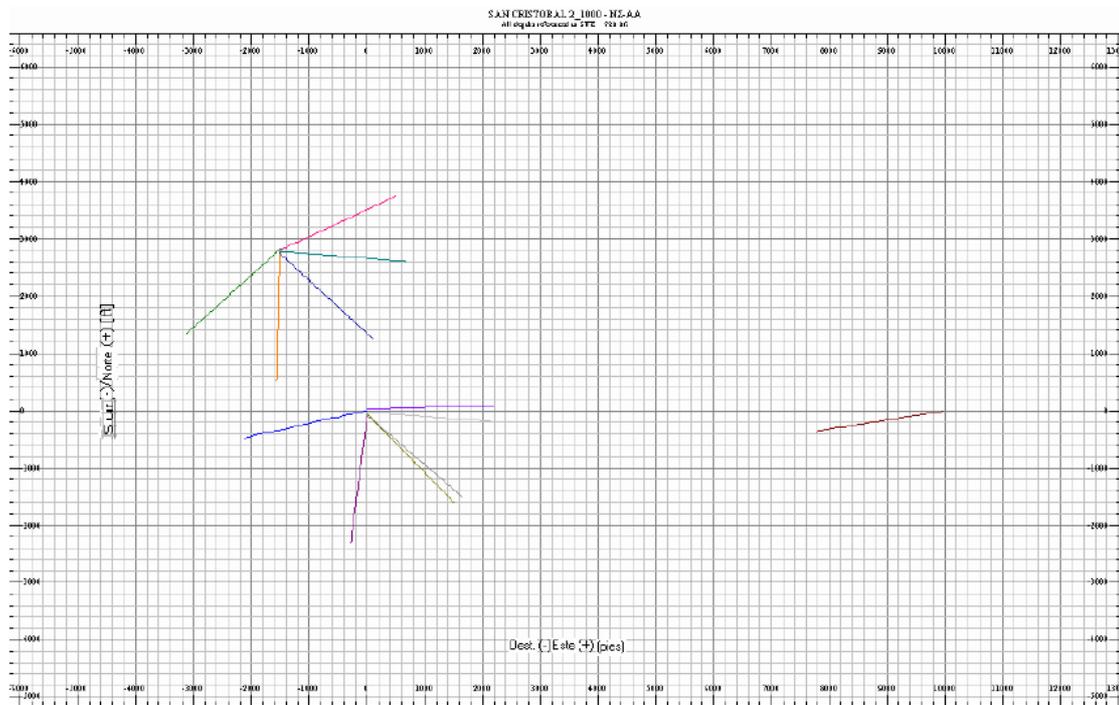


FIGURA 3.1.4 Vista de Planta del Plan Direccional Anticolisión

3.1.1.1 Diseño de la Completación de los Pozos.

La completación se diseño en función de la producción esperada para las localizaciones de los pozos horizontales del Campo San Cristóbal (1400 BPPD por pozo) y de la data generada por las diferentes aplicaciones de ingeniería utilizadas, y así se obtuvo el diseño de completación Sencillo con Bomba de Cavidad Progresiva y Tubería de 5 ½"; 17,5 Lb/pie; J-55 EUE.

Las condiciones de diseño utilizadas para la selección de la tubería de completación se muestran a continuación y se reflejan en la tabla 3.1.2 :

- Producción esperada (Pozo horizontal): 1400 BPPD.
- Gravedad API: Varía de acuerdo a la arena a atravesar, esta entre el orden de 13 a 17 grados.
- Relación Gas-Petróleo: 100 PCN/BPN
- Presión de Poro: 1200-1260 Lpc/pie
- Gradiente de Fractura: 0.70-0.73 Lpc/pie
- Presión para la Inyección de Vapor: 2000 Lpc a 350 °F.
- Presión de Prueba de Tubería de Completación: 3000 Lpc.
- Profundidad para la colocación de la Bomba (Varía de acuerdo al Pozo):

TABLA 3.1.2 Diseño de las Secciones a Perforar

SECCIÓN	DIAMETRO DEL HOYO	MECHA	REVESTIDOR	PUNTOS DE ASENTAMIENTO
Superficie	17 ½"	Tricónica	13 ¾"	1200 pies
Intermedia	12 ¼"	Tricónica	9 ⅝"	3794 pies
Producción	8 ½"	PDC	7"	4795 pies

3.1.1.2 Diseño de Fluidos de Perforación

Una vez revisados los sumarios de lodos de los pozos vecinos y de la muestra tomada del Campo Bare, el fluido de perforación a utilizar para la perforación de las distintas fases del pozo, siempre garantizando la integridad del hoyo, limpieza y resguardo de los equipos y/o accesorios que conforman el ensamblaje de fondo, presenta las siguientes propiedades:

- PRIMER INTERVALO (hoyo de 17 ½")

La perforación del hoyo superficial, se encuentra comprendida desde superficie hasta 1200 pies, esta sección será perforada con un lodo tipo "agua-gel"; resultando este fluido de una mezcla de un compuesto mineral de procedencia natural (Bentonita Wyoming) con agua. Por referencias geológicas y datos de pozos vecinos, este intervalo en su parte superior contiene arcillas altamente solubles, con intercalaciones de arenas de granos finos a medios. El sistema a ser utilizado constará de: 12,5 LPB Bentonita + 0,4 LPB KOH. Las propiedades del lodo requeridas para esta fase se especifican a continuación:

TABLA 3.1.3 Propiedades del Fluido Agua - Gel

PROPIEDAD	RANGO REQUERIDO	UNIDAD DE MEDIDA
Densidad	8,6-8,9	Lbs/Gal (Lpg)
Viscosidad	45-50	Seg/qt de galón
Viscosidad Plástica	6-8	Centipoise (Cps)
Punto de Cedencia	8-12	Lbs/100 pies ²
Filtrado API	15-10	Cs/30 min
Revoque	<2	N/32 pulgadas
P.H	9,5-10	
Geles	2/8-3/12	Lbs/100 pies ²
MBT	20-25	Lbs/Bbl

- SEGUNDO INTERVALO (hoyo de 12 ¼")

La perforación del hoyo intermedio, se encuentra entre el revestidor de superficie y el punto de entrada a la arena objetivo (Formación Oficina). De acuerdo a estudios realizados para esta fase en el Campo Bare, se llegó a una formulación del lodo más efectiva que ayuda minimizar los daños que comúnmente se presentan en esta zona debido a la reacción de lutitas reactivas ante el lodo de perforación, y a su vez garantizan mejor limpieza del hoyo. El sistema de fluido a ser utilizado viene dado por:

TABLA 3.1.4 Formulación del Sistema Lignosulfonato

	Lodo Base	Con KCOOH
Soda Cáustica (Lbs)	0.5	0.5
Goma Xántica (Lbs)	1.0	1.0
Bentonita	1.5	1.5
Lignosulfonato	2.3	2.3
Lignito	0.8	0.8
Pac-R	0.6	0.6
Pac-L	0.1	0.1
Detergente	0.7	0.7
Antiespumante	0.7	0.7
Barita	5.1	5.1
KCOOH	-	6.7

TABLA 3.1.5 Propiedades del Lodo Requeridas para esta Fase

PROPIEDAD	RANGO REQUERIDO	UNIDAD MEDIDA
Densidad	9.6+	Lbs/Gal (Lpg)
Viscosidad Plástica	18	Cps
Punto de Cedencia	38	Lbs/100 pies ²
Geles 10"/10'	14/26	Lbs/100 pies ²
PH	9.8	
Filtrado API	4.8	Cc/30 min
% SBG	4	% V/V

TABLA 3.1.6 Propiedades del Fluido de Perforación Ligosulfonato con KCOOH

PROPIEDAD	RANGO REQUERIDO	UNIDAD MEDIDA
Densidad	9.6+	Lbs/Gal (Lpg)
Viscosidad Plástica	18	Cps
Punto de Cedencia	38	Lbs/100 pies ²
Geles 10''/10'	14/26	Lbs/100 pies ²
PH	9.8	
Filtrado API	4.8	Cc/30 min
% SBG	4	% V/V

- TERCER INTERVALO (hoyo de 8 ½ ")

La perforación del hoyo de producción, esta constituido por las Arenas Basales de la Formación Oficina (E, G y H según sea el objetivo del pozo). Para la perforación de esta fase se utilizará un fluido Polimérico, dando resultado efectivo según estudios realizados para esta zona. Este sistema Polimérico constará de:

TABLA 3.1.7 Formulación del Sistema Polimérico.

PROPIEDAD	CANTIDAD
Flovis (Lbs)	1.8
DualFlo (Lbs)	4
K-52 (Lbs)	6
CaCO ₃ 10-15 (Lbs)	22.5
CaCO ₃ 20-25 (Lbs)	2.5
KOH (Lbs)	0.05

TABLA 3.1.8 Propiedades del Fluido de Perforación Polimérico

PROPIEDAD	RANGO REQUERIDO	UNIDAD MEDIDA
Densidad	8.5	Lpg
Viscosidad Plástica	7	Cps
Punto de Cedencia	28	Lbs/100 pies ²
Geles 10''/10'	15/19	Lbs/100 pies ²
PH	9.1	
Filtrado API	6.1	Cc/ 30 min

3.1.2 ANÁLISIS DE CONSTRUCCIÓN DE LOS POZOS

En el trabajo de VCD desarrollado para el proyecto San Cristóbal se concluyó que la construcción de cada pozo planificado en el proyecto debería llevarse a cabo en un lapso no mayor a los quince días, siendo este tiempo considerado como una escenario pesimista de la planificación. Los tiempos de construcción según cada escenario planteado por la metodología VCD se muestran a continuación.

TABLA 3.1.9 Escenarios de Construcción de Pozos. Tiempos de Perforación

		DIAS		
	Fases	Tiempo Optimista	Tiempo Esperado	Tiempo Pesimista
1	MUDANZA	1.7	2.71	4.2
2	HOYO SUPERFICIAL	1.8	1.7	2.6
3	HOYO INTERMEDIO	5	4.91	5.2
3	HOYO DE PRODUCCIÓN	1.2	1.25	1.5
5	COMPLETACIÓN	1.3	2.43	1.5
TOTAL EN DIAS.		11	13	15

Luego que los objetivos y propósitos del proyecto han sido establecidos, integrados y planificados para las 12 localizaciones horizontales pertenecientes al Campo San Cristóbal aplicando la metodología VCD, y mediante los análisis de tiempo realizados se logró una reducción de 19 días de construcción de cada pozo a 13 días, lo cual indica una diferencia de 6 días de trabajo, lo cual trae diversos beneficios para el proyecto.

CAPITULO 4

METODOLOGÍA

4.1 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO.

De las campañas de perforación desarrolladas en los campos Bare y Melones, los cuales presentan características muy similares entre sí, se observó que los altos volúmenes de sólidos de perforación generados durante el proceso de construcción de pozos horizontales, representan un grave problema a la hora de ser manejados por los equipos de control de sólidos de descarga tanto desde el punto de vista operacional como económico.

En vista de que se tiene previsto desarrollar un proyecto de perforación de doce (12) localizaciones horizontales en el campo San Cristóbal, Distrito San Tomé, se ha hecho necesario tomar las previsiones pertinentes, para disminuir los riesgos asociados a los siguientes problemas:

- Cambios frecuentes de los pistones y filtros de las bombas de lodo y mallas de las zarandas.
- Incapacidad de los equipos de control de sólidos de manejar altos volúmenes de líquido con alto contenido de sólidos.
- Atascamiento de tuberías
- Taponamiento de la línea de flujo
- Incremento de los niveles en los tanques de lodo
- Contaminación por sólidos en el lodo de perforación

Estos problemas pueden conllevar a incrementos de los costos operacionales y retrasos significativos que posteriormente pueden comprometer la rentabilidad y viabilidad del proyecto.

Por tal motivo, ha surgido la necesidad de seleccionar un sistema de control de sólidos de descarga que permita manejar de manera eficiente los grandes volúmenes de sólidos de perforación que se espera se generen en el campo San Cristóbal, como consecuencia de las actividades de perforación

de pozos horizontales en la zona. De esta manera se busca evitar o minimizar los problemas que podrían ocasionar el mal manejo o mala disposición de dichos sólidos, y los atrasos y costos adicionales que estos implican para el proyecto.

Para la selección de dicho sistema se implementó una metodología basada en la comparación de varios sistemas de control de sólidos, para de esta manera escoger el sistema que represente la mejor eficiencia de remoción de sólidos al menor costo posible.

4.2 METODOLOGÍA DE TRABAJO

El desarrollo de la metodología a seguir en este estudio, se realizó en varias fases las cuales permitieron establecer los parámetros necesarios para la realización del mismo y el cumplimiento a cabalidad de los objetivos planteados. Dichas fases de trabajo se presentan de manera esquemática en la figura 4.1.

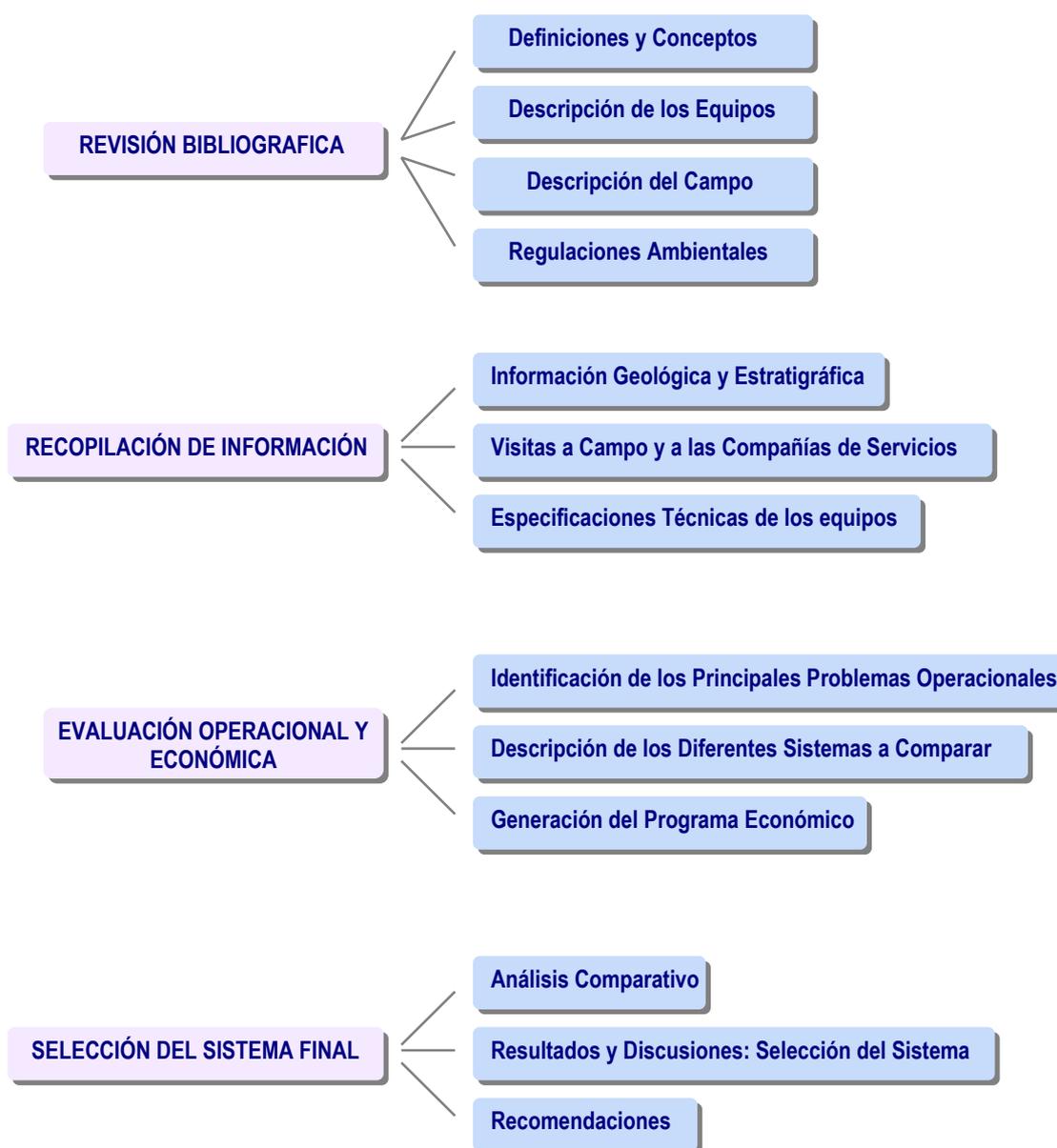


FIGURA 4.2.1 Esquema de las Fases que Componen la Metodología de Trabajo

4.2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta fase se buscó y recopiló toda la información básica necesaria para el desarrollo del presente estudio y para la comprensión del funcionamiento de un sistema de control de sólidos, lo cual permitió realizar los análisis y evaluaciones indispensables para el estudio en cuestión. Dicha información se puede desglosar de la siguiente manera:

- **Conceptos Básicos del Proceso de Control de sólidos.**

Se refiere a los principales conceptos relacionados con el proceso de control de sólidos, fluidos de perforación, pozos horizontales, y algunos antecedentes de lo que ha sido el proceso de control de sólidos a través de los años.

- **Descripción Breve de los Equipos de Control de Sólidos.**

Se describe el funcionamiento y requerimientos de los principales equipos de remoción de sólidos, así como también algunas de las aplicaciones que se les puede dar a los mismos en diferentes situaciones.

- **Descripción y Ubicación del Campo.**

En esta sección se da una descripción exacta de la ubicación geográfica del campo San Cristóbal, así como también una pequeña descripción de la geografía regional del área y de lo que será el proyecto como tal.

- **Regulaciones Ambientales para la Zona en Estudio.**

Se reseñan brevemente las principales leyes y artículos por los cuales se deben regir cualquier procesamiento, manejo y disposición de residuos durante las operaciones de construcción y mantenimiento de los pozos en la zona en estudio (Apéndice J).

4.2.2 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En esta fase se recopiló la información referente al trabajo en sí, y la misma se basó en la búsqueda de información del campo San Cristóbal, manuales y catálogos sobre equipos de control de sólidos, sus especificaciones técnicas y operacionales, requerimientos funcionales y guías de mantenimiento, para poder realizar la selección de los equipos que formarán parte del sistema de control de sólidos, según las condiciones presentes en el área de estudio. También se realizaron visitas a campo y a compañías de servicio, las cuales facilitaron material de suma importancia para realizar la selección de los equipos. Dicha recopilación se llevó a cabo mediante la realización de las siguientes actividades:

- **Recopilación de Información Geológica y Estratigráfica del Campo.**

Se recopiló información sobre las principales características del campo, como lo es la estratigrafía, ambiente de sedimentación y estructura del área y de las formaciones a atravesar, así como también la caracterización energética de los fluidos presentes en las arenas objetivo, características del proyecto (propiedades del crudo y del gas, presiones y composición de las arenas productoras), e información exploratoria del campo San Cristóbal.

- **Visitas a Campo y a las Compañías de Servicios.**

Estas visitas se realizaron con la finalidad de tener una mejor visión del funcionamiento y desempeño de los equipos o sistemas de control de sólidos en campo y los requerimientos operacionales de los mismos.

- **Asesoría sobre Especificaciones Técnicas de los Equipos**

Se solicitó asesoría técnica e información especializada por parte de la compañía de servicios sobre las especificaciones técnicas y operacionales de los equipos, así como sus ventajas y los costos de adquisición o alquiler, instalación y mantenimiento. Parte de la información brindada por la compañía de servicio se basó en la entrega de programas para realizar los cálculos de selección de la malla del tamiz y de eficiencia del sistema de control de sólidos.

4.2.3 EVALUACIÓN OPERACIONAL Y ECONÓMICA DEL PROYECTO.

En esta sección se analizó a detalle la información recopilada en las fases anteriores, con lo cual se establecieron los criterios de evaluación más adecuados para poder llevar a cabo la selección de los equipos integrantes de los posibles sistemas de control de sólidos, entre los cuales se hará una comparación operacional y económica para de esta manera escoger el más adecuado. Esta fase de trabajo se puede desglosar de la siguiente manera:

- **Identificación de los Principales Problemas Operacionales.**

Se buscó identificar cuales fueron los principales problemas operacionales que se presentaron durante la perforación de pozos en campañas de perforación anteriores en los campos San Cristóbal y Bare, para de esta manera tener una idea de las diferentes situaciones que se puedan presentar durante la construcción de los pozos horizontales del proyecto en estudio.

Para lograr identificar dichos problemas se utilizó el programa *DIMS™ For Windows (DFW™)*, el cual es un software que integra completamente, una base de datos, comunicación e ingeniería para la perforación, completación y servicios al pozo, y para la búsqueda de información referente a cualquier pozo que se encuentre cargado en esta aplicación. Es un programa completo que se basa en reportes de operaciones y un sistema de base de datos, y que además puede prepararse para ser adaptado a cualquier campo, idioma, sistema de medidas o ambiente de operaciones, para facilitar los reportes operacionales y las consultas necesarias para obtener una información rápida de la historia del pozo. Además el DFW permite la generación de preguntas, ya que la herramienta cuenta con un analizador de datos y una caja de herramienta de ingeniería de los informes y gráficos normalmente pedidos.

Además de la utilización del *DFW™*, se buscó información en carpeta de pozos referente a las perforaciones anteriormente realizadas en el campo San Cristóbal (anteriores al año 2000) ya que las mismas no se encontraban cargadas en el *DFW™* debido a que estos son pozos viejos que han sido cerrados a producción. La intención al buscar información de estos pozos fue, al igual que en el campo Bare, la de identificar problemas operacionales que se hallan presentado

en el campo para prevenir su posible aparición en el presente proyecto de perforación, y en base a los mismos plantear soluciones mediante la implementación del mejor sistemas de control de sólidos. En las figuras siguientes se observan las ventanas del programa DIMS.

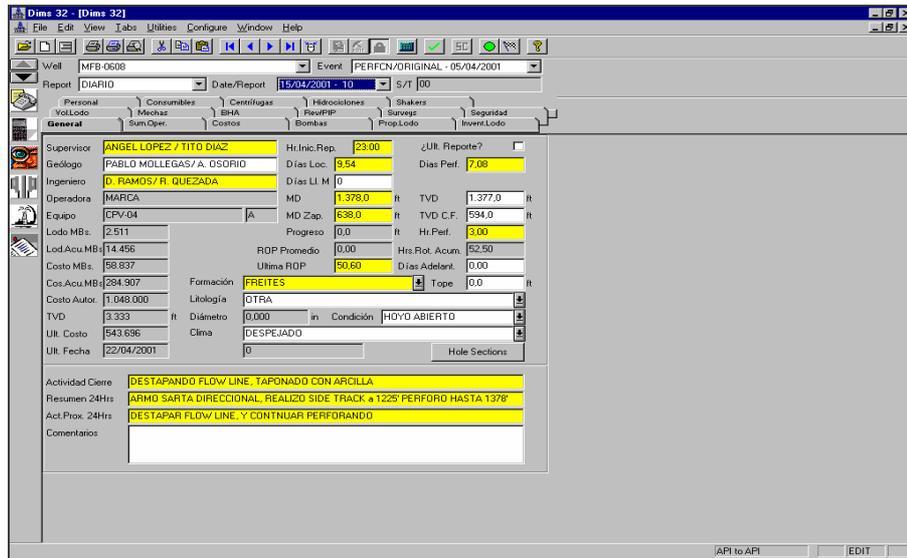


FIGURA 4.2.2 Pantalla Principal del DFW™.

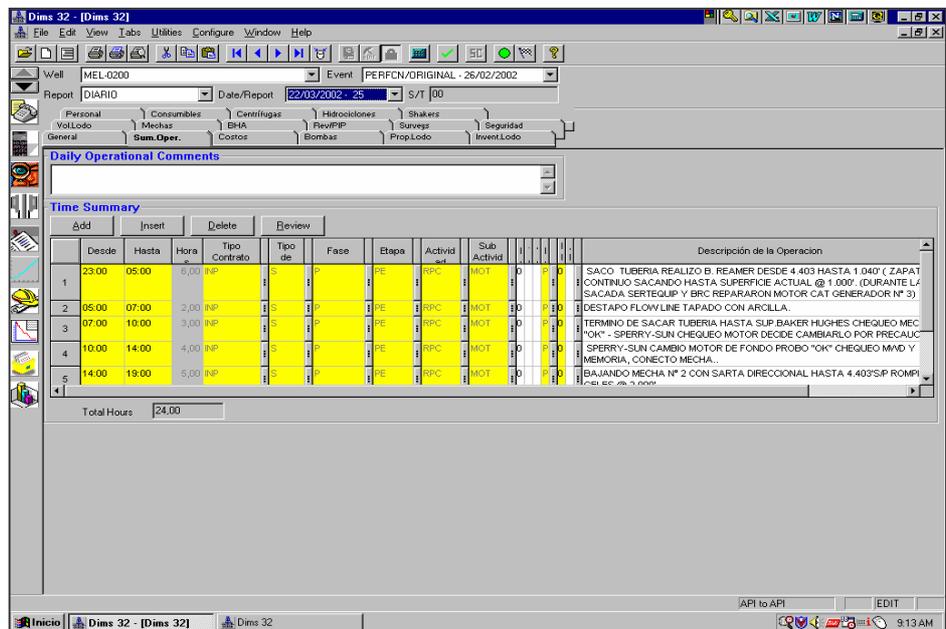


FIGURA 4.2.3 Sumario de Operaciones Diarias.

- **Descripción de los Diferentes Sistemas de Control de Sólidos.**

Se plantearon los diferentes sistemas de control de sólidos, los cuales van a ser objeto de una comparación tanto operacional como económica. El planteamiento de estos sistemas se basó en la información recopilada en las fases de trabajo anteriormente mencionadas, en cuanto a funcionamiento y especificaciones técnicas de los equipos y en el tamaño de partícula que se desea remover de cada sección perforada. Para tal fin se contó con la ayuda y asesoría de la compañía de servicios para la selección de los equipos adecuados para cada situación planteada con sus correspondientes especificaciones y requerimientos operacionales para lograr la máxima eficiencia de remoción de cada uno de ellos.

En el caso particular de las zarandas vibratorias la selección del tamaño de la malla del tamiz se realizó con la utilización de un programa suministrado por una empresa de servicio, **Programa de Selección de Mallas, (PSM)** ^[12] (Fig. 4.2.4), el cual arroja varias opciones de malla según el tipo de tamiz (si es piramidal, convencional, etc.), Sin embargo los resultados que muestra este programa son tomados estrictamente como recomendaciones, y no como un valor preciso, ya que el mismo no toma en cuenta directamente el tipo de formación que se está perforando, ni los volúmenes de roca manejados. Este programa se basa en los siguientes parámetros para hacer su selección de malla:

- Viscosidad plástica del fluido de perforación.
- Tipo de zaranda vibratoria que se desea utilizar, convencional o de alta fuerza G.
- Galonaje del fluido de perforación que se maneja por sección u hoyo perforado, gpm.
- Densidad del fluido de perforación, lpg.
- Tipo de fluido de perforación, PHPA (poliacrilamida parcialmente hidrolizada) o no-PHPA.

Para darle valores de entrada al **PSM**, se necesitó la información correspondiente a las propiedades del fluido de perforación y el galonaje del mismo que será utilizado en cada sección a perforarse. En cuanto al tipo de zaranda que se utilizaría se tomó a todas como zarandas de alta fuerza G, ya que este es el tipo de zaranda que más se utiliza en la actualidad debido a que se ha comprobado su alta eficiencia de remoción y versatilidad.

En este programa las capacidades de flujo son aproximadas, y la selección y uso de las mallas dependen también de la tasa de penetración, caudal, propiedades del fluido de perforación, diámetro del hoyo y tipo y cantidad de ripios procesados.

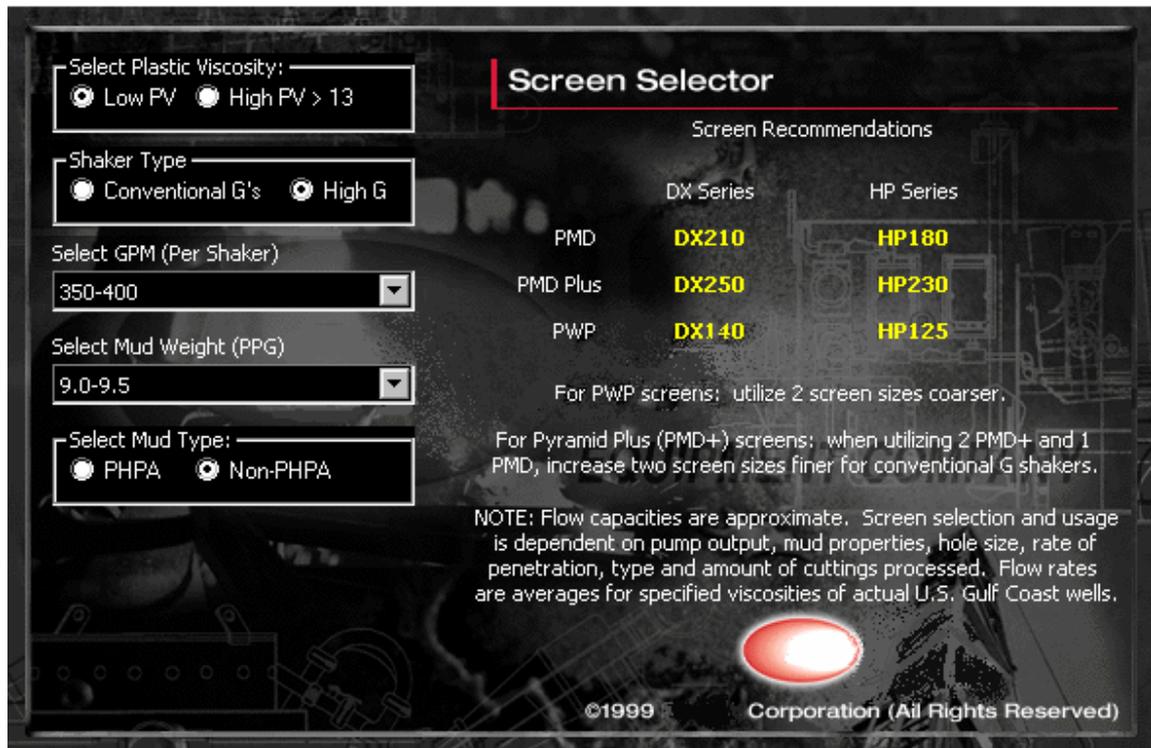


FIGURA 4.2.4 Programa para la Selección de las Mallas de los Tamices.^[12]

- Generación del Programa para el Análisis Económico del Proceso de Control de Sólidos.**
 Para el desarrollo y aplicación de la metodología, y para poder llevar a cabo el análisis comparativo entre los sistemas de control de sólidos planteados en la fase anterior, se utilizó como herramienta principal de trabajo el programa **Excel de Microsoft Office**, con el cual se verificaron las ecuaciones entregadas por la compañía de servicios. Cabe destacar que dichos programas fueron entregados en papel, es decir, en versión impresa, por lo cual se montaron las ecuaciones de los mismos en **Excel** para de esta manera realizar los cálculos mediante un programa computarizado que se pudiera utilizar en cualquier caso con solo introducir los datos solicitados por el mismo. A este programa se le dio el nombre de **Programa para el Análisis**

Económico del Proceso de Control de Sólidos (PAE). El programa fue montado y validado con datos reales de campo los cuales sirvieron como prueba piloto para el desarrollo del mismo.

4.2.4 SELECCIÓN DEL MEJOR SISTEMA DE CONTROL DE SÓLIDOS

Esta fase depende directamente de los resultados obtenidos en la fase de evaluación operacional y económica, ya que se utiliza como herramienta principal para la comparación de los sistemas de control de sólidos planteados el **PAE** desarrollado en Excel. Podemos subdividir esta fase en las siguientes etapas de trabajo:

- **Análisis Comparativo de los Sistemas Planteados.**

El análisis comparativo se llevó a cabo, con base en los resultados económicos obtenidos del **PAE**, ya que con el programa se realizó un análisis económico comparativo entre los diferentes sistemas planteados para así determinar los beneficios económicos que aportará la incorporación de los equipos seleccionados de un sistema u otro. También se analizaron los beneficios operacionales que aporta cada sistema en particular.

- **Selección del Sistema Final de Control de Sólidos.**

Se realizó la selección del mejor sistema de control de sólidos basándose en el análisis comparativo de los sistemas planteados en la fase anterior, y en las ventajas operacionales que presenta dicho sistema sobre los demás sistemas propuestos. En esta sección se reporta cual fue el resultado del análisis comparativo:

- Sistema propuesto como mejor alternativa tanto económica como operacional para lograr una eficiente remoción de ripios al menor costo posible.
- Indicaciones para la correcta colocación y disposición de los equipos de control de sólidos en el área del taladro.
- Requerimientos operacionales y funcionales de cada uno de los equipos que componen el sistema de control de sólidos seleccionado.

- **Recomendaciones.**

En esta fase se plantearon las posibles soluciones y/o recomendaciones a las implicaciones ambientales y problemas operacionales que puedan traer consigo la implementación de dichos equipos de control de sólidos.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 PROBLEMAS OPERACIONALES QUE SE PUEDEN PRESENTAR DURANTE LA PERFORACIÓN DE POZOS EN EL CAMPO SAN CRISTOBAL

Para la prevención de los problemas operacionales relacionados con la generación de ripios y/o sólidos de perforación, que más frecuentemente puedan ocurrir durante la perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, se seleccionó un total de 12 pozos, perforados en el período comprendido entre los meses de octubre del año 2001 y octubre del 2002 en los campos Bare y San Cristóbal del Distrito San Tomé. Se tomaron los pozos perforados más recientemente, ya que los pozos que se perforarán en el proyecto en desarrollo del campo San Cristóbal, seguirán los lineamientos y técnicas de perforación utilizadas en el campo Bare.

5.1.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS PRINCIPALES PROBLEMAS OPERACIONALES

Mediante la revisión minuciosa de las carpetas de pozos y con el apoyo del software Dims For Windows, fue posible la elaboración de una base de datos sobre los problemas operacionales, relacionados con los sólidos presentes en el fluido de perforación. En esta base de datos se especifica el tipo de problema presentado, la profundidad a la cual aconteció el mismo, horas invertidas en solventarlo, así como también el tipo de fluido de perforación utilizado con sus propiedades más relevantes.

Con la elaboración de esta base de datos se pudo obtener el tiempo promedio de perforación de los pozos, el porcentaje de incidencia de los problemas estudiados, y se logró desglosar los tiempos perdidos durante la perforación por la ocurrencia de los problemas estudiados. A continuación se muestra un ejemplo de la base de datos elaborada para los pozos NZZ-161 y MFB-609, el resto de la base de datos se encuentra en el apéndice E.

TABLA 5.1.1 Base de Datos de los Potenciales Problemas Operacionales que Pueden Ocurrir en San Cristóbal.

Pozo	Sección Perforada	Tipo de Lodo	Densidad lb/gal	Vp – Pc cP-lb/100ft ²	Geles 10s–10m	Horas	Problema
NZZ-161	13 ^{1/4} " x 10 ^{3/4} "	Agua Gel	8,5 – 8,9	-	-	6	Paro perf. por zona de deposición de ripios, malas condiciones y falta de muro de contención al tanque 3 caras. Saneamiento a la locación
						1,5	Se tapó línea del sifón por presencia de mucha arcilla. Se destapó Sifón y se limpió celler
						0,5	Se daño pistón # 3 de la bomba # 1. Reemplazo pistón a bomba # 1
						0,5	Chequeo y limpieza del filtro bomba # 2
						1	Circulo pozo hasta retorno limpio por la presencia excesiva de arcilla.
	9 ^{7/8} " x 7"	Lignosulfonato	9 -10	8/18 – 8/16	3/10 - 5/18	2,5	Varias circulaciones del pozo por presencia de un 60% de arcillas en la formación entre los 2840 y 2860 pies, para limpieza y acond. del fluido.
MFB-609	12 ^{1/4} " x 9 ^{5/8} "	Lignosulfonato	9 –9,8	10/18 – 10/16	4/10 – 5/18	3	Taponamiento del divisor de flujo mientras perf. de 703 a 880'. Se intenta destapar el divisor sin éxito. El fluido se regresa por la campana por reducción en la salida del divisor de flujo y por falta de más inclinación en la línea de flujo.
						6	Parado por reparación mecánica y modificación del divisor de flujo de los equipos de control de sólidos, niple campana y línea de flujo. Saneo locación.
						8	Continua parado por reparaciones.
						9,5	Continua parado por reparaciones. E.C.S. modificados en un 100%.
						1,5	Se obstruye el divisor y la línea de flujo por falta de inclinación. Se intenta destaparlos sin éxito @ 1393'
						0,5	Destapando el divisor y la línea de flujo.
						9	Liberando sarta por arrastre y pega.
						1,5	Destap. divisor y línea de flujo por obstruc. por falta de inclinación @ 1627'.
						1,5	Obstruc. divisor y línea de flujo al reparar. Falta de inclinación. Se destapan 100%
						0,5	Destap. divisor y línea de flujo por obstruc. por exceso de arcillas @ 3000'.
						5	Tensionando para sacar tubería por pega.

Evaluando los problemas operacionales que se presentaron durante la perforación de cada pozo, se logró detectar el tiempo perdido de perforación como consecuencia de cada problema operacional. De esta manera se realizó un análisis porcentual de los tiempos productivos e improductivos para cada pozo, los cuales representan el tiempo efectivo de perforación y avance del proyecto, y el tiempo perdido por paralización de las operaciones respectivamente.

A demás de la determinación de los tiempos productivos e improductivos igualmente se obtuvo un estimado del porcentaje de influencia de cada problema identificado sobre los tiempos efectivos de perforación de cada uno de los pozos incluidos en la base de datos.

En Primer lugar se realizaron análisis individuales para cada pozo contenido en la base de datos, con lo cual se obtuvo el porcentaje total de tiempo improductivo causado por sólidos durante la perforación, y en segundo lugar, se desglosa ese porcentaje total de tiempo improductivo en subporcentajes, es decir, se identifica cuales problemas operacionales causan la perdida total de tiempo y se cuantifican porcentualmente.

A continuación se muestra el análisis porcentual realizado para el pozo MFB-0638 del campo Bare en la figura 5.1.1. En la parte a) de la gráfica se muestran los porcentajes de tiempos productivos e improductivos para el pozo en cuestión, estos porcentajes representan una fracción del tiempo total de perforación y. En la parte b) se identifican los problemas operacionales que causan el tiempo improductivo y se determina el porcentaje de incidencia de los mismos.

El análisis porcentual de los tiempos productivos e improductivos de los todos los pozos se muestra al detalle en el Apéndice F.

Tiempo total de perforación pozo MFB-0638: 14,125 días

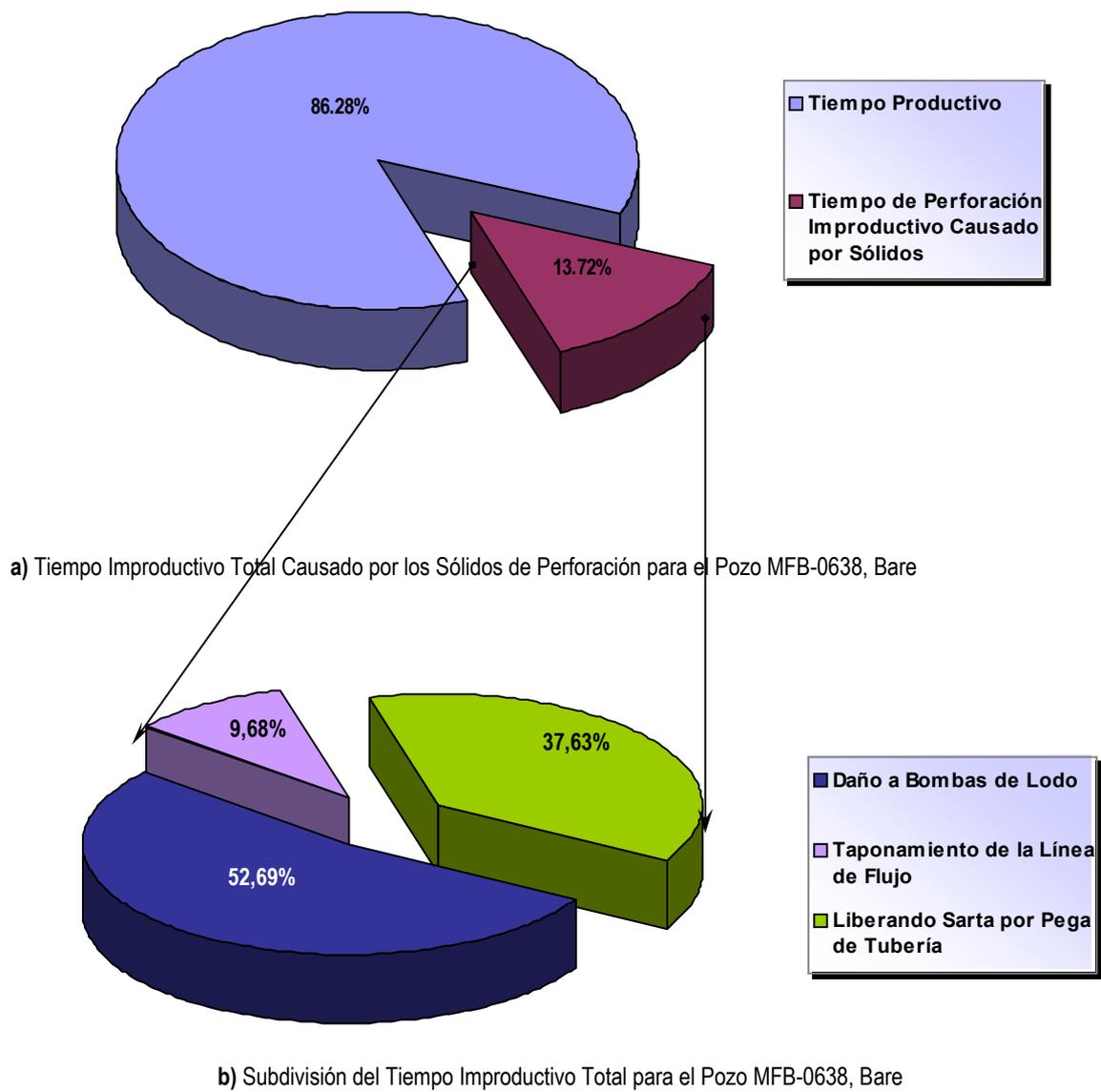


GRAFICO 5.1.1 Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0638, Bare

5.1.2 PROBLEMAS OPERACIONALES RELACIONADOS CON SÓLIDOS DE PERFORACIÓN.

Los principales problemas operacionales identificados mediante la base de datos creada para los 12 pozos de los campos Bare y San Cristóbal, se nombran a continuación en orden de frecuencia de aparición, o mayor porcentaje de ocurrencia:

1. Daño a las Bombas de Lodo (Cambio de los pistones, módulos de descarga y succión, camisas, empacaduras, limpieza a los filtros y chequeos por desgaste potencial). ■
2. Circulación del pozo por exceso de sólidos de perforación. □
3. Taponamiento de la línea de flujo por exceso de sólidos de perforación. □
4. Operaciones de circulación y liberación de la sarta por pega diferencial, arrastre y repaso. ■
5. Modificación de los equipos de control de sólidos por taponamiento de las mallas y mal desempeño de los mismos. □
6. Taponamiento del tubo campana y línea de flujo por exceso de sólidos. ■
7. Falla del muro de contención del tanque tres caras y saneamiento a la locación. ■
8. Taponamiento de la línea del sifón. □
9. Taponamiento del divisor de flujo y de la línea de flujo por falta de inclinación de la línea y exceso de sólidos. ■

Con el análisis porcentual de cada pozo se procedió a realizar un estimado del porcentaje que representa cada problema operacional en el tiempo improductivo de perforación. Dicho estimado se calculó mediante un promedio aritmético del porcentaje presente de cada problema operacional entre la cantidad de pozos, y se presenta a continuación:

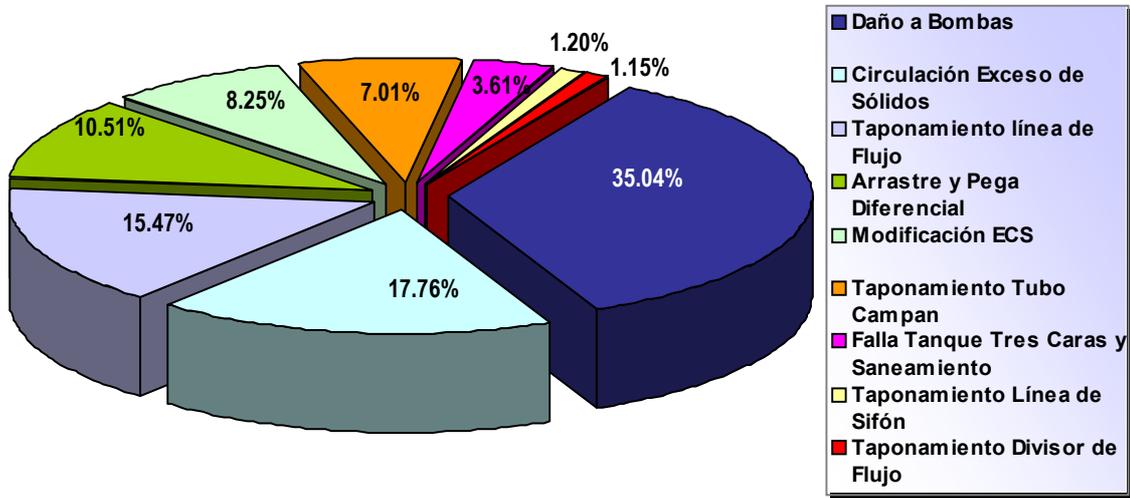


GRÁFICO 5.1.2 Porcentaje de Incidencia de Problemas Operacionales Relacionados con Sólidos que Pueden Ocurrir Durante la Perforación de Pozos Horizontales.

Como se determinó en el área de Visualización, Conceptualización y Definición realizada para el proyecto San Cristóbal, la construcción de cada localidad horizontal debe ser concluida en un lapso óptimo de trece (13) días de trabajo, lapso en el cual se contabilizaron los tiempos improductivos. Por tal motivo se debe tener en consideración el impacto de los sólidos de perforación en el aumento o disminución de tales tiempos, ya que en gran medida estos sólidos serán los principales causantes de problemas operacionales a lo largo del a perforación y que inevitablemente causaran retrasos en la ejecución del proyecto por lo cual se generará un costo extra.

Para el caso particular del campo San Cristóbal los problemas operacionales causados por los sólidos están asociados a la perforación de zonas altamente arcillosas como lo es en el caso de la formación Freites, la cual representa una sección importante a perforar, en la cual predominan las lutitas hidratables dispuestas en bloques moderadamente compactos. Del tiempo total de perforación de los pozos estudiados en los campos Bare y San Cristóbal, aproximadamente el 3,84% es tiempo improductivo debido a los problemas operacionales causados por exceso de sólidos de perforación durante la construcción de pozos horizontales. Estos valores se encuentran reflejados en gráfico 5.1.3.

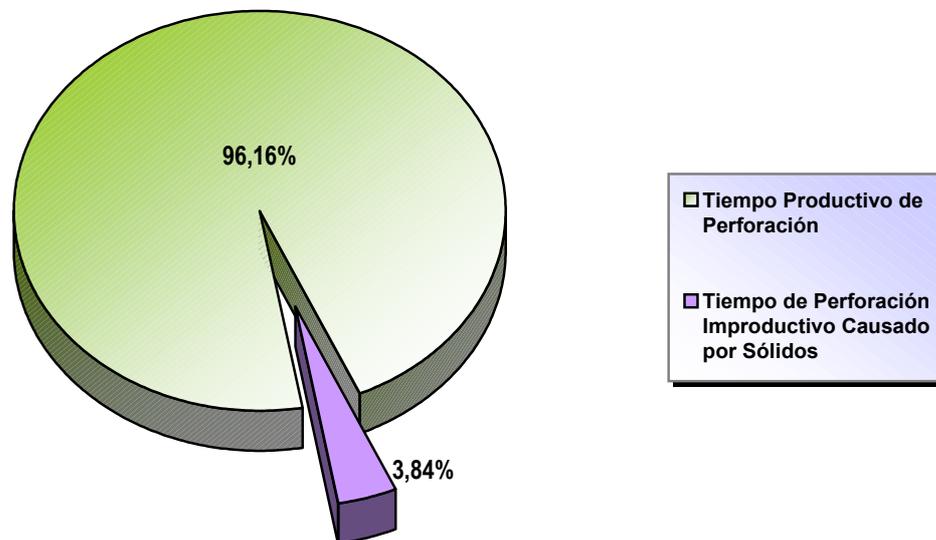


GRÁFICO 5.1.3 Fracción del Tiempo Total de Perforación que corresponde a Tiempos Improductivos Ocasionados por Problemas Operacionales Relacionados con Sólidos

▪ **Daño a los Equipos de Bombeo.**

La principal causa del deterioro y avería en las bombas de lodo y sus componentes (pistones, módulos de descarga y succión, camisas, empaaduras, filtros, etc.) es el desgaste causado por la fricción mecánica entre las partículas contenidas en el Fluido de perforación y los equipos, y debido a que estas partículas sólidas son altamente abrasivas, la cantidad o concentración de las mismas es proporcional al desgaste generado sobre los equipos, por lo tanto mientras mayor sea su concentración mayor será el deterioro causado a estos y menor el tiempo de vida de los mismos. Esta situación de igual modo generará tiempos perdidos por reparaciones a los equipos de superficie, los cuales retrasarán el desarrollo de la perforación, y por supuesto los tiempos perdidos se traducirán en gastos significativos por las reparaciones realizadas.

▪ **Circulaciones del Fluido de Perforación.**

El motivo principal de realizar múltiples circulaciones es el de garantizar la limpieza del hoyo, ya que a medida que el fluido pasa a través de los equipos de control de sólidos, mayor cantidad de

partículas serán removidas del sistema, manteniendo así las propiedades reológicas del lodo en un rango aceptable y manejable. El mantener las condiciones óptimas del lodo de perforación es un factor determinante para obtener una limpieza eficiente del hoyo, ya que el transporte de las partículas y sólidos hacia la superficie por parte del fluido de perforación, depende de unas condiciones específicas del mismo.

Mientras no exista una buena limpieza del hoyo se mantendrán los sólidos en el sistema, lo cual causará que la concentración de los mismos en el fluido se incremente a medida que este complete cada circulación. Esto a su vez traerá como consecuencia que se generen y presenten todos los problemas operacionales asociados al exceso de sólidos de perforación en el sistema de lodo.

▪ **Taponamientos Durante la Circulación del Fluido de Perforación.**

Las obstrucciones o taponamientos se presentan en secciones del pozo en las cuales se reduce el diámetro del área de circulación del fluido de perforación. Los lugares más comunes en donde se presentan taponamientos son la Línea de Flujo, Tubo Campana, Línea del Sifón y Divisor de Flujo. Este problema, aunque no se considera de alto riesgo, trae consigo pérdidas innecesarias de tiempo, las cuales se traducen en pérdidas de dinero. Generalmente los taponamientos son la consecuencia inmediata de la presencia de arcillas plásticas con alto contenido de esmectita, un tipo de mineral de arcilla muy susceptible a la presencia de agua. También pueden ocurrir cuando se produce un exceso de rípios por derrumbes y/o lavado del hoyo. Esta situación aumenta el diámetro del hoyo, lo cual disminuye la velocidad en el anular y por tanto, puede disminuir la capacidad de limpieza del sistema de fluido de perforación. En tal sentido, la presencia de bloques de arcilla y de derrumbes considerables de la formación causan la obstrucción de las vías de circulación del fluido de perforación por causa de la acumulación progresiva de las partículas contenidas en él, por lo tanto se debe invertir tiempo y dinero en destapar las secciones obstruidas.

Para el caso del campo San Cristóbal se ha vislumbrado que los taponamientos se presentarán con mayor frecuencia en un intervalo específico durante la perforación de la fase de superficie y

la mayor parte de la fase intermedia. Dicho intervalo corresponde a la formación Freites, por lo que se puede considerar la presencia de arcillas plásticas. Para determinar si ocurre por la presencia de minerales de arcilla hidratable se requiere determinar la composición mineralógica de la formación de esa zona específica.

- **Arrastre y Pega Diferencial.**

La presencia de estos problemas puede tener diversas causas como: altos ángulos de construcción lo cual contribuye a que la sarta tienda a acercarse mas al lado bajo de la perforación por efecto de la gravedad, hidratación de las lutitas con su consecuente hinchamiento, lo cual trae como consecuencia la reducción del hoyo, cuando no se usa la densidad adecuada o se utiliza una densidad menor a la requerida, o cuando se acumulan grandes cantidades de ripios alrededor de los estabilizadores y/o sarta causando que el lodo se contamine con sólidos lo que hace que el revoque que se forma en las paredes del hoyo sea muy grueso reduciendo así el diámetro del hoyo.

Cabe destacar que durante la perforación en el campo San Cristóbal se realizarán ciertas prácticas operacionales tales como el bombeo de píldoras viscosas cada 300 pies y circulación del fluido cuando ocurren estos problemas. Esto puede indicar que los problemas de apoyo y arrastre se originan por la acumulación de ripios en el anular. Sin embargo, la construcción de altos ángulos durante la perforación también podría ser la causa de estos inconvenientes. Para eliminar la incertidumbre acerca de la acumulación de ripios en el anular es necesario determinar la velocidad de flujo y la velocidad mínima en el mismo que garantice la limpieza del hoyo.

- **Modificación de los Equipos de Control de Sólidos.**

La modificación de los equipos se realiza principalmente debido a la obstrucción de los tamices de las zarandas vibratorias las cuales son la primera línea de remoción de ripios del sistema. La causa más frecuente de estas obstrucciones es la presencia de grandes cantidades de sólidos en el sistema de tipo arcilloso, sobre todo aquellos ripios conocidos como gumbo, que no es otra cosa que bloques de arcillas muy pegajosa los cuales tiende a adherirse a la malla del tamiz

y por lo tanto van cegándola y disminuyendo así el porcentaje de área abierta de la misma. Al ocurrir este fenómeno la remoción de sólidos del sistema en las zarandas se reduce de manera dramática, lo cual causa, además de desbordamientos en las zarandas, que el fluido que continua fluyendo hacia los demás equipos del sistema de control de sólidos este saturado de sólidos de gran tamaño, causando que estos disminuyan su eficiencia de remoción y posteriormente se dañen. Por tal motivo, se deben cambiar las especificaciones de los tamices de las zarandas y buscar la manera de remover estos bloques de arcillas de manera que no disminuyan el rendimiento del sistema de control de sólidos.

▪ **Falla del Tanque Tres Caras y Saneamiento a la Locación.**

Las fallas que se reportan con el tanque tres caras son debido al desbordamiento de los fluidos y sólidos contenidos en él, ya que en este se acumulan los sólidos de perforación que van siendo descartados del sistema. Si dicho sistema se encuentra saturado de ripios producto de derrumbes en la formación o bloques de arcilla de tamaño considerable, el tanque tres caras tiende a colapsar debido a que recibe más carga de la que el puede contener, trayendo como consecuencia el desbordamiento de su contenido y la contaminación del área aledaña al mismo. Por lo tanto se debe proceder a sanear la locación lo mas pronto que sea posible para evitar daños irreversibles al medio ambiente. Este tipo de problemas no solo ocasionan una perdida de tiempo vital para el desarrollo del proyecto, sino que además generan gastos importantes debido a las acciones que se deben implementar para minimizar el impacto ambiental.

Para evitar el colapso del tanque se debe mantener una vigilancia estricta sobre el mismo y tratar de descargar todo el material de desecho que sea posible antes de que el tanque ceda y se desborde. Esta tarea se vuelve un poco difícil cuando se están perforando zonas altamente arcillosas o de poca compactación debido a que se generan grandes volúmenes de sólidos los cuales son difíciles de manejar y remover.

5.2 SISTEMAS DE CONTROL DE SÓLIDOS PROPUESTOS PARA EL CAMPO SAN CRISTOBAL.

Según las necesidades y requerimientos del proyecto de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, en cuanto a la remoción de sólidos o ripios del fluido de perforación, se plantearon varios sistemas de control de sólidos con la finalidad de seleccionar el más adecuado para la zona y el proyecto en cuestión. El objetivo de dichos planteamientos es determinar mediante una comparación operacional y económica, cual es el mejor sistema a implementar en el área con la meta de lograr una alta eficiencia de remoción, para de esta manera minimizar los tiempos no productivos causados por la excesiva generación de ripios durante la perforación.

Los sistemas que se plantearon están conformados en su totalidad, por equipos que se considera cumplen con las características necesarias para lograr obtener la mejor eficiencia de remoción de ripios. Estos sistemas se conformaron según el corte que realiza cada uno de ellos, mediante una combinación de los siguientes equipos:

TABLA 5.2.1 Equipos que Conforman los Sistemas Propuestos

EQUIPOS DE CONTROL DE SÓLIDOS PROPUESTOS	PUNTO DE CORTE QUE REALIZAN, (micrones)
Unidad Removedora de Arcilla, ó "Scalper"	Mayor a 1600 μ
Zarandas Vibratorias	2000 – 74 μ
Unidad "Tres en Uno"	800 – 15 μ
Super Conos, ó Unidad "gMAX"	800 – 10 μ
Centrifuga Dual	500 – 2 μ
Sistema de Doble Centrifuga	500 – 2 μ

5.2.1 DESCRIPCIÓN Y ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS QUE CONFORMAN LOS DIFERENTES SISTEMAS

Unidad Removedora de Arcillas ó "Scalper".

La unidad removedora de arcilla, consiste en una correa rotatoria, no vibratoria, con un tamiz grueso de malla 8 a 10, la cual realiza un corte de entre 10000 y 1679 μ . Este equipo se utilizará

principalmente para la remoción de la arcilla más problemática que se presenta durante la perforación como lo es el “gumbo”, es decir, aglomeraciones de arcilla muy pegajosa, que sale en grandes bloques del pozo hacia los equipos de control de sólidos.

Este tipo de arcilla es muy perjudicial debido a su carácter pegajoso, por lo que tiende a obstruir cualquier tipo de tubería, línea de flujo y los tamices de las zarandas. Por lo tanto es necesario tratar de remover la mayor cantidad posible de dichas aglomeraciones antes de que éstas lleguen a las zarandas principales, ya que si las zarandas son de malla fina, se obstruirían los tamices de las mismas provocando el desbordamiento del fluido de perforación y por lo tanto un aumento considerable en los costos de perforación por el fluido que se debe reponer. Por otro lado si los tamices son de malla gruesa, estos dejarán pasar partículas de tamaño considerable, que comprometerán la eficiencia de remoción del resto de los equipos que componen el sistema.

Zarandas Vibratorias.

Las zarandas recomendadas para todos los sistemas tendrán las siguientes características:

- Movimiento Lineal.
- Mallas Convencionales.
- Tamiz de Chapas Perforadas.
- Fuerza G Igual o Mayor a 5 G's.
- Máxima Inclinación Disponible de la Canasta Cuesta Abajo.

La malla del tamiz dependerá de la sección que se esté perforando, de la cantidad de zarandas a utilizar, del galonaje manejado, y, de las condiciones y características de la formación que se esté atravesando.

Unidad “Tres en Uno”.

De igual manera que con las zarandas vibratorias, ciertas especificaciones de la Unidad tres en Uno dependerán de la sección que se esté perforando y sus características. Sin embargo las características generales de esta unidad son las siguientes:

- Conos Desarenadores de 10"
- Conos Deslimadores de 4"
- Zaranda de Movimiento Lineal.
- Mallas Convencionales.
- Tamiz de Chapas Perforadas.
- Fuerza G Igual o Mayor a 5 G's.
- Máxima Inclinación Disponible del Tamiz Cuesta Abajo.
- Bombas (dos) de Alimentación de 6"x8"x14" (una para el desarenador y otra para el deslimador).

Super Cono ó Unidad gMAX

La unidad gMAX es un múltiple de ciclones de 10" y capacidad de procesamiento de 500 gpm cada uno, pero realiza un corte de separación igual o menor a un cono de 4" de entre 10 y 40 μ . Esta unidad es mucho más compacta debido a que no tiene tantos conos como el Tres en Uno, pero es capaz de realizar el mismo corte e incluso menor y manejar mayores volúmenes de fluido. Esta unidad tiene las siguientes especificaciones:

- Super Conos de 10" c/u
- Zaranda de Movimiento Lineal.
- Mallas Convencionales.
- Tamiz de Chapas Perforadas.
- Fuerza G Igual o Mayor a 5 G's.
- Máxima Inclinación Disponible del Tamiz Cuesta Abajo.
- Una bomba de Alimentación de 6"x8"x14"

Otras especificaciones dependen de la sección y de sus características.

Centrifuga Dual.

Esta es una centrifuga que se puede poner a trabajar como centrifuga de alta o como centrifuga de baja según las necesidades que se presenten durante la perforación. Esta capacidad de

comportarse como dos centrifugas en una es debido a que tiene velocidades de rotación adaptables de cero a tres mil revoluciones por minuto, (0 – 3000 rpm). Ésta se utilizaría como centrifuga de alta para remover los sólidos ultrafinos que son los más perjudiciales, y como centrifuga de baja en el caso que sea necesario recuperar material densificante de alta gravedad específica en la sección intermedia que es la única en la cual se utiliza barita.

Sistema de Doble Centrifuga

Este sistema opera con dos centrifugas por las cuales va circular parte del fluido de perforación. La intención de este sistema es recuperar material densificante que debe ser reincorporado al sistema para luego remover los sólidos más finos del fluido y disminuir su concentración.

En la siguiente tabla se presentan los parámetros más relevantes tanto para la centrifuga dual como para el sistema de doble centrifuga, ya que lo que va a variar es la configuración de las mismas, es decir, para la centrifuga dual se configura la centrifuga como de baja o de alta según la necesidad y para el sistema de doble centrifuga se tiene una centrifuga de baja y una de alta por separado. Sin embargo las especificaciones son las mismas para ambas.

TABLA 5.2.2 Parámetros para las Centrifugas

PARAMETROS	CENTRIFUGA DE BAJA	CENTRIFUGA DE ALTA
Velocidad (RPM)	0 - 950	1150 – 2500
Diámetro del Tazón (pulgadas)	24 – 40	24 – 40
Capacidad (gpm)	150	150
Fuerza G	1000 G's	3000 G's

5.2.2 SISTEMAS DE CONTROL DE SÓLIDOS PROPUESTOS

En cada caso que se presenta a continuación, se plantea un sistema de control de sólidos y los equipos que componen dicho sistema. Cada uno los equipos que conforman los sistemas planteados tiene ciertas especificaciones técnicas que van a depender de la sección que se valla a perforar, como lo son el tamaño de malla que se va a utilizar en las zarandas vibratorias, el número

de conos de las unidades tres en uno y/o de la unidad de súper conos , la fuerza G utilizada para los diferentes equipos etc. A manera de ejemplo se muestran las especificaciones técnicas de los equipos por sección a perforar para el sistema planteado número uno (S1) en las tablas 5.2.3 a 5.2.11. Las especificaciones técnicas de los demás sistemas se presentan en el apéndice G.

SISTEMA # 1.

Este es el sistema de control de sólidos anteriormente utilizado durante la perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal. El mismo sirvió como caso base a partir del cual se plantean los demás sistemas, es decir, se toma como una referencia a partir de la cual se proponen los nuevos equipos o combinaciones de equipos para realizar el análisis comparativo entre los casos planteados. Este sistema esta compuesto por:

- Tres (3) Zarandas de movimiento lineal,
- Unidad “Tres en uno” .
- Centrifuga Dual.

Sin embargo, se debe destacar que en algún momento durante la perforación se sustituyo la centrifuga dual por un sistema de doble centrifuga, pero para los efectos de esta investigación se asumió que siempre se trabajo con la centrifuga dual ya que no existen registros precisos que puedan aclarar cuando y porque se llevo a cabo dicha sustitución. A seguir se describen las especificaciones técnicas por sección a perforar para cada componente del S1.

1.1. Hoyo de Superficie

TABLA 5.2.3 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 1.1.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	285 - 300	84	196	≥ 5	7.60

TABLA 5.2.4 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 1.1.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	16	37,6	150	106	≥ 5	5.30

TABLA 5.2.5 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 1.1.

Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

1.2. Hoyo Intermedio.

TABLA 5.2.6 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 1.2.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	285 - 300	84	196	≥ 5	7.60

TABLA 5.2.7 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 1.2.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	18	39,2	150	112	≥ 5	5.30

TABLA 5.2.8 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Baja y Alta) en el Caso 1.2.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

1.3 Hoyo de Producción

TABLA 5.2.9 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 1.3.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	300	150	106	≥ 5	7.60

TABLA 5.2.10 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 1.3.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	12	34	175	112	≥ 5	5.30

TABLA 5.2.11 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 1.3.

Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

SISTEMA # 2.

El sistema número dos (S2), difiere principalmente del sistema base en la utilización de un sistema de doble centrifuga en lugar de la centrifuga dual. Este sistema esta compuesto por:

- Tres (3) Zarandas de movimiento lineal
- Unidad "Tres en uno"
- Sistema de doble centrifuga

SISTEMA # 3.

El sistema número tres (S3), difiere principalmente del sistema base en la utilización de una unidad de súper conos en lugar de la unidad tres en uno, y en el número y área de procesamiento de las zarandas vibratorias. Este sistema esta compuesto por:

- Cuatro (4) Zarandas de movimiento lineal
- Unidad de Súper Conos "gMAX"
- Centrifuga Dual.

SISTEMA # 4.

El sistema número cuatro (S4), difiere principalmente del sistema base en la utilización de un sistema de doble centrifuga en lugar de la centrifuga dual, y, en el número y área de procesamiento de las zarandas vibratorias. Este sistema esta compuesto por:

- Cuatro (4) Zarandas de movimiento lineal
- Unidad Tres en Uno
- Sistema de Doble Centrifuga.

SISTEMA # 5.

El sistema número cinco (S5), difiere principalmente del sistema base en la incorporación de una unidad removedora de arcillas, conocida como "Scalper", y en el área de procesamiento de las zarandas vibratorias. Este sistema esta compuesto por:

- Unidad removedora de arcilla o "Scalper".
- Tres (3) Zarandas de movimiento lineal,
- Unidad "Tres en uno".
- Centrifuga Dual.

SISTEMA # 6.

El sistema número seis (S6), difiere principalmente del sistema base en la incorporación de una unidad removedora de arcillas, conocida como "Scalper", en la utilización de un sistema de doble centrifuga en lugar de la centrifuga dual, y en el área de procesamiento de las zarandas vibratorias. Este sistema esta compuesto por:

- Unidad removedora de arcilla o "Scalper".
- Tres (3) Zarandas de movimiento lineal
- Unidad "Tres en uno"
- Sistema de doble centrifuga.

SISTEMA # 7.

El sistema número siete (S7), difiere principalmente del sistema base en la incorporación de una unidad removedora de arcillas, conocida como "Scalper", en la utilización de una unidad de súper conos en lugar de la unidad tres en uno, y en el área de procesamiento de las zarandas vibratorias. Este sistema esta compuesto por:

- Unidad removedora de arcilla o "Scalper".
- Tres (3) Zarandas de movimiento lineal
- Unidad de Súper Conos "gMAX"
- Centrifuga Dual.

SISTEMA # 8.

El sistema número ocho (S8), difiere principalmente del sistema base en la incorporación de una unidad removedora de arcillas, conocida como "Scalper", en la utilización de una unidad de súper conos en lugar de la unidad tres en uno, en la utilización de un sistema de doble centrifuga en lugar de la centrifuga dual, y en el área de procesamiento de las zarandas vibratorias. Este sistema esta compuesto por:

- Unidad removedora de arcilla o "Scalper".
- Tres (3) Zarandas de movimiento lineal
- Unidad gMAX
- Sistema de Doble Centrifuga.

5.2.3 EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE CADA SISTEMA Y COSTOS DE ALQUILER

Basados en los reportes de lodo entregados por la compañía de lodo, se determinó que la eficiencia del sistema S1 de control de sólidos empleado durante la perforación del pozo NZZ-161, del campo San Cristóbal era de aproximadamente el setenta por ciento, 70%. Este porcentaje se determinó mediante la utilización de unas ecuaciones básicas para el cálculo del comportamiento del sistema de remoción de sólidos dichos cálculos se muestran en el Apéndice G.

Es de importancia destacar que la eficiencia de remoción de cada sistema debería calcularse como un comportamiento por hoyo o sección perforada, ya que esta va a depender del tipo de formación, volumen de ripios, tipo de fluido de perforación, etc. Por lo tanto el cálculo de la eficiencia para el pozo NZZ-161 se realizó por hoyo perforado y se obtuvo para los hoyos de superficie, intermedio y

producción una eficiencia de remoción con el S1 del 60, 68 y 80% respectivamente, lo cual representa un promedio de eficiencia de setenta por ciento, 70% para el pozo completo.

En la tabla 5.2.12 se indica el costo de alquiler diario y el porcentaje de eficiencia de remoción para cada sistema planteado. El costo de alquiler de cada equipo utilizado fue aportado por la compañía de servicio, y en base a las combinaciones de cada sistema se calculó el costo de alquiler de cada uno.

Finalmente, la eficiencia de remoción de cada sistema se calculó a partir del valor obtenido para el S1, y se realizó con la ayuda de expertos en la materia que aportaron sus conocimientos y experiencia para determinar el rango de eficiencia de cada sistema en función del comportamiento de cada equipo. De esta manera, se determina la eficiencia de remoción de una manera teórica basada en que cada sistema presenta una mejora en la eficiencia con respecto al S1 dependiendo de los equipos que los conforman.

TABLA 5.2.12 Costos y eficiencia de Cada Sistema Planteado.

SISTEMA	COSTO DIARIO DE ALQUILER \$	EFICIENCIA DE REMOCIÓN ESTIMADA %
1	1150	70
2	1520	70
3	1240	81
4	1670	78
5	1300	82
6	1670	82
7	1240	85
8	1610	85

Como punto relevante, se debe considerar que el cálculo de la eficiencia no se ve afectado por el tipo de pozo que se este perforando, vertical u horizontal, ya que ésta consideración se encuentra implícita al utilizar el volumen de ripios generados durante la perforación como parte de los cálculos.

5.3 GENERACIÓN DEL PROGRAMA PARA EL ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROCESO DE CONTROL DE SÓLIDOS.

Se realizó un programa en Excel con el cual se realizará un análisis comparativo entre los sistemas planteados, basado en los costos que involucra la remoción de sólidos del fluido de perforación.

La eficiencia de remoción de los sólidos de perforación tiene un impacto directo en los costos por dilución. Cuando un líquido de dilución es añadido al sistema se incluyen tres costos simultáneamente: (1) Costo de líquido base para la dilución, (2) Costo de los aditivos para mantener estables las propiedades del lodo y (3) Costo de disposición de sólidos y líquidos.

Generalmente el ahorro debido al incremento en las tasas de perforación y a la reducción de los tiempos improductivos, es prácticamente imposible de predecir y contabilizar como para ser utilizados como una justificación para la adquisición de nuevas tecnologías en equipos de control de sólidos. Sin embargo, las ventajas económicas debido a la reducción en la dilución y costos por disposición son más que suficientes para justificar el gasto en equipo adicional o nuevas tecnologías para el control de sólidos. Los beneficios económicos en términos de consumo de fluido y disposición pueden ser determinados mediante un simple balance de masa, el cual será utilizado para cuantificar dichos beneficios y se muestra a continuación.

5.3.1 Balance de Masa para el Análisis Económico.^[13]

A continuación se muestra una lista de los parámetros de control de sólidos que serán utilizados para realizar el balance de masa, así como también la simbología y unidades respectivas.

TABLA 5.3.1 Parámetros Económicos del Balance.

PARÁMETROS ECONÓMICOS (Datos)		
PARÁMETRO	SIMBOLO	UNIDAD
Costos por Dilución	C_D	\$ / bbl
Costos por Disposición de Sólidos	C_{DS}	\$ / bbl
Costos por Disposición de Líquidos	C_{DL}	\$ / bbl
Costos de los Equipos del Sistema	C_E	\$ / bbl

TABLA 5.3.2 Parámetros Operacionales del Balance.

PARÁMETROS OPERACIONALES			
PARÁMETRO	SIMBOLO	UNIDAD	TIPO DE PARAMETRO
Volumen de Sólidos Generados	Vc	bbl	Cálculo
Volumen Inicial en los Tanques de Lodo	Vi	bbl	Dato
Volumen Final en los Tanques de Lodo	Vf	bbl	Dato
Volumen de Dilución Requerido	Vd	bbl	Cálculo
Volumen del Líquido de Desperdicio	Vlw	bbl	Cálculo
Volumen de Sólidos Húmedos de Desperdicio	Vsw	bbl	Cálculo
Volumen Total de Sólidos y Líquido de Desecho	Vt	bbl	Cálculo
Concentración Inicial de Sólidos Perforados en el Fluido	Ki	%	Dato
Máxima Concentración de Sólidos Perforados en el Fluido	Ks	%	Dato
Porcentaje de Sólidos Removidos por el Sistema	X	%	Supuesto
Máximo Porcentaje de Humedad en los Ripios Desechados	Y	%	Dato
Diámetro de la Sección Perforada	D	Pulgadas	Dato
Longitud de la Sección Perforada	L	Pies	Dato
Factor de Ensanchamiento	W	%	Dato
Densidad del Fluido de Dilución	ρ^D	lpg	Cálculo
Densidad de los Cortes	ρ^C	lpg	Dato
Densidad del Fluido de Perforación al Inicio de la Sección	ρ^i	lpg	Dato
Densidad del Fluido de Perforación al Final de la Sección	ρ^e	lpg	Dato

Primero se debe calcular el volumen de los sólidos generados en un intervalo dado

$$V_C = 0.000971 \cdot D \cdot L \cdot W^2 \dots\dots\dots \text{Ecuación. 5.3.1}$$

Para un porcentaje dado de remoción de sólidos el volumen de dilución requerido se calcula como sigue:

$$V_d = \frac{(1 - K_s)}{K_s} \cdot (1 - X) \cdot V_c - V_i + \frac{K_i}{K_s} \cdot V_i \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.3.2}$$

La densidad del fluido de perforación de dilución, V_d , está basada en la densidad de entrada y salida del fluido de perforación del pozo y se calcula así:

$$\rho^D = \rho^e + \frac{V_i}{V_d} \cdot (\rho^e - \rho^i) - \frac{V_c}{V_d} \cdot (1 - X) \cdot (\rho^c - \rho^e) \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.3.3}$$

El volumen total de sólidos y líquidos de desecho generados para un intervalo dado es:

$$V_t = V_i + V_c + V_d \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.3.4}$$

El volumen de sólidos húmedos, V_{sw} , y el volumen de líquido de desecho mientras se perfora, V_{lw} , se calculan como sigue:

$$V_{sw} = X \cdot V_c \cdot (1 + Y) \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.3.5}$$

$$V_{lw} = V_t - (V_f + V_c + V_{sw}) \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.3.6}$$

Una vez que el volumen de desecho es calculado, los costos totales de dilución y costo por disposición para el intervalo pueden ser determinados estimando el costo de alquiler de los equipos, el costo por barril de adición/dilución y los costos por disposición de sólidos y líquidos

1. Costos de los Equipos de Control de Sólidos. Se estima el costo del alquiler, transporte, servicio y mantenimiento por el intervalo (Generalmente suministrados por la compañía de servicio).
2. Costos de Adición/Dilución. Se estima costo de líquido de dilución, aditivos y manejo.

$$CD = C_D \cdot (V_{sw} + V_{lw}) \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.3.7}$$

3. Costos por Disposición de Sólidos y Líquidos. Se estima el costo por el manejo de los desechos.

$$CD_{SL} = (CD_S \cdot V_{sw}) + (CD_L \cdot V_{lw}) \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.3.8}$$

1. Por último se calcula el costo total del intervalo mediante la suma de todos los costos involucrados

$$CT = C_E + CD + CD_{SL} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 5.3.9}$$

Las ecuaciones del balance de masa se montaron en un programa con la utilización de **Microsoft Excel for Windows** para de esta manera poder realizar el **Programa para el Análisis Económico del Proceso de Control de Sólidos (PAE)**. El programa final fue corrido en frío con un ejemplo resuelto el cual fue la base para la creación de dicho programa.

El **PAE** se basa en el cálculo de los volúmenes de fluido de dilución requeridos para una sección en particular, así como también en los costos asociados a la remoción de los sólidos en cuanto al alquiler de los equipos, dilución y disposición de los desechos. Dichos cálculos se realizan según la eficiencia estimada de remoción de los equipos, el porcentaje de sólidos presentes en el fluido de perforación al inicio y final de la sección, y el porcentaje de humedad de los ripios a la salida, entre otros. También juega un factor importante las dimensiones de la sección perforada.

Una vez estimados todos los parámetros mencionados anteriormente el programa calcula los costos totales asociados a la remoción de ripios para un sistema de control de sólidos, o equipos en particular. Realizando estos cálculos para diferentes sistemas, se puede calcular el ahorro generado por un sistema con respecto a otro. En las figuras 5.3.1 y 5.3.2 se muestran los cuadros de Excel que contienen el **PAE** con el ejemplo piloto, y los datos de dicho ejemplo se encuentran en el Apéndice H.

El ejemplo ilustra como un incremento en el costo de los equipos para optimizar la eficiencia de remoción de sólidos es justificado por el ahorro en los costos de adición/dilución y disposición, incluso sin considerar el ahorro atribuible al incremento de la tasa de penetración o a la reducción de los costos por problemas operacionales.

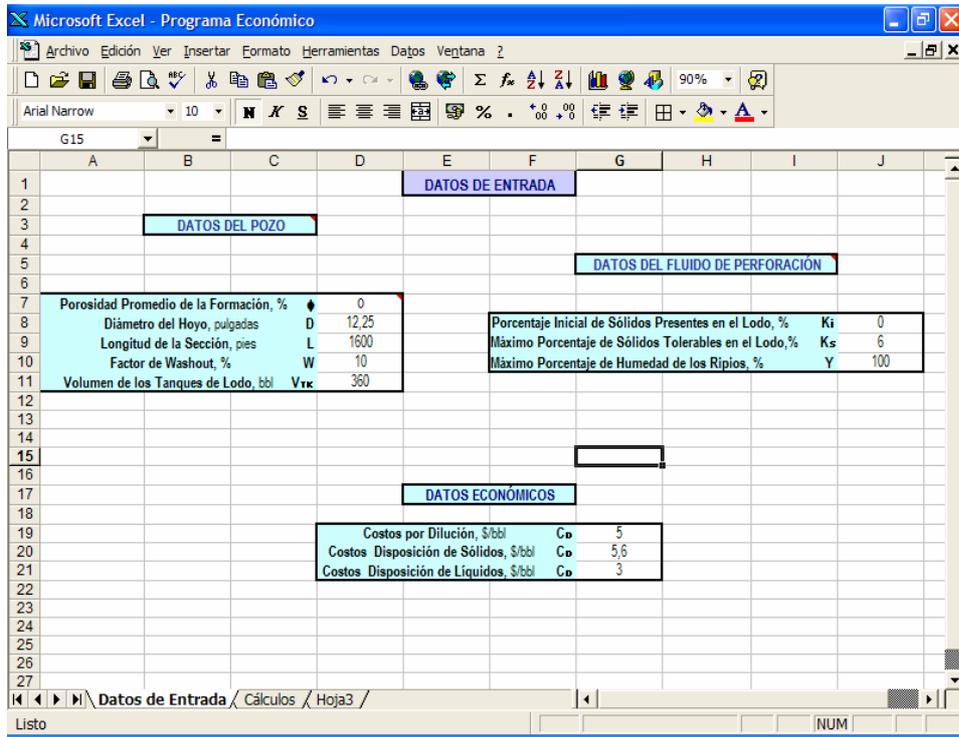


FIGURA 5.3.1 Ventana de Excel con los Datos de Entrada del PAE.

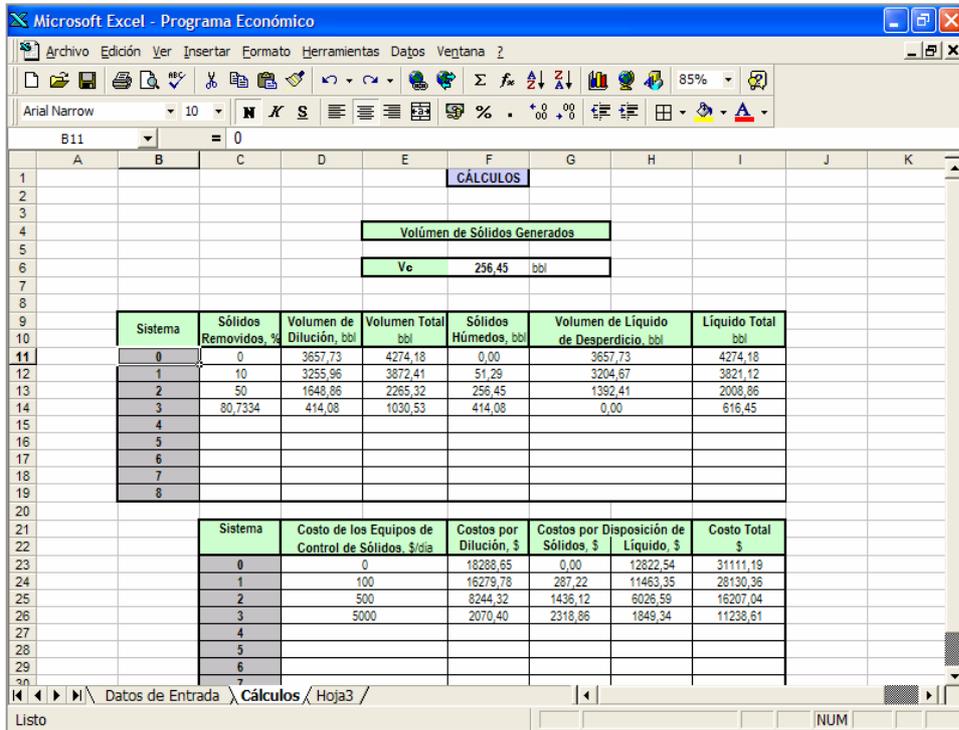


FIGURA 5.3.2 Ventana de Excel de los Cálculos que Realiza del PAE.

5.4 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS PROPUESTOS

Los sistemas de control de sólidos propuestos fueron evaluados en cuanto al aporte económico que tiene cada uno para la perforación. Para esta evaluación se utilizó el Programa para el Análisis Económico desarrollado en la fase anterior, **PAE**, con el cual se calculó el costo total de cada sistema, donde dicho costo incluye el alquiler de los equipos (listado de costos por alquiler en tabla 5.2.12 del capítulo 5), costos de adición/dilución, y costos por disposición. Esta evaluación se realizó mediante una comparación entre los sistemas planteados para cada sección perforada de un pozo modelo cuyas dimensiones son un promedio de las especificaciones de los diferentes pozos que se perforaran durante el proyecto San Cristóbal. Además se incluye en los cálculos un caso cero (0) el cual es el caso de utilización de una fosa de desecho en el que solo se utiliza dilución y descarte como método de remoción de sólidos.

TABLA 5.4.1 Datos Generales de l Pozo Modelo Requeridos para el Programa Económico

DATOS GENERALES PARA EL POZO MODELO	
Porosidad Promedio de la Formación	30 %
Factor de Ensanchamiento	20 %
Máximo Porcentaje de Humedad de los Ripios	25 %
Volumen de Tanques de Lodo (estimado)	500 bbl

La evaluación comparativa de los sistemas se realizará mediante el análisis de los resultados obtenidos con el **PAE**, siendo los parámetros más relevantes a considerar los que se nombran a continuación:

- **Costo total**, es el costo en dólares del proceso completo de control de sólidos (equipos, dilución, disposición) para cada sección perforada, y por cada sistema en estudio.
- **Beneficio aportado**, es la disminución en los costos, o ahorro, que se obtiene con la utilización de cada sistema en particular en comparación con el caso cero (0) en el cual no hay ninguna clase de sistema de control de sólidos, es decir es la cuantificación de la diferencia entre la utilización de un sistema u otro en términos económicos.
- **Costo para el proyecto**, es el producto entre el costo total para un pozo y la cantidad de pozos planificados para el proyecto, por sección perforada.

En las secciones siguientes se muestran los datos de entrada y los cálculos realizados por el **PAE** para cada sección ha perforar. Dichos los valores de entrada y salida del programa se muestran en forma de tablas de manera de facilitar la comprensión de los mismos. De igual modo se muestran las ventanas donde el programa realiza los cálculos para lograr visualizar su funcionamiento.

5.4.1 HOYO DE SUPERFICIE

TABLA 5.4.2 Datos del Pozo Modelo Para el Hoyo de Superficie

DATOS PARA EL HOYO DE SUPERFICIE			
Diámetro del Hoyo	17 ½ "	Sólidos Presentes en Lodo Original	0,5%
Longitud del Hoyo	1200'	Sólidos Tolerables en el Lodo	6%
Litología Prevalente	Areniscas ferruginosas de la formación Mesa y lutitas marinas de la formación Freites	Costo del Lodo Base por Barril	2,37 \$
		Costo por Disposición de Sólidos	8\$/bbl
Tipo de Lodo	Agua - Gel	Costo por Disposición de Líquidos	3\$/bbl
Densidad Inicial del Lodo	9,4 lpg	Tiempo estimado de Perforación	1,7 días

En las figuras 5.4.1 y 5.4.2 se muestran las ventanas de solicitud de entrada de datos por parte del programa y la de cálculos realizados o valores de salida para el hoyo de superficie.

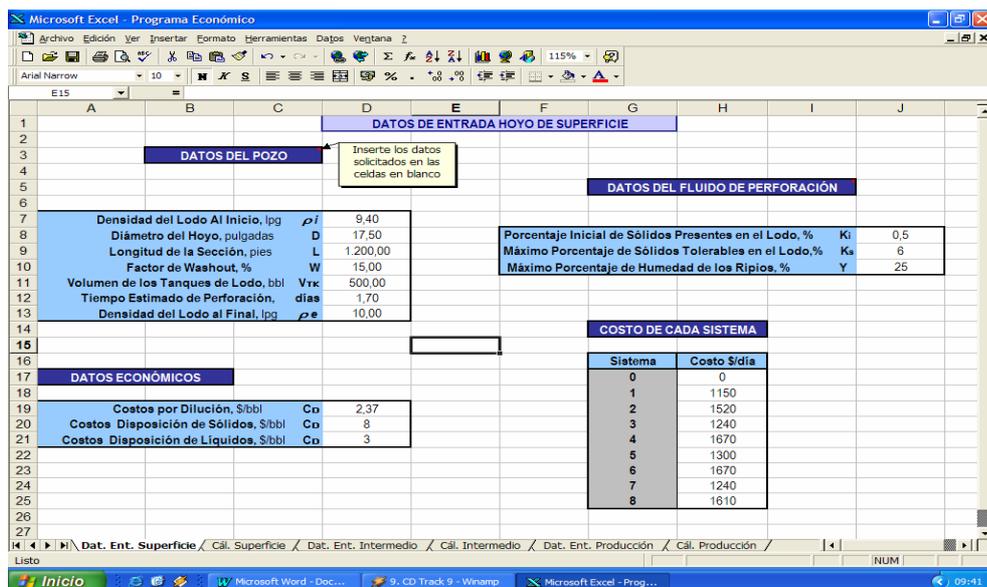


FIGURA 5.4.1 Datos de entrada del Programa Económico para el Hoyo de Superficie.

Sistema	Sólidos Removidos, %	Volumen de Dilución, bbl	Volumen Total bbl	Sólidos Húmedos, bbl	Volumen de Líquido de Desperdicio, bbl	Líquido Total bbl
0	0	6419,95	6840,31	0,00	6419,95	6840,31
1	70	1919,57	2339,94	359,07	1560,49	1980,86
2	70	1919,57	2339,94	359,07	1560,49	1980,86
3	83	1083,78	1504,15	425,76	658,02	1078,39
4	78	1405,24	1825,61	400,11	1005,13	1425,50
5	82	1148,07	1568,44	420,63	727,45	1147,81
6	82	1148,07	1568,44	420,63	727,45	1147,81
7	85	955,20	1375,57	436,02	519,18	939,55
8	85	955,20	1375,57	436,02	519,18	939,55

Sistema	Costo de los Equipos de Control de Sólidos, \$	Costos por Dilución, \$	Costos por Disposición de Sólidos, \$	Costo Total \$	Beneficio Aportado, \$	Costo Total 12 Pozos, \$	Sistema Seleccionado
0	0	15.215,27	0,00	20.520,94	36.736,22	0,00	428.834,58 Descartado
1	11500	4.549,37	2.872,58	5.942,59	24.864,55	10.871,67	298.374,55 Descartado
2	15200	4.549,37	2.872,58	5.942,59	28.564,55	7.171,67	342.774,55 Descartado
3	12400	2.568,56	3.406,06	3.235,18	21.609,81	14.126,41	259.317,68 Descartado
4	16700	3.330,41	3.200,88	4.276,49	27.507,78	8.228,43	330.093,40 Descartado
5	13000	2.720,93	3.365,02	3.443,44	22.529,40	13.206,81	270.352,83 Descartado
6	16700	2.720,93	3.365,02	3.443,44	26.229,40	9.506,81	314.752,83 Descartado
7	12400	2.263,82	3.488,14	2.818,66	20.970,62	14.765,60	251.647,40 SELECCIONADO
8	16100	2.263,82	3.488,14	2.818,66	24.670,62	11.065,60	296.047,40 Descartado

FIGURA 5.4.2 Cálculos del Programa Económico para el Hoyo de Superficie.

En las tablas 5.4.3 y 5.4.4 se muestra un resumen de los valores calculados por el PAE para el hoyo de superficie y cual es el sistema seleccionado jerarquizando el resto de los sistemas y señalando cuales son las mejores opciones de selección en cuanto al factor económico.

TABLA 5.4.3 Costos Involucrados en el Proceso de Control de Sólidos para el Hoyo de Superficie

SISTEMA PROPUESTO	COSTO ECS, \$	COSTOS POR DILUCIÓN, \$	COSTOS POR DISPOSICIÓN DE	
			SÓLIDOS, \$	LÍQUIDOS, \$
0	0	15.215,27	0,00	20.520,94
1	11500	4.549,37	2.872,58	5.942,59
2	15200	4.549,37	2.872,58	5.942,59
3	12400	2.568,56	3.406,06	3.235,18
4	16700	3.330,41	3.200,88	4.276,49
5	13000	2.720,93	3.365,02	3.443,44
6	16700	2.720,93	3.365,02	3.443,44
7	12400	2.263,82	3.488,14	2.818,66
8	16100	2.263,82	3.488,14	2.818,66

TABLA 5.4.4 Costos Definitivos y Selección del Mejor Sistema para el Hoyo de Superficie.

SISTEMA PROPUESTO	COSTO TOTAL POR POZO, \$	BENEFICIO APORTADO, \$	COSTO PARA EL PROYECTO, \$	SELECCIÓN HOYO SUPERFICIE
0	35.736,22	0,00	428.834,58	Opción 9
1	24.864,55	10.871,67	298.374,55	Opción 5
2	28.564,55	7.171,67	342.774,55	Opción 8
3	21.609,81	14.126,41	259.317,68	Opción 2
4	27.507,78	8.228,43	330.093,40	Opción 7
5	22.529,40	13.206,81	270.352,83	Opción 3
6	26.229,40	9.506,81	314.752,83	Opción 6
7	20.970,62	14.765,60	251.647,40	SELECCIONADO
8	24.670,62	11.065,60	296.047,40	Opción 4

5.4.2 HOYO INTERMEDIO

TABLA 5.4.5 Datos del Pozo Modelo Para el Hoyo Intermedio

DATOS PARA EL HOYO INTERMEDIO			
Diámetro del Hoyo	12 ¼ "	Sólidos Presentes el Lodo Original	4 %
Longitud del Hoyo	4000 ' (2800' a perforar)	Sólidos Tolerables en el Lodo	7 %
Litología Prevalente	Lutitas marinas de formación Freites, areniscas con lutitas alternadas y lignitos de Oficina	Costo de Lodo Base por Barril	10\$
		Costo por Disposición de Sólidos	8 \$/bbl
Tipo de Lodo	Lignosulfonato	Costo por Disposición de Líquidos	3 \$/bbl
Densidad Inicial del Lodo	9,8 lpg	Tiempo estimado de Perforación	4,91 días

En las figuras 5.4.3 y 5.4.4 se muestran las ventanas de solicitud de entrada de datos por parte del programa y la de cálculos realizados o valores de salida para el hoyo intermedio.

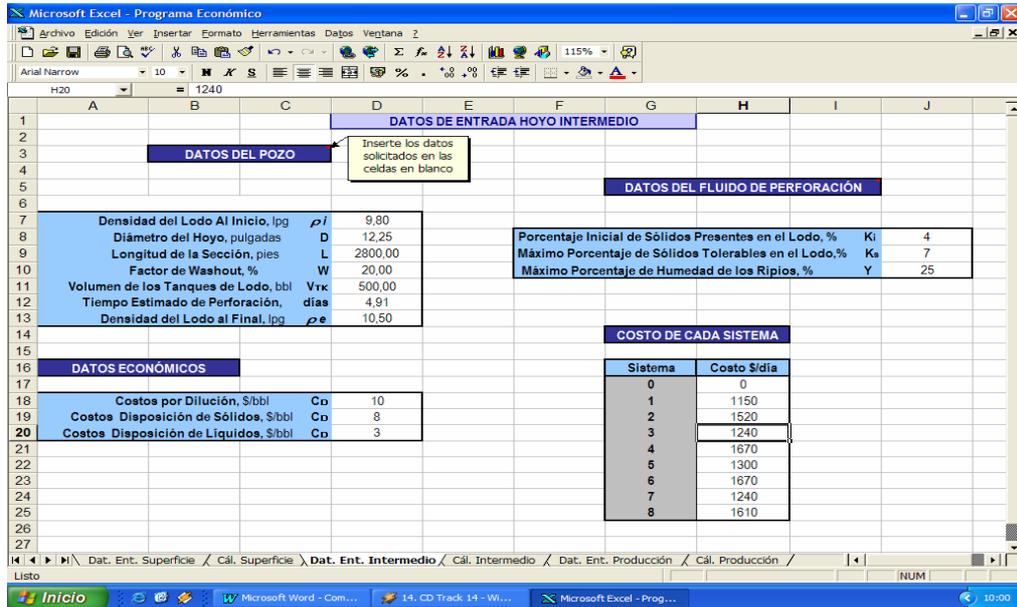


FIGURA 5.4.3 Datos de entrada del Programa Económico para el Hoyo Intermedio.

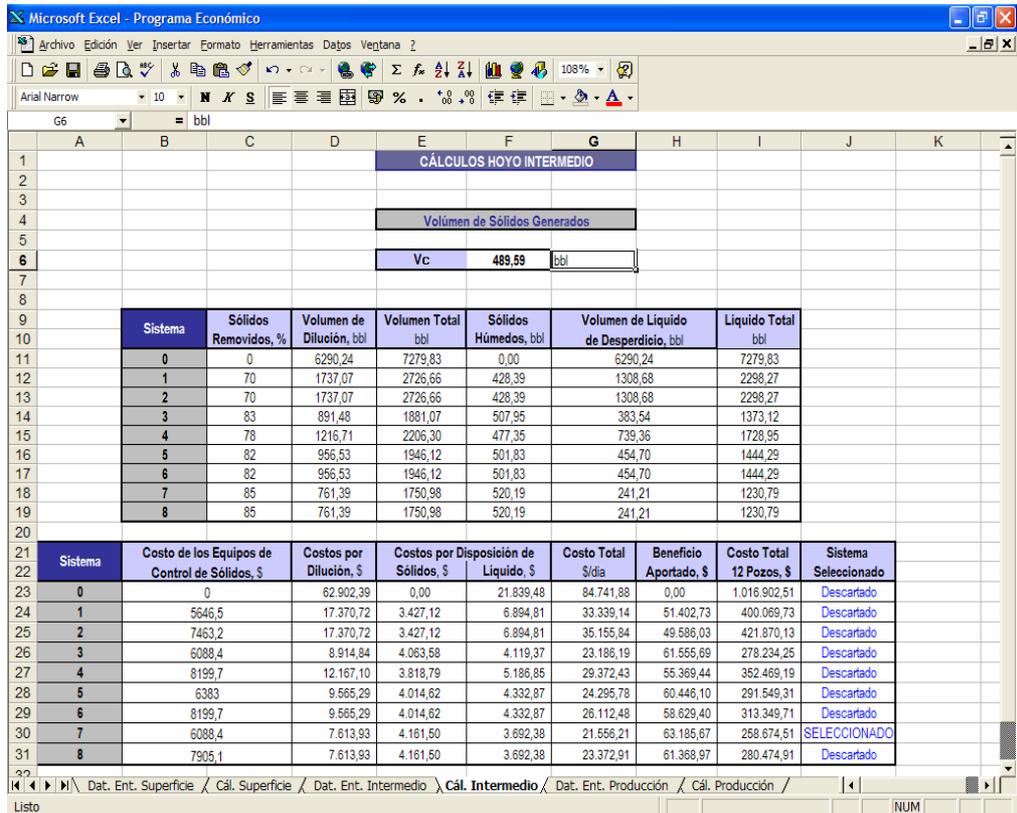


FIGURA 5.4.4 Cálculos del Programa Económico para el Hoyo Intermedio.

En las tablas 5.4.6 y 5.4.7 se muestra un resumen de los valores calculados por el PAE para el hoyo intermedio y cual es el sistema seleccionado jerarquizando el resto de los sistemas y señalando cuales son las mejores opciones de selección en cuanto al factor económico.

TABLA 5.4.6 Costos Involucrados en el Proceso de Control de Sólidos para el Hoyo Intermedio

SISTEMA PROPUESTO	COSTO ECS, \$	COSTOS POR DILUCIÓN, \$	COSTOS POR DISPOSICIÓN DE	
			SÓLIDOS, \$	LÍQUIDOS, \$
0	0	62.902,39	0,00	21.839,48
1	5646,5	17.370,72	3.427,12	6.894,81
2	7463,2	17.370,72	3.427,12	6.894,81
3	6088,4	8.914,84	4.063,58	4.119,37
4	8199,7	12.167,10	3.818,79	5.186,85
5	6383	9.565,29	4.014,62	4.332,87
6	8199,7	9.565,29	4.014,62	4.332,87
7	6088,4	7.613,93	4.161,50	3.692,38
8	7905,1	7.613,93	4.161,50	3.692,38

TABLA 5.4.7 Costos Definitivos y Selección del Mejor Sistema para el Hoyo Intermedio.

SISTEMA PROPUESTO	COSTO TOTAL POR POZO, \$	BENEFICIO APORTADO, \$	COSTO PARA EL PROYECTO, \$	SELECCIÓN HOYO INTERMEDIO
0	84.741,88	0,00	1.016.902,51	Opción 9
1	33.339,14	51.402,73	400.069,73	Opción 7
2	35.155,84	49.586,03	421.870,13	Opción 8
3	23.186,19	61.555,69	278.234,25	Opción 2
4	29.372,43	55.369,44	352.469,19	Opción 6
5	24.295,78	60.446,10	291.549,31	Opción 4
6	26.112,48	58.629,40	313.349,71	Opción 5
7	21.556,21	63.185,67	258.674,51	SELECCIONADO
8	23.372,91	61.368,97	280.474,91	Opción 3

5.4.3 HOYO DE PRODUCCIÓN

TABLA 5.4.8 Datos del Pozo Modelo Para el Hoyo de Producción

DATOS PARA EL HOYO DE PRODUCCIÓN			
Diámetro del Hoyo	8 ½ "	Sólidos Presentes en Lodo Original	0,5 %
Longitud del Hoyo	5500' verticales y 1000' navegando (2500' a perforar)	Sólidos Tolerables en el Lodo	2 %
Litología Prevalente	Areniscas y lutitas alternadas, y lignitos de la formación Oficina	Costo de Lodo Base por Barril	16 \$
		Costo por Disposición de Sólidos	8 \$/bbl
Tipo de Lodo	Polimérico	Costo por Disposición de Líquidos	3 \$/bbl
Densidad Inicial del Lodo	8,5	Tiempo estimado de Perforación	1,25 días

En las figuras 5.4.5 y 5.4.6 se muestran las ventanas de solicitud de entrada de datos por parte del programa y la de cálculos realizados o valores de salida para el hoyo de Producción.

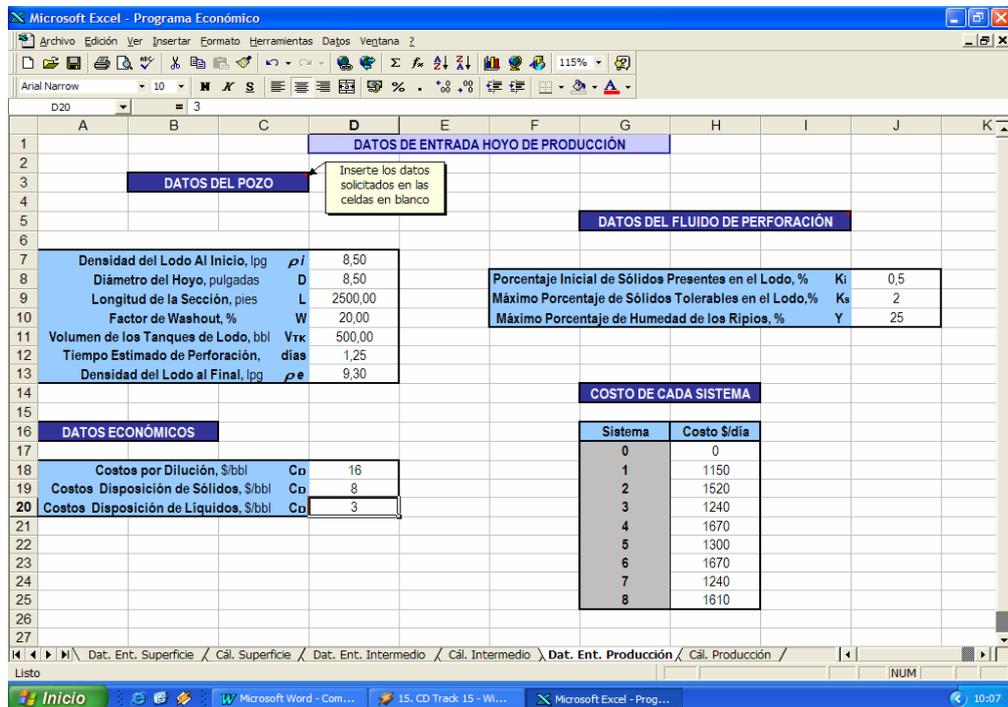


FIGURA 5.4.5 Datos de entrada del Programa Económico para el Hoyo de Producción.

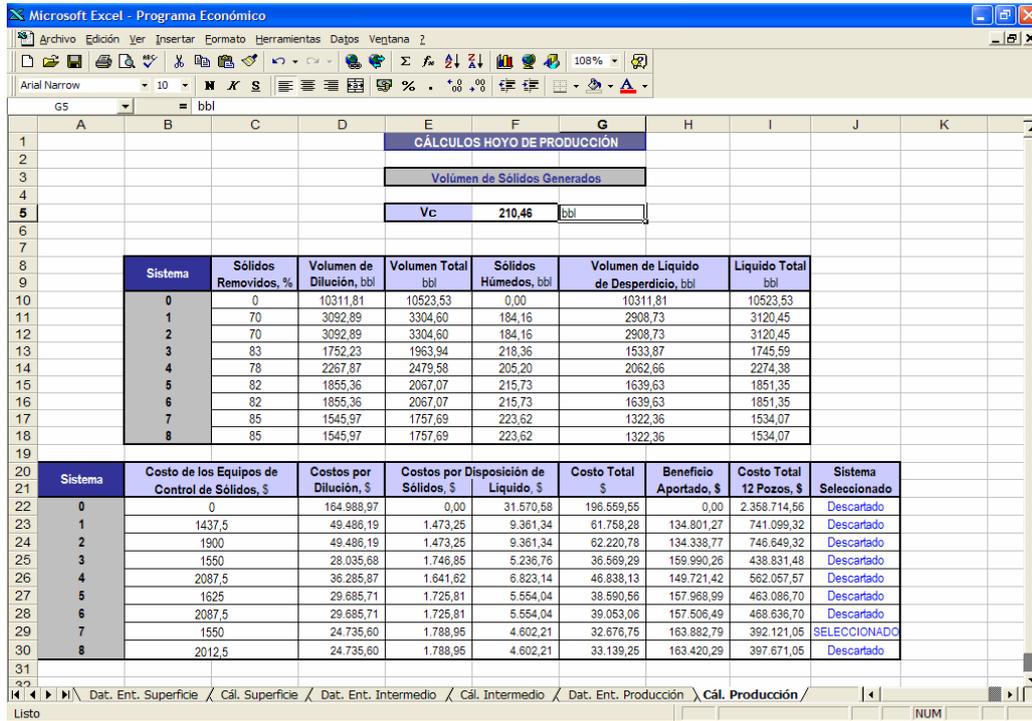


FIGURA 5.4.6 Cálculos del Programa Económico para el Hoyo de Producción.

En las tablas 5.4.9 y 5.4.10 se muestra un resumen de los valores calculados por el PAE para el hoyo de producción y cual es el sistema seleccionado jerarquizando el resto de los sistemas y señalando cuales son las mejores opciones de selección en cuanto al factor económico.

TABLA 5.4.9 Costos Involucrados en el Proceso de Control de Sólidos para el Hoyo Intermedio

SISTEMA PROPUESTO	COSTO ECS, \$	COSTOS POR DILUCIÓN, \$	COSTOS POR DISPOSICIÓN DE	
			SÓLIDOS, \$	LÍQUIDOS, \$
0	0	164.988,97	0,00	31.570,58
1	1437,5	49.486,19	1.473,25	9.361,34
2	1900	49.486,19	1.473,25	9.361,34
3	1550	28.035,68	1.746,85	5.236,76
4	2087,5	36.285,87	1.641,62	6.823,14
5	1625	29.685,71	1.725,81	5.554,04
6	2087,5	29.685,71	1.725,81	5.554,04
7	1550	24.735,60	1.788,95	4.602,21
8	2012,5	24.735,60	1.788,95	4.602,21

TABLA 5.4.10 Costos Definitivos y Selección del Mejor Sistema para el Hoyo de Producción.

SISTEMA PROPUESTO	COSTO TOTAL POR POZO, \$	BENEFICIO APORTADO, \$	COSTO PARA EL PROYECTO, \$	SELECCIÓN HOYO DE PRODUCCIÓN
0	196.559,55	0,00	2.358.714,56	Opción 9
1	61.758,28	134.801,27	741.099,32	Opción 7
2	62.220,78	134.338,77	746.649,32	Opción 8
3	36.569,29	159.990,26	438.831,48	Opción 3
4	46.838,13	149.721,42	562.057,57	Opción 6
5	38.590,56	157.968,99	463.086,70	Opción 4
6	39.053,06	157.506,49	468.636,70	Opción 5
7	32.676,75	163.882,79	392.121,05	SELECCIONADO
8	33.139,25	163.420,29	397.671,05	Opción 2

5.4.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS COMPARATIVO

Del análisis comparativo se obtuvo el siguiente resumen de resultados mediante la utilización del *PAE*, para cada hoyo o sección perforada:

TABLA 5.4.11 Sistema Seleccionado por Sección Perforada y Costos Asociados.

SECCIÓN PERFORADA	SISTEMA SELECCIONADO	COSTO TOTAL, \$	BENEFICIO APORTADO, \$	COSTO PARA EL PROYECTO, \$
Superficie	7	20.970,62	14.765,60	251.647,40
Intermedio	7	21.556,21	63.185,67	258.674,51
Producción	7	32.676,75	163.882,79	392.121,05

Basándose en los valores obtenidos de la tabla anterior el sistema que mejor se presenta para ser implementado en el proyecto San Cristóbal es el número siete (7). Cabe destacar que los valores que se muestran en la tabla 5.4.11 van desde el cálculo detallado del costo total por sección para un solo pozo, hasta el cálculo generalizado del costo por sección para todos los pozos planificados en el proyecto. Es de suma importancia remarcar las diferencias en cuanto a costos generados entre los dos mejores sistemas, o los sistemas que presentaron menor costo, ya que si se comparan, por

ejemplo, los resultados del costo total por pozo para la sección del hoyo de superficie para los sistemas siete (7) y ocho (8), se podrá observar que la diferencia entre uno y otro es de apenas tres mil setecientos dólares (3700 \$), pero al contabilizar el costo total para todos los pozos, en lo que a la sección de superficie se refiere, se puede observar una diferencia significativa de cuarenta y cuatro mil cuatrocientos dólares (44400 \$).

Si se realiza el mismo análisis para todas las secciones entre los sistemas siete (7) y ocho (8) con todos los costos asociados a las mismas, se obtendrán resultados muy similares a los obtenidos con el ejemplo de la sección de superficie, pero con un aumento significativo en el ahorro generado entre un caso y otro. De igual modo se deben hacer comparaciones con el caso original, caso cero (0) en donde no hay equipos, la única forma de control es por dilución, y el caso base, que es el caso uno (1), en el cual se propone el mismo sistema de control de sólidos que tenía el campo originalmente cuando se realizaron las perforaciones en el año 2001, para ver las ventajas de las nuevas propuestas.

En la tabla 5.4.12 en la columna de Costo para el Proyecto, se pueden observar los costos definitivos para cada caso. El resultado definitivo es sin duda alguna que el sistema propuesto a utilizar debe ser el número siete (7), ya que este representa el menor costo posible de entre todas las alternativas propuestas.

Si se realiza una comparación del costo para el proyecto del sistema siete (7) y los costos de los otros tres sistemas observaremos que con respecto al sistema cero (0) en donde solo hay descarte y dilución del fluido de perforación, el ahorro obtenido con la utilización del sistema siete es de dos millones novecientos dos mil ocho dólares con sesenta y nueve centavos, 2.902.008,69 \$, con respecto al sistema uno (1) que es el caso base, quinientos treinta y siete mil cien dólares con sesenta y cuatro centavos, 537.100,64 \$, y con respecto al sistema número ocho (8), que era uno de los mejores candidatos, setenta y un mil setecientos cincuenta dólares con cuarenta centavos, 71.750,40 \$.

TABLA 5.4.12 Costos Definitivos de los Sistemas Clave en el Análisis Comparativo

HOYO DE SUPERFICIE			
SISTEMA	COSTO TOTAL, \$	BENEFICIO APORTADO, \$	COSTO PARA EL PROYECTO, \$
0	35.736,22	0,00	428.834,58
1	24.864,55	10.871,67	298.374,55
7	20.970,62	14.765,60	251.647,40
8	24.670,62	11.065,60	296.047,40
HOYO INTERMEDIO			
SISTEMA	COSTO TOTAL, \$	BENEFICIO APORTADO, \$	COSTO PARA EL PROYECTO, \$
0	84.741,88	0,00	1.016.902,51
1	33.339,14	51.402,73	400.069,73
7	21.556,21	63.185,67	258.674,51
8	23.372,91	61.368,97	280.474,91
HOYO DE PRODUCCIÓN			
SISTEMA	COSTO TOTAL, \$	BENEFICIO APORTADO, \$	COSTO PARA EL PROYECTO, \$
0	196.559,55	0,00	2.358.714,56
1	61.758,28	134.801,27	741.099,32
7	32.676,75	163.882,79	392.121,05
8	33.139,25	163.420,29	397.671,05
TOTAL PARA LAS TRES SECCIONES			
SISTEMA	COSTO TOTAL, \$	BENEFICIO APORTADO, \$	COSTO PARA EL PROYECTO, \$
0	31.7037,65	0,00	3.804.451,65
1	119.961,97	197.075,67	1.439.543,60
7	75.203,58	241.834,06	902.442,96
8	81.182,78	235.854,86	974.193,36

5.4.5 DISCUSIÓN OPERACIONAL DEL SISTEMA SELECCIONADO

En lo que a la parte operacional se refiere, las ventajas que aporta la utilización del sistema seleccionado (7), se observan mediante una comparación entre este y el sistema original (1), que se había estado utilizando en el campo San Cristóbal. Dichos sistemas están compuestos por los equipos que se muestran en la tabla 5.4.13.

TABLA 5.4.13 Comparación entre el Sistema Base y el Sistema Seleccionado

UNIDAD REMOVEDORA DE ARCILLAS, "SCALPER"						
SISTEMA	CAPACIDAD, gpm		TAMAÑO DE MALLA		AREA DE PROCESAMIENTO, ft ²	
1	-		-		-	
7	1000		10		7.60	
ZARANDAS VIBRATORIAS						
SISTEMA	CANTIDAD	CAPACIDAD, gpm	TAMAÑO DE MALLA		AREA DE PROCESAMIENTO, ft ²	
1	3	284 – 300	84 – 150		7.60	
7	3	300	175 - 200		5.30	
UNIDAD TRES EN UNO						
SISTEMA	CAPACIDAD, gpm	CONOS DE 10"	CONOS DE 4"	MALLA	AREA DE PROCESAMIENTO, ft ²	
1	300	2	16 – 18 - 12	150 - 175	5.30	
7	-	-	-	-	-	
UNIDAD DE SUPER CONOS "gMAX"						
SISTEMA	CAPACIDAD, gpm	CONOS DE 10"	TAMAÑO DE MALLA		AREA DE PROCESAMIENTO, ft ²	
1	-	-	-		-	
7	300	2	175		5.30	
CENTRIFUGA DUAL						
SISTEMA	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)		Capacidad (gpm)	Fuerza G	
1	Desconocidas. No era centrifuga dual solo centrifuga de alta, pero en algún momento se cambió a SDC					
7	Baja	0 - 950	24 - 40		150	1000 G's
	Alta	1150 - 2500	24 - 40		150	3000 G's

Debido a la incorporación de equipos de nueva tecnología, como lo son el super cono, "gMAX" y la unidad removedora de arcillas, "Scalper", y tomando en cuenta la experiencia obtenida durante las anteriores perforaciones en el campo San Cristóbal, se espera que la utilización de estos equipos en combinación con el resto del sistema escogido, mejoren el comportamiento o eficiencia de remoción del nuevo sistema, en aproximadamente un quince por ciento, 15%, con respecto al sistema anterior.

Esta mejoría se debe en gran parte, a la utilización de la unidad removedora de arcillas como primera línea de defensa del sistema de control de sólidos ante la presencia inminente de grandes cantidades de gumbo en la formación a perforar, ya que esta unidad evita que este tipo de sólidos

llegue al resto de los equipos que componen el sistema y evitando así la obstrucción de los mismos. De igual manera se evita que estos sólidos se degraden en partículas de menor tamaño a medida que pasan a través del resto de los equipos. Este tipo de remoción se puede decir que es del tipo preventiva ya que se está tratando de remover la mayor cantidad posible de gumbo, antes de que este cause un daño definitivo a los equipos y antes de su degradación a partículas coloidales, ya que en ese punto la única solución para el problema sería la adición de grandes volúmenes de fluido de dilución.

Por otra parte la incorporación del super cono en sustitución de la unidad "Tres en Uno", brinda beneficios en cuanto a la disminución de la cantidad de sólidos presentes en el fluido como consecuencia de la atracción de partículas por efecto de los agitadores, bombas de lodo y bombas centrífugas, ya que al disminuir considerablemente el número de conos requeridos para procesar el fluido, también disminuirán los requerimientos de equipo de bombeo. De este modo la concentración de sólidos coloidales será menor, y, por lo tanto, se requerirá menor cantidad de fluido de dilución. Otra ventaja de los super conos es lo compacto de su diseño, lo cual hace que sea de fácil ubicación en el área de trabajo, y que sus requerimientos energéticos sean mucho menores que los de la unidad "Tres en Uno".

Respecto a las zarandas de movimiento lineal, la cantidad de unidades es la misma tanto en el sistema original como en el sistema seleccionado, con la diferencia de que en el primero se utilizaron tamices con un área de procesamiento mayor a la de los tamices que se proponen para el nuevo sistema, ya que se buscaba tener una mayor capacidad de manejo de fluido debido a los problemas que se presentaban con el gumbo durante las perforaciones para prevenir la obstrucción de los equipos. Con la utilización de la unidad removedora de arcillas, no es necesario aumentar el tamaño del área de procesamiento de las zarandas debido a que se minimizan los problemas con el gumbo.

Otra diferencia significativa entre un sistema y otro, es la malla del tamiz de las zarandas, ya que en el sistema original, se utilizaba una malla mucho menor a la del nuevo sistema. Esta diferencia se basa en el hecho de que para el sistema original no se podían colocar mallas finas debido a que estas tienen una mayor tendencia a obstruirse con el gumbo que las mallas más gruesas, y por lo

tanto, a generar la pérdida de fluido de perforación, la disminución del tiempo de vida útil de los tamices, y consecuentemente la generación de mayores costos para la perforación. Para el sistema seleccionado se pueden utilizar mallas finas debido a que el gumbo es controlado con la unidad removedora de arcillas, y por ende la remoción de los sólidos a nivel de las zarandas se hace más eficiente, porque no existe la tendencia a que el tamiz se ciegue por el exceso de gumbo. Sin embargo, no se deben utilizar mallas mayores a 250 ya que si bien el exceso de gumbo es controlado por la unidad removedora de arcilla, una buena parte de estos sólidos permanecen en el sistema y se deben tratar con las debidas precauciones.

Respecto a la centrifuga dual, la utilización de ésta es de gran importancia para la limpieza del sistema ya que, aunque se ha determinado que el rendimiento de la misma depende en gran parte de la calidad de remoción de sólidos por parte de los equipos que la preceden, esta va a remover una buena cantidad de sólidos de diámetro menor a cinco micrones. Para el caso del sistema seleccionado, los equipos previos a la centrifuga evitan la sobrecarga de sólidos en el sistema de fluido, lo cual minimiza la cantidad de líquido de dilución que se debe emplear en la centrifuga, debido a que con la disminución de la concentración de sólidos también disminuye la viscosidad del fluido de perforación, y en tal sentido, la centrifuga trabaja con mucho más eficiencia para remover los sólidos de tamaño coloidal presentes en el sistema, debido a que el asentamiento por centrifugación es mucho más efectivo.

Otra opción era la utilización de un sistema de doble centrifuga, sin embargo, se descarto dicha idea ya que este tipo de equipo es utilizado principalmente en lodos altamente densificados, en donde se hace necesaria la recuperación de la mayor cantidad posible de barita, o material densificante, para disminuir los costos por adición/dilución, y en el caso del campo San Cristóbal, solo se utilizará material densificante de alta gravedad especifica en el hoyo intermedio, sin embargo, la densidad será de apenas 9,8 lpg teniendo como máximo 10,1 lpg, que si bien se considera que es un lodo densificado, el ahorro que se pueda obtener por la recuperación de material densificante, no justifica los costos de la utilización de un sistema de doble centrifuga. Sin embargo se emplea una centrifuga dual debido a que con esta se puede recuperar barita en el caso de que se presente la necesidad por la pérdida excesiva del material densificante sin necesidad de tener una centrifuga adicional.

Además, en cuanto a costos, la centrífuga dual cuesta la mitad del alquiler del sistema de doble centrífuga, y apenas unos veinte a treinta dólares más que una centrífuga de alta.

El incremento de la eficiencia de remoción en un quince por ciento, 15%, para llegar a una eficiencia definitiva de ochenta y cinco por ciento, 85%, es debido en gran parte a las remociones que efectuará la primera línea de defensa del sistema seleccionado, que son la unidad removedora de arcillas y las zarandas vibratorias, ya que estas removerán la mayor cantidad de sólidos de gran tamaño que son candidatos potenciales a desintegración y a ser causantes de la mayoría de los problemas operacionales mencionados con anterioridad, y evitarán la sobre carga del sistema de fluido de perforación. Además, la introducción de la unidad de super conos, también aportará un beneficio que aunque no tan significativo como el de la primera línea de defensa, es importante tanto cuantitativa como cualitativamente en el proceso de remoción de sólidos.

Si tratamos de cuantificar en porcentaje el aporte o beneficio brindado por la utilización de los equipos que componen el nuevo sistema de control de sólidos, podríamos decir que la unidad removedora de arcillas y las zarandas son responsables de un 12% de la mejoría (sobre todo por la unidad removedora de arcillas), la unidad de super conos de un tres por ciento, 3%, y el beneficio que aporta la centrífuga debido a las mejorías en el desempeño del resto del sistema en conjunto ya se ha discutido previamente que depende del desempeño de los equipos que la preceden. De esta manera obtenemos como resultado un ochenta y cinco por ciento, 85%, de eficiencia de remoción de sólidos de perforación.

Como consecuencia del aumento de la eficiencia de remoción de sólidos, se deduce que los tiempos improductivos generados por los problemas operacionales que se presentan durante la perforación debido al exceso de sólidos, disminuirán, ya que al minimizar la concentración de los sólidos presentes en el sistema de fluido, la incidencia de tales problemas operacionales será mucho menor, y por ende disminuirán los tiempos improductivos generados por el tiempo invertido en darle una solución a los mismos.

5.5 DISPOSICIÓN DE LOS EQUIPOS DE CONTROL DE SÓLIDOS

Para obtener la máxima eficiencia de separación por parte de los equipos de control de sólidos seleccionados, S7, es esencial la colocación correcta de los mismos en el taladro. El equipo mecánico usualmente está situado en un orden descendente basado en el tamaño de la partícula que se va a remover.

La superficie del sistema activo de lodo se divide en dos secciones: remoción de sólidos y adición/succión. En la primera sección ocurre la separación de sólidos hecha por los equipos y la desgasificación si es necesaria, y en la segunda la adición de fluido fresco al sistema circulante, y provee el suficiente tiempo de retención y residencia del fluido para que haya una buena agitación antes de que éste sea bombeado al hoyo. Estas secciones están compuestas a su vez por compartimentos que se encuentran comunicados mediante ventanas de retorno, aunque hoy en día se están suplantando los compartimentos por tanques comunicados mediante las mismas ventanas.

Un factor importante es la altura de nivelación o de las ventanas de retorno entre los tanques. Normalmente se tomará lodo del tope del último tanque de remoción de sólidos, y se descargará lodo cerca del tope del tanque siguiente. Estas ventanas mantienen el nivel de fluido alto en la sección de remoción de sólidos para mantener suficiente altura de succión para las bombas centrífugas previniendo así la cavitación. También incrementa la habilidad para detectar los cambios de volumen debido a los influjos o pérdidas a la formación. La comunicación entre ellas es simplemente por rebosamiento debido a que de esta manera por simple gravedad el fluido fluye de un tanque a otro. Sin embargo se debe tener en cuenta que del tanque de la trampa de arena jamás se puede tomar descarga del fondo debido a que los sólidos de mayor tamaño se van decantando en el fondo del tanque por acción de la gravedad. Cada tanque debe tener válvulas de drenaje por las cuales se remuevan los sólidos que se decantan en el fondo por asentamiento gravitacional.

Los equipos de control de sólidos serán dispuestos para que secuencialmente remuevan sólidos más finos a medida que el fluido se mueve de la línea de flujo hacia el tanque de succión. De esta manera se reducirá la sobre carga de sólidos en el siguiente equipo. Además, cada dispositivo

tomará fluido de una descarga aguas arriba y descargará en el siguiente compartimento aguas abajo.

5.5.1 GUÍA GENERAL PARA LA DISPOSICIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE SÓLIDOS

1. Todos los compartimentos de remoción, excepto la trampa de arena, deben ser bien agitados para asegurar la homogeneidad del fluido.
2. El compartimento de la trampa de arena nunca debe ser usado como succión o descarga para los super conos.
3. Los agitadores mecánicos son los más recomendados.
4. No se recomiendan inyectores de lodo para la sección de remoción de sólidos.
5. Todos los equipos deben descargar inmediatamente aguas debajo de su compartimento de succión.
6. Todos los equipos, exceptuando la centrifuga, deben procesar al menos el cien por ciento, 100%, de la tasa de circulación. Debe haber un reflujo de desde el compartimento del tanque corriente abajo hacia el compartimento de alimentación. Esto asegurará que 100% del flujo total será procesado.
7. Debe haber nivelación por rebosamiento entre la succión y descarga para todos los equipos de remoción de sólidos. Nunca tomar la alimentación del fondo de la descarga. Esto también permite que una porción importante del flujo contornee el equipo de control de sólidos.
8. Diferentes dispositivos de control de sólidos no deben compartir compartimentos de succión o descarga, y nunca deben usar la misma bomba de alimentación, a menos, de que ambos hagan el mismo corte de separación. Por ejemplo dos deslimadores pueden compartir la misma ruta de fluido, pero un desarenador y un deslimador no deben hacerlo.
9. Nunca tomar la alimentación de un equipo de control de sólidos a partir del tanque de mezcla. Esto eliminará los productos químicos que son agregados al lodo. Esto ocurre con mayor frecuencia en los equipos de perforación donde se está usando la bomba centrífuga de la tolva mezcladora para alimentar al equipo de control de sólidos.

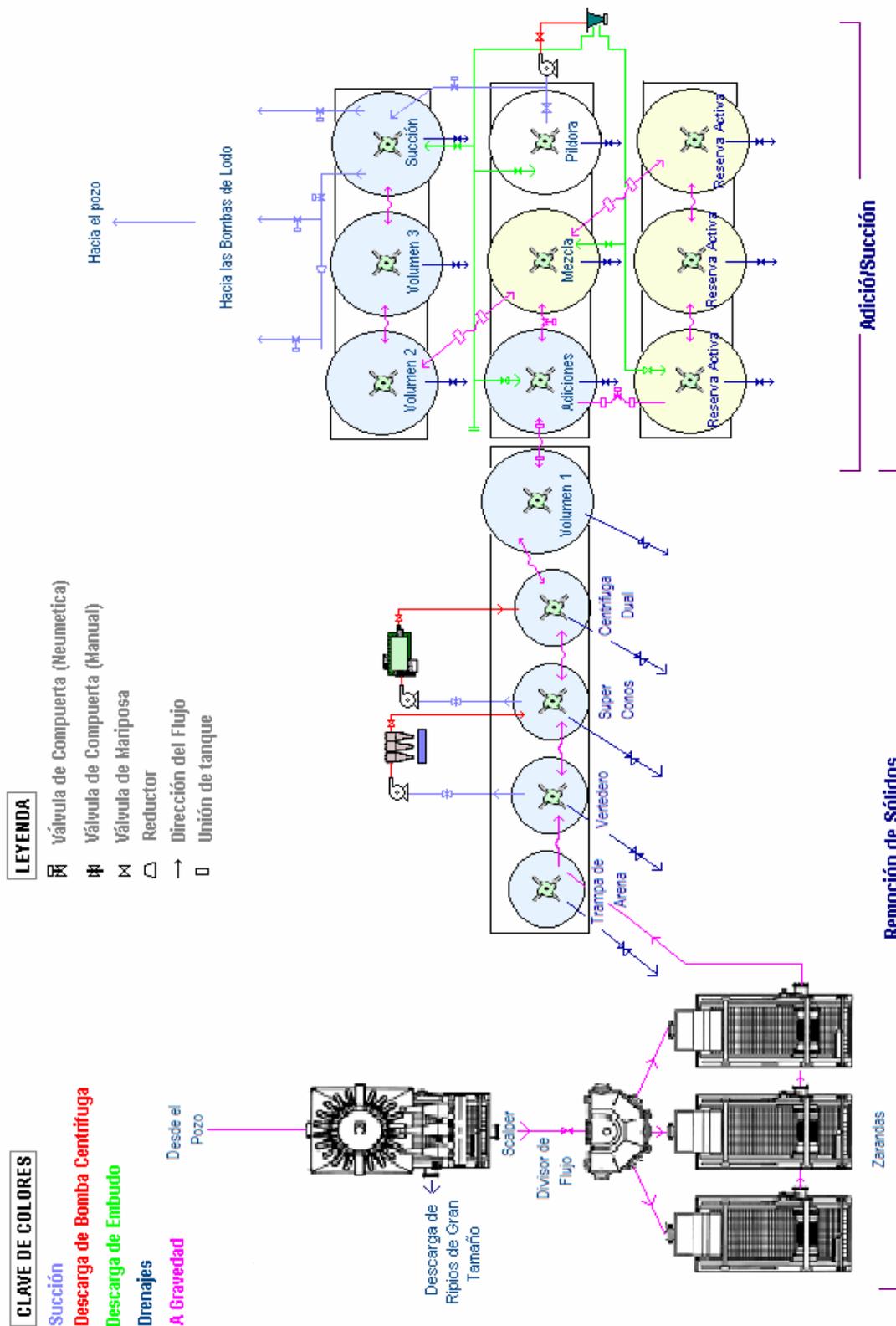


FIGURA 5.5.1 Disposición de los Equipos del Sistema Seleccionado

1. Se determinó en base al factor económico que el sistema de control de sólidos seleccionado estará conformado por una Unidad Removedora de Arcillas o “Scalper”, tres Zarandas de Movimiento Lineal, una Unidad de Super Conos y una Centrifuga Dual, todos adaptados a las condiciones y requerimientos de cada sección perforada.
2. Se calculó que la eficiencia de remoción de sólidos por parte del sistema seleccionado del será teóricamente del ochenta y cinco por ciento, 85 %, lo cual representa una mejora del quince por ciento, 15%, respecto a los sistemas utilizados en perforaciones anteriores en el Campo San Cristóbal.
3. Se realizó un programa económico para realizar un análisis comparativo el cual se denominó, Programa para el Análisis Económico del Proceso de Control de Sólidos, **PAE**. Este programa puede ser utilizado para seleccionar el sistema de control de sólidos más efectivo para unas condiciones de perforación dadas. Con este programa se predice:
 - Los volúmenes de líquido de dilución requeridos por sección perforada.
 - Volúmenes de desperdicios generados (líquidos y sólidos).
 - Costos asociados a las operaciones de adición/dilución.
 - Costos asociados a los desperdicios generados (líquidos y sólidos).
 - Costo total de las operaciones asociadas al proceso de control de sólidos por sección perforada.
4. Se establece que la utilización del sistema seleccionado, S7, disminuye los costos para el proyecto en quinientos treinta y siete mil cien dólares (537.100,64 \$) con respecto al S1. Así mismo el costo del sistema seleccionado es de novecientos dos mil cuatrocientos cuarenta y dos dólares (902.442,96 \$).
5. Se determinó que los problemas operacionales con mas posibilidades de aparecer durante el proyecto San Cristóbal son los daños a los equipos de bombeo, saturación del sistema de

CONCLUSIONES

fluidos por exceso de sólidos, taponamiento de la línea de flujo, y arrastre y pega diferencial, los cuales, son responsables de aproximadamente el cuatro por ciento, 4% de los tiempos improductivos.

6. Mientras mayor sea la eficiencia de remoción del sistema de control de sólidos, menores serán los costos asociados a las operaciones de adición/dilución y disposición de líquidos, lo cual depende de una combinación de equipos que proporcionen la mejor eficiencia de remoción posible.

1. Se recomienda la implementación del sistema seleccionado, S7, como sistema de control de sólidos en el campo San Cristóbal a la hora de iniciar las perforaciones en la zona.
2. Para garantizar la mejor eficiencia de remoción del sistema y debido a la gran cantidad de arcillas pegajosas, gumbo, presentes en los sólidos de perforación, se recomienda el uso de mallas bidimensionales ya que las tridimensionales tienden a obstruirse con mucha más facilidad que las del tipo plano por causa del gumbo que se queda atrapado en los canales de la malla. La cobertura máxima del tamiz de las zarandas debe ser del 75 % para evitar desbordamientos
3. Se recomienda la utilización del Programa para el Análisis Económico del Proceso de Control de Sólidos, **PAE**, para la determinación de cuales son las mejores opciones al momento de tomar decisiones y comparar entre varios sistemas de control de sólidos.
4. Se debe tener especial cuidado con los problemas operacionales causados por sólidos de perforación y tratar de minimizarlos para evitar las complicaciones que estos traen consigo, y por ende disminuir los costos asociados a dichos problemas.
5. Se debe invertir en equipos de control de sólidos que garanticen la mejor remoción posible para así disminuir los costos asociados con las operaciones de dilución/adición y por ende los costos asociados a los sólidos de perforación.
6. Llevar un estricto control de los equipos de control de sólidos mediante la realización de pruebas de eficiencia y monitoreo de las propiedades del lodo cada trescientos pies, tanto a la entrada como a la salida de los equipos, en donde las principales propiedades a medir son la densidad, porcentaje de sólidos y MBT.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. QUIRÓZ L., Fermín A. **Elaboración de un método de evaluación del sistema de control de sólidos, basado en una nueva definición de los objetivos funcionales de los equipos y en un nuevo concepto de eficiencia.** Trabajo Especial de Grado. UCV, Caracas junio 2002. Págs. 1 – 50.
2. Manual de Fluidos de Perforación. Laboratorio de Fluidos de Perforación. UCV. Autor desconocido. Págs. 401- 452.
3. **Proper Solids Control, “Yesterday’s Minor Problem: Today’s Major Concern”.** Primer Seminario de Fluidos de Perforación y Pozos, 1990. Págs. 1 – 16.
4. GIMENEZ, Jorge. **Guía de laboratorio de fluidos de perforacion.** UCV. 2002. Sección de Procedimientos.
5. **M-I Drilling Fluids Engineering Manual.** Versión 2.0 CD-ROM. M-I. USA, Texas. 2001. Capitulo Octavo.
6. RINCONES, José G. **Diseño de un Programa de Perforación para un Pozo Multilateral en los Campos Bare y Arecuna.** Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ingeniería Escuela de Petróleo, UDO. Puerto la Cruz, Mayo 1998. Capitulo Primero.
7. El Pozo Ilustrado. Primera Edición en CD – Rom. Caracas, septiembre 1998. Págs. 158,159
8. HILTL, Bernardo. **Tecnología para el Control de Sólidos en Fluidos de Perforación Pasado, Presente y Futuro.** XIII Congreso Latinoamericano de Perforación. Caracas, noviembre 2002. Págs. 4-16.
9. **Solids Control & Fine Screening.** Fluid Systems Inc. Pagina Web <http://www.FSIshakers.com>.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

10. **“Memoria descriptiva proyecto San Cristóbal, perforación de pozos estratigráficos y horizontales (arenas NZZ-35X y SC-2X), año 2003”**.U.E explotación Liviano. Desarrollo de Yacimientos. (2002). San Tomé. Informe Técnico. Págs. 3 – 15.

11. GIL G., Karina D. **Implantación de la Metodología VCD (Visualización, Conceptualización y Definición) en la Planificación de un Proyecto de Perforación de 12 Localizaciones Horizontales Pertenecientes al Campo San Cristóbal de la Unidad de Explotación Liviano del Distrito San Tomé-PDVSA**. Trabajo Especial de Grado Facultad de Ingeniería, Escuela de Petróleo, UCV. Caracas Abril 2003. Págs. 129 – 151.

12. **Solids Control Solutions**. Derrick Equipment Company. Versión CD-ROM. 2001. Sección de Productos.

13. **Solids Control Handbook**. Schlumberger – Dowell. Versión CD-ROM. Enero 1998. Secciones 100, 200, 300 y 1100.

NOMENCLATURA

NOMENCLATURA

°:	Gravedad	lb/bbl:	Libras por Barril
':	Pies	lb/ft ³ :	Libras por Pie Cúbico
":	Pulgadas	lb/pie:	Libras por Pie.
%:	Por ciento	lb/plg ² :	Libras por Pulgada Cuadrada
μ:	Micrones	lpc:	Libras por Pulgada Cuadrada
°F:	Grados Fahrenheit	lpc/pie:	Libras por Pulgada Cuadrada por Pie
\$/bbl:	Dólares por Barril	lpg:	Libras por Galón
a:	Amplitud.	LPB:	Libras por Barril
ANP:	Arena Neta Petrolífera	min:	Minutos
API:	American Petroleum Institute	mm:	Milímetros
bbl:	Barriles.	mD:	Milidarcy
BPPD:	Barriles Producidos Por Día	m ³ /hr:	Metros Cúbicos por Hora
BY/BN:	Barril de Yacimiento por Barril Normal	MBD:	Miles de Barriles Diarios
cc:	Centímetro Cúbico	MMBls:	Millones de Barriles
cm ³ :	Centímetro Cúbico	PCN/BN:	Pie Cúbico por Barril Normal
cP:	Centipoises.	PCY/PCN:	Pie Cúbico de Yacimiento por Pie Cúbico Normal.
DIMS:	Drilling Information Management System	PDC:	Mecha Policristalina
EUE:	External Up Set	PHPA:	Poliacrilamida Parcialmente Hidrolizada
ft:	Pies	RPM:	Revoluciones por Minuto
ft/sec:	Pies por segundo	Seg/qt galón:	Segundo por ¼ de Galón
G:	Fuerza G	TVD:	Trae Vertical Deep
Gr/cm ³ :	Gramos por Centímetro Cúbico.	VPM:	Vibraciones por Minuto
GPM:	Galones por Minuto (gpm)		
k:	Permeabilidad		
kD:	Kilo Darcy		
kD/cm:	Kilo Darcy por Centímetro		
kD/m:	Kilo Darcy por Metro		
KOH:	Hidróxido de Sodio		

Aceleración Gravitacional: Es igual a la aceleración de movimiento de caída libre de los cuerpos como resultante de la acción ejercida sobre las diversas partes del mismo por la atracción de la masa terrestre.

Adedamiento: Fenómeno que sucede en yacimientos con mecanismo de empuje hidrostática en donde el contacto agua petróleo no se encuentra bien definido, sino que el agua avanza invadiendo la zona de petróleo con canales que se asemejan a dedos, debido principalmente a una permeabilidad poco homogénea en el estrato.

Apex: Vértice o Cúspide.

Barita: Óxido de bario (BaO). Material sólido grisáceo inerte utilizado como densificante en los fluidos de perforación y de gravedad específica 4,2.

Bentonita: Roca blancuzca parecida a la arcilla compuesta principalmente de sílice y montmorillonita (en la mayoría de los casos). Es utilizada como material viscosificante y extendedor en los fluidos de perforación.

Buzamiento: Ángulo que forma con la horizontal la línea de máxima pendiente de un estrato.

Carbonatos: Sal del ácido carbónico.

Celler:

Celulosa: $C_6H_{10}O_5$. Constituyente fundamental de la membrana vegetal y de naturaleza hidrocarbonosa.

Coloide: Sistema en el cual las partículas se encuentran suspendidas en un líquido debido a un equilibrio dinámico.

Conglomerado: Roca sedimentaria formada por gravas o fragmentos de rocas preexistentes.

Conificación: Fenómeno que sucede en yacimientos con mecanismo de empuje hidrostático en donde el agua invade la zona de petróleo de forma tal que se produce un alto corte de agua en la superficie. Este fenómeno sucede principalmente debido a una producción que sobre pasa la capacidad o potencial del yacimiento y por lo tanto el agua tiende a formar una especie de cono que rodea la tubería causando los altos cortes de agua.

Cratón: Sector de la corteza terrestre que por su naturaleza rígida solo puede experimentar deformaciones del tipo germánico.

Cretáceo: Periodo geológico comprendido desde 150 a 72 millones de años aproximadamente.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Destilación: Separación mediante la aplicación de calor de elementos con diferentes composiciones contenidos en mezclas líquidas.

Discordancia: Disposición de una serie de capas o estratos que reposan sobre otras más antiguas no paralelas a las anteriores.

Dolomita: $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Carbonato de calcio y magnesio, roca romboédrica de brillo vítreo. Puede ser incolora, blanca o diversamente coloreadas.

Edades Geológicas: Cada una de las divisiones que se han establecido en la serie ininterrumpida de los tiempos geológicos

Embolamiento: Atascamiento de la mecha de perforación debido a la existencia de un revoque irregularmente grueso, o viscosidad elevada del fluido de perforación debido a la presencia de exceso de sólidos de perforación.

Estratigrafía: Parte de la geología que estudia la disposición y características de las rocas estratificadas, en particular de las rocas sedimentarias, tanto del punto de vista de la edad de formación y su composición.

Ferruginoso: Mineral que contiene hierro ya sea en estado metálico o en aleación.

Filtrado: Líquido forzado a través de un medio poroso durante la filtración. En el caso del fluido de perforación el líquido es forzado a través del revoque.

Floculación: Precipitación de los coloides o partículas de una solución para formar pequeños copos y/o grumos. En los fluidos de perforación el lodo se flocula causando un aumento significativo en las propiedades reológicas del mismo.

Fuerza Centrifuga: Fuerza que tiende a hacer que los objetos o partículas se alejen del centro de acción de la misma.

Gel: Un estado de una suspensión coloidal en el que los esfuerzos de corte inferiores a un valor finito no pueden producir ninguna deformación permanente. El esfuerzo de corte mínimo que producirá una deformación permanente se conoce como resistencia al corte o esfuerzo de gel del gel considerado. Los geles suelen ocurrir cuando las partículas coloidales dispersas tienen una gran afinidad con el medio dispersante.

Grava: Fracción de rocas detríticas sueltas que de diámetro entre 2 y 20 mm. Son el resultado de la acción de fracturación o disgregación de otras rocas.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Gravedad Específica: El peso de un volumen determinado de cualquier sustancia comparado con el peso de un volumen igual de agua a la temperatura de referencia. Para los gases, se suele usar el aire como sustancia de referencia.

Guijarro: Roca pequeña desgastada por la erosión por lo cual tienden a ser redondeados.

Hidrólisis: Reacción que tiene por efecto el desdoblamiento de una molécula por acción del agua.

Homoclinal: Estructura geológica en la cual la estratificación es plana pero presenta una ligera inclinación o buzamiento.

Impele: Instrumento mediante el cual se le comunica un impulso o movimiento a un fluido para asegurar una velocidad y presión más elevadas.

Intercambio Catiónico: Los cationes compensadores que se adsorben en la superficie de la capa de las arcillas pueden ser cambiados por otros cationes y se llaman los cationes intercambiables de la arcilla. La cantidad de cationes por peso unitario de la arcilla es medida y registrada como la CEC (capacidad de intercambio catiónico). La CEC está expresada en miliequivalentes por 100 g de arcilla seca (meq/100 g), y mientras mayor sea esta medida para una arcilla en particular mayor será su capacidad de hidratación.

Isópaco: Línea imaginaria que une los puntos de igual espesor de un estrato en particular.

Lignito: Carbón mineral de poco poder calorífico de color negro o pardo que contiene gran cantidad de agua (20 al 40%) y elementos volátiles (más del 45%).

Lignosulfonato: Aditivos orgánicos de fluido de perforación, derivados de los productos secundarios del proceso de fabricación de papel de sulfito con maderas de coníferos. Algunas de las sales comunes, como el ferrocromo, cromo, calcio y sodio, son usadas como dispersantes universales, mientras que otras son usadas selectivamente para sistemas tratados con calcio. En grandes cantidades, las sales de ferrocromo y cromo son usadas para control de filtrado e inhibición de lutitas.

Litología: Parte de la geología que tiene como objeto la descripción de las rocas y su clasificación, especialmente de las rocas sedimentarias.

Macolla: Arreglo mediante el cual varios pozos, por lo general direccionales u horizontales, son perforados y drenados a través de la misma tubería productora. Dichos pozos tienen como objetivo diferentes arenas petrolíferas.

Meridional: Perteneciente o relativo al meridiano. En un punto de la tierra es la circunferencia máxima que pasa por los polos de esa región y tiene como centro el punto máximo.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Mioceno: Cuarto periodo de la era terciaria y que se extiende entre los 25 a 13 millones de años.

Neógeno: Nombre que se le da a la parte superior del terciario y que comprende los sistemas mioceno y plioceno.

Oligoceno: Tercer periodo de la era terciaria que se extiende entre los 36 a 25 millones de años.

Pleistoceno: Parte principal del cuaternario antiguo. Su duración es poco precisa pero se evalúa entre 1 y 2 millones de años.

Poliacrilamida Parcialmente Hidrolizada (PHPA): La Poliacrilamida Parcialmente Hidrolizada (PHPA) se usa frecuentemente para identificar el copolímero poliacrilamida/ poliacrilato. El producto final de una PHPA es el mismo polímero que es formado por una copolimerización de poliacrilamida/poliacrilato. Aunque el producto sea frecuentemente llamado PHPA, en realidad es el producto de la copolimerización de los monómeros acrilamida y acrilato de sodio.

Poliacrilatos: Polímero de un éster del ácido acrílico o de sus derivados químicos.

Polímero: Compuesto químico natural o sintético compuesto por de unidades estructurales repetidas.

Punto Cedente: El punto cedente, segundo componente de la resistencia al flujo en un fluido de perforación, es una medida de las fuerzas electroquímicas o de atracción en un fluido. Estas fuerzas son el resultado de las cargas negativas y positivas ubicadas en o cerca de las superficies de las partículas. El punto cedente es una medida de estas fuerzas bajo las condiciones de flujo, y depende de: las propiedades superficiales de los sólidos del fluido, la concentración volumétrica de los sólidos, y el ambiente eléctrico de estos sólidos (concentración y tipos de iones en la fase fluida del fluido).

Revoque: Los sólidos suspendidos que se depositan sobre un medio poroso durante el proceso de filtración.

Septentrional: Hacia el norte.

Sílice: SiO₂. Dióxido de silicio que se encuentra en gran número de minerales.

Tanque Tres Caras: Tanque que se encuentra al final del sistema de control de sólidos en el cual se recolectan los rípios removidos del fluido de perforación. Este tanque tiene solo tres lados debido a que por el lado faltante se retiran los sólidos de perforación a medida que estos se van depositando en el mismo.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Terciario: Era Geológica que reciente que empezó hace 75 millones de años y terminó hace un millón de años y se divide en cinco periodos paleoceno, eoceno, oligoceno mioceno y plioceno.

Torque: Una medida de la fuerza o esfuerzo aplicado a un eje, causando su rotación. En un equipo de perforación rotatorio, esto se aplica especialmente a la rotación de la tubería de perforación, en lo que se refiere a su acción contra el calibre del pozo. El torque puede generalmente ser reducido mediante la adición de varios aditivos del fluido de perforación.

Tortuosidad: Terreno accidentado que constantemente se aleja de la dirección recta dando vueltas y rodeos.

Viscosidad Plástica: La viscosidad plástica es una medida de la resistencia interna al flujo de fluido, atribuible a la cantidad, tipo y tamaño de los sólidos presentes en un fluido determinado.

PORCENTAJE EN VOLUMEN DE LOS SÓLIDOS EN EL FLUIDO

Para la determinación del porcentaje en volumen de sólidos se utilizará la retorta y se realiza el siguiente procedimiento:

1. Asegurarse de que la retorta y todos sus componentes se encuentren limpios y secos.
2. Colocar lanilla metálica en el conducto del cilindro al condensador de la retorta.
3. Llenar el cilindro de 10, 20 o 50 cc con fluido de manera que al tapar el cilindro solo sobresalga una pequeña gota del orificio de la tapa, así nos aseguramos que en el cilindro hay la cantidad adecuada de fluido. Limpiar el exceso de fluido sobresaliente.
4. Enroscar el cilindro al condensador sin voltear el cilindro, ya que se puede derramar el fluido contenido en el. Colocar el cilindro y el condensador en la retorta.
5. Colocar un cilindro graduado con capacidad de almacenar la misma cantidad de fluido que se colocó en el cilindro metálico, debajo de la salida del condensador para recoger los líquidos que saldrán del mismo y con estos realizar el análisis.
6. Una vez terminada la prueba se encenderá un bombillo rojo el cual indica que ya se pueden retirar el cilindro y el condensador del equipo. Se debe tener extremo cuidado ya que se encuentran a temperaturas elevadas, por lo cual se deben utilizar guantes para retirarlos. Se pueden colocar debajo un chorro de agua teniendo cuidado de no mojar el condensador.
7. Una vez se halla recolectado el líquido condensado se tomará nota de la cantidad del volumen en el cilindro y se calculará mediante una simple regla de tres el porcentaje en volumen de líquido presente en el lodo de perforación y la diferencia al cien por ciento, 100%, representará el porcentaje en volumen de la presencia de sólidos. El cálculo se realiza de la siguiente manera si el fluido es en base agua:
 - Cilindro de la retorta con capacidad para 10 cc de fluido de perforación
 - Cilindro graduado de 10 cc de capacidad.
 - Volumen de líquido condensado en el cilindro graduado = 8 cc

10 cc \longrightarrow 100% v/v
 8 cc \longrightarrow Porcentaje de Agua

- Porcentaje en volumen de líquido presente en el fluido de perforación = 80 %
 - Porcentaje en volumen de sólidos presente en el fluido de perforación = 100% - 80% = 20%
8. En el caso de estar en presencia de un fluido 100% en base aceite los cálculos se realizarán de manera similar.
9. Si el fluido es una emulsión inversa se debe prestar atención a la interfase que se forma entre el agua y el aceite y anotar los volúmenes que cada una de estas ocupan en el cilindro graduado. Los cálculos se realizan como sigue:

- Cilindro de la retorta con capacidad para 10 cc de fluido de perforación
- Cilindro graduado de 10 cc de capacidad.
- Volumen de líquido condensado en el cilindro graduado = 8,5 cc
- Volumen de agua presente en los 8,5 cc de líquido = 7 cc
- Volumen de aceite presente en los 8,5 cc de líquido = 1,5 cc

10 cc \longrightarrow 100% v/v
 7 cc \longrightarrow Porcentaje de Agua
 1,5 cc \longrightarrow Porcentaje de Aceite

- Porcentaje en volumen de agua presente en el fluido de perforación = 70 %
- Porcentaje en volumen de aceite presente en el fluido de perforación = 15 %
- Porcentaje en volumen de sólidos presente en el fluido de perforación = 100% - 80% = 15%

CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE AZUL DE METILENO ^[5]

Los lodos frecuentemente contienen sustancias además de las arcillas reactivas que absorben azul de metileno. El pretratamiento con peróxido de hidrógeno tiene la intención de remover el efecto de materiales orgánicos tales como lignosulfonatos, lignitos, polímeros celulósicos, poliacrilatos, etc.

EQUIPOS

- a) Solución de azul de metileno 3,20g (1 cm³ = 0.01meq).
- b) Peróxido de hidrógeno, solución al 3%.
- c) Ácido sulfúrico aproximadamente 5N.
- d) Jeringa de un (1) cm³.
- e) Cilindro graduado de 50 cm³. Erlenmeyer de 250 cm³.
- f) Plancha de calentamiento.
- g) Papel filtro Whatman No. 1.

PROCEDIMIENTO

1. Medir 1 cm³ de la muestra de lodo en el erlenmeyer, el cual contiene 10cm³ de agua destilada.
2. Añadir 15 cm³ de peróxido de hidrógeno al 3%.
3. Añadir 0,5 cm³ de ácido sulfúrico.
4. Hervir la muestra moderadamente por 10 minutos.
5. Después de hervir la muestra, llevar el volumen a un total de 50 cc con agua destilada. Permitir que la mezcla se enfríe.
6. Añadir la solución de azul de metileno en incrementos de 0,5 cm³. Después de cada adición, agitar el contenido por 30 segundos aproximadamente. Mientras los sólidos permanecen en

suspensión, remover una gota del líquido con el agitador y colocarla sobre el papel filtro. El punto final se alcanza cuando un anillo azul-verdoso aparece alrededor de los sólidos teñidos.

- 7. Cuando se alcanza el punto final, agitar por 2 minutos y nuevamente en evidencia, se ha alcanzado el punto final. Si el anillo no aparece, continuar añadiendo azul de metileno hasta cuando se alcance el punto final y éste permanezca después de agitar por dos minutos adicionales. Registrar los cm³ de azul de metileno utilizado.
- 8. El intercambio de cationes del lodo debe registrarse como la capacidad de azul de metileno calculada como sigue:

$$\text{Capacidad de Azul de Metileno (CEC)} = \frac{\text{cm}^3 \text{ de Azul de Metileno}}{\text{cm}^3 \text{ de Lodo}} \quad \text{..Ecuación B.1}$$

- 9. El uso de peróxido de hidrógeno permite además estimar el contenido de bentonita del lodo sin interferencia de otros materiales absorbentes. Los cálculos son los siguientes:

$$\text{Bentonita (lb/bbl)} = 5 \cdot \text{CEC} \quad \text{.....Ecuación B.2}$$

METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL CONTENIDO DE ARENA ^[5]

Se considera como impureza la arena o sólidos superiores al tamiz N° 200. El equipo consiste de un tamiz N° 200 mesh de 2.5" de diámetro, unido a un embudo y un recipiente de vidrio (zanahoria) calibrado desde 0 a 20%. El porcentaje de arena se lee directamente del recipiente de vidrio y se registra en el informe de lodo.

PROCEDIMIENTO.

1. Llenar el recipiente de vidrio con lodo hasta la marca "lodo hasta aquí". Añadir agua hasta la marca "agua hasta aquí". Cubrir la boca del recipiente con el dedo pulgar y sacudir vigorosamente.
2. Verter la mezcla sobre el tamiz limpio previamente mojado. Descartar el líquido que pasa a través del tamiz. Agregar más agua al recipiente de vidrio, sacudir y verter de nuevo sobre el tamiz. Repetir hasta que el agua de lavado se observe clara. El contenido retenido en el tamiz no debe aplastarse o forzarse con el dedo, lápiz o dispositivo alguno que pueda destruir la malla. Lavar la arena retenida sobre la malla con una corriente suave de agua para eliminar partículas de lodo.
3. Fijar el embudo en la parte superior del tamiz, invertirlo lentamente, colocando el pico del embudo en la boca del recipiente de vidrio y con una corriente suave de agua, lavar la arena. Dejar decantar la arena en el recipiente.
4. Observar el volumen de arena depositado y expresar el valor obtenido en porcentaje de arena contenido por el lodo.

SELECCIÓN DE LAS MALLAS PARA LAS ZARANDAS^[12]

D.1 HOYO DE SUPERFICIE

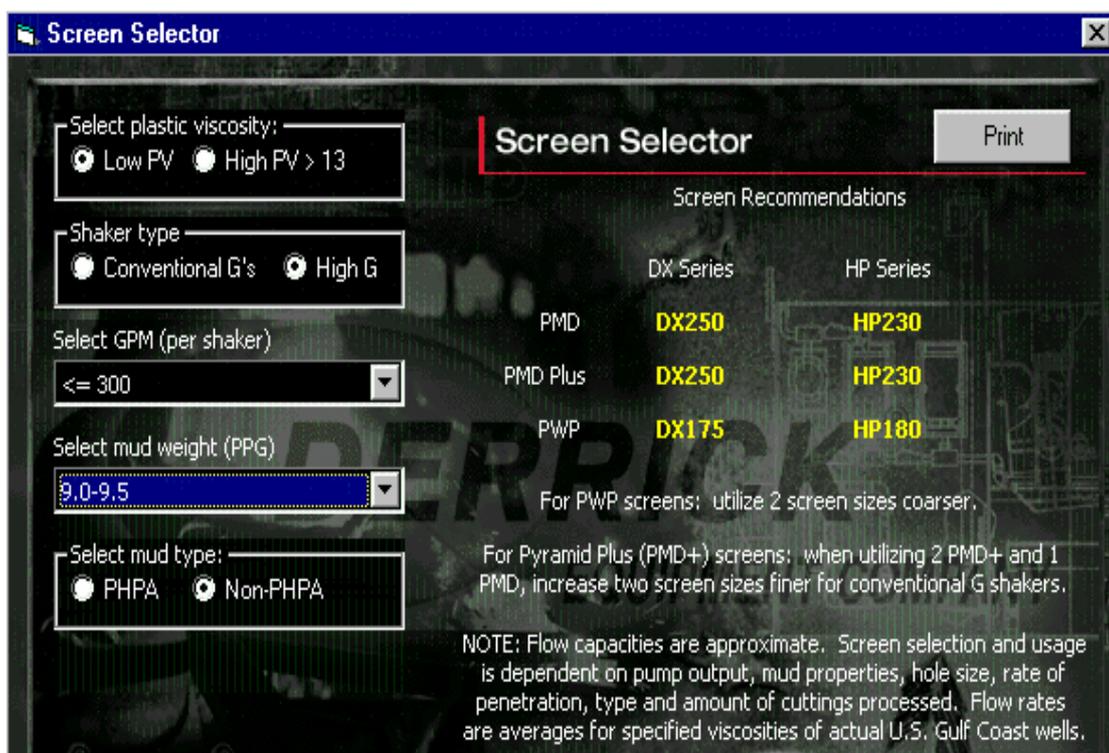


FIGURA D.1 Programa para la Selección de las Mallas en el Hoyo de Superficie

D.2 HOYO INTERMEDIO

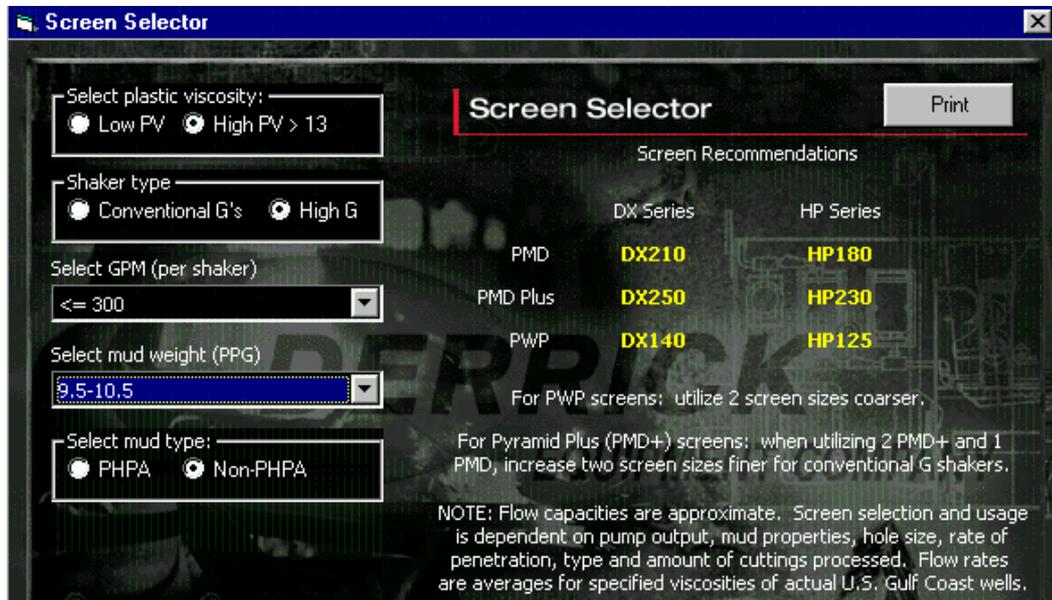


FIGURA D.2 Programa para la Selección de las Mallas en el Hoyo Intermedio

D.3 HOYO DE PRODUCCIÓN

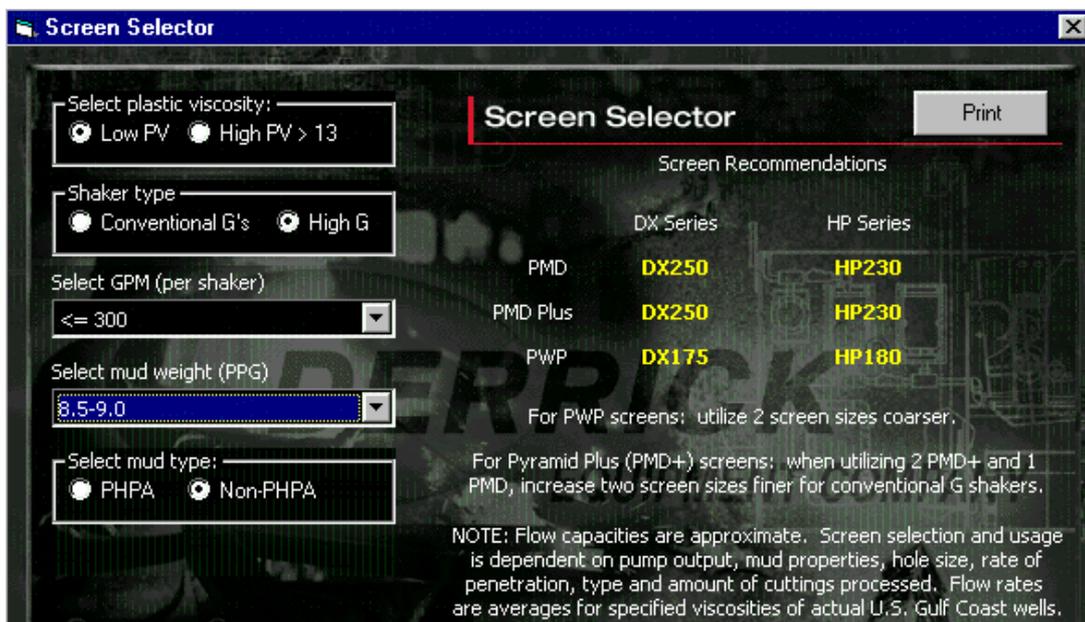


FIGURA D.3 Programa para la Selección de las Mallas en el Hoyo de Producción.

BASE DE DATOS DE POSIBLES PROBLEMAS OPERACIONALES

TABLA E.1 Base de Datos de los Potenciales Problemas Operacionales que Pueden Ocurred en San Cristóbal

Pozo	Sección Perforada	Tipo de Lodo	Densidad lb/gal	Vp – Pc cP-lb/100ft ²	Geles 10s–10m	Horas	Problema
MFB-611	12 ^{1/4} " x 9 ^{5/8} "	Lignosulfonato	9 –9,8	10/18 – 10/16	4/10 – 5/18	1,5	Destapando campana y línea de flujo obstruidos por retorno de arcillas @ 1040'
						1,5	Destapando campana y línea de flujo obstruidos por retorno de arcillas @ 1186'
						6	Se tiene baja ROP debido al taponamiento por arcilla en el tubo campana. Solo se perforan 324'.
						0,5	Reemplazo del pistón # 3 de la bomba # 1 por daño por los sólidos.
						1	Destapando campana y línea de flujo obstruidos por exceso de arena @ 3389'
	1	Circulando hasta obtener retorno limpio por excesiva presencia de arena @ 3845'.					
	8 ^{1/2} " x 7"	Polimérico	9 – 9.8	10/18 – 10/16	4/10 – 5/18	0,5	Arrastre con intento de pega de tubería. Circulo pozo hasta eliminar arrastre 5200'
MFB-618	12 ^{1/4} " x 9 ^{5/8} "	Lignosulfonato	9 –9,8	10/18 – 10/16	4/10 – 5/18	1,5	Paro perf. por taponamiento de línea de flujo con abundante arcilla de formación @ 947'. Destapo línea.
						2	Paro perf. por taponamiento de línea de flujo por presencia de grandes trozos de arcilla @ 1161'. Destapo línea.
						1,5	Paro perf. por taponamiento de línea de flujo con abundante arcilla de formación @ 1387'. Destapo línea.
						2	Circulo pozo y observo retorno de arcilla, y taponamiento de la línea de flujo @ 2532'. Destapo línea de flujo.
						0,5	Circulo pozo y observo retorno de arcilla, y taponamiento de la línea de flujo sacando tubería. Destapo línea de flujo.
						1	Circulo pozo hasta retorno limpio bajando tubería con retorno abundante de arcilla.

APÉNDICE E

Base de Datos de los Problemas Operacionales en el Campo San Cristóbal

Pozo	Sección Perforada	Tipo de Lodo	Densidad lb/gal	Vp - Pc cP-lb/100ft ²	Geles 10s-10m	Horas	Problema
MFB-620	12 ^{1/4} " x 9 ^{5/8} "	Lignosulfonato	9-9,8	10/18 - 10/16	4/10 - 5/18	0,5	Circulo pozo por taponamiento de la línea de flujo @ 1033'. Destapo línea de flujo
						0,5	Reemplazo pistón # 1 de la bomba # 1
						3	Liberando tubería por arrastre y pega.
						1,5	Circ. pozo por taponamiento de la línea de flujo subiéndola tubería. Destapo línea
						2	Circ. pozo por taponamiento de la línea de flujo subiéndola tubería. Destapo línea
						2	Liberando tubería por arrastre y pega.
MFB-623	12 ^{1/4} " x 9 ^{5/8} "	Lignosulfonato	9-9,8	10/18 - 10/16	4/10 - 5/18	3,5	Circulo hasta retorno limpio @ 3485 con presencia de mucha arcilla
						2	Circulo hasta retorno limpio @ 3485 luego de bajar el revestidor con presencia de mucha arcilla.
MFB-632	12 ^{1/4} " x 9 ^{5/8} "	Lignosulfonato	8,8-9,7	10/11 - 10	5 - 7	1,5	Taponamiento de la línea de flujo @ 1315' por presencia de arcillas. Destapo línea.
						2,5	Circulo hasta retorno limpio sacando tubería por taponamiento de la línea de flujo por presencia de mucha arcilla.
	8 ^{1/2} " x 7"	Polimérico	8,5-8,8	9/11 - 30	14 - 16	0,5	Reemplazo de pistón de bomba # 1 por daños causados por sólidos @ 3634'
						4	Taponamiento de las mallas de los E.C.S. por presencia de crudo y excesiva arena. Colapso del tanque tres caras.
MFB-636	12 ^{1/4} " x 9 ^{5/8} "	Lignosulfonato	8,8-9,7	10/11 - 12	5 - 7	1	Circulo pozo con retorno de mucha arcilla @ 1097'.
						2	Taponamiento de la línea de flujo @ 1336' por presencia de arcillas. Destapo línea.
						1	Reemplazo pistón # 2 de bomba de lodo # 1 @ 3590'.
						0,5	Circulo pozo y observo retorno de arcilla, y taponamiento de la línea de flujo sacando tubería. Destapo línea de flujo.
	8 ^{1/2} " x 7"	Polimérico	8,5-9	9-30	14-16	1	Destapando línea de flujo por taponamiento con excesiva arena @ 4845'. Litología 30-40% de lutitas.
						1	Destapando línea de flujo por taponamiento con excesiva arena @ 5227'
						2,5	Circulando pozo hasta retorno limpio mientras bajo tubería por excesiva arena

Pozo	Sección Perforada	Tipo de Lodo	Densidad lb/gal	Vp – Pc cP-lb/100ft ²	Geles 10s–10m	Horas	Problema
MFB-637	12 ^{1/4} " x 9 ^{5/8} "	Lignosulfonato	8,8 – 9,7	10/11 - 12	5 - 7	3	Chequeando bombas de lodos # 1 y 2 por ruidos extraños. Limpiando filtro de ambas bombas. Sacando tubería.
	8 ^{1/2} " x 7"	Polimérico	8,5 – 8,8	9 - 30	14 - 16	1	Daño de la bomba # 2. Cambiando pistón @ 4787'.
MFB-638	12 ^{1/4} " x 9 ^{5/8} "	Lignosulfonato	8,8 – 9,7	10/11 - 12	5 - 7	0,5	Cambio pistón # 1 a bomba de lodo # 1 @ 820'.
						5	Chequeo y reviso bombas, limpio filtros y cambio válvula en succión de bomba # 1 @ 820'. Sigue haciendo ruidos.
						2,5	Chequeo bomba # 1 y realizo cambio del pistón y camisas al módulo. Sin éxito.
						4	Realizo cambio del impele a la centrífuga de la bomba # 1 por desgaste de 3/8". Se prueba bomba sin éxito. Siguen ruidos.
						1,5	Circulo pozo por taponamiento de la línea de flujo @ 1267'. Destapo línea.
						1,5	Taponamiento de la línea de flujo @ 1336' por presencia de arcillas. Destapo línea.
						0,5	Reemplazo de pistón de bomba # 1 por daños causados por sólidos @ 3210'
						6,5	Liberando sarta por pega de tubería @ 3316'.
						10,5	Cambio módulo de descarga de y succión de la bomba # 2. Armande bomba.
						1,5	Circulo pozo hasta retorno limpio por taponamiento de la línea de flujo
	1,5	Reemplazo pistón y empaadura de la camisa al cilindro # 1 de la bomba # 2 @ 3435'.					
	8 ^{1/2} " x 7"	Polimérico	8,5 – 9,1	9 - 30	14 - 16	11	A 3688' tubería pegada al levantar. Tensionando para despegar tubería en dos intentos.
MFB-639	12 ^{1/4} " x 9 ^{5/8} "	Lignosulfonato	8,8 – 9,7	10/11 - 12	5 - 7	0,5	Cambiando pistón en bomba de lodo # 2 @ 4065'
						0,5	Cambiando pistón en bomba de lodo # 1 metiendo tubería
						2	Cambio camisa y pistón # 2 a bomba de lodo # 1.

Pozo	Sección Perforada	Tipo de Lodo	Densidad lb/gal	Vp - Pc cP-lb/100ft ²	Geles 10s-10m	Horas	Problema
MFB-640	12 ^{1/4} " x 9 ^{5/8} "	Lignosulfonato	8,8 - 9,7	10/11 - 12	5 - 7	2,5	Destapo línea de flujo por presencia de mucha arcilla o gumbo. Circulo pozo @1333'
						1	Reparo filtro de bomba de la bomba # 2 @ 3468'
						5	Reparando bomba de lodo # 1 sacando y tensionando tubería
						1	Destapo línea de flujo por presencia de bloques de arcilla reactiva. Circulo pozo. Sacando tubería
						1	Destapo línea de flujo por presencia de mucha arcilla reactiva. Circulo pozo. Sacando tubería.
						0,5	Reemplazando pistón dañado # 3 de la bomba # 2.
	8 ^{1/2} " x 7"	Polimérico	8,5	9 - 30	14 - 16	2	Circulando pozo mientras se destapa línea de flujo al subir tubería.

APENDICE F

ANÁLISIS PORCENTUAL DE TIEMPOS DE PERFORACIÓN

POZO NZZ-161

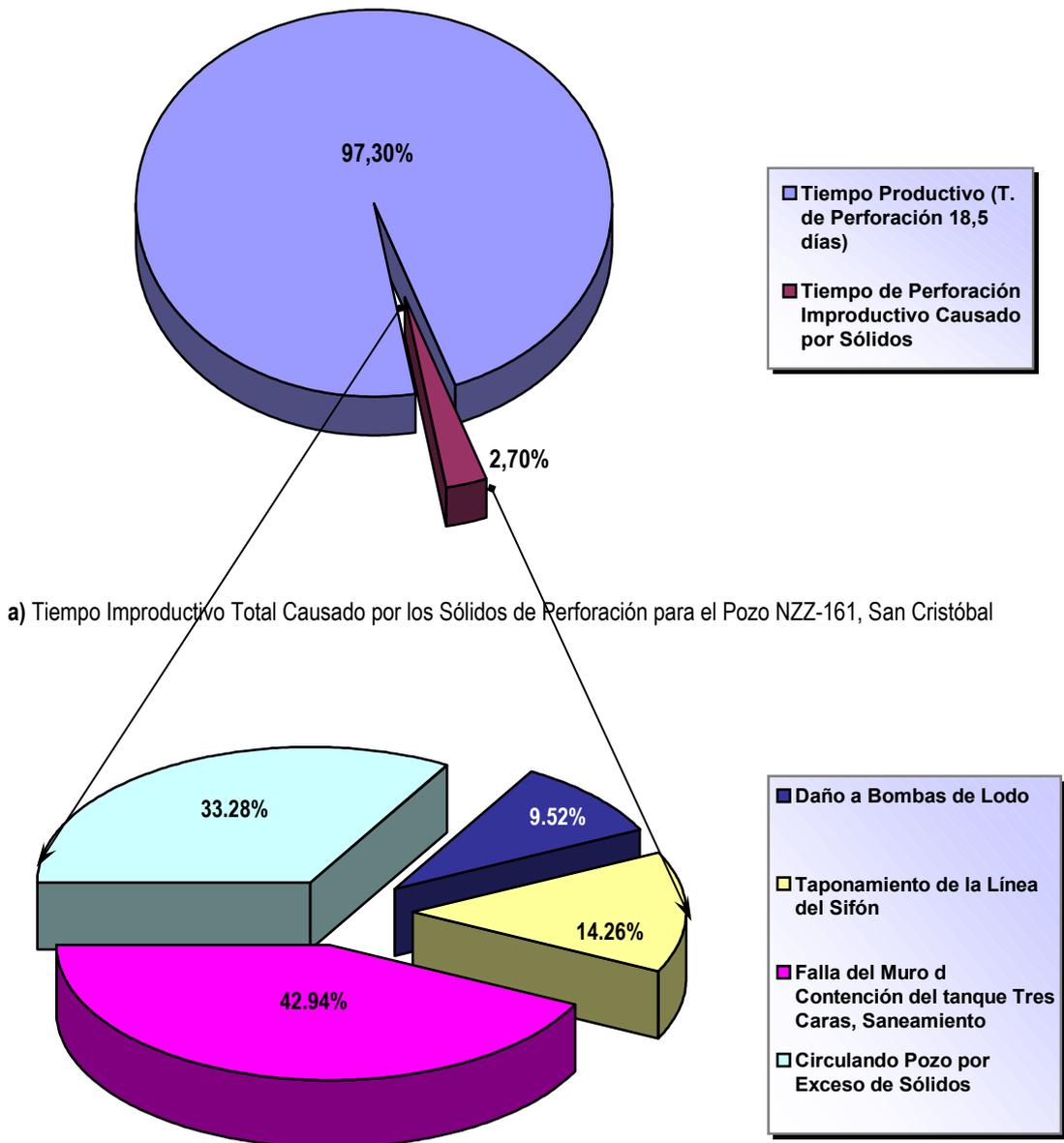


GRAFICO F.1 Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo NZZ-161, San Cristóbal

POZO MFB-0609

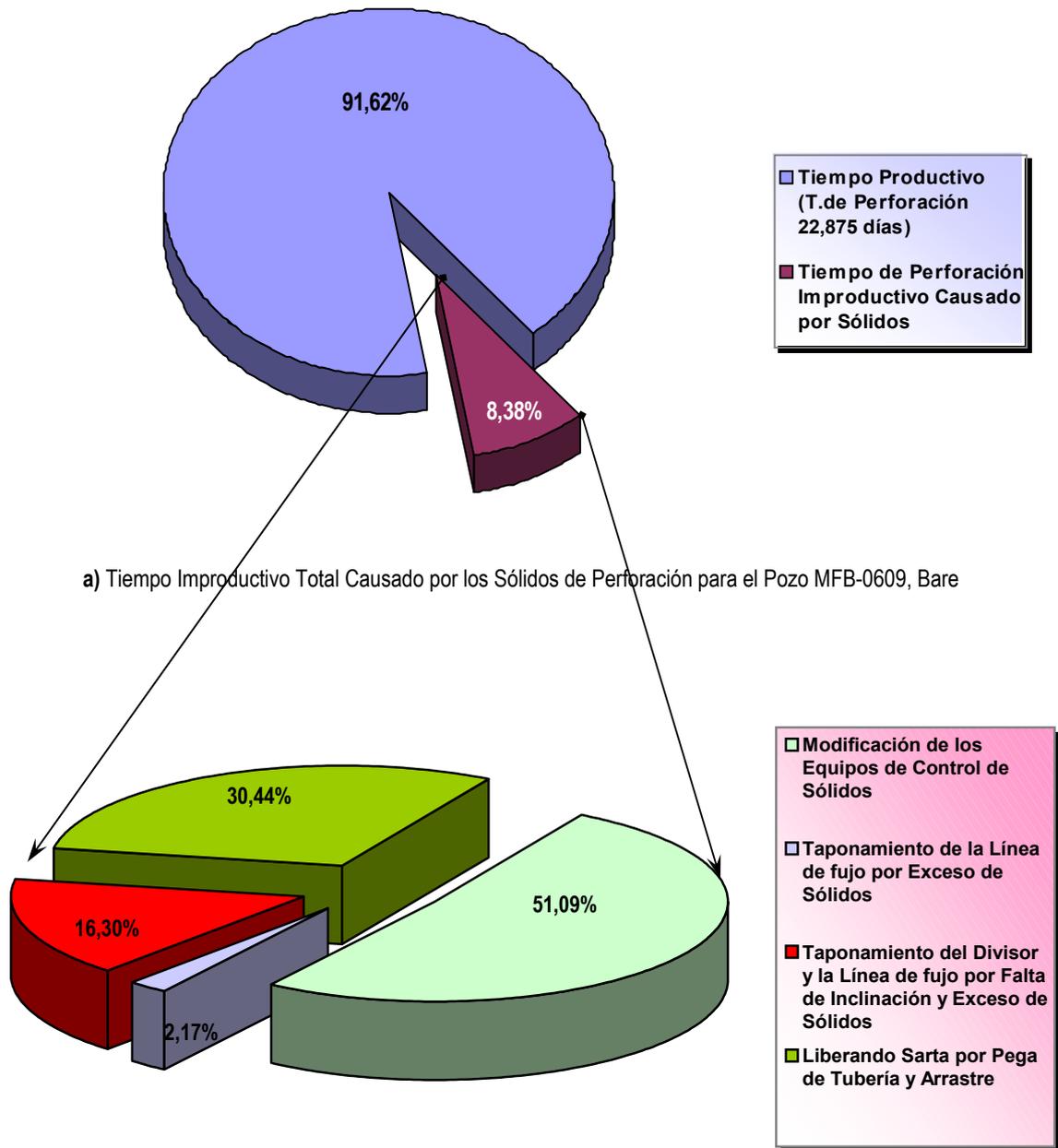


GRAFICO F.2 Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0609, Bare

POZO MFB-0611

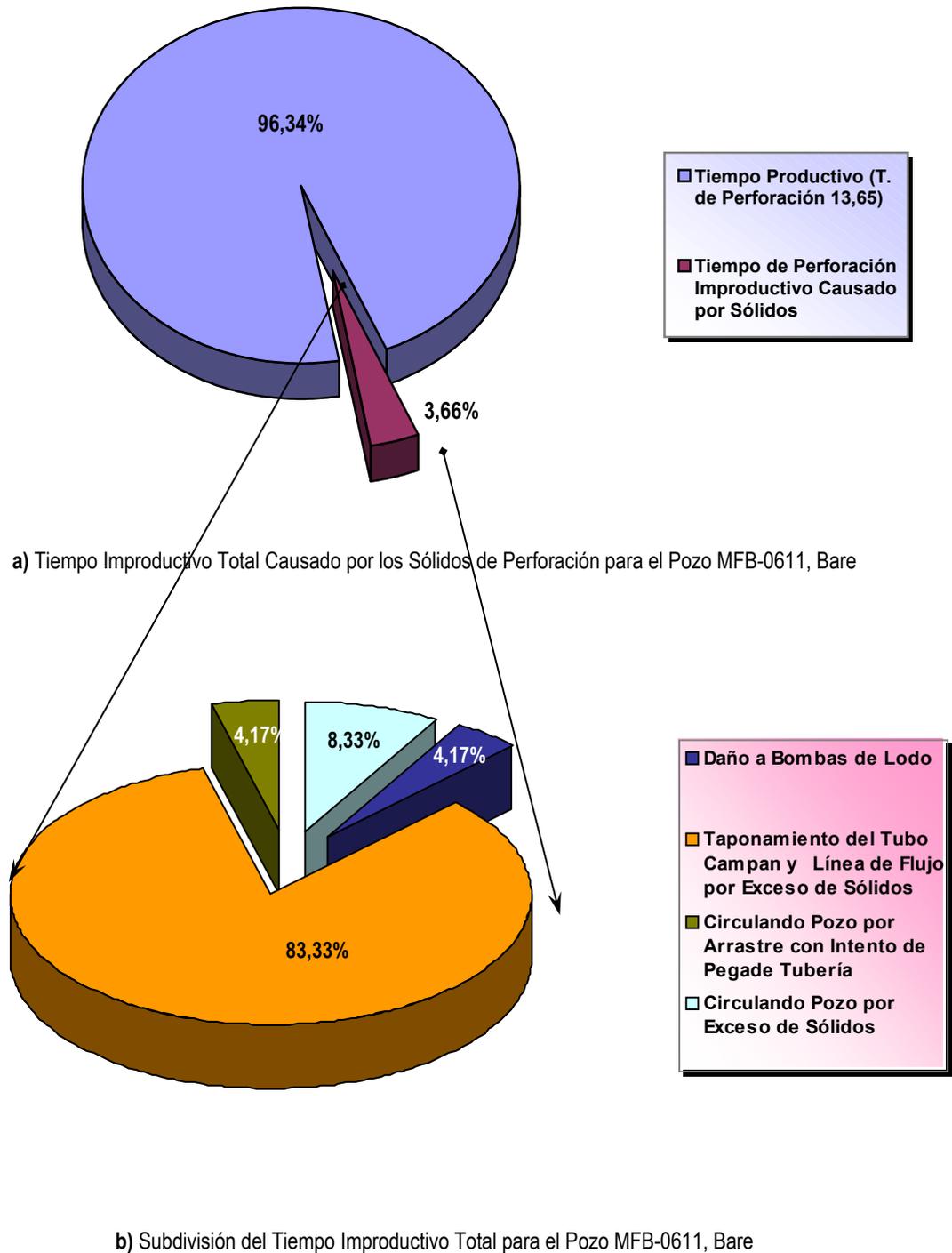
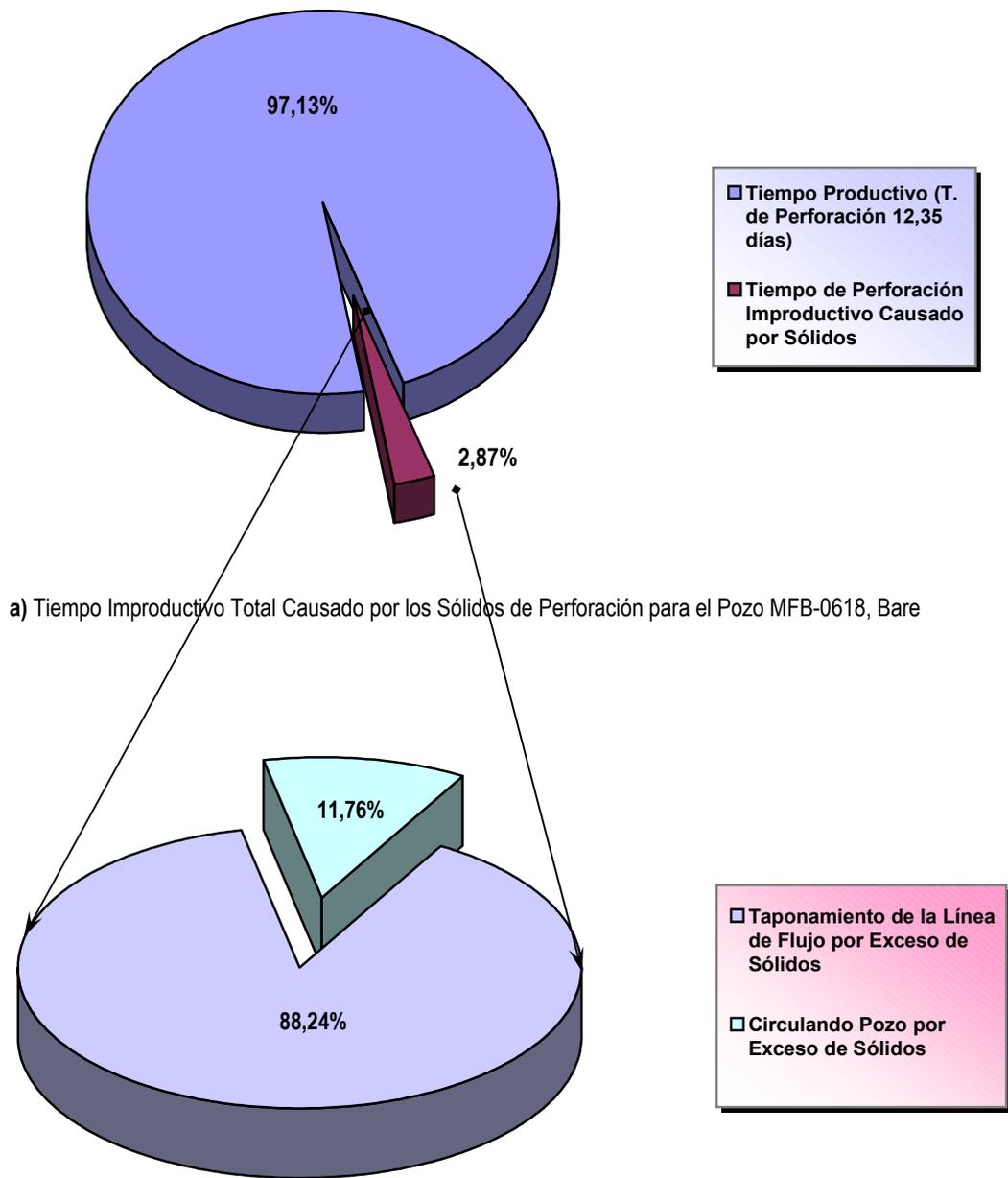


GRAFICO F.3 Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0611, Bare



a) Tiempo Improductivo Total Causado por los Sólidos de Perforación para el Pozo MFB-0618, Bare

b) Subdivisión del Tiempo Improductivo Total para el Pozo MFB-0618, Bare

GRAFICO F.4 Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0618, Bare

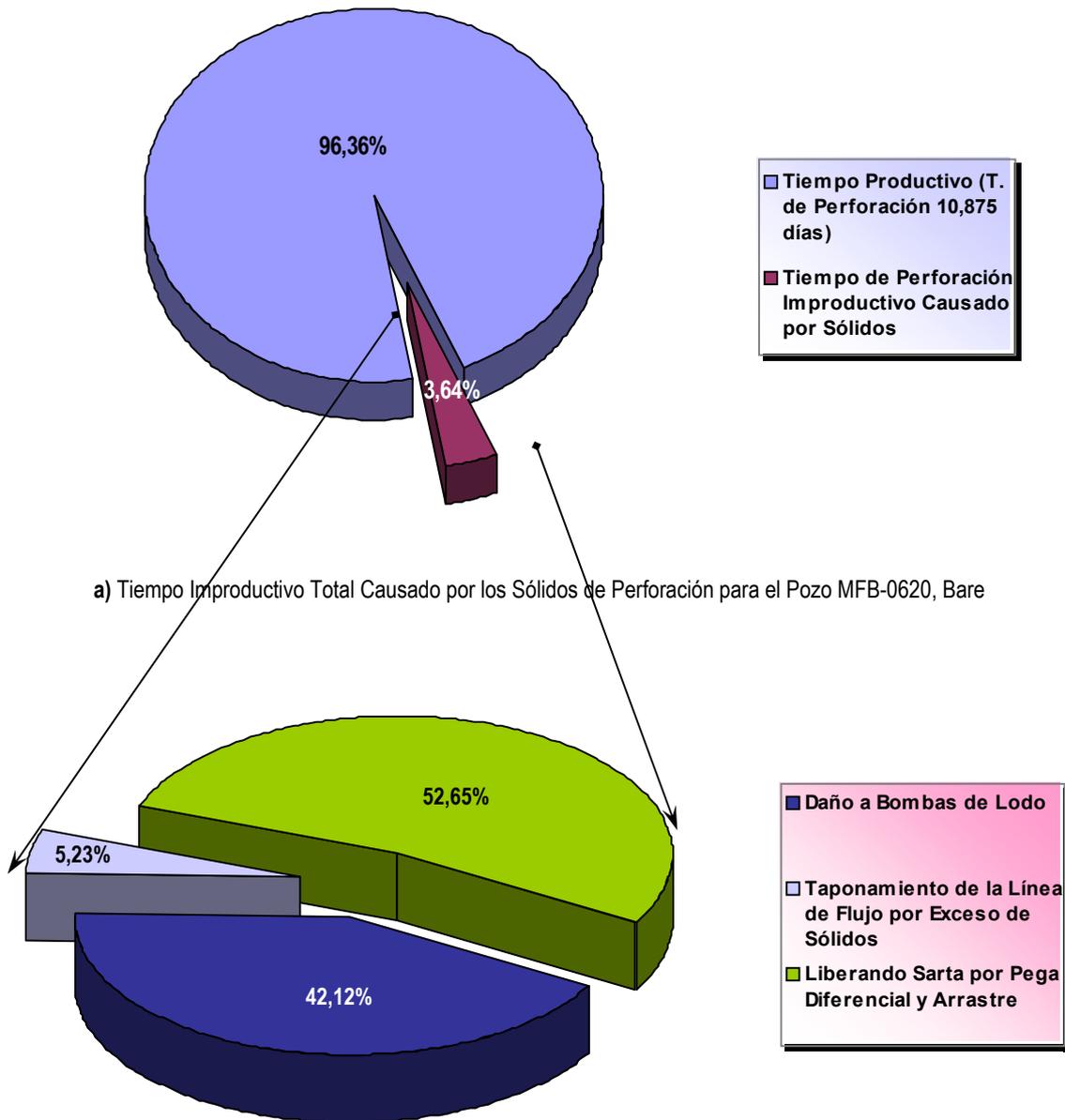
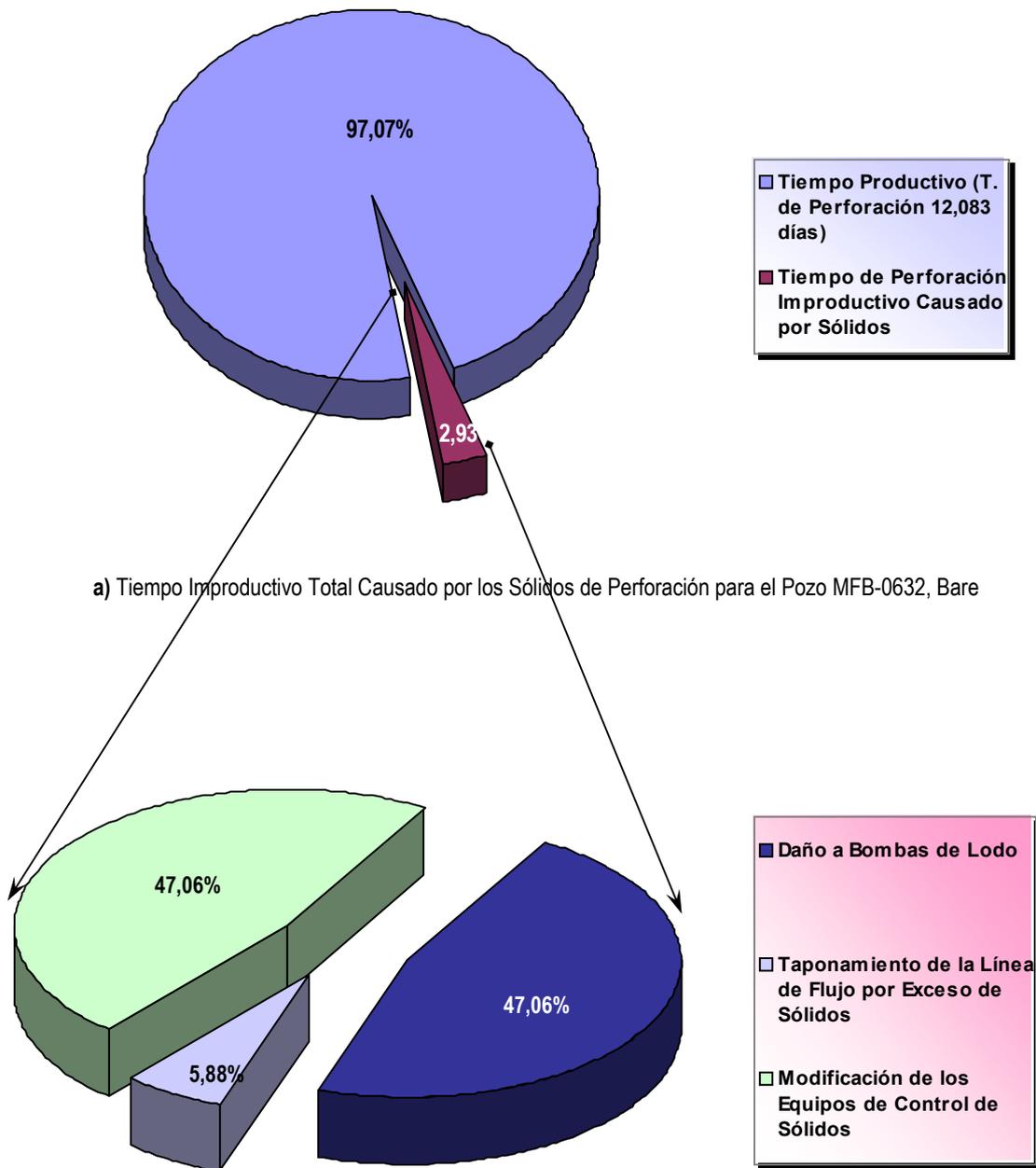


GRAFICO F.5 Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0620, Bare



a) Tiempo Improductivo Total Causado por los Sólidos de Perforación para el Pozo MFB-0632, Bare

b) Subdivisión del Tiempo Improductivo Total para el Pozo MFB-0632, Bare

GRAFICO F.6 Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0632, Bare

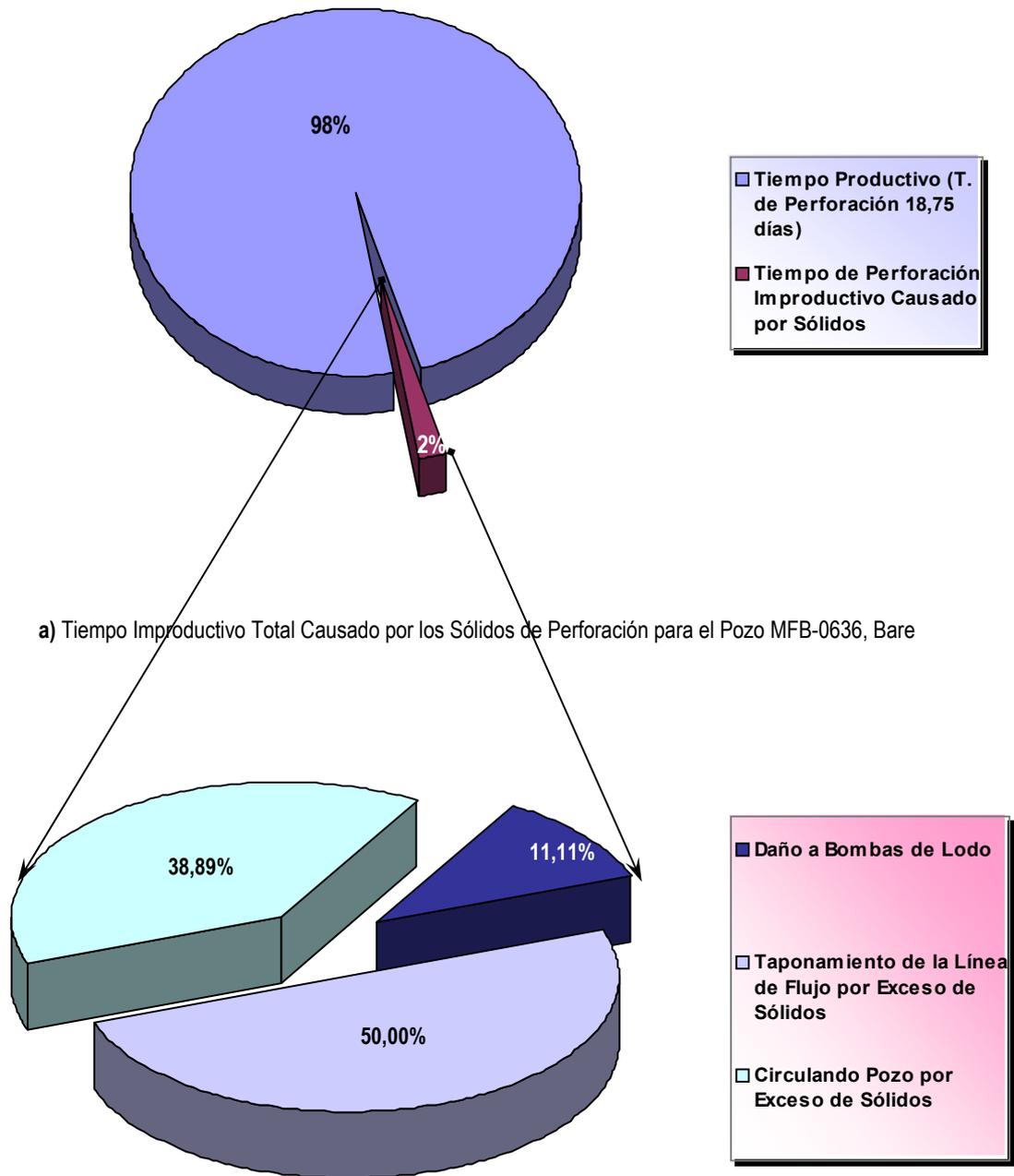


GRAFICO F.7 Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0636, Bare

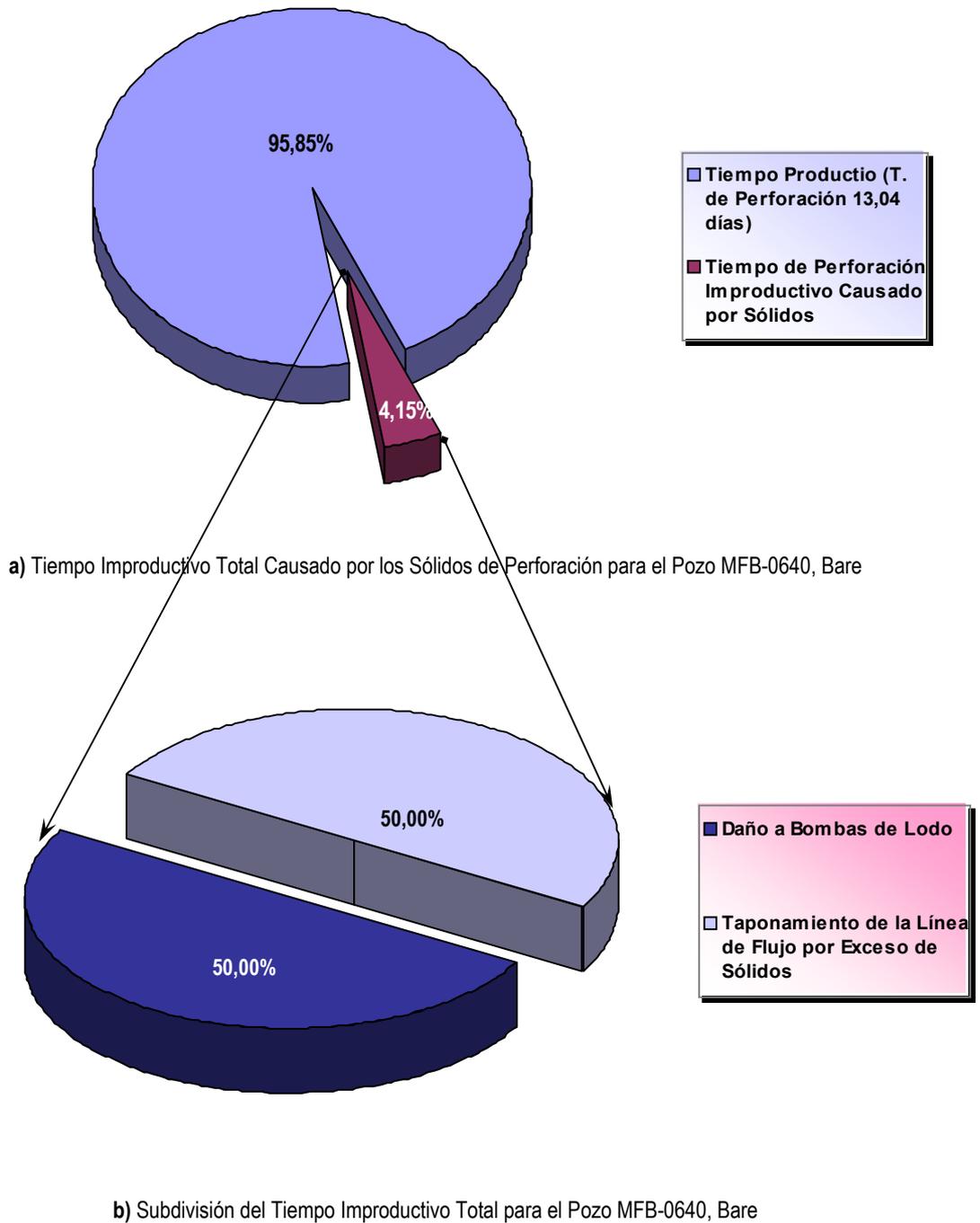


GRAFICO F.8 Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0640, Bare

POZO MFB-0623

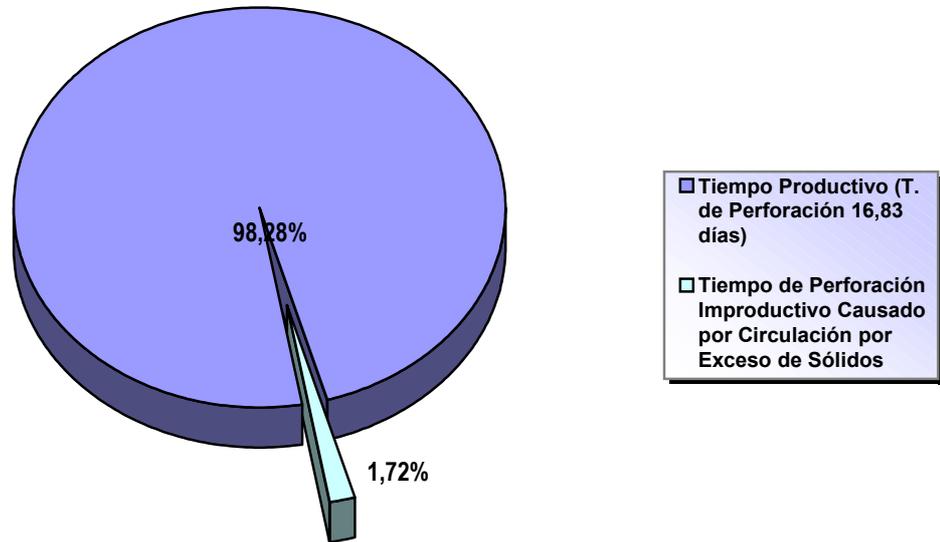


GRAFICO F.9 Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0623, Bare

POZO MFB-0637

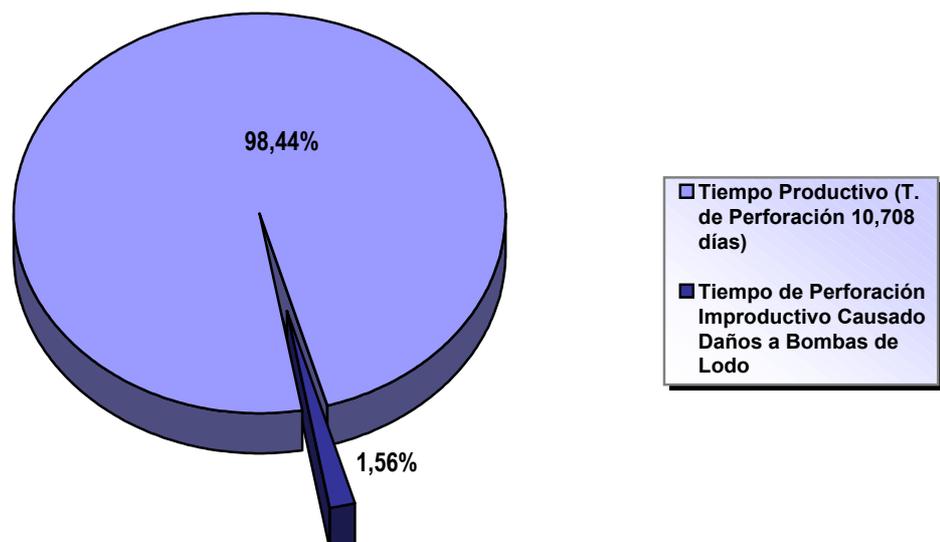


GRAFICO F.10 Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0637, Bare

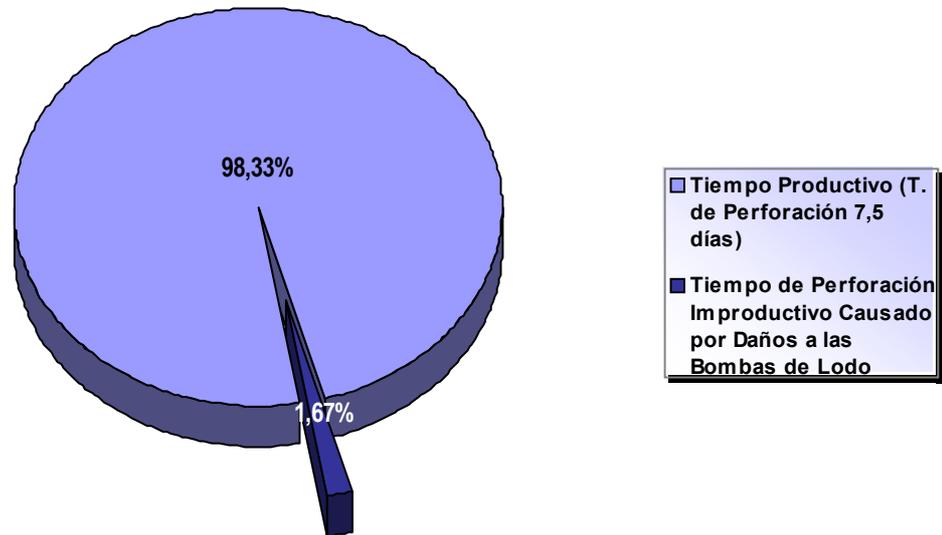


GRAFICO F.11 Análisis Porcentual de los Tiempos Productivos e Improductivos del Pozo MFB-0639, Bare

SISTEMAS PROPUESTOS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

SISTEMA # 1 Equipos utilizados en la perforación de pozos verticales en el Campo san Cristóbal (caso base).

- Zarandas de movimiento lineal,
- Unidad “Tres en uno”.
- Centrifuga Dual.

1.1. HOYO DE SUPERFICIE

TABLA G.1 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 1.1.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	285 - 300	84	196	≥ 5	7.60

TABLA G.2 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 1.1.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	16	37,6	150	106	≥ 5	5.30

TABLA G.3 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 1.1.

Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

1.2. HOYO INTERMEDIO.

TABLA G.4 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 1.2.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	285 - 300	84	196	≥ 5	7.60

TABLA G.5 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 1.2.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	18	39,2	150	112	≥ 5	5.30

TABLA G.6 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Baja y Alta) en el Caso 1.2.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

1.4 HOYO DE PRODUCCIÓN

TABLA G.7 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 1.3.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	300	150	106	≥ 5	7.60

TABLA G.8 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 1.3.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	12	34	175	112	≥ 5	5.30

TABLA G.9 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 1.3.

Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

SISTEMA # 2:

- Zarandas de movimiento lineal
- Unidad “Tres en uno”
- Sistema de doble centrifuga

2.1. HOYO DE SUPERFICIE

TABLA G.10 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 2.1.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	285 - 300	84	196	≥ 5	7.60

TABLA G.11 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 2.1.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	16	37,6	150	112	≥ 5	5.30

TABLA G.12 Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga de en el Caso 2.1.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

2.2. HOYO INTERMEDIO.

TABLA G.13 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 2.2.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	285 - 300	84	196	≥ 5	7.60

TABLA G.14 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 2.2.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	18	39,2	150	106	≥ 5	5.30

TABLA G.15 Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 2.2.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

2.3 HOYO DE PRODUCCIÓN

TABLA G.16 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 2.3.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	300	150	106	≥ 5	7.60

TABLA G.17 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 2.3.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	12	34	175	112	≥ 5	5.30

TABLA G.18 Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 2.3.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

SISTEMA # 3

- Zarandas de movimiento lineal
- Unidad gMAX
- Centrifuga Dual.

3.1 HOYO DE SUPERFICIE

TABLA G.19 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 3.1.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
4	225	84	196	≥ 5	5.30

TABLA G.20 Especificaciones para la Unidad gMAX en el Caso 3.1.

Número de Conos	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	37,6	150	106	≥ 5	5.30

TABLA G.21 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 3.1.

Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

3.2 HOYO INTERMEDIO.

TABLA G.22 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 3.2.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
4	225	84	196	≥ 5	5.30

TABLA G.23 Especificaciones para la Unidad gMAX en el Caso 3.2.

Número de Conos	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	39,2	150	106	≥ 5	5.30

TABLA G.24 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Baja y Alta) en el Caso 3.2.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

3.3. HOYO DE PRODUCCIÓN

TABLA G.25 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 3.3.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	225	150	106	≥ 5	5.30

TABLA G.26 Especificaciones para la Unidad gMAX en el Caso 3.3.

Número de Conos	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	39,2	175	115	≥ 5	5.30

TABLA G.27 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 3.3.

Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

SISTEMA # 4:

- Zarandas de movimiento lineal
- Unidad Tres en Uno
- Sistema de Doble Centrifuga.

4.1. HOYO DE SUPERFICIE

TABLA G.28 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 4.1.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
4	225	84	196	≥ 5	5.30

TABLA G.29 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 4.1.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	16	37,6	150	112	≥ 5	5.30

TABLA G.30 Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 4.1.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

4.2. HOYO INTERMEDIO.

TABLA G.31 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 4.2.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
4	225	84	196	≥ 5	5.30

TABLA G.32 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 4.2.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	18	39,2	150	106	≥ 5	5.30

TABLA G.33 Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 4.2.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

4.3. HOYO DE PRODUCCIÓN

TABLA G.34 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 4.3.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	225	150	106	≥ 5	5.30

TABLA G.35 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 4.3.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	12	34	175	112	≥ 5	5.30

TABLA G.36 Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 4.3.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

SISTEMA # 5:

- Unidad removedora de arcilla o "Scalper".
- Zarandas de movimiento lineal,
- Unidad "Tres en uno".
- Centrifuga Dual.

5.1. HOYO DE SUPERFICIE

TABLA G.37 Especificaciones para el Scalper en el Caso 5.1.

Capacidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ
1000	9 - 12	2000 - 1410

TABLA G.38 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 5.1.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	300	175	112	≥ 5	5.30

TABLA G.39 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 5.1.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	16	37,6	200	75	≥ 5	5.30

TABLA G. 40 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 5.1.

Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

5.2. HOYO INTERMEDIO.

TABLA G.41 Especificaciones para el Scalper en el Caso 5.2.

Capacidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ
1000	9 - 12	2000 - 1410

TABLA G.42 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 5.2.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	300	175	112	≥ 5	5.30

TABLA G.43 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 5.2.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	18	39,2	200	75	≥ 5	5.30

TABLA G.44 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Baja y Alta) en el Caso 5.2.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

5.3 HOYO DE PRODUCCIÓN

TABLA G.45 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 5.3.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
2	300	200	75	≥ 5	5.30

TABLA G.46 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 5.3.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	12	34	250	63	≥ 5	5.30

TABLA G.47 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 5.3.

Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

SISTEMA # 6:

- Unidad removedora de arcilla o "Scalper".
- Zarandas de movimiento lineal
- Unidad "Tres en uno"
- Sistema de doble centrifuga.

6.1. HOYO DE SUPERFICIE

TABLA G.48 Especificaciones para el Scalper en el Caso 6.1.

Capacidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ
1000	9 - 12	2000 - 1410

TABLA G.49 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 6.1.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	300	175	112	≥ 5	5.30

TABLA G.50 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 6.1.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	16	37,6	200	75	≥ 5	5.30

TABLA G.51 Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga de en el Caso 6.1.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

6.2. HOYO INTERMEDIO.

TABLA G.52 Especificaciones para el Scalper en el Caso 6.2.

Capacidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ
1000	9 - 12	2000 - 1410

TABLA G.53 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 6.2.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	300	175	112	≥ 5	5.30

TABLA G.54 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 6.2.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	18	39,2	200	75	≥ 5	5.30

TABLA G.55 Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 6.2.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

6.3 HOYO DE PRODUCCIÓN

TABLA G.56 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 6.3.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
2	300	200	75	≥ 5	5.30

TABLA G.57 Especificaciones para la Unidad Tres en Uno en el Caso 6.3.

Núm. de Conos 10"	Núm. de Conos 4"	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	12	34	250	63	≥ 5	5.30

TABLA G.58 Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 6.3.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

SISTEMA # 7

- Unidad removedora de arcilla o “Scalper”.
- Zarandas de movimiento lineal
- Unidad gMAX
- Centrifuga Dual.

7.1 HOYO DE SUPERFICIE**TABLA G.59 Especificaciones para el Scalper en el Caso 7.1.**

Capacidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ
1000	9 - 12	2000 - 1410

TABLA G.60 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 7.1.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	300	175	112	≥ 5	5.30

TABLA G.61 Especificaciones para la unidad gMAX en el Caso 7.1.

Número de Conos	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	37,2	175	115	≥ 5	5.30

TABLA G.62 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 7.1.

Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

7.2. HOYO INTERMEDIO.**TABLA G.63 Especificaciones para el Scalper en el Caso 7.2.**

Capacidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ
1000	9 - 12	2000 - 1410

TABLA G.64 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 7.2.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	300	175	112	≥ 5	5.30

TABLA G.65 Especificaciones para la unidad gMAX en el Caso 7.2.

Número de Conos	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	39,2	175	115	≥ 5	5.30

TABLA G.66 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Baja y Alta) en el Caso 7.2.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

7.3. HOYO DE PRODUCCIÓN

TABLA G.67 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 7.3.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
2	300	200	75	≥ 5	5.30

TABLA G.68 Especificaciones para la unidad gMAX en el Caso 7.3.

Número de Conos	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	34	175	115	≥ 5	5.30

TABLA G.69 Especificaciones para la Centrifuga Dual (Alta) en el Caso 7.3.

Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

SISTEMA # 8

- Unidad removedora de arcilla o “Scalper”.
- Zarandas de movimiento lineal
- Unidad gMAX
- Sistema de Doble Centrifuga.

8.1 Hoyo de Superficie**TABLA G.70 Especificaciones para el Scalper en el Caso 8.1.**

Capacidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ
1000	9 - 12	2000 - 1410

TABLA G.71 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 8.1.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	300	175	112	≥ 5	5.30

TABLA G.72 Especificaciones para la unidad gMAX en el Caso 8.1.

Número de Conos	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	37,2	175	115	≥ 5	5.30

TABLA G.73 Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 8.1.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

8.2. HOYO INTERMEDIO.

TABLA G.74 Especificaciones para el Scalper en el Caso 8.2.

Capacidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ
1000	9 - 12	2000 - 1410

TABLA G.75 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 8.2.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
3	300	175	112	≥ 5	5.30

TABLA G.76 Especificaciones para la unidad gMAX en el Caso 8.2.

Número de Conos	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	39,2	175	115	≥ 5	5.30

TABLA G.77 Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 8.2.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

8.3. HOYO DE PRODUCCIÓN

TABLA G.78 Especificaciones para las Zarandas en el Caso 8.3.

Cantidad de Zarandas	Capacidad por Unidad, gpm	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Procesamiento, ft ²
2	300	200	75	≥ 5	5.30

TABLA G.79 Especificaciones para la unidad gMAX en el Caso 8.3.

Número de Conos	Máx Presión de Entrada, lpc	Tamaño de Malla	Corte de la malla, μ	Fuerza G	Área de Proc. Malla, ft ²
2	34	175	115	≥ 5	5.30

TABLA G.80 Especificaciones para el Sistema de Doble Centrifuga en el Caso 8.3.

Baja	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	0 - 950	24 - 40	150	1000 G's
Alta	Velocidad de Rotación (RPM)	Diámetro del Tazón (pulg)	Capacidad (gpm)	Fuerza G
	1150 - 2500	24 - 40	150	3000 G's

VALIDACIÓN DEL PROGRAMA ECONÓMICO^[13]

TABLA H.1 Datos y Cálculos de Parámetros Operacionales del Ejemplo de Validación.

PARÁMETROS OPERACIONALES			
PARÁMETRO	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Volumen de Sólidos Generados	Vc	Ecuación 5.3.1	bbl
Volumen Inicial en los Tanques de Lodo	Vi	360	bbl
Volumen Final en los Tanques de Lodo	Vf	360	bbl
Volumen de Dilución Requerido	Vd	Ecuación 5.3.2	bbl
Volumen del Líquido de Desperdicio	Vlw	Ecuación 5.3.6	bbl
Volumen de Sólidos Húmedos de Desperdicio	Vsw	Ecuación 5.3.5	bbl
Volumen Total de Sólidos y Líquido de Desecho	Vt	Ecuación 5.3.4	bbl
Concentración Inicial de Sólidos Perforados en el Fluido	Ki	0	%
Máxima Concentración de Sólidos Perforados en el Fluido	Ks	6	%
Porcentaje de Sólidos Removidos por el Sistema	X	0; 10; 50; 80,7334	%
Máximo Porcentaje de Humedad en los Ripios Desechados	Y	100	%
Diámetro de la Sección Perforada	D	12,25	Pulgadas
Longitud de la Sección Perforada	L	1600	Pies
Factor de Ensanchamiento	W	10	%
Densidad del Fluido de Dilución	ρ^D	Ecuación 5.3.3	lpg
Densidad de los Cortes	ρ^C	21,68	lpg
Densidad del Fluido de Perforación al Inicio de la Sección	ρ^i	8,6	lpg
Densidad del Fluido de Perforación al Final de la Sección	ρ^e	9,4	lpg

TABLA H.2 Datos y Cálculos de Parámetros Económicos del Ejemplo de Validación.

PARÁMETROS ECONÓMICOS			
PARÁMETRO	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Costos por Dilución	C_D	5	\$/bbl
Costos por Disposición de Sólidos	C_{DS}	5,6	\$/bbl
Costos por Disposición de Líquidos	C_{DL}	3	\$/bbl
Costos de los Equipos del Sistema	C_E	0; 100; 500; 5000	\$
Costos de Adición/ Dilución	CD	Ecuación 5.3.7	\$
Costos por Disposición de Sólidos y Líquidos	CD_{SL}	Ecuación 5.3.8	\$
Costo Total	CT	Ecuación 5.3.9	\$

Para la realización de este ejemplo se tomaron varios casos de eficiencia de remoción de sólidos, parámetro X, con los cuales se establecieron las diferencias entre las consecuencias económicas de la utilización de diferentes sistemas de control de sólidos. De esta manera se validaron las ecuaciones expuestas en el capítulo 5, las cuales fueron montadas en Excel para facilitar la realización de los cálculos.

COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE REMOCIÓN DE SÓLIDOS^[13]

El Instituto Americano de Petróleo, API, recomienda en su apartado 13C un método para la evaluación de la eficiencia total del sistema procesador del fluido de perforación base agua. Como muchos otros análisis de comportamiento, este procedimiento depende de la información obtenida respecto al volumen de dilución. El procedimiento API usa el volumen de dilución de un intervalo dado para computar un factor de dilución, DF, el cual es la razón en volumen de la cantidad actual de lodo de adición, a la cantidad de lodo de dilución requerido para mantener la concentración de sólidos deseada en el caso en que no se tuviesen equipos de remoción de sólidos. El factor de dilución es usado para determinar la eficiencia de remoción total del sistema. Los parámetros necesarios para llevar a cabo los cálculos de eficiencia se muestran a continuación.

TABLA I.1 Parámetros para el Cálculo de la Eficiencia del Sistema de Control de Sólidos

PARÁMETRO	SIMBOLOGÍA	UNIDAD	TIPO DE PARÁMETRO
Agua Añadida	V_w	bbl	Dato
Fracción de Agua Presente en el Lodo	K_w	-	Dato
Volumen de Sólidos Perforados	V_c	bbl	Dato
Máxima Concentración de Sólidos en el Lodo	K_s	-	Dato
Volumen de Lodo de Adición	V_m	bbl	Cálculo
Volumen de Dilución sin E.C.S	V_d	bbl	Cálculo
Factor de Dilución	DF	-	Cálculo
Comportamiento de Remoción de Sólidos (Eficiencia)	E_t	%	Cálculo

1. Se calcula el volumen de lodo de adición, V_m :

$$V_m = \frac{V_w}{K_w}$$

..... Ecuación I.1

2. Seguidamente calculamos el volumen de sólidos perforados, V_c :

$$V_c = 0,000971 \cdot D^2 \cdot L \cdot W \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación I.2}$$

3. Cálculo del volumen de dilución requerido si no hay E.C.S, V_d :

$$V_d = \frac{V_c}{K_s} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación I.3}$$

4. Cálculo del factor de dilución, DF:

$$DF = \frac{V_m}{V_d} \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación I.4}$$

5. Cálculo de la Eficiencia de Remoción de Sólidos, E_t :

$$E_t = (1 - DF) \cdot 100 \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación I.5}$$

Mediante la utilización de estas ecuaciones se calculó la eficiencia de remoción de sólidos con la que operaban los equipos de control de sólidos durante la perforación del pozo NZZ-161 en el campo San Cristóbal. Se utilizó este pozo debido a que fue el único que se perforó recientemente en el Campo con características similares a las del presente proyecto en cuanto a profundidad y formaciones a atravesar. Los cálculos se realizaron tomando como datos la información obtenida mediante los reportes de fluido de la compañía de servicios encargada del mismo.

TABLA I.2 Datos de Cada Hoyo para el Cálculo de la Eficiencia por Sección Perforada

PARÁMETROS	HOYO DE SUPERFICIE	HOYO INTERMEDIO	HOYO DE PRODUCCIÓN
V_w	675 bbl	833 bbl	95 bbl
K_w	0.95	0.8	0.85
V_c	105,4 bbl	244,61 bbl	11,09
K_s	0.06	0.075	0,02
E_t	60 %	68 %	80 %

Con las eficiencias obtenidas para cada sección del pozo NZZ-161 se obtuvo un promedio de eficiencia de remoción de sólidos para el pozo de setenta por ciento, 70%, con el cual se puede tener una referencia de cuanto será la eficiencia promedio de cada sistema planteado para el estudio en curso, ya que el sistema de control de sólidos planteado como caso base (sistema uno), está compuesto por los equipos utilizados durante el último proyecto de perforación en el Campo San Cristóbal.

REGULACIONES AMBIENTALES**SERVICIO INTEGRAL DE CONTROL AMBIENTAL PARA POZOS EN EL
DISTRITO SAN TOMÉ**

En la siguiente sección se mencionarán todos los puntos resaltantes del servicio integral de control ambiental, pero solo se ahondará en aquellos puntos referentes a los sólidos de perforación, asumiendo que las consideraciones o regulaciones ambientales respecto a los fluidos de perforación son tratadas de manera diferente que las regulaciones para las descargas sólidas

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

El servicio de control ambiental consiste en el manejo, tratamiento y disposición final de residuos sólidos, semisólidos y líquidos durante las operaciones de construcción y mantenimiento de pozos, así como también la limpieza de tanques, tratamiento y disposición final de fluidos base agua, residuos líquidos impregnados con cemento y fluidos de perforación, generados estos durante las operaciones de cementación, el saneamiento de la locación durante la construcción y/o completación de pozos, de igual forma el saneamiento de la localización a la salida del equipo en el oriente del país.

A. Procesamiento de Residuos Sólidos o Semi – Sólidos.**A.1** El servicio incluye:

- Manejo de residuos (transporte y almacenamiento) en centro de acopio autorizado por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, M.A.R.N.
- Dosificación.
- Análisis físico – químico (laboratorio autorizado por el M.A.R.N.)
- Dispersión y aireación de la mezcla (incluye equipos).
- Siembra de la Cobertura (vegetación autóctona), cuando sea requerida.
- Personal técnico.

- Entrega de finiquito ambiental emitido por el M.A.R.N. y certificación de conformidad del mismo.

Las empresas de servicios ambientales deberán tramitar sus respectivos finiquitos ambientales, ante el M.A.R.N..

La entrega del finiquito o conformidad ambiental emitida por el M.A.R.N. a la unidad contratante, dará pie a la liberación de la retención de fiel cumplimiento.

Las empresas ambientales tramitarán con el ente rector, M.A.R.N., el tiempo y número de biotratamientos que en una misma parcela u área permitida se podrán aplicar, en el biotratamiento de residuos, de uno o varios proyectos o pozos y estos puedan recibir su respectivo finiquito, en los lapsos que fija la ley.

Las empresas de servicios ambientales, no podrán reutilizar áreas biotratadas para el tratamiento de nuevos residuos, sin la respectiva autorización del ente rector M.A.R.N.

Las áreas utilizadas en biotratamientos y no autorizadas por el M.A.R.N. para su reutilización, deberán consignar las recomendaciones emitidas por el M.A.R.N. y su aplicación, garantizándole al generador, el cumplimiento de las mismas, acción que debe ser certificada por la supervisión ambiental.

Informes periódicos de seguimiento y control deben ser suministrados tanto al ente rector M.A.R.N. como a la unidad contratante, cuando estos sean requeridos.

A.2 Tipos de residuos sólidos: Cortes de perforación, limpieza de fluidos, asentamiento de tanques y residuos de saneamiento de la locación.

A.3 Se aplicará una técnica de biotratamiento u otra avalada por el M.A.R.N. El procesamiento del residuo se hará en un **centro de acopio suministrado por la contratista**, este centro

debe estar debidamente permitido por el M.A.R.N. El costo unitario debe presentar su detalle (costos por tratamiento y costos por transporte). El transporte debe ser totalmente hermético y autorizado por el M.A.R.N., la empresa contratista, deberá de disponer y considerar en su oferta la posibilidad de utilizar contenedores herméticos para el transporte de residuos, y así garantizar su traslado a los centros de acopio, en el supuesto que las comunidades dispongan de asociaciones de volqueteros y estos no cuenten con su respectiva autorización del ente rector M.A.R.N., para el transporte de los mismos.

A.4 Es de hacer notar que deberán presentar el protocolo de pruebas acorde con la normativa ambiental para la técnica que aplicaran en el procesamiento y manejo de los residuos.

La contratista deberá cumplir con todo lo referente en la LEGISLACIÓN AMBIENTAL VIGENTE, presentando los resultados de por lo menos tres caracterizaciones u/o análisis para validar sus resultados, contenidos en el decreto 2635 en los artículos 50 y 53.

Conductividad eléctrica, pH , cloruros, densidad, aceites y grasas, salinidad, metales totales y lixiviados.

Esparcimiento: cortes con fluido base agua, se deben estimar dos caracterizaciones (cortes/fluido, suelo natural)

En fluido base aceite la muestra a tomar para la ejecución del biotratamiento, si es esta la técnica seleccionada, debe ser de al menos tres caracterizaciones.

Deben ser muestra homogénea de un (1) Kg. Para base agua y dos (2) Kg. Para las tres caracterizaciones en base aceite.

1. Suelo natural del área.
2. Cortes / residuos del inicio del proceso

3. Mezcla suelo / cortes al final

En los tratamientos para cortes base aceite se requiere de una caracterización final cuyo contenido sea menor o igual a 1% de aceites y grasas.

B. Procesamiento de Aguas Negras y Grises.

C. Procesamiento o Disposición de Aguas Residuales y Fluidos Base Agua.

D. Manejo de Efluentes.

E. Limpieza de Tanques y Saneamiento.

F. Aspectos Generales.

En términos generales el contratista deberá presentar un informe de cada fase, siete días después de finalizada la perforación, con todas las actividades pertinentes al Servicio de Control Ambiental. Debe incluir el monitoreo de volúmenes de adición de productos, propiedades, tratamientos, y otros parámetros de interés para la calidad del servicio. Al final de la construcción del pozo debe recopilar todos estos informes en el resumen final para ser entregados a la unidad contratante.

GUIA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS^[5,13]

K.1 GUÍA PARA LA OPERACIÓN APROPIADA DE LAS ZARANDAS

1. Montar y operar la zaranda de manera que esté nivelada.

Las capacidades de sólidos y volumen serán menores si la zaranda no está nivelada.

2. Proporcionar el voltaje y la frecuencia apropiados.

Un voltaje bajo reduce la vida útil del motor. Una frecuencia baja reduce el movimiento vibrante y la capacidad.

3. Asegurarse que el vibrador esté girando en la dirección apropiada, para la descarga correcta de sólidos.

La parte superior del eje debería girar hacia el extremo de descarga de sólidos.

4. Instalar los amortiguadores apropiados de apoyo de la malla, de conformidad con las instrucciones del fabricante.

Las mallas que rozan contra el acero se desgastan rápidamente. La dureza del caucho es crítica para que las mallas estén correctamente asentadas.

5. Asegurarse de tensionar las mallas correctamente, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

Si las mallas no están tensionadas correctamente, su vida útil se reducirá.

6. El tamaño de las mallas debería ser seleccionado de manera que el lodo cubra de 75 a 80% del área.

Esto permite usar la capacidad de la zaranda, dejando un área de reserva para manejar las sobrecargas.

7. Con las zarandas de múltiples cubiertas, se debe usar la combinación correcta de tamaños de malla.

En las zarandas divididas de múltiples mallas, el mismo tamaño de malla debería ser usado en todos los paneles.

8. Una manguera de agua (o aceite) debería ser proporcionada para lavar las mallas.

Todas las mallas se ciegan y se obturan hasta cierto grado. El lodo que se deposita en las mallas durante los viajes obturará temporalmente las aberturas de las mallas. Las mallas deberían ser lavadas cuando se interrumpe la circulación antes de realizar un viaje.

9. Ocasionalmente se usa un rocío de agua (o aceite) en las zarandas para facilitar la remoción de las partículas húmedas y pegajosas (“gumbo”) de la malla.

Este rocío nunca se debe usar continuamente. El rocío de agua diluye el lodo y elimina las pequeñas partículas a través de la malla, cuyas partículas, de no haber sido eliminadas, se hubieran adherido (“llevadas a cuestras”) a las partículas más grandes que son eliminadas en la zaranda.

10. Nunca contornear las mallas, incluso durante un viaje, a menos que el lodo contenga material de pérdida de circulación.

Una zaranda contorneada llena rápidamente la trampa de arena y elimina la capacidad de reserva para los sólidos grandes. El equipo de Remoción de sólidos ubicado corriente abajo no funcionará correctamente si sólidos de gran tamaño están circulando más allá de la zaranda. El hecho de contornear una zaranda causará la obturación del desarenador y deslimador. El lodo aportado de otra ubicación debería ser agregado al sistema de lodo activo solamente a través de la zaranda.

11. Lavar y monitorear las conexiones de las mallas de la zaranda.

Las mallas que tienen agujeros o rasgaduras deberían ser reemplazadas inmediatamente después de detectarse dichos defectos.

K.2 MANTENIMIENTO Y LOCALIZACIÓN DE ERRORES DE LOS SUPER CONOS (Operación Incorrecta y Causas Probables)

1. Ninguna descarga de sólidos húmedos en el vértice (fondo)

a) Abertura del fondo (vértice) obturada:

Apagar la unidad. Soltar el ajuste inferior. Empujar una varilla desde la abertura del fondo hacia arriba, para remover el lodo seco o aglomerado. Si esto no da resultados, retirar la tapa del cono y quitar el objeto que está obstruyendo el vértice. Asegurarse que el lodo no esté contorneando la zaranda. Ajustar de nuevo el fondo y volver a colocar la tapa de los conos.

b) Presión de alimentación (cabeza hidrostática) demasiado alta:

Ajustar la presión de cabeza correcta, o 75 ± 5 ft, usando un manómetro preciso.

c) Lodo sin partículas los conos pueden eliminar en la descarga:

Si la perforación es muy lenta o si la unidad está funcionando durante un viaje, la remoción puede aproximarse a cero en el flujo que sale por abajo y la unidad debería ser apagada y sólo debe ser operada periódicamente.

d) Tobera de admisión, buscador de vértice o diámetro interno de los conos desgastado:

Retirar y examinar el cono para determinar si está excesivamente desgastado. Reemplazarlo si existe alguna duda en lo que se refiere a su estado.

e) Conos incorrectamente instalado:

Retirar y examinar el cono, e instalarlo de nuevo de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

2. Gran descarga de líquido a través del vértice (fondo)

a) Presión de alimentación (cabeza hidrostática) demasiado baja:

Examinar el tubo de succión de la bomba para determinar si hay alguna obstrucción, si el nivel del líquido es inadecuado para la succión de la bomba, o si está entrando aire por el tubo de succión. Examinar las paletas de la rueda móvil de la bomba para determinar si están desgastadas y si son del tamaño correcto. Examinar la descarga de la bomba para determinar si

el múltiple está correctamente encaminado hacia una sola unidad de control de sólidos de los conos. Verificar el estado del empaque de la bomba y la alineación-espacio libre de la rueda móvil de la bomba. Asegurarse que el compartimento de succión de la bomba esté equilibrado por el fondo con el compartimento de descarga del flujo que sale por arriba ubicado corriente abajo.

- b)** Tobera de admisión de los conos obturada, resultando en una presión de alimentación inadecuada:

Retirar y examinar los conos, quitando cualquier objeto que esté obturando la tobera de admisión. Si la obturación de la alimentación ocurre frecuentemente, examinar cuidadosamente la zaranda para determinar si los recortes la están contorneando, y las mallas para detectar cualquier agujero/rasgadura. Instalar una malla de succión en la bomba centrífuga. No contornear la zaranda.

- c)** Buscador de vértice obturado, causando una contrapresión en el conos:

Retirar y examinar los conos, quitando cualquier objeto que esté obturando el tubo vertical. Si la obturación de la alimentación ocurre frecuentemente, examinar cuidadosamente la zaranda para determinar si los recortes la están contorneando, y las mallas para detectar cualquier agujero/rasgadura. Instalar una malla de succión en la bomba centrífuga. No contornear la zaranda.

- d)** Tobera de admisión, buscador de vértice o DI de conos desgastado:

Retirar y examinar los conos para determinar si está excesivamente desgastado. Reemplazar los conos si existe alguna duda en lo que se refiere a su estado.

- e)** Conos incorrectamente instalado:

Retirar y examinar los conos, e instalarlo de nuevo de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

3. Obturación de los conos

a) Cabezal de alimentación (que alimenta las toberas de admisión de los conos) obturado: Apagar la bomba de alimentación, retirar el tapón ciego del extremo del cabezal de admisión y quitar la obstrucción. Volver a colocar el tapón ciego y encender de nuevo la bomba después de examinar la malla de succión. No contornear la zaranda.

b) Conos sobrecargado (descarga tipo sogá):

Se requiere una mayor capacidad de control de sólidos. El sistema de remoción de sólidos no puede manejar las velocidades de perforación y/o las cargas de sólidos excesivas.

4. Fluctuación de la cabeza hidrostática de admisión

a) Succión de la bomba obstruida:

Examinar la succión de la bomba para determinar si hay alguna obstrucción, lodo cortado por gas o espuma. Controlar el estado general de la bomba y las tuberías.

K.3 PAUTAS PARA LA OPERACIÓN CORRECTA DE LAS CENTRÍFUGAS DECANTADORAS

1. No operar la centrífuga sin **el recubrimiento del ensamblaje rotatorio y las correas de seguridad** sujetadas.
2. Primero, hacer girar el tazón con la mano para asegurarse de que tenga un movimiento “libre” (sin arrastre).
3. No operar la unidad si aparece algún ruido o vibración inusual; lubricar los cojinetes de conformidad con las recomendaciones del proveedor (típicamente cada 8 horas de operación).
4. Dejar que la unidad alcance la velocidad rotacional deseada **antes** de encender la bomba de alimentación.
5. No sobrecargar (“amontonar”) la centrífuga.
Síntomas:
 - El acoplamiento de torque de seguridad se desprende frecuentemente
 - La unidad se obtura rápidamente.
 - Cantidad “excesiva” de material densificante en el flujo que sale por arriba.
 - Rechazo de sólidos “húmedos” de la unidad.
6. Los fluidos muy densificados y viscosos requieren velocidades de alimentación más bajas y tasas de dilución más altas.
7. Asegurarse que una agitación apropiada esté disponible en la succión de la bomba centrífuga y en el tanque de retorno de barita.
8. Acordarse de cerrar el suministro de líquido de dilución una vez que la centrífuga ha sido apagada.

9. Revisar los procedimientos de arranque y parada; si no son adecuados, notificar al proveedor.

10. Si aparece algún problema incomprensible, llamar a un técnico especializado en centrífugas antes de intentar cualquier reparación.