

UNIVERSIDAD DE MATANZAS

“Camilo Cienfuegos”



FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Trabajo de diploma

En opción al título de Ingeniero Químico

**EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS TECNOLÓGICOS
DEL PROCESO DE CEMENTACIÓN DE CAMISAS DE
REVESTIMIENTO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE.**

Autora: Mariangela Lorenzo Hernández.

Tutores: MSc. Irina Pedroso Rodríguez.

Ing. Eduardo J. Berrio Turiño.

Lic. Yadira Cuesta Noroña.

Consultante: Dr.C. Liz Pérez Martínez

Matanzas, 2022

Declaración de Autoridad y Nota Legal

Yo, Mariangela Lorenzo Hernández, declaro que soy la única autora del siguiente Trabajo de Diploma, titulado: *Influencia de los parámetros tecnológicos del proceso de cementación de camisas de revestimiento sobre el medio ambiente*, y en virtud de tal, cedo el derecho del mismo a la Universidad de Matanzas, bajo la licencia *Creative Commons* de tipo *Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada*, con lo cual se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de la obra y no realice ninguna modificación en ella.

Matanzas, 30 de noviembre de 2022.

Mariangela Lorenzo Hernández

Nota de Aceptación

Pensamiento

*“Emplearse en lo estéril cuando se puede hacer lo útil;
ocuparse en lo fácil cuando se tienen bríos para intentar lo
difícil, es despojar de su dignidad al talento.”*

José Martí



Dedicatoria

*A la niña que vive en mí,
nuestro más grande sueño se está cumpliendo.*

*A mi familia,
por ayudarme a mantener viva la ilusión del primer día.*

Agradecimientos

Doy gracias a Dios por iluminar, bendecir y guiar mi camino.

A mis padres, Gloria y Juan R., por sus consejos, compañía y apoyo incondicional, sin ellos no sería quien soy. Gracias por alimentar mi curiosidad y ansías por aprender, por darme la confianza y el coraje para seguir mis sueños, por dejarme experimentar los altibajos de la vida dejándome saber que siempre estarían ahí para mi si los necesitaba, por impulsarme a ser independiente; por construir unos fuertes cimientos donde refugiarme.

A mis hermanos, Anita, Juampi, Jose y Reino (el nene), por ser fuentes inagotables de alegría y desazón. Por impulsarme a ser mejor, a luchar por mis creencias y a nunca rendirme.

A mis amigos de toda la vida, Rachel (Carla), Rachel (la R) y Carlitos, por hacer de mi mundo un lugar más hermoso, amplio, acogedor y lleno de aventuras. A las químicas del 143, Annia (Babyboo), Kris, Kiaruchi, Mari y Nai, porque más que amigas han sido mis hermanas durante estos cuatro años de continuo esfuerzo y aprendizaje, porque a pesar de que no podemos ser más diferentes, he descubierto en ustedes un hogar fuera de mi hogar.

Al profe Damián, gracias a su pasión por la química me enamoré de ella y elegí esta carrera. A mi facultad, al maravilloso departamento de Ingeniería Química, por sus constantes esfuerzos para preparar a la siguiente generación de profesionales, en especial a mi tutora Irina y colaboradores Liz y Eduardo, por ayudarme a convertir una vaga idea en este proyecto de tesis. A los profesores Santiago, Orozco, Ena, Caridad y Yamilé, por abonar mi amor por la ingeniería química.

A Gilmery, por su apoyo al ayudarme a discernir mi futuro profesional. A Yadira y Martica, de EMPERCAP, por su invaluable colaboración y apoyo durante la elaboración de este proyecto. A todos los compañeros de la DSTPIP, por sus pacientes explicaciones, tiempo y trabajo, por todo su apoyo.

Y finalmente a cada persona de mi familia, amigos y compañeros, que me han acompañado y apoyado durante mi vida de una manera u otra, Muchas Gracias.

Resumen

La División de Servicios Técnicos a la Perforación e Intervención de Pozos se encuentra ubicada en La Finca La Cachurra, Guácimas. Los trabajos que ejecuta están certificados de calidad, sin embargo, el proceso de cementación de camisas de revestimiento no cuenta con el Reconocimiento Ambiental Territorial. Un desbalance en sus parámetros tecnológicos trae consecuencias al medio ambiente por lo que se plantea determinar el estado general de funcionamiento del proceso a través de un índice sintético y su impacto al medio ambiente. Al aplicar el índice este evaluó el proceso como Regular. Este proceso se aplica para los diferentes agujeros en la perforación. Los parámetros tecnológicos medidos en el proceso son Densidad, Caudal, Volumen y Presión, fueron evaluados como Mal, Bien, Bien y Bien respectivamente; y agrupados en indicadores: Indicador 1 – Densidad – Mal, Indicador 2 – Caudal y Volumen – Bien e Indicador 3 – Presión – Bien. Las principales causas que afectan los parámetros operacionales son equipos, mantenimiento, mano de obra, mediciones y material. Los principales impactos ambientales que provoca el proceso son la contaminación de agua en el subsuelo, liberación de gases tóxicos y modificación de la formación.

Abstract

The Well Drilling and Intervention Technical Services Division is located in the farm La Cachurra, Guacimas. The works that the division executes are quality certified; however, the casing cementation process doesn't have the Territorial Environmental Recognition. An imbalance in its technological parameters brings consequences to the environment, so it is proposed to determinate the general state of operation of the process through a synthetic index and its impact on the environment. When applying the index, it evaluated the process as Regular. This process is applied for the different holes in the perforation. The technological parameters measured in the process are Density, Flow, Volume and Pressure, they were evaluated as Bad, Good, Good and Good respectively; and grouped into indicators: Indicator 1 – Density – Bad, Indicator 2 – Flow and Volume – Good and Indicator 3 – Pressure – Good. The main causes that affect the operational parameters are equipment, maintenance, labor, measurements and material. The main environmental impacts caused by the process are the contamination of subsoil water, the release of toxic gases and modification of the formation.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1. Análisis Bibliográfico	4
1.1 Cementaciones.....	4
1.1.1 Cemento Portland	5
1.1.2 Aditivos, herramientas y equipamiento auxiliar.....	8
1.1.3 Lechada de cemento	12
1.1.4 Integración del proceso de cementación de camisas de revestimiento.....	14
1.1.5 Pozos Horizontales	16
1.3 Contaminación ambiental empresarial	17
1.2 Control de proceso	20
1.2.1 Índices sintéticos	20
1.2.2 Diagrama causa-efecto	22
1.3 Conclusiones Parciales	23
Capítulo 2: Materiales y Métodos	24
2.1 Descripción tecnológica del proceso de cementación de camisas de revestimiento en la DSTPIP	24
2.1.1 Procedimiento de trabajo de la cementación 1 ^{era} Etapa.....	25
2.1.2 Procedimiento de trabajo de la cementación 2 ^{da} Etapa	27
2.2 Herramientas estadísticas	29
2.2.1 <i>Software Statgraphics</i>	29
2.2.2 <i>Software R</i>	30
2.3 Metodología para la construcción del índice sintético	31
2.3.1 Fase 1. Integración y análisis de los datos.....	31
2.3.2 Fase 2. Construcción del índice.....	32
2.4 Metodologías para la utilización del Diagrama Causa-Efecto	32

Capítulo 3. Análisis de los Resultados	37
3.1 Resultados de la caracterización estadística de los parámetros tecnológicos.....	37
3.1.1 Resultados de la caracterización estadística, variable Densidad	37
3.1.2 Resultados de la caracterización estadística, variable Caudal	40
3.1.3 Resultados de la caracterización estadística, variable Presión	44
3.1.4 Resultados de la caracterización estadística, variable Volumen	47
3.2 Resultados de la aplicación de la metodología para evaluar el estado global del proceso tecnológicos	51
3.2.1 Resultados de la implementación del índice.....	51
3.2.2 Resultados del método de estratificación	56
3.3 Conclusiones parciales	63
Conclusiones.....	64
Recomendaciones	65
Referencias Bibliográficas.....	
Anexos	

Introducción

En el Informe Regional sobre Desarrollo Humano para América Latina y el Caribe titulado *Progreso multidimensional: bienestar más allá del ingreso* se precisa entre múltiples aspectos que: “nada que disminuya los derechos de las personas y las comunidades, ni nada que amenace la sostenibilidad ambiental del planeta, puede considerarse progreso”. Es por ello que resulta imprescindible llevar a cabo prácticas coherentes y amigables con el medio ambiente desde una perspectiva multidimensional y holística (Zabala & Fundora, 2018).

La contaminación del medioambiente, en términos científicos, es la impregnación del aire, el agua o el suelo con productos que afectan la salud del hombre, la calidad de vida o el funcionamiento natural de los ecosistemas (Fernández *et al.*, 2015).

En Cuba, la conservación del medioambiente y la protección de los recursos naturales se realizan sobre fundamentos científicos; se elaboran y aplican normas técnicas que contemplan la dimensión ambiental y se crean las bases para desarrollar los sistemas de gestión para la preservación ambiental, diseñando procedimientos basados en las normas internacionales ISO 14000. Todo esto ha contribuido a avanzar en la instrumentación de políticas y acciones concretas al respecto, como la integración de la gestión para el cuidado ambiental a la gestión de la calidad y el establecimiento de un Sistema Nacional de Reconocimiento Ambiental para estimular a aquellas entidades que logren un mejoramiento interno en su desempeño para la protección ambiental (Salas *et al.*, 2020).

La realidad cubana, al igual que la de otros países en desarrollo, no está exenta de continuas transformaciones en el medio ambiente, por lo que se hace necesario adaptarse y/o mitigar sus impactos negativos. La gestión ambiental local integrada constituye el cimiento obligado de cualquier intento de construcción sostenible, aspecto que se evidencia en una de las prioridades de la Estrategia Ambiental Nacional definida por el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), así como la voluntad política expresada en el Plan de Estado para el enfrentamiento al cambio climático, conocido como Tarea Vida (Zabala & Fundora, 2018).

Durante el siglo XX, aumenta en cuatro veces la población mundial, superando los 5 mil millones de habitantes, mientras que el volumen de producción global a comienzos del nuevo

milenio es veinte veces mayor que en 1900. En la actualidad, el consumo de combustibles fósiles es treinta veces superior al de ese entonces, aumentando aceleradamente en las últimas décadas (Zaror, 2000).

La Unión Cuba-Petróleo (CUPET) perteneciente al Ministerio de Energía y Minas tiene el propósito de realizar sus actividades de forma compatible con el medio ambiente, pues la producción de bienes materiales y servicios constituye la esencia del sistema de relaciones que se establecen entre la sociedad y la naturaleza, lo que determina que la sociedad se comporte como generadoras de alteraciones en los ecosistemas y a la vez, como receptora de las consecuencias por las modificaciones antrópicas introducidas en ellas. Cuba se ha propuesto mantener un desarrollo sostenible, que involucre a las generaciones futuras y estimular el desarrollo socioeconómico del país con la preservación del medio ambiente (EMPERCAP, 2021).

En diciembre de 2017 gracias a cambios legislativos, nuevas formas de gestión y la necesidad de fomentar el desarrollo territorial la Empresa de Perforación y Reparación Capital de Pozos de Petróleo y Gas (EMPERCAP), Subordinada a la Unión CUPET, definió su Sistema de Gestión Ambiental, este establece como política, la prestación y mejora continua de los servicios aprobados en su objeto social, teniendo en cuenta la protección del medio ambiente y el uso sostenible de los recursos naturales, con particular atención al cumplimiento de la legislación ambiental vigente y la ejecución de acciones orientadas a la mitigación y adaptación al cambio climático y la prevención y control de la contaminación. Tras una ardua labor alcanzaron el Aval Provincial y ostentan el Premio Provincial de Medio Ambiente.

La División de Servicios Técnicos a la Perforación e Intervención de Pozos (STPIP), ubicada dentro del condominio petrolero en La Finca La Cachurra, Guácimas, Cárdenas, Matanzas, se encuentra certificada de calidad, sin embargo, todas las actividades desarrolladas en ella no cuentan con el Reconocimiento Ambiental Territorial (RAT).

El proceso de cementación de camisas de revestimiento no cuenta con el RAT. Este es un proceso considerablemente complejo debido a las condiciones económicas del país, además conlleva una serie de riesgos ambientales y humanos de importancia, un desbalance en los parámetros tecnológicos podría traer consecuencias catastróficas al medio ambiente.

Teniendo en consideración los elementos expuestos con anterioridad, se formula el siguiente **problema científico de la investigación**:

¿Cómo influye el estado global de los parámetros tecnológicos del proceso de cementación de camisas de revestimiento sobre el medio ambiente?

Para dar solución al problema científico se propone la siguiente **hipótesis de trabajo**:

Si se identifican, caracterizan y evalúan los parámetros tecnológicos del proceso de cementación de camisas de revestimiento se podrá determinar el estado global de funcionamiento del proceso.

Para dar cumplimiento a la hipótesis planteada con anterioridad se ha trazado el siguiente **objetivo general** de la investigación:

- Determinar el estado general de funcionamiento del proceso de cementación de camisas de revestimiento a través de un índice sintético y su impacto en el medio ambiente.

A continuación, se plantean los siguientes **objetivos específicos** de la investigación:

- Realizar un análisis bibliográfico sobre el proceso de cementación de camisas de revestimiento, gestión medioambiental e índices sintéticos.
- Caracterizar el proceso tecnológico de cementación.
- Evaluar los parámetros tecnológicos del proceso de cementación.
- Determinar el estado global del proceso.
- Determinar las causas que afectan el estado global del proceso y su impacto al medio ambiente.

Capítulo 1. Análisis Bibliográfico

En este capítulo se presenta las bases conceptuales de la investigación, como resultado de la revisión bibliográfica realizada. Se abordan las etapas del proceso de cementación de camisas de revestimiento, las clases de cementos y aditivos; los sistemas de gestión ambiental, indicadores, índices sintéticos y diagrama de causa y efecto.

1.1 Cementaciones

Las cementaciones son las operaciones con lechada de cemento que se efectúan con fines específicos en los pozos petroleros. Se clasifican según su objetivo en Cementación primaria y Cementación remediadora (Cementación forzada y Tapones de cemento).

La cementación primaria es el proceso que consiste en colocar lechada de cemento en el espacio anular, entre la tubería de revestimiento y la formación expuesta del agujero, asegurando un sello completo y permanente (Arjomand, 2018). Desde 1903, el principal objetivo de la cementación primaria ha sido proporcionar aislamiento entre las zonas del pozo que contienen aceite, gas, y agua. Para lograr este objetivo, debe ser creado un sello hidráulico entre la tubería de revestimiento y la lechada de cemento, y entre este y la formación, al mismo tiempo previniendo canalizaciones en la capa de cemento (Anexo 1) (Nelson, 2006). Este requerimiento convierte a la cementación primaria en la operación más importante realizada en un pozo. Sin el completo aislamiento del agujero, el pozo podría nunca alcanzar todo su potencial productor (Kamenskih *et al.*, 2018).

Cuando el pozo alcanza la profundidad deseada, la tubería de perforación es removida, y una camisa de revestimiento de mayor diámetro es pasada hasta el fondo del pozo. En este punto, el lodo de perforación está todavía en el agujero. Este lodo debe ser removido y remplazado por la lechada de cemento. El proceso más común utilizado para lograrlo es el método de los dos tapones (Anexo 2). Este método fue usado por primera vez en 1910 en pozos poco profundos en California. Para prevenir la contaminación por lodo, dos tapones aíslan la lechada mientras es bombeada por la camisa. Suficiente lechada de cemento es bombeada en la camisa para rellenar el espacio anular de la columna desde el fondo hasta al menos el tope de la zona productiva. Usualmente, la lechada de cemento es acarreada hasta localizaciones altas para excluir otros fluidos indeseables del agujero del pozo, para proteger zonas de manantiales, y proteger la camisa de revestimiento de la corrosión. El proceso de

cementación es completado cuando la presión incrementa en la superficie indicando que el tapón superior ha llegado al *float collar* y el desplazamiento con lodo o agua ha terminado. El pozo es cerrado por un tiempo para permitir el fraguado de la lechada de cemento antes de completar el trabajo o continuar taladrando una nueva zona. Los pozos son más profundos en la actualidad, 9 000 metros o más, a pesar de los avances tecnológicos y los cambios en las cementaciones, el método básico de dos tapones permanece predominante (Nelson, 2006). La cementación remediadora consiste en dos amplias categorías: cementación forzada y tapones de cemento. La cementación forzada es el proceso de colocar lechada de cemento dentro del agujero del pozo bajo suficiente presión hidráulica para deshidratar parcialmente o expulsar el agua de la lechada, dejando una cementación competente que se fraguará y sellará todos los espacios (Anexo 3). Tapones de cemento (Anexo 4) es la colocación de volúmenes limitados de lechada de cemento en lugares específicos dentro del agujero del pozo para crear un sello sólido o tapón (Yugay *et al.*, 2019).

Las operaciones de cementación remediadora son utilizadas por varias razones: para reparar trabajos de cementación primaria defectuosos, alterar las características de la formación, reparar problemas en la camisa de revestimiento y para abandonar pozos (Anexo 5) (Yousuf *et al.*, 2021). Ambas operaciones requieren tanta experiencia técnica, ingenieril y operacional como cualquier cementación primaria (Lucas *et al.*, 2018).

1.1.1 Cemento Portland

El cemento es una mezcla compleja de caliza (u otros materiales con alto contenido en carbonato de calcio), sílice, fierro y arcilla, molidos y calcinados, que al entrar en contacto con el agua forma un cuerpo sólido (Rodríguez, 2019). Esta mezcla de ingredientes se muele, se calcina en hornos horizontales con corriente de aire y se convierte en *Clinker*, el cual contiene todos los componentes del cemento, excepto el sulfato de calcio, que se le agrega como ingrediente final (Anexo 6) (Neto *et al.*, 2021).

Los componentes que forman el cemento son óxidos superiores de oxidación lenta. Esto significa que terminan su grado de oxidación al estar en contacto con el aire al enfriarse.

De todos los cementos, el *Portland* es el más importante en cuanto a términos de calidad. Es el material idóneo para las operaciones de cementación de pozos. Algunos cementos *Portland* son de fabricación especial, debido a que las condiciones de los pozos difieren

significativamente entre sí al variar su profundidad. En la solución de algunos problemas específicos de pozos se utilizan cementos de menor uso (Ingeniería de Cementaciones).

El cemento *Portland* es, además, el ejemplo típico de un cemento hidráulico: fragua y desarrolla resistencias a la compresión como resultado de la hidratación, la cual involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento. El fraguado y endurecimiento no solamente ocurre si la mezcla de cemento y agua se deja estática al aire, también se presenta si la mezcla se coloca en agua. El desarrollo de resistencia es predecible, uniforme y relativamente rápido (Nwankwo *et al.*, 2020). La lechada de cemento fraguada tiene baja permeabilidad y es insoluble en agua, de tal forma que expuesto a ésta no se destruyen sus propiedades. Tales atributos son esenciales para que una lechada de cemento obtenga y mantenga el aislamiento entre las zonas del subsuelo (Tabatabaei & Taleghani, 2020).

Principales compuestos del cemento y sus funciones (Jolicoeur & Simard, 1998):

- Silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) habitualmente conocido como C_3S . Es el componente más abundante en la mayoría de los cementos y, además, el factor principal para producir la consistencia temprana o inmediata (1 a 28 días). Generalmente, los cementos de alta consistencia inmediata contienen en mayor concentración este compuesto; más que el Portland común y los retardados.
- Silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) habitualmente conocido como C_2S . Compuesto de hidratación lenta que proporciona la ganancia gradual de resistencia. Ocurre en un período largo: después de 28 días.
- Aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) habitualmente conocido como C_3A . Tiene influencia en el tiempo de espesamiento de la lechada. Es responsable de la susceptibilidad al ataque químico de los sulfatos sobre los cementos. Esta susceptibilidad se clasifica en moderada y alta resistencia al ataque químico, cuando contienen este compuesto en 8 y 3% respectivamente.
- Alúmino ferrito tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) habitualmente conocido como C_4AF . Este compuesto es de bajo calor de hidratación y no influye en el fraguado inicial.

Los cementos *Portland* son manufacturados para cumplir con ciertos estándares químicos y físicos de los que depende su aplicación. Para promover la consistencia de su rendimiento

entre los fabricantes, fueron establecidos sistemas de clasificación y especificaciones por varios grupos de consumidores. Los sistemas más conocidos son ASTM International (antiguamente *the American Society for Testing and Materials*) (ASTM C 150, *Standard Specification for Portland Cement*) que se refieren al tipo de cemento y API (API Spec 10A, *Specification for Cements and Materials for Well Cementing*) que se refiere a la clase de cemento. Las Normas API han sido adoptadas por las normas ISO como *Standard 10426-1, Petroleum and natural gas industries - Cements and materials for well cementing - Part 1: Specification* (Nelson, 2006).

Clasificaciones API y ASTM de los cementos (Smith, 1990):

- Cemento clase A o tipo I: está diseñado para emplearse a 1830 m de profundidad como máximo, con temperatura de 77 °C, y donde no se requieran propiedades especiales.
- Cemento clase B o tipo II: diseñado para emplearse hasta a 1830 m de profundidad, con temperaturas de hasta 77 °C, y en donde se requiere moderada resistencia a los sulfatos.
- Cemento clase C o tipo III: está diseñado para emplearse hasta 1830 m de profundidad como máximo, con temperatura de 77 °C, donde se requiere alta resistencia a la compresión temprana; se fabrica en moderada y alta resistencia a los sulfatos.
- Cemento clase D: este cemento se emplea de 1830 hasta 3050 m de profundidad con temperatura de hasta 110 °C y presión moderada. Se fabrica en moderada y alta resistencia a los sulfatos.
- Cemento clase E: este cemento se usa de 1830 hasta 4270 m de profundidad con temperatura de hasta 143 °C y alta presión. Se fabrica en moderada y alta resistencia a los sulfatos.
- Cemento clase F: este cemento se usa de 3050 hasta 4880 m de profundidad con temperatura de 160 °C, en donde exista alta presión. Se fabrica en moderada y alta resistencia a los sulfatos.
- Cementos clase G y H: comúnmente conocidos como cementos petroleros, son básicos para emplearse desde la superficie hasta 2240 m tal como se fabrican. Pueden modificarse con aceleradores y retardadores para usarlos en un amplio rango de condiciones de presión y temperatura. En cuanto a su composición química son

similares al cemento API clase B. Están fabricados con especificaciones más rigurosas tanto físicas como químicas, por ello son productos más uniformes.

- Cemento clase J: se quedó en fase de experimentación y fue diseñado para usarse a temperatura estática de 177 °C de 3660 a 4880 m de profundidad, sin necesidad del empleo de harina sílica, que evite la regresión de la resistencia a la compresión.

1.1.2 Aditivos, herramientas y equipamiento auxiliar

Los sistemas de cemento Portland para cementación de pozos son rutinariamente diseñados para trabajar en rangos de temperatura desde el punto de congelación en zonas permanentemente congeladas hasta 350 °C en recuperación térmica y pozos geotérmicos. Las lechadas de cemento se pueden encontrar entre rangos de presión desde casi ambiente en pozos poco profundos hasta más de 200 MPa en pozos profundos (Thakkar *et al.*, 2019). En adición a las severas temperaturas y presiones, las lechadas de cemento regularmente deben ser diseñadas para afirmar formaciones débiles o porosas, fluidos corrosivos, y formaciones con fluidos presurizados. Los aditivos de cementación hacen posible acomodar tan amplio rango de condiciones (Mitra & Boruah, 2022). Los aditivos modifican el comportamiento del cemento, idealmente permitiendo una colocación exitosa de la lechada entre la camisa y la formación, un desarrollo rápido de la resistencia compresiva, y un adecuado aislamiento durante el tiempo de vida del pozo (Aslani *et al.*, 2022). Hoy en día existen más de 100 aditivos para cementos petroleros, muchos de los cuales pueden ser obtenidos en formas líquidas o sólidas. Existen ocho categorías mayores de aditivos (Cadix & James, 2022).

Categorías de los aditivos y sus funciones:

- Aceleradores: son productos químicos que reducen el tiempo de fraguado de los sistemas de cemento. Incrementan la velocidad de desarrollo de resistencia compresiva.
- Retardadores: son productos químicos que prolongan el tiempo de fraguado de los sistemas de cemento.
- Extendedores: son materiales que bajan la densidad de los sistemas de cemento y/o reducen la cantidad de cemento por unidad de volumen del producto fraguado.
- Densificantes: son materiales que incrementan la densidad de los sistemas de cemento.

- Dispersantes: son productos químicos que reducen la viscosidad de las lechadas de cemento.
- Controladores de filtrado: son materiales que controlan la pérdida de la fase acuosa de los sistemas de cemento, frente a zonas permeables.
- Controladores de pérdida de circulación: son materiales que controlan la pérdida de cemento hacia zonas débiles de la formación o fracturas.
- Aditivos especiales: es la miscelánea de aditivos complementarios para la cementación, tales como antiespumantes, controladores de la regresión de la resistencia compresiva, etcétera.

(Practical Guide to Design and effect primary cementations, 2018)

Los aceleradores acortan el tiempo de bombeo e incrementan el desarrollo de resistencia compresiva; disminuyendo el tiempo del equipo de perforación.

Los aceleradores de mayor aplicación son:

- Cloruro de calcio (CaCl_2): esta sal se dosifica del 2 al 4% por peso de cemento, dependiendo del tiempo de bombeo que se desea obtener. Es el producto que exhibe mayor control en el tiempo bombeable.
- Cloruro de sodio (NaCl): actúa como acelerador en concentraciones de hasta un 10% por peso de agua, entre el 10 y 18% produce un tiempo de bombeo similar al obtenido con agua dulce. A concentraciones mayores del 18% causa retardamiento. La típica concentración de acelerador es del 2 al 5% por peso del agua.
- Sulfato de calcio (CaSO_4): es un material que por sí mismo posee características cementantes y tiene fuerte influencia en expandir el cemento fraguado; como acelerador se dosifica basándose en el tiempo que se desea y la temperatura a la cual va a trabajar. Su concentración varía del 50 al 100% por peso del cemento.

(Ingeniería de Cementaciones)

Los retardadores del fraguado del cemento incrementan el tiempo de fraguado inicial y brindan la posibilidad de trabajar el cemento en un amplio rango de temperatura y presión. Como la aceleración, los mecanismos para retardar el fraguado del cemento Portland son aún materia de controversia. Así han surgido varias teorías que intentan explicar el proceso retardante (Saedi *et al.*, 2021). Éstas son: de la adsorción, la precipitación, la nucleación y la

complejidad. Consideran dos factores: la naturaleza química del retardador y la fase del cemento (silicato o aluminato) sobre la cual actúa el retardador (Zihan *et al.*, 2021).

Los retardadores más conocidos son los lignosulfonatos de calcio y los cromolignosulfonatos de calcio, así como otros que son mezclas químicas. Unos trabajan a temperaturas bajas y otros a temperaturas altas. Su dosificación es de 0,1 a 2,5% por peso de cemento (Santos *et al.*, 2021)

Los reductores de fricción (dispersantes) ayudan a obtener con gastos bajos de bombeo el régimen turbulento. Reducen la fricción entre granos, y entre éstos y las paredes. Generalmente, son sales de ácidos grasos y se dosifican del 0,2 al 2,5% por peso de cemento (Ingeniería de Cementaciones).

De acuerdo con varias investigaciones realizadas en diferentes países (Sánchez, 2018; Castillo, 2019; Herbet, 2020; López, 2021), se ha demostrado que la mayor eficiencia en la limpieza del lodo del espacio anular se logra en régimen turbulento; es decir, cuando la lechada de cemento y los colchones de limpieza se desplazan a una velocidad tal que corresponda a un número de Reynolds de 3000 a 4000 o mayor, en función de sus características reológicas.

El control del filtrado es un factor de vital importancia en la cementación de camisas de revestimiento y en las cementaciones forzadas para colocar el cemento en el lugar deseado, sin que sufra deshidratación fuerte al pasar por zonas permeables o bien al estar forzando la lechada. Generalmente, los reductores de filtrado son productos derivados de la celulosa y se dosifican del 0,3 al 1,5%, por peso de cemento (Liu *et al.*, 2015).

Los reductores de densidad incrementan el rendimiento y reducen la densidad de la lechada. Tienen la habilidad de manejar grandes volúmenes de agua. Esta característica se aprovecha cuando se desean cubrir columnas largas con cemento, sin llegar a rebasar la presión de fracturamiento, pues al usar grandes volúmenes de agua, se reduce la densidad de la lechada; además, son mezclas más económicas (Ingeniería de Cementaciones).

Los densificantes son materiales químicos inertes, de alto peso específico y que manejan poca agua. Los densificantes comúnmente empleados son la barita y la limadura de fierro. También se puede reducir el agua de mezcla, adicionando un agente reductor de fricción para disminuir el efecto de incremento de viscosidad (Ingeniería de Cementaciones).

Los extendedores son aditivos que disminuyen la densidad de la lechada y/o reducen la cantidad de cemento por unidad de volumen de la lechada. Se utilizan para lograr las siguientes condiciones: disminución de la densidad de la lechada e incremento del volumen de mezcla por saco de cemento (Broni-Bediako *et al.*, 2016). Los extendedores evitan el encogimiento del cemento después del fraguado, evitando el estrés interno de la estructura y por tanto la fracturación del mismo (Fan *et al.*, 2020).

Los agentes de control de regresión de la resistencia a la compresión (harina de sílice) evitan los efectos de la temperatura. Son silicatos de alta pureza, con una textura que va de malla 100 a 325 para poder tener una distribución grande y homogénea en el cuerpo del cemento; normalmente se dosifican al 35% por peso de cemento y requiere el 40% de agua de su propio peso para la malla 325, para la malla 100 no requiere agua. En pozos geotérmicos con temperaturas mayores hasta 315 °C se emplea harina de sílice al 50% (Ingeniería de Cementaciones).

Los controladores para pérdida de circulación se usan para restaurar la circulación o prevenir la pérdida de circulación, cuando la lechada se pierde a través de formaciones fracturadas, cavernosas o no consolidadas, y no permite que la operación se termine. Los aditivos se clasifican en: granulares (Gilsonita, perlititas, plásticos), fibrosos (Corteza, madera triturada y aserrín), laminares (Mica, celofán) y semisólidos (Cadix & James, 2022).

Los antiespumantes son aditivos que dilatan el producto hidratado, sin que esto sea originado por efecto de la temperatura, ellos eliminan la mayor parte de las burbujas de aire. Generalmente, son poliglicol o siliconas o una mezcla de ambos, puede también incluir surfactantes. La concentración requerida es muy pequeña, menos del 0,1% por peso de agua (Broni-Bediako *et al.*, 2016).

Herramientas que se utilizan en las operaciones de cementación (DSTPIP, 2022):

- Retenedor: Se utiliza para aislar la porción inferior del caño del pozo, tiene la capacidad para encajar la sarta de tubería y extraerla, fácilmente perforable.
- Collar de etapas (*DVTool*): Se utiliza en la cementación primaria para cementar la sarta de camisas en múltiples etapas, el collar tiene puertos los cuales están cerrados y son mecánica o neumáticamente abiertos, el collar es incluido en la sarta de camisas a la profundidad deseada, la primera etapa es ejecutada con el collar de etapas cerrado, el collar de etapas es luego abierto y la segunda etapa es realizada a través de los

puertos, a la terminación de la segunda etapa los puertos se cierran de nuevo, se utilizan tapones de cementación especiales con estos collares de etapas.

- Zapata guía: es la parte inferior de la camisa de revestimiento y generalmente posee válvulas anti retorno.
- *Liner Hanger*: se utiliza para colgar una sarta de camisa dentro de otra.
- Válvula anti retorno (*float collar*): evita que los fluidos que se encuentran en el anular con una mayor densidad retornen a la sarta de revestimiento.
- *Stinger*: herramienta que sitúa en el fondo de la sarta de revestimiento y permite conectar la tubería de perforación y con esto disminuir el volumen de desplazamiento.

Equipamiento auxiliar (DSTPIP, 2022):

- Línea de inyección: serie de tuberías y accesorios entre la bomba y la cabeza del pozo que permiten el flujo hacia el espacio anular.
- Equipos, accesorios y recursos humanos directos que usualmente intervienen en las operaciones de cementación:
- Compresor; Silo Móvil y Estático; Recirculador; Unidad Cementadora *Single* y/o *Twin*; Camión Grúa; Tanques de 25 m³ c/u.
- Accesorios: mangueras, tuberías, válvulas, conexiones *chiksan* y cabezas de 7", 9^{5/8}" y 13^{3/8}".

1.1.3 Lechada de cemento

Las lechadas de cemento son suspensiones altamente concentradas de partículas sólidas en agua. El contenido de sólidos de una lechada de cemento puede llegar hasta un 70%.

La reología de la lechada de cemento está relacionada con la del líquido de soporte, la fracción volumétrica de los sólidos (volumen de partículas/volumen total) y la interacción entre las partículas. En una lechada de cemento, el fluido intersticial es una solución acuosa de varias clases de iones y aditivos orgánicos. Por lo tanto, la reología de la lechada difiere de la reología del agua (Ingeniería de Cementaciones).

Los sólidos en una lechada están en función directa a su densidad. Las interacciones de las partículas dependen principalmente de la distribución de las cargas superficiales. Los dispersantes del cemento, también conocidos como "superplastificadores", ajustan las

cargas superficiales de las partículas para obtener las propiedades reológicas deseadas de la lechada (Liu *et al.*, 2018).

Cuando se mezcla cemento en polvo y agua se forma una estructura de gel en toda la lechada, que impide flujos con esfuerzo cortante menor al esfuerzo de corte dado por el valor de cedencia. Esto es resultado de la interacción electrostática entre las partículas. A esfuerzos de corte menores al valor de cedencia, la lechada se comporta como un sólido. Esto puede originar algunas deformaciones finitas, de compresión o, eventualmente, de deslizamiento, pero no fluye. Arriba del valor de cedencia, la lechada se comporta como un líquido comprendido en el modelo Bingham, con viscosidad plástica bien definida (Namkon *et al.*, 2018).

La lechada con suficiente dispersante tiene como valor de cedencia cero y se comporta como un fluido newtoniano (Ingeniería de Cementaciones); lo que significa que la cedencia fluctúa en correspondencia con la concentración del dispersante.

Algunos de los parámetros necesarios para el diseño de la lechada son:

- Tiempo de cementación: es el tiempo mínimo requerido para el endurecimiento de la lechada por la deshidratación del cemento; este tiempo es 1,5 veces mayor que el tiempo de duración de las operaciones de cementación; es decir si las operaciones duran 5 horas, el tiempo de fraguado del cemento será 7,5 horas.
- Tiempo de espesamiento: Es el tiempo que se le da a una lechada para que permanezca lo suficientemente fluida para poder bombearse en el hoyo bajo determinadas condiciones de temperatura y presión.
- Tiempo mezclando y bombeado: es el tiempo mínimo para mezclar y bombear la lechada de cemento dentro del pozo hasta el espacio anular. Las consideraciones técnicas. Dependen del tiempo de bombeabilidad depende del tipo de trabajo, condiciones de pozo y el volumen de cemento que se desea bombear.
- Tiempo soltando los tapones: es el tiempo requerido para soltar los tapones antes y después de la lechada de cemento para iniciar el desplazamiento. El tiempo que dura colocando cada tapón es de aproximadamente 10 minutos.
- Tiempo de desplazamiento: Es el tiempo requerido para que la columna de cemento se desplace dentro del revestimiento hasta llegar al fondo del hoyo. Este factor está en

función de la profundidad de la sección a cementar, el caudal de bombeo y las propiedades del revestidor.

(Well Petroleum Cementing, 2009)

Problemas más frecuentes con las cementaciones:

- Contaminación del agua de mezcla con materiales orgánicos o inorgánicos.
- Temperaturas de circulación de fondo de pozo (BHCT) estimadas incorrectamente.
- Falta de homogeneidad de la mezcla entre cementos y aditivos.
- Falta o concentración inadecuada de aditivos para el control de tiempo de bombeabilidad, filtrado, reología, etc.
- Volúmenes de pre flujos, lavadores químicos y espaciadores insuficientes para la limpieza adecuada y eliminación del lodo de perforación.
- Tapones de goma mal ubicados.
- Diseño de la lechada no adecuado para controlar las presiones porales elevadas.
- Fallas de los equipos de mezcla de superficie y bombeo de pozo.
- Deshidratación prematura de la mezcla de cemento.
- Gelificación del cemento por contaminación.
- Densidad equivalente de circulación elevada que fractura la formación y ocasiona pérdidas.

(Pilkington, 1992; Huang *et al.*, 2021) (Anexo 7)

1.1.4 Integración del proceso de cementación de camisas de revestimiento

El proceso de Cementación de Camisas de Revestimiento en Pozos de Petróleo y Gas comienza con la solicitud del servicio hecha por el cliente. Se realiza el análisis de los parámetros solicitados y los cálculos preliminares, con estos se solicita el Servicio de análisis del laboratorio al Centro de Investigación del Petróleo CEINPET (Muestreo de Cemento y Aditivos), este envía el informe de Laboratorio, se precisan las acciones operativas identificando los riesgos propios de cada pozo, riesgos, ambientales, seguridad y salud del trabajo y personal capacitado que participará en la operación. Se trasladan las unidades de cementación y recursos a la explanada del pozo donde se concilia con el cliente el plan de trabajo de la operación, en consenso con este, se comienza la cementación que consiste en el bombeo de la lechada de cemento hacia el espacio anular de la tubería de revestimiento y la

formación creando un sello hidráulico evitando la migración de agua, gas o ambos de una zona de petróleo a otra, así como canalizaciones en el cemento por donde pueda migrar el fluido. (Anexo 8). Una vez terminada esta operación se recoge la evaluación del servicio del cliente, se confecciona el Informe Técnico y la facturación del servicio recién finalizado.

1.1.4.1 Cementación de tuberías de revestimiento superficiales

La función principal de la cementación de estas tuberías es aislar formaciones no consolidadas y evitar la contaminación de mantos acuíferos que se encuentran a profundidades someras; mantener el agujero íntegro y evitar la probable migración de aceite, agua y gas de alguna arena productora superficial, además de permitir la continuación de la etapa de perforación. Es importante señalar que se incluye en las tuberías de revestimiento superficiales a la tubería conductora. Su función principal es la de permitir la circulación y evitar derrumbes de arenas poco consolidadas, además de ser el primer medio de circulación de lodo a la superficie. Esta tubería de revestimiento (TR) puede cementarse o hincarse según lo permita el terreno. Los rangos de estas TR superficiales van de 9 ^{5/8}” a 30” (DSTPIP, 2022).

En esta etapa se instalan los preventores para el control del pozo. Uno de los problemas que frecuentemente se encuentran en esta etapa es el bajo gradiente de fractura. Para esto hay que tener un buen diseño de lechada y evitar en la cementación una pérdida de circulación; así también hay que evitar el colapso de la tubería de revestimiento debido a la carga hidrostática generada por la lechada en el espacio anular (DSTPIP, 2022).

Las bajas temperaturas de la formación prolongan los tiempos de fraguado del cemento; además, la irregularidad del agujero por condiciones del tipo de formación dificulta durante la operación obtener una eficiente remoción del lodo (DSTPIP, 2022).

1.1.4.2 Cementación de tuberías de revestimiento intermedias

Esta tubería es necesaria para mantener la integridad del pozo al continuar la perforación para profundizarlo. Sus rangos de diámetro varían de 6 ^{5/8}” a 13 ^{3/8}” y su profundidad de asentamiento varía de 300 a 4600 m. Normalmente es la sección más larga de las tuberías en el pozo y van corridas hasta la superficie, por lo cual los preventores se instalan en estas tuberías para perforar las siguientes etapas. Estas sartas generalmente se emplean para cubrir

zonas débiles que pueden ser fracturadas con densidades de lodos mayores, que son necesarias al profundizar el pozo y así evitar pérdidas de circulación. También aíslan zonas de presiones anormales y la cementación se puede realizar con una sola lechada o con dos diseños si el pozo y el gradiente de fractura lo requieren (DSTPIP, 2022).

1.1.4.3 Cementación de tuberías de revestimiento de explotación

Uno de los objetivos principales en la construcción de un pozo es la sarta de explotación la cual es el propio pozo. Esta tubería sirve para aislar los yacimientos de hidrocarburos de fluidos indeseables debiendo conservar la formación productora aislada. Es, además, el revestimiento protector de la sarta de producción y otros accesorios usados en el pozo. Un aislamiento eficiente de esta tubería nos permite efectuar con posterioridad tratamientos de estimulación necesarios para mejorar la producción del pozo (DSTPIP, 2022).

1.1.5 Pozos Horizontales

Los pozos horizontales son aquellos en los que en una parte del pozo está desviada 90° con respecto a la vertical. La técnica de perforación horizontal puede ser subdividida en cuatro grupos, dependiendo del ángulo con el que se ha construido el pozo, que puede ser: de radio largo, medio, corto y ultracorto (Anexo 9) (Ingeniería de Cementaciones).

Los yacimientos petroleros dentro de nuestro territorio nacional forman parte del lecho marino, por las condiciones políticas-económicas que nos afectan, no es posible extraer el crudo desde plataformas petroleras, por lo que se ha adoptado la construcción de pozos horizontales. Su diseño permite alcanzar hasta 10 000 metros (*MD*) con una profundidad vertical de hasta 3 000 metros (*TVD*) (Anexo 10). Este tipo de pozos son los más complejos en su diseño y construcción, sin embargo, maximizan la producción y reducen los costos en el desarrollo de los yacimientos.

Una de las finalidades de cementar pozos horizontales es la de evitar la inestabilidad mecánica y fisicoquímica del pozo, además de aislar zonas para que no haya comunicación de fluidos (Shadravan, 2013).

La productividad de los pozos horizontales, es mayor que la de uno vertical por varias razones: propicia una mayor área de comunicación con la formación productora, atraviesa perpendicularmente a sistemas de fracturas naturales, justifica comúnmente los costos de

perforación con mayores gastos de producción, reduce las caídas de presión y propicia la mayor eficiencia de drene de la formación productora (Jackson, 2018).

En pozos horizontales, uno de los problemas que afectan la cementación es el depósito de los recortes del lodo de perforación en la parte baja del pozo. Esto se puede evitar haciendo un buen diseño del lodo, específicamente en el punto de cedencia. El depósito de sólidos evita el desplazamiento y frustra el propósito de la cementación: rodear completa y homogéneamente la camisa de revestimiento con una envoltura de cemento y afianzarla a la formación. Otro aspecto muy importante es centrar la tubería de revestimiento para mejorar el desplazamiento del lodo (Shadravan, 2013).

Para lograr una buena cementación es muy importante colocar uniformemente la lechada de cemento en el espacio anular (Gowida *et al.*, 2018), y que en el diseño de la lechada de cemento no hay agua libre y no se asienten las partículas (Zhang *et al.*, 2021).

1.3 Contaminación ambiental empresarial

La actitud adoptada por el hombre hacia la naturaleza durante el último siglo, dio lugar a uno de los problemas capitales que la humanidad tiene planteado en la actualidad, la contaminación ambiental (Cañizares, 2015).

Si bien en Cuba, como en la mayoría de los países del hemisferio, existe un organismo cuya misión es la protección del medioambiente y la dirección de la política ambiental del país, dicha labor no puede ser exclusiva del mismo, sino que en ella han de comprometerse todos los organismos y empresas del Estado en una labor coordinada, de forma que en cada plan de desarrollo y dentro de las respectivas competencias de cada uno, se inserte la dimensión ambiental (Antúnez, 2019).

Las empresas se han caracterizado por la generación excesiva de residuos y por la contaminación del aire, el agua y el suelo. A ello se suma la demanda elevada de recursos naturales, altos consumos de energía y de insumos, de los cuales muchos son tóxicos, dañinos al medioambiente y a la salud humana, así como la creación de escenarios de riesgos de accidentes y desastres. Todo lo anterior hace que la actividad empresarial sea la que más impactos negativos causa al medioambiente, debido fundamentalmente a procesos de producción y servicios ineficientes, por las tecnologías y materias primas empleadas y los

gastos de energía requeridos, lo que afecta la productividad, eficiencia y competitividad de las mismas (Pérez, 2022).

La industria petrolera en particular realiza numerosos procesos que generan consecuencias directas sobre el ambiente, en especial emisiones atmosféricas, contaminación y desechos líquidos, sólidos y peligrosos.

Todas las empresas, que de una forma u otra intervienen en el proceso productivo-comercial de los hidrocarburos y sus derivados, están obligados a reforzar las medidas establecidas en cada una de ellas en cuanto a la protección medioambiental y de sus recursos humanos, puesto que en cada paso del proceso existen riesgos de contaminación que atentan contra el medioambiente y la calidad de vida de las personas que interactúan con estos productos.

Las consecuencias de los efectos negativos ocasionados por el manejo y utilización de los hidrocarburos y sus derivados en la actualidad resultan obvias. La contaminación de los mares, los ríos y los suelos, con incidencia en la pérdida de la flora y la fauna, resulta una problemática alarmante que resulta, en gran parte, consecuencia directa de la industria petrolera, ya sea en la perforación, cementación, extracción, procesamiento, transportación o distribución de las materias primas y los productos resultantes de la misma debido, entre otras causas, a la ocurrencia de derrames, mala manipulación y vertimientos.

Algunas de las situaciones problemáticas en el ámbito ambiental que se presentan en la cementación en el sector petrolero son:

- Contaminación de fuentes de aguas subterráneas
- Manejo incorrecto de los fluidos y equipos de cementación
- Liberación incontrolada de grandes volúmenes de petróleo
- Partículas en la atmósfera debido a la alteración del suelo debido a las actividades de construcción y tráfico vehicular, además de la incineración de desechos y quema de gas
- Emisión de hidrocarburos como el Metano (CH₄), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Óxidos de Nitrógeno (N_xO_y) y Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) debido a fugas, derrames y desechos en la producción
- Liberación incontrolada de gas, explosiones o incendios por reventón del pozo.
- Modificación de la topografía y eliminación de vegetación debido a la construcción de caminos, sitios de perforación e instalaciones de producción.
- Daño de áreas ecológicas frágiles, hábitats críticos de la fauna y especies amenazadas.

Se hace imprescindible destacar además otras consecuencias importantes como:

- Generación de aguas residuales durante actividades relacionadas con la explotación, además de la generada durante el mantenimiento y la limpieza de los equipos.
- Contaminación de fuentes hídricas por aceites, lodos, lechada de cemento, agua de mezcla, lubricantes, aditivos y otros desechos.
- Enfermedades en especies y personas por inhalación de aire contaminado, como la silicosis producto de la emisión de silicatos al manipular el cemento, o consumo de aguas contaminadas.
- Pérdida de fertilidad en los suelos, que afecta las actividades relacionadas con la agricultura.
- Contaminación por goteo o derrames generados durante actividades tales como: transporte y operación de maquinaria.
- Generación de residuos sólidos y peligrosos.

Los parámetros a evaluar en este trabajo de grado inciden directamente sobre los llamados indicadores de impacto.

Los indicadores se ocupan de describir y mostrar los estados y las principales dinámicas de los procesos, es decir el estatus y la tendencia por ejemplo de: la biota y biodiversidad, la cantidad y calidad de agua, la calidad del aire respirable, la carga contaminante y renovabilidad de la oferta energética, la disponibilidad y extracción de algunos recursos naturales (bosques, pesca, agricultura), la contaminación urbana, la producción de desechos sólidos, el uso de agrotóxicos, la frecuencia e intensidad de los desastres naturales, entre otros (Martínez, 2009).

Los indicadores de impacto orientan acerca de los efectos del estado del medioambiente sobre diferentes ámbitos de interés para las actividades humanas, tales como la calidad de vida, la economía urbana, los ecosistemas, la vulnerabilidad urbana y sobre el nivel político-institucional. Los impactos al medioambiente que afectan a los ecosistemas y a sus elementos (agua, aire, suelo, biodiversidad) se reflejan en la calidad de vida de los habitantes de la ciudad, en el medioambiente construido (edificios, infraestructura urbana, etc.) y en las actividades económicas que estimulan el desarrollo de la ciudad. Los indicadores del impacto favorecen el análisis estratégico, en el cual las decisiones identifican las prioridades de acción e inversión (Pérez, 2022).

Deben considerarse como impactos la vulnerabilidad a accidentes naturales o provocados, que pueden ser traducidos en los datos cuantitativos para subsidiar el análisis de gestión de riesgos locales (Pérez, 2022).

1.2 Control de proceso

En innumerables ocasiones tanto en el campo de la ingeniería química como en la vida cotidiana cuando nos enfrentamos a un problema tomamos medidas para atacarlo pensando en su solución y tratamos de determinar y resolver las causas que le dieron origen. Esta situación conlleva en muchas ocasiones a invertir recursos tanto materiales como humanos sin lograr el resultado deseado. De ahí la importancia que el ingeniero cuente en su actuar con herramientas, que le permitan tomar decisiones acertadas para la solución de problemas en su esfera de acción.

1.2.1 Índices sintéticos

Los índices sintéticos se pueden definir como instrumentos que capturan, en una sola medida, un concepto multidimensional que, *a priori*, solo puede ser representado mediante un conjunto de indicadores individuales. Además, debe cumplir los requisitos de sostenibilidad, oportunidad, periodicidad, comprensibilidad, compatibilidad, eficiencia, utilidad, fiabilidad, precisión y relevancia (Freire & Bermúdez, 2016). La confección de índices sintéticos responde a la necesidad de medir fenómenos complejos, no directamente observables por variables individuales ya existentes (Pérez, 2022).

Los índices sintéticos han sido utilizados en una gran variedad de disciplinas para medir conceptos complejos y multidimensionales que, en algunos casos no se pueden observar ni medir directamente, o en otros, para facilitar la toma de decisiones. El poder de estos indicadores reside en su habilidad de sintetizar una gran cantidad de información en un formato simple y práctico. La sencillez de estos índices sintéticos facilita el acceso a la información al público en general y a otros usuarios potenciales. Los indicadores son instrumentos de medición analítica más utilizados en la práctica en multitud de campos de la realidad social (Mamund & Lownes, 2011; Galindo *et al.*, 2018), por lo que contribuyen a la toma de decisiones (Palomeque *et al.*, 2018) y a la mejora continua de la institución (Tayupanta & Cajamarca, 2019).

Sin embargo, el listado de indicadores a medir en una empresa puede tornarse realmente grande y engorroso para sus directivos, lo cual ha llevado a los investigadores a reducirlo a un número más manejable mediante el uso de índices sintéticos que permitan un mayor control y una toma de decisiones más efectiva (Pérez, 2022).

La construcción de Índices Sintéticos se realiza mediante técnicas de minería de datos, lo que deriva en la eliminación de posibles errores humanos que se cometen durante el proceso de extracción y manipulación de los datos. Se resuelve también de este modo, el habitual problema de que no todas las variables sean importantes, algunas de ellas puedan ser variables irrelevantes o redundantes que no contribuyen de manera sustancial en tareas de clasificación o de análisis de datos. En estos escenarios se emplean algoritmos capaces de clasificar datos, sin la necesidad de conocer la clase a la que pertenece cada objeto de la muestra (Pérez, 2022).

El análisis del índice permite el estudio del comportamiento de los indicadores en el tiempo, lo que propicia una valoración tendencial de las consecuencias de las acciones realizadas en la actualidad, para colaborar a la toma de decisiones con el propósito de ayudar a la administración para que marque tendencias, señale problemas y tome decisiones inteligentes (Anexo 11) (Pérez, 2022).

El procedimiento de construcción de índice parte de los datos históricos de las empresas. El objetivo es realizar un procedimiento de clasificación el cual permita crear índices sintéticos a partir de la relación que pueda existir en un conjunto de datos ya sean indicadores o parámetros. Según (Barstow, 1985) a partir de la integración y recopilación de estos se genera el almacén o base de datos, el que a través de la selección, limpieza y transformación origina una serie de datos seleccionados o vista minable.

Mediante la aplicación de la minería de datos se identifican los patrones de comportamiento de los parámetros característicos del desarrollo del proceso, los cuales son evaluados e interpretados durante la generación de conocimiento, de cuya difusión y empleo resulta la construcción del índice. La evaluación de dicho índice constituye un apoyo al proceso de toma de decisiones relacionado con la gestión ambiental empresarial. De esta forma se propone un procedimiento para la construcción del índice, a partir de la integración de la minería de datos como herramienta de inteligencia artificial (Pérez, 2022).

1.2.2 Diagrama causa-efecto

El diagrama causa-efecto (*CED*) es una de las técnicas más utilizadas para el análisis de causas (Clare & Wandersee, 2010), también es conocido como diagrama de Ishikawa (en honor al doctor Kaoru Ishikawa) o diagrama de espina de pescado (He *et al.*, 1996). Es un método gráfico que refleja la relación entre una característica de calidad (muchas veces un área problemática) y los factores que posiblemente contribuyen a que exista (Stefanovic *et al.*, 2014). En otras palabras, es una gráfica que relaciona el efecto (problema) con sus causas potenciales (Rodgers & Oppenheim, 2019).

Esta herramienta es un fiel exponente del enfoque de proceso para analizar las causas de un determinado problema, al estudiar la relación causa-efecto y reducir la magnitud de estos efectos (objetivos) se prioriza la previsión, trabajando sobre las causas y subcausas que lo provocan. La naturaleza gráfica del diagrama permite que los grupos organicen grandes cantidades de información sobre el problema y determinar exactamente las posibles causas. Finalmente, aumenta la probabilidad de identificar las causas principales (Coccia, 2018).

En el lado derecho, se anota el problema, y en el lado izquierdo se especifican por escrito todas sus causas potenciales, de tal manera que se agrupan o estratifican de acuerdo con sus similitudes en ramas y subramas. En ella, cada posible causa se agrega en alguna de las ramas principales (Cahyana, 2018).

Pasos para la construcción de un Diagrama de Ishikawa:

- Identificación del efecto. Se coloca a la extrema derecha en un rectángulo.
- Realizar la gran expansión de eventos causales, que están directamente relacionados al efecto. Esta gran expansión debe contar con un número máximo de 4 a 6 eventos causales. La unión de varios eventos causales constituye procesos directamente relacionados con el efecto. La técnica utilizada para realizar objetivamente esta expansión es el método de Kendall; el cual permite realizar la selección de forma parametral y comprobando la concordancia con un sencillo análisis estadístico.
- Realizar la primera pequeña expansión: consiste en determinar las subcausas de cada evento causal. Para realizar la misma se recomienda el método de tormentas de ideas o brainstorming. El número de subcausas dependerá de la naturaleza de cada evento causal.

- Realizar la segunda pequeña expansión: partiendo de las subcausas de la primera pequeña expansión, se pueden descomponer las mismas subcausas. La técnica que se utiliza para realizar este análisis es el diagrama de afinidad.
 - Una vez definidas las causas (gran expansión) se formulan algunas hipótesis o contra medidas para eliminar las mismas y posteriormente se mide la eficiencia de esas contramedidas.
 - Preparar un plan de acciones para cada una de las causas a ser investigadas o corregidas, de tal forma que se determinen las acciones que se deben realizar.
- (Suárez & Rodríguez, 2018)

1.3 Conclusiones Parciales

Como resultado de la revisión de la bibliografía y otras fuentes de información para la construcción del estado del arte y la práctica de la investigación que se resume en esta Tesis de Grado, se concluye que:

- Después de perforar, la camisa de revestimiento es colocada dentro del agujero, y es sostenida y protegida con la ayuda del cemento Portland. El cemento es colocado por la circulación de lechada de cemento a través del centro del pozo hasta rellenar el espacio anular entre la camisa y la roca. Las camisas se colocan en capas con diámetros decrecientes en el centro del agujero en cada paso.
- La utilización de herramientas como el índice sintético debe ser considerada en la estrategia de las empresas, como fuente de dinamización, que permita solucionar los conflictos de responsabilidades, optimizar y simplificar el proceso de toma de decisiones basadas en datos integrales, una mayor coherencia y facilidad de manejo junto a la reducción de costos, incremento del rendimiento, las competencias y el entrenamiento de los miembros de la empresa.
- La obtención de los indicadores y del índice sintético mediante el empleo de técnicas de minería de datos provee solidez y rigor a la información obtenida, ya que es derivada de la simulación y no de la subjetividad de los investigadores. Esto demuestra la necesidad de emplear algoritmos capaces de clasificar datos, sin la necesidad de conocer la clase a la que pertenece cada objeto de la muestra.

Capítulo 2: Materiales y Métodos

En este capítulo, se caracteriza el objeto de estudio y se describe el procedimiento metodológico propuesto, así como los métodos y técnicas, para la evaluación de la gestión ambiental en el proceso de cementación de camisas de revestimiento, a partir de sus particularidades.

2.1 Descripción tecnológica del proceso de cementación de camisas de revestimiento en la DSTPIP

La cementación de pozos petroleros es el proceso mediante el cual se bombea un volumen de lechada de cemento al pozo, con la intención de cubrir el espacio anular existente entre las paredes del agujero y la camisa de revestimiento, y de esta manera poder sujetar la camisa a las paredes del pozo.

Es un proceso de bombeo que se aplica para cada fase en la construcción del pozo, o sea, se debe llevar a cabo para los diferentes agujeros en la perforación, pasando por el agujero: conductor, superficial, intermedio y de producción.

Se eligió un pozo X para cumplir con el objeto de estudio de este trabajo. De él se va a analizar detalladamente la cementación de la camisa de revestimiento del agujero en la fase intermedia, con un diámetro de 13^{3/8}'' y una profundidad de 1852 mMD, a realizar en dos etapas.

Los cálculos y diseño general de la cementación se pueden contemplar en el programa de perforación y construcción del pozo.

La etapa consistió en la perforación del agujero de 17,5'' desde el zapato anterior ubicado a 296 mMD hasta la profundidad total del intervalo de 1852 mMD, con un lodo de perforaciones, cloruro de potasio (KCl), polímero con densidad de 1,37 g/cm³. Para fines de simulaciones se considera la sección con un 30% de exceso y se considera el *DVTool* localizado a 925 mMD de la superficie. La cementación se llevará a cabo en dos etapas. La primera etapa considera el uso de una lechada única de 1,90 g/cm³ la cual cubrirá del fondo (1852 m) hasta 1125 mMD de la superficie, con un tirante total de 725 m. La segunda etapa considera el *DVTool* hasta 200 m de la superficie y sin exceso.

2.1.1 Procedimiento de trabajo de la cementación 1^{era} Etapa

Se preparan las condiciones para realizar las pruebas de bombeo a través de la sarta del revestidor y la formación. Se realiza una reunión de seguridad con todo el personal involucrado en la operación. Una vez se tenga el revestidor en posición se realiza una circulación del pozo a diferentes caudales (0,80; 1,00; 1,50; 2,0) m³/min, verificando presiones en el *stand pipe* y retornos en la línea de flujo. En caso de que se observen pérdidas a un determinado caudal se monitorea el mismo y este valor será el máximo caudal y no se deberá llegar a él durante la operación.

Se verifican todos los parámetros del lodo según indicaciones del grupo técnico (homogeneidad de densidad y reologías a la entrada y salida). En caso de que el lodo no se encuentre en los parámetros indicados se debe acondicionar a los valores reológicos más bajos posibles sin comprometer la estabilidad del agujero abierto y que permitan mantener la densidad del lodo sin comprometerlo por decantación del material pesante.

Se instala la cabeza de cementación de 13^{3/8}", conexiones y accesorios necesarios para interconectar las unidades de cementación, realizar movimientos de válvulas los cuales permitan la alineación de las unidades de cementación con el equipo de perforación. Se preparan condiciones para realizar la cementación, instalar líneas de inyección, líneas de movimiento de lodo y armado de líneas con las unidades de cementación, preparación del fluido lavador, fluido separador y agua de mezcla.

Se realizan prueba de funcionamiento y presión a todo el equipamiento que participará en la operación de cementación, así como a todas las líneas y conexiones que se encuentran en la interconexión de dichos equipamientos, a una presión mínima de 21 MPa (3045 psi) durante un periodo de tiempo de 15 minutos. En caso de observar fuga, se desaloja la presión y se corrige la fuga, se repite la prueba hasta tanto se obtengan la hermeticidad deseada.

Se bombean con la unidad de cementación 5,0 m³ de fluido lavador de 1,01 g/cm³ a un caudal de (0,7-1,0) m³/min. Se chequea el flujo de retorno en zaranda (este volumen se encuentra previamente preparado en el Twin estático). Durante el bombeo se verifican presiones y flujo de salida. Se bombean con la unidad de cementación 14,0 m³ de fluido separador de 1,55 g/cm³ a un caudal de (0,7-1,0) m³/min. Se chequea el flujo de retorno en zaranda (este volumen se encuentra previamente preparado en el recirculador). Durante el bombeo se verifican presiones y flujo de salida.

Se comienza a densificar la lechada de cemento según la receta diseñada por CEINPET con anterioridad y recibida en el equipo para la cementación. Se mezclan y bombean 53 m³ de lechada de cemento con una densidad de 1,90 g/cm³, a un caudal de (0,5-0,8) m³/min, para cubrir 725 m lineales y 36 m de *shoe track*. Se verifica la densidad de la lechada con balanza en sitio y se recoge muestra cada 5 m³ bombeados.

Se libera el tapón y se procede a desplazar la lechada con 3 m³ de agua (bombeados con la unidad de cementación) y 141 m³ de lodo con una densidad de 1,37g/cm³ a un caudal de (0,7-1,0) m³/min. El caudal inicial es de 0,5 m³/min, en el caso de que no se observe pérdidas de circulación, se aumenta el caudal gradualmente hasta obtener un caudal máximo sin incurrir en pérdidas, estos volúmenes son chequeados desde el activo del equipo de perforación previamente acondicionado para esta función. El desplazamiento es realizado con las bombas del equipo, haciendo uso de tanques del mismo, los cuales deben estar limpios y herméticos. El volumen de desplazamiento se rectifica con el *tally* final del revestidor para garantizar un correcto desplazamiento de la lechada de cemento. Concluido el desplazamiento de la lechada de cemento, se abre el *DVTtool* y se espera el tiempo de fragüe de la lechada de cemento previamente simulada en el laboratorio de cemento y bajo las indicaciones de las pruebas realizadas por el laboratorio de CEINPET. En la tabla 2.1 se puede observar la secuencia de bombeo de esta primera etapa.

Se verifica el comportamiento de los fluidos durante la circulación para de ser necesario ajustar los volúmenes (tabla 2.2)

Tabla 2.2: Posición de los fluidos.

ANULAR					
Fluido	Cima mMD	Base mMD	Longitud m	Volumen m ³	Densidad ρ gr/cm ³
Lodo	0	897,39	897,39	70,90	1,37
Lavador	897,39	957,00	59,61	5,0	1,01
Separador	957,00	1125,01	168,01	14,09	1,55
Lechada	1125,01	1850,00	724,99	60,82	1,90
INTERIOR DE LA CAMISA					
Lodo	0,0	1776,18	1776,18	140,96	1,37
Lavador	1776,18	1813,98	37,80	3,0	1,01
Lechada	1813,98	1850	36,02	2,86	1,90

La tabla 2.2 indica la cima de los fluidos considerando el 30% de exceso anular, si el agujero se encuentra al diámetro nominal puede resultar que la cima del cemento este por encima de los 1125 mMD, en caso contrario un agujero más grande puede resultar que el tope de cemento (TOC) se encuentre por debajo de los 1125 mMD.

En la figura 2.1 se puede observar la posición de los fluidos posterior a la primera etapa de la cementación.

El tiempo de fragüe del cemento para esta operación es de tiempo bombeable (6,5 – 7,0) horas.

2.1.2 Procedimiento de trabajo de la cementación 2^{da} Etapa

El procedimiento de trabajo de la cementación de la segunda etapa es muy similar al de la primera. Se realiza la reunión de seguridad con todo el personal involucrado en la operación. Se verifica todos los parámetros del lodo (homogeneidad de densidad y reologías del lodo a la entrada y salida). En caso de que no se encuentre en los parámetros indicados se debe acondicionar a los valores reológicos. Se instalan las conexiones y accesorios necesarios para interconectar las unidades de cementación, realizar movimientos de válvulas los cuales permitan la alineación de las unidades de cementación con el equipo de perforación. Se preparan las condiciones para realizar la cementación, instalar líneas de inyección, líneas de movimiento de fluido, armado de líneas con las unidades de cementación, preparación del fluido lavador, fluido separador y agua de mezcla. Se realizan las pruebas de funcionamiento y presión a todo el equipamiento que participará en la operación de cementación, así como a todas las líneas y conexiones que se encuentran en la interconexión de dichos equipamientos, a una presión mínima de 21 MPa (3045 psi) durante un periodo de tiempo de 15 minutos. En caso de observar fuga, se desaloja la presión y se corrige la fuga, se repite la prueba hasta tanto se obtenga la hermeticidad deseada. Se define el caudal máximo de circulación tomando en cuenta el elemento más débil (revestidor) para evitar dañarlo. Se bombean con la unidad de cementación 5,0 m³ de fluido lavador de 1,01 g/cm³ a un caudal de (0,7-1,0) m³/min. Se chequea el flujo de retorno en zaranda (este volumen se encuentra previamente preparado en el Twin estático). Durante el bombeo se verifican las presiones y el flujo de salida. Se bombea con la unidad de cementación 10,0 m³ de fluido separador de 1,55 g/cm³ a un caudal de (0,7-1,0) m³/min. Se chequea el flujo de retorno en zaranda (este volumen se encontrará

previamente preparado en el recirculador). Durante el bombeo se verifican presiones y flujo de salida. Se comienza a densificar la lechada de cemento según receta diseñada por CEINPET. Se mezclan y bombean 47,3 m³ de lechada de cemento de amarre con una densidad de 1,90 g/cm³, a un caudal de (0,5-0,8) m³/min. Se verifica la densidad de la lechada con balanza en sitio con el químico del pozo, donde se recoge muestra cada 5 m³ bombeados. Se libera el tapón y se procede a desplazar la lechada con 3 m³ de agua (bombeados con la unidad de cementación) y 70,4 m³ de lodo con una densidad de 1,37 g/cm³. El caudal inicial es de 0,5 m³/min, en el caso de que no se observen pérdidas de circulación, se aumenta el caudal gradualmente hasta obtener un caudal máximo sin incurrir en pérdidas, estos volúmenes son chequeados desde el activo del equipo de perforación previamente acondicionado para esta función. El desplazamiento es realizado con las bombas del equipo, haciendo uso de tanques del mismo, los cuales están limpios y herméticos. El volumen de desplazamiento se rectifica con el *tally* final del revestidor para garantizar un correcto desplazamiento de la lechada de cemento. Concluido el desplazamiento de la lechada de cemento, se continua con procedimiento para verificar el adecuado cierre del *DVTool*. Se espera el tiempo de fragüe de la lechada de cemento previamente simuladas en laboratorio y bajo las indicaciones de las pruebas realizadas por el laboratorio de CEINPET. La secuencia de bombeo y la posición de los fluidos posterior a la segunda cementación, se puede encontrar en la tabla 2.3 y la figura 2.2 respectivamente (Anexos 12 y 13).

El tiempo de fragüe del cemento en esta operación es de tiempo bombeable (4,5 – 5,0) horas. En la tabla 2.4 se resumen los riesgos y contingencias de ambas etapas.

Tabla 2.4: Riesgos tecnológicos y contingencias.

Riesgos	Contingencias
Fuga en línea durante la prueba de presión de cementar.	Proceder a reapriete del elemento.
Pérdidas de circulación durante bombeo de fluidos y desplazamiento.	Se deberá ajustar caudales sin comprometer la operación teniendo en cuenta el tiempo bombeable disponible.
No se observa hermeticidad después del cierre del <i>DVTool</i> .	Esperar fraguado con la cabeza de cementar cerrada.

Falla de los equipos de mezcla y bombeo.	Parar bombeo, alinear válvulas a segundo equipo en espera.
Riesgo de salida de cemento a superficie.	Verificar los retornos y enviar al tanque de corte de ser necesario.

2.2 Herramientas estadísticas

La estadística estudia los fenómenos o experimentos aleatorios intentando deducir leyes sobre los mismos y aplicando dichas leyes para la predicción y toma de decisiones. Gracias a los avances de la tecnología y recursos informáticos, es sencillo almacenar información, lo que lleva a tener grandes bases de datos, por lo que se hace necesario, para el análisis estadístico de los mismos, utilizar herramientas informáticas por la considerable ventaja que suponen en rapidez y fiabilidad.

En la actualidad existen disímiles herramientas, metodologías y técnicas que pueden desarrollarse en las empresas, para evaluar su Sistema de Gestión Ambiental. En este trabajo se aplican herramientas estadísticas como el *software Statgraphics* e índice sintético basado en inteligencia artificial para evaluar el impacto de los parámetros tecnológicos del proceso de cementación de camisas de revestimiento sobre el medio ambiente.

2.2.1 *Software Statgraphics*

El programa *Statgraphics* es un *software* que está diseñado para facilitar el análisis estadístico de datos. Mediante su aplicación es posible realizar un análisis descriptivo de una o varias variables, utilizando gráficos que expliquen su distribución o calculando sus medidas características. Entre sus muchas prestaciones, también figuran el cálculo de intervalos de confianza, contrastes de hipótesis, análisis de regresión, análisis multivariantes, así como diversas técnicas aplicadas en Control de Calidad (StatPoint Technologies, Inc., 2009).

La Estadística Descriptiva se ocupa de presentar, de forma resumida, la información más importante de un conjunto de datos. Para ello se calculan sus medidas centrales (media, mediana...) y se da una medida de cómo están los datos dispersos en torno a esos valores centrales (varianza, desviación típica, rango...). Asimismo, tras un análisis descriptivo, se dispondrá de una representación de los datos en forma de gráficos, de forma que sea posible

detectar valores atípicos, tendencias o agrupaciones (Christensen, 1998; Freund & Wilson, 2003).

2.2.1.1 Análisis de la varianza

El análisis de la varianza es un procedimiento estadístico que permite comprobar si r muestras provienen o no de poblaciones con la misma media, cuando se dan ciertas condiciones establecidas (Mishra et al., 2019). El paquete *Statgraphics* presenta una completa colección de programas de análisis de varianza, que incluye, anova de una vía.

La prueba Anova de una vía incluye en sus opciones tabulares el cálculo de estadísticos resumen, la tabla de análisis de varianza, tabla de medias con cálculo de intervalos, donde se puede elegir el coeficiente de confianza y tipo de intervalo, como *LSD*, *Tukey*, *Bonferroni* o intervalos de confianza con varianzas iguales o diferentes. Se proporciona también las comparaciones múltiples *LSD*, *Tukey*, *Bonferroni* y otras, varias pruebas de igualdad de varianzas y análisis de varianza no paramétrico de *Kruskal-Wallis* (Bertinetto et al., 2020; Finch, 2020).

2.2.2 Software R

R es un conjunto integrado de funciones de *software* para manipulación de datos, cálculo y visualización gráfica. Es un programa de última generación para realizar análisis de datos, siendo también un lenguaje de programación, lo cual lo hace muy versátil (Kim, 2019). Como lenguaje de programación, R es un dialecto de un lenguaje de programación denominado S. Dentro de los lenguajes de programación se puede clasificar como un lenguaje orientado a objetos de tipo interpretado. Lo que lo hace flexible, potente y posee un tiempo de aprendizaje corto. Actualmente se encuentran disponibles más de 15303 paquetes desarrollados en R, que cubren multitud de campos desde aplicaciones Bayesianas, financieras, graficación de mapas, *wavelets*, análisis de datos espaciales, etc. (Venables, 2022).

R proporciona muchísimas herramientas estadísticas para el análisis de datos: modelos lineales y no lineales para regresión, test estadísticos, análisis de series temporales, algoritmos de clasificación y agrupamiento, gráficas, etc. Como es un lenguaje de programación, permite que los usuarios lo extiendan definiendo sus propias funciones. Gran parte de las funciones de R están escritas en el mismo R, aunque para algoritmos

computacionalmente exigentes es posible desarrollar bibliotecas en C, C++ o *Fortran* que se cargan dinámicamente. La sintaxis es relativamente simple. R también puede usarse como herramienta de cálculo numérico, donde puede ser tan eficaz como otras herramientas específicas tales como *GNU Octave* y su equivalente comercial, *MATLAB*. Es multiplataforma, se puede ejecutar en casi todos los sistemas operativos (*Linux*, *Windows*, *MacOS*). Está dividido en paquetes modulares que responden a necesidades específicas. Posee un excelente paquete, *knit*, que permite desarrollar presentaciones interactivas que evalúan el código R en el momento (Venables, 2022).

2.3 Metodología para la construcción del índice sintético

En este epígrafe se desarrolla la metodología utilizada para la construcción del índice sintético a través de los datos recogidos concernientes a los parámetros tecnológicos en la cementación de la camisa de revestimiento de 13 ^{3/8}" en el pozo X (Figura 2.3).

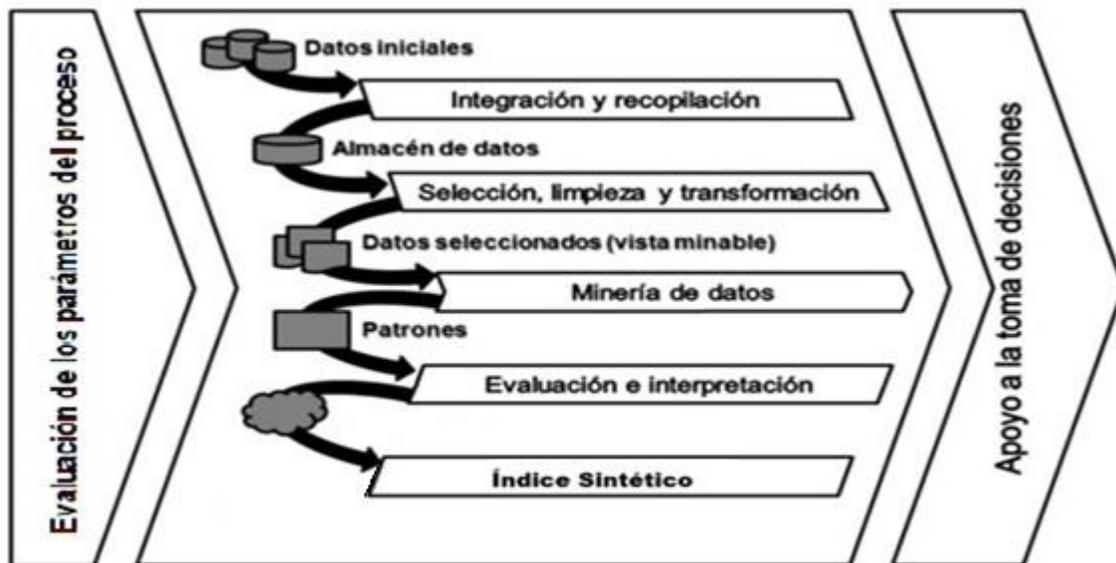


Figura 2.3: Procedimiento para la construcción del índice sintético.

2.3.1 Fase 1. Integración y análisis de los datos

Consiste en la identificación del conjunto de datos de entrenamiento y pruebas para el pre procesamiento. En esta etapa se seleccionan los datos iniciales que serán procesados. El procesamiento de los datos se realizará en el *software RStudio*, un entorno de desarrollo integrado para el lenguaje de programación R, dedicado a la computación estadística y

gráficos. Previa a la ejecución de los algoritmos es necesario transformar los datos a partir de la normalización de sus atributos, de forma tal que sus valores estén en un rango entre 0 y 1. Los datos serán transformados a una estructura *data frame* para hacer posible su manipulación en el lenguaje R. Se seleccionan, limpian y transforman los datos hasta obtener un conjunto de datos minables, se obtienen los patrones existentes en el conjunto, a partir de las series temporales, este tratamiento se realiza con el empleo de métodos de minería de datos mediante la herramienta *RStudio*. Con la aplicación de los métodos clusters se determinan los indicadores presentes en el proceso.

2.3.2 Fase 2. Construcción del índice

Se procesa la información obtenida de la Fase 1, determinando las variables que cumplan con las especificaciones establecidas y el estado de los indicadores de modo que se construye el índice a partir de la relación existente en el conjunto de datos, siendo estos los parámetros tecnológicos recogidos en la camisa de 13^{3/8"}, densidad, caudal, presión y volumen. La evaluación de dicho índice constituye un apoyo al proceso de toma de decisiones relacionado al estado global de funcionamiento del proceso.

2.4 Metodologías para la utilización del Diagrama Causa-Efecto

Existen tres posibles metodologías para la construcción de un diagrama de Ishikawa:

- Metodología 6M o análisis de dispersión.
- Flujo de proceso.
- Estratificación o enumeración de causas.

Metodología 6M o análisis de dispersión (Aust & Pons, 2020)

Es el método de construcción más común y consiste en agrupar las causas potenciales en seis ramas principales:

1. Mano de obra.

- Conocimiento.
- Entrenamiento.
- Habilidad.
- Capacidad.

2. Métodos.

- Estandarización (¿Las responsabilidades y los procedimientos de trabajo están definidos clara y adecuadamente?)
- Excepciones (Cuando el procedimiento estándar no se puede llevar a cabo existe un procedimiento alternativo claramente definido).
- Definición de operaciones (Están definidas las operaciones que constituyen los procedimientos. Cómo se decide si la operación fue hecha de manera correcta).

3. Máquinas o equipos.

- Capacidad.
- ¿Hay diferencias? (Hacer comparaciones entre máquinas, cadenas, estaciones, instalaciones, etc.).
- Herramientas (¿Hay cambios de herramientas periódicamente, son adecuadas?).
- Ajustes (¿Los criterios para ajustar las máquinas son claros?).
- Mantenimiento (¿Hay programas de mantenimiento preventivo, son adecuados?)

4. Material.

- Variabilidad (¿Se conoce la variabilidad de las características importantes?).
- Cambios (¿Ha habido algún cambio?).
- Proveedores (¿Cuál es la influencia de múltiples proveedores, se sabe cómo influyen los distintos tipos de materiales?).

5. Medición o inspección.

- Disponibilidad (¿Se dispone de las mediciones requeridas?).
- Definiciones (¿Están definidas operacionalmente las características que son medidas?).
- Tamaño de las muestras.
- Capacidad de repetición (¿Se puede repetir con facilidad la medida?).
- Sesgo (¿Existe alguna desviación en las medidas?).

6. Medio ambiente.

- Ciclos (¿Existen patrones o ciclos en los procesos que dependen de condiciones ambientales?).
- Temperatura.

Ventajas:

- Obliga a considerar una gran cantidad de elementos relacionados con el problema.
- Puede ser usado cuando el proceso no se conoce con detalles.
- Se concentra en el proceso y no en el producto.

Desventajas:

- En una sola rama se identifican demasiadas causas potenciales.
- Tiende a concentrarse en pequeños detalles del proceso.
- El método no es ilustrativo para quienes desconocen el proceso

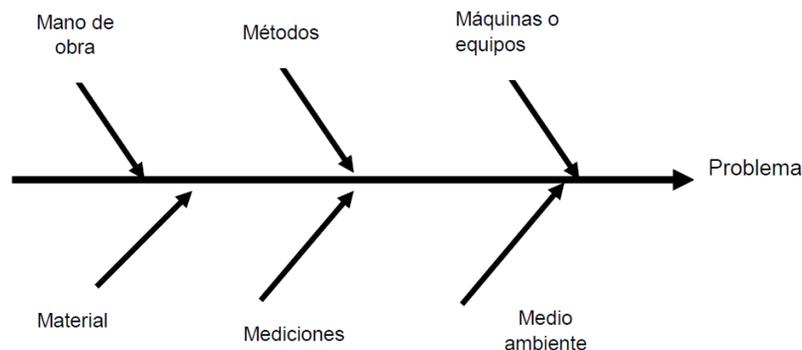


Figura 2.4 Metodología de las 6M.

Metodología Flujo del Proceso.

Con este método de construcción, la línea principal del diagrama de Ishikawa sigue la secuencia normal del proceso de producción.

Con frecuencia el diagrama de flujo de proceso es la primera etapa para entender un proceso de manufactura. Para ir agregando en el orden del proceso, las causas potenciales, se puede realizar la siguiente pregunta: ¿la variabilidad en esta parte del proceso afecta el problema especificado?

Este método permite explorar formas alternativas de trabajo, detectar cuellos de botella, descubrir problemas ocultos, etc.

Ventajas:

- Obliga a preparar el diagrama de flujo del proceso.
- Se considera al proceso completo como una causa potencial del problema.
- Identifica procesos alternativos de trabajo.
- Se pueden llegar a descubrir problemas no considerados inicialmente.

- Permite que personas que desconocen el proceso se familiaricen con él, lo que facilita su uso.
- Puede usarse para predecir problemas del proceso, poniendo atención especial en las fuentes de variabilidad.

Desventajas:

- Es fácil no detectar las causas potenciales puesto que la gente puede estar muy familiarizada con el proceso haciéndosele todo normal.
- Es difícil usarlo por mucho tiempo sobretodo en procesos complejos.
- Algunas causas potenciales pueden aparecer muchas veces.

Causas principales que inciden en el alto porcentaje de agua para la venta del petróleo crudo EPEP Centro.

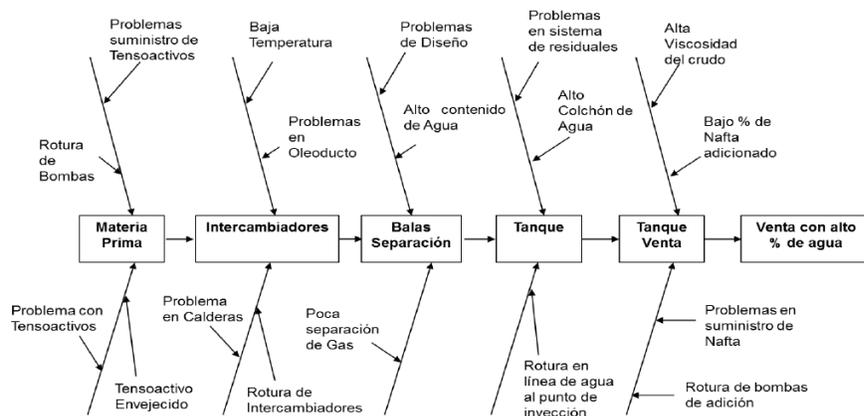


Figura 2.5 Metodología Flujo del Proceso.

Fuente: Conference proceedings, 2019.

Metodología de estratificación o enumeración de causas.

Este método va directamente a las principales causas potenciales de un problema. La selección de estas causas se hace muchas veces a través de una lluvia de ideas. Debe cuidarse atacar causas reales y no consecuencias (Alimov, 2020).

Ventajas y desventajas (Hlevnjak, *et al.*, 2021).

Ventajas:

- Proporciona un agrupamiento claro de las causas potenciales del problema, lo que permite centrarse directamente en el análisis del mismo.
- Este diagrama es por lo general menos complejo que los obtenidos por los otros métodos.

Desventajas:

- Se pueden omitir algunas causas potenciales importantes.
- Puede ser difícil definir subdivisiones principales.
- Se requiere un mayor conocimiento del proceso.
- Se requiere un gran conocimiento de las causas potenciales.

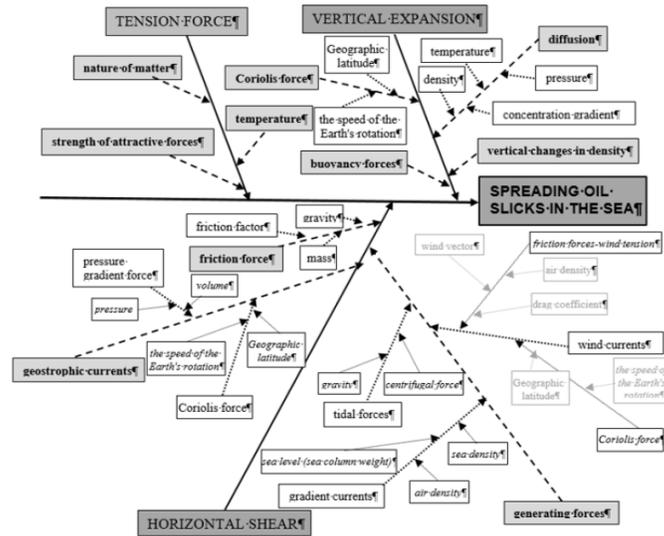


Figura 2.6 Metodología de estratificación o enumeración de causas.

Fuente: (Hlevnjak, *et al.*, 2021).

Capítulo 3. Análisis de los Resultados

En el presente capítulo se explican los resultados de la caracterización estadística de los parámetros tecnológicos del proceso de cementación de camisas de revestimiento. Se expone la influencia de dichos parámetros tecnológicos sobre el medio ambiente a través del índice y el diagrama de Ishikawa y se proponen modificaciones tecnológicas para mejorar la gestión ambiental existente.

3.1 Resultados de la caracterización estadística de los parámetros tecnológicos

Los parámetros tecnológicos estudiados en este trabajo son la densidad, caudal, presión y volumen, descargados de la unidad *Single*, durante la primera etapa de cementación de la camisa de revestimiento intermedia 13^{3/8"} en el pozo X. La cementación de esta etapa tomó alrededor de tres horas y diez minutos, durante la cual se tomaron datos cada 30 segundos, dando un total de 300 mediciones entre los siete tramos bombeados (Tabla 3.1).

3.1.1 Resultados de la caracterización estadística, variable Densidad

Se cuentan con 300 valores de Densidad de 0,734853 a 1,93525 entre los siete tramos.

Tabla 3.2: Resumen estadístico para Densidad.

Tamaño de la muestra	300
Promedio	1,41477
Mediana	1,82539
Moda	0,998653
Varianza	0,2473
Desviación Estándar	0,497293
Coefficiente de Variación	35,1501%
Mínimo	0,734853
Máximo	1,93525
Rango	1,2004
Sesgo Estandarizado	-1,4041
Curtosis Estandarizada	-6,63563

La tabla 3.2 muestra los estadísticos de resumen para Densidad. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma (Figura 3.1). De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada no se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. Como el valor de curtosis no se encuentra dentro del rango esperado, no se puede confiar en el valor de desviación estándar, el cual es aceptable si los datos provinieran de una distribución normal, el coeficiente de variación confirma esta inexactitud pues es superior al 12%, lo que significa una dispersión relativamente alta (Figura 3.2).

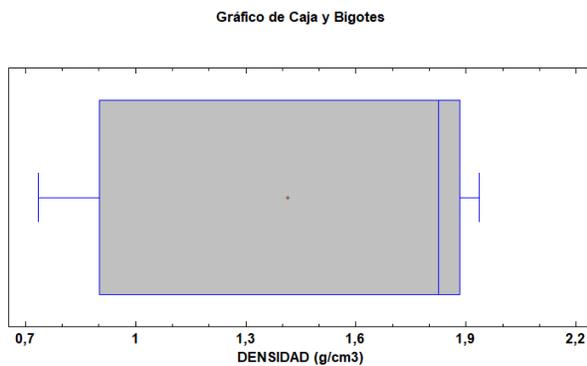


Figura 3.1: Gráfico de Caja y Bigotes.

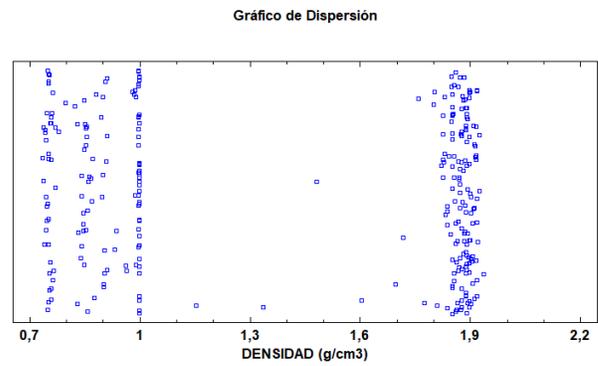


Figura 3.2: Gráfico de Dispersión.

Como la muestra medida cuenta con una dispersión evidente, se realizó el análisis de varianza a través de la prueba ANOVA de una vía. Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para Densidad. Construye varias pruebas y gráficas (Figuras 3.3, 3.4 y 3.5) para comparar los valores medios de Densidad para los 7 diferentes niveles de Tramos. La prueba-F en la tabla ANOVA determina las diferencias entre las medias (Tabla 3.3), la Prueba de Rangos Múltiples dice cuáles medias son significativamente diferentes de otras (Tabla 3.4) y la Prueba de Kruskal-Wallis compara las medianas en lugar de las medias para buscar la presencia de valores atípicos (Tabla 3.6).

Tabla 3.3: ANOVA para Densidad (g/cm^3) por Tramos.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	70,3317	6	11,722	951,11	0,0000
Intra grupos	3,61106	293	0,0123244		
Total (Corr.)	73,9428	299			

La tabla ANOVA descompone la varianza de Densidad en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 951,114, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Densidad entre un nivel de Tramos y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 3.4: Pruebas de Múltiple Rangos para Densidad (g/cm^3) por Tramos (Método: 95,0 porcentaje LSD)

<i>Tramos</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
T4	96	0,870139	X
T3	14	0,966521	X
T7	10	0,997862	X
T2	16	0,997919	X
T1	7	0,998139	X
T5	153	1,87507	X
T6	4	1,88709	X

En la tabla 3.4 se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0. La homogeneidad de los tramos en la variable Densidad se ve influenciada por la jerarquía de las fricciones, para una cementación exitosa es fundamental que esta se cumpla. Se puede observar en la tabla que se satisface este requerimiento, pues los tramos 1, 2, 3 y 7 son homogéneos, siendo estos los pertinentes al bombeo del lavador y el agua, los cuales necesitan presentar densidades similares, lo

contrario indicaría la contaminación de los mismos. De igual manera la homogeneidad entre los tramos 5 y 6, es favorable, pues representa un correcto desplazamiento de la lechada de cemento a través de la camisa. Es lógico que el tramo 4 no sea homogéneo con el resto pues en él se busca alcanzar la densidad adecuada para una correcta cementación

La tabla 3.5 (Anexo 14) aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 14 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 3.6: Prueba de Kruskal-Wallis para Densidad (g/cm^3) por Tramos

<i>Tramos</i>	<i>Tamaño Muestra</i>	<i>Rango Promedio</i>
T1	7	121,286
T2	16	116,813
T3	14	98,1429
T4	96	52,5417
T5	153	221,513
T6	4	240,125
T7	10	116,2
Estadístico = 239,19 Valor-P = 0		

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de Densidad dentro de cada uno de los 7 niveles de Tramos son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (*rank*) promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

3.1.2 Resultados de la caracterización estadística, variable Caudal

Se cuentan con 300 valores de Caudal con rango desde 0 a 1292,67 entre los siete tramos.

Tabla 3.7: Resumen estadístico para Caudal.

Tamaño de la muestra	300
Promedio	469,305
Mediana	707,699
Moda	0
Varianza	173809,0
Desviación Estándar	416,904
Coefficiente de Variación	88,8344%
Mínimo	0
Máximo	1292,67
Rango	1292,67
Sesgo Estandarizado	-0,851324
Curtosis Estandarizada	-6,25359

La tabla 3.7 muestra los estadísticos de resumen para Caudal. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma (Figura 3.6). De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada no se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. Como el valor de curtosis no se encuentra dentro del rango esperado, no se puede confiar en el valor de desviación estándar, sin embargo, en este caso nos habla de una alta dispersión, lo cual se ve confirmado por el coeficiente de variación, que es muy alto (Figura 3.7).

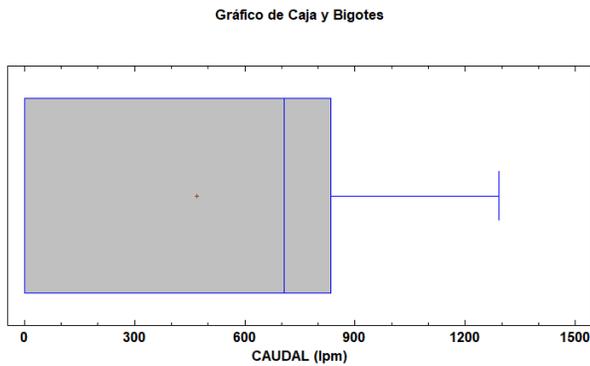


Figura 3.6: Gráfico de Caja y Bigotes.

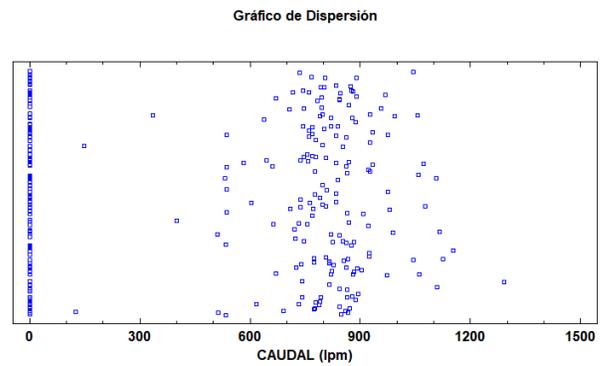


Figura 3.7: Gráfico de Dispersión.

Como la muestra medida cuenta con una alta dispersión, se realizó el análisis de varianza a través de la prueba ANOVA de una vía. Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para Caudal. Construye varias pruebas y gráficas (Figuras 3.8, 3.9 y 3.10) para comparar los valores medios de Caudal para los 7 diferentes niveles de Tramos. La prueba-F en la tabla ANOVA determina las diferencias entre las medias (Tabla 3.8), las Pruebas de Rangos Múltiples dicen cuáles medias son significativamente diferentes de otras (Tabla 3.9) y la Prueba de Kruskal-Wallis la cual compara las medianas en lugar de las medias para buscar la presencia de valores atípicos (Tabla 3.11).

Tabla 3.8: ANOVA para Caudal (L/min) por Tramos

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	4,53244E7	6	7,55407E6	333,11	0,0000
Intra grupos	6,64446E6	293	22677,4		
Total (Corr.)	5,19689E7	299			

La tabla ANOVA descompone la varianza de Caudal en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 333,111, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Caudal entre un nivel de Tramos y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 3.9: Pruebas de Múltiple Rangos para Caudal (L/min) por Tramos (Método: 95,0 porcentaje LSD)

<i>Tramos</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
T1	7	0	X
T6	4	0	X
T4	96	0	X
T2	16	34,2602	X
T7	10	635,731	X
T3	14	798,875	X
T5	153	801,972	X

En la tabla 3.9 se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0. La homogeneidad de los tramos 1, 2, 4 y 6 en la variable Caudal se debe a que en estos tramos no se tomaron datos, pues no fueron bombeados fluidos por la unidad *Single*. En los tramos 3 y 5 la homogeneidad de los valores se debe a la gran cantidad de litros por minuto de lavador y lechada de cemento bombeados para cubrir el espacio anular entre la camisa y la formación. Es lógico que el tramo 7 no sea homogéneo con el resto pues se deja de medir caudal una vez alcanzado el volumen deseado. La tabla 3.10 (Anexo 15) aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 14 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 3.11: Prueba de Kruskal-Wallis para Caudal (L/min) por Tramos

<i>Tramos</i>	<i>Tamaño Muestra</i>	<i>Rango Promedio</i>
T1	7	63,5
T2	16	71,6875
T3	14	224,071
T4	96	63,5
T5	153	209,611
T6	4	63,5
T7	10	200,1
Estadístico = 221,642 Valor-P = 0		

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de Caudal dentro de cada uno de los 7 niveles de Tramos son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (*rank*) promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

3.1.3 Resultados de la caracterización estadística, variable Presión

Se cuentan con 300 valores de Presión con rango desde 0 a 23,6421 entre los siete tramos.

Tabla 3.12: Resumen estadístico para Presión.

Tamaño de la muestra	300
Promedio	2,69477
Mediana	1,75816
Varianza	14,5107
Desviación Estándar	3,80929
Coefficiente de Variación	141,358%
Mínimo	0
Máximo	23,6421
Rango	23,6421
Sesgo Estandarizado	27,278
Curtosis Estandarizada	63,1215

La tabla 3.12 muestra los estadísticos de resumen para Presión. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma (Figura 3.11). De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor de sesgo estandarizado y el valor de curtosis estandarizado no se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. Como ambos valores indican la desviación de la normalidad, no se puede confiar en la desviación estándar, la cual a pesar de ser aceptable es contradicha por el coeficiente de variación el cual supera el 100%, su dispersión es sumamente alta (Figura 3.12).

Gráfico de Caja y Bigotes

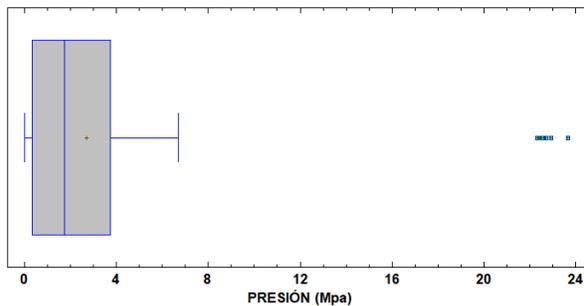


Figura 3.11: Gráfico de Caja y Bigotes.

Gráfico de Dispersión

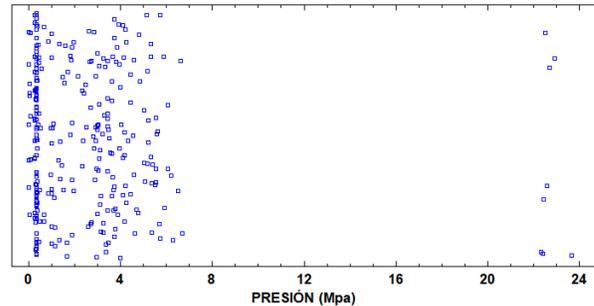


Figura 3.12: Gráfico de Dispersión.

Como los valores estudiados cuentan con una gran dispersión, se realizó el análisis de varianza a través de la prueba ANOVA de una vía. Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para Presión. Construye varias pruebas y gráficas (Figuras 3.13, 3.14 y 3.15) para comparar los valores medios de Presión para los 7 diferentes niveles de Tramos. La prueba-F en la tabla ANOVA determina las diferencias entre las medias (Tabla 3.13), las Pruebas de Rangos Múltiples dicen cuáles medias son significativamente diferentes de otras (Tabla 3.14) y la Prueba de Kruskal-Wallis la cual compara las medianas en lugar de las medias para conocer la presencia de valores atípicos (Tabla 3.16).

Tabla 3.13: ANOVA para Presión (MPa) por Tramos

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	2078,76	6	346,46	44,92	0,0000
Intra grupos	2259,93	293	7,71307		
Total (Corr.)	4338,69	299			

La tabla ANOVA descompone la varianza de Presión en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 44,9186, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Presión entre un nivel de Tramos y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 3.14: Pruebas de Múltiple Rangos para Presión (MPa) por Tramos (Método: 95,0 porcentaje LSD)

<i>Tramos</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
T1	7	0,123121	XX
T4	96	0,3456	X
T6	4	0,394725	XX
T7	10	0,886666	XX
T3	14	2,18909	XX
T5	153	3,55702	X
T2	16	11,8172	X

En la tabla 3.14 se han identificado 4 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0. El tramo 2 le corresponde a la prueba de presión, por tanto, es favorable su no homogeneidad con el resto de los tramos, pues esta prueba se realiza para encontrar el valor máximo de presión que no se debe alcanzar durante la cementación para el correcto funcionamiento y hermeticidad de todos los equipamientos y líneas que participarán en la cementación, además se utiliza para verificar que no existan

fugas. La homogeneidad del resto de los grupos se explica por el aumento paulatino de la presión mientras aumenta la profundidad que alcanzan los fluidos y la consecuente disminución de la misma mientras estos ascienden por el ánulo.

La tabla 3.15 (Anexo 16) aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 11 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 3.16: Prueba de Kruskal-Wallis para Presión (MPa) por Tramos

<i>Tramos</i>	<i>Tamaño Muestra</i>	<i>Rango Promedio</i>
T1	7	33,5714
T2	16	191,469
T3	14	166,214
T4	96	63,0885
T5	153	211,114
T6	4	69,25
T7	10	89,05
Estadístico = 199,234 Valor-P = 0		

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de Presión (MPa) dentro de cada uno de los 7 niveles de Tramos son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (*rank*) promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

3.1.4 Resultados de la caracterización estadística, variable Volumen

Se cuentan con 300 valores de Volumen con rango desde 0 a 53,3878 entre los siete tramos.

Tabla 3.17: Resumen estadístico para Volumen.

Tamaño de la muestra	300
Promedio	14,8952
Mediana	3,76799
Moda	0
Varianza	312,629
Desviación Estándar	17,6813
Coefficiente de Variación	118,705%
Mínimo	0
Máximo	53,3878
Rango	53,3878
Sesgo Estandarizado	5,32442
Curtosis Estandarizada	-3,47067

La tabla 3.17 muestra los estadísticos de resumen para Volumen. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma (Figura 3.16). De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor de sesgo estandarizado y el valor de curtosis estandarizada no se encuentran dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. Tanto la desviación estándar como el coeficiente de variación nos hablan de una alta dispersión (Figura 3.17).

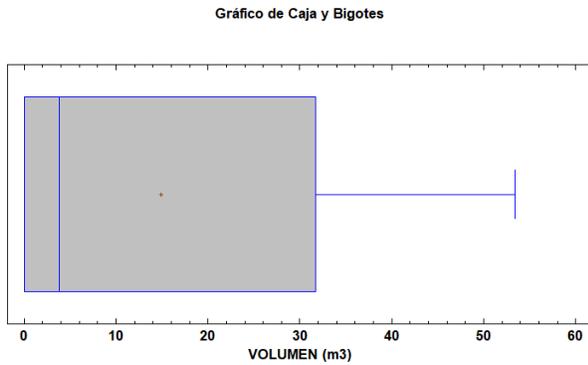


Figura 3.16: Gráfico de Caja y Bigotes.

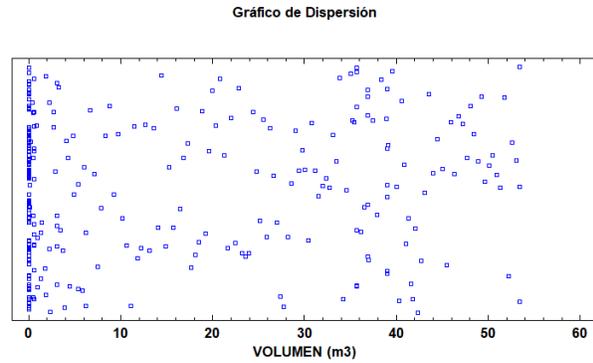


Figura 3.17: Gráfico de Dispersión.

Por la evidente dispersión de los datos observada en el gráfico de dispersión, se realizó el análisis de varianza a través de la prueba ANOVA de una vía. Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de un factor para Volumen. Construye varias pruebas y gráficas (Figuras 3.18, 3.19 y 3.20) para comparar los valores medios de Volumen para los 7 diferentes niveles de Tramos. La prueba-F en la tabla ANOVA determina las diferencias entre las medias (Tabla 3.18), las Pruebas de Rangos Múltiples dicen cuáles medias son significativamente diferentes de otras (Tabla 3.19) y la Prueba de Kruskal-Wallis la cual compara las medianas en lugar de las medias para buscar la presencia de valores atípicos (Tabla 3.21).

Tabla 3.18: ANOVA para Volumen (m^3) por Tramos

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	59653,6	6	9942,27	86,13	0,0000
Intra grupos	33822,4	293	115,435		
Total (Corr.)	93476,0	299			

La tabla ANOVA descompone la varianza de Volumen en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente dentro-de-grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 86,1288, es el cociente entre el estimado entre-grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Volumen entre un nivel de Tramos y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 3.19: Pruebas de Múltiple Rangos para VOLUMEN (m³) por Tramos (Método: 95,0 porcentaje LSD)

<i>Tramos</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
T1	7	0	X
T6	4	0	X
T4	96	0,000828057	X
T2	16	0,551486	X
T7	10	2,19561	X
T3	14	3,35576	X
T5	153	28,6976	X

En la tabla 3.19 se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0. La homogeneidad de los tramos 1, 2, 3, 4, 6 y 7, se debe a que los volúmenes bombeados en dichas etapas son escasos (van de 0 a 6 m³), estos fluidos cumplen la función de probar y limpiar las líneas, y de desplazar la lechada. El tramo 5 es el único no homogéneo, pues corresponde al bombeo de la lechada de cemento, ya que se trata de un proceso acumulativo es el tramo con mayor dispersión de (0 a 53) m³. La tabla 3.20 (Anexo 17) aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la salida muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 6 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 3.21: Prueba de Kruskal-Wallis para Volumen (m³) por Tramos

Tramos	Tamaño Muestra	Rango Promedio
T1	7	53,5
T2	16	118,344
T3	14	145,036
T4	96	54,0573
T5	153	222,761
T6	4	53,5
T7	10	136,55
Estadístico = 252,241 Valor-P = 0		

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de Volumen dentro de cada uno de los 7 niveles de Tramos son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango (*rank*) promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza.

3.2 Resultados de la aplicación de la metodología para evaluar el estado global del proceso tecnológicos

En este epígrafe se muestran los resultados de la evaluación global del proceso tecnológico a partir de la implementación del índice sintético (Anexo 18 y 19) y su relación con el medio ambiente a través del diagrama de Ishikawa.

3.2.1 Resultados de la implementación del índice

Para la aplicación de la metodología para evaluar el estado global del proceso tecnológico se tienen en cuenta los siguientes pasos:

Fase 1: Determinación del número de clusters

- Lectura de datos
- Determinar valor óptimo
- Determinar matriz de distancias
- Determinar clusters (Agrupamiento y Dendograma) (Anexo 20)

Fase 2: Construcción del índice

- Determinar cantidad de variables que cumplan con las normas establecidas
- Determinar el estado de los indicadores a partir de las variables
- Construcción del índice a partir de los indicadores

Fase 1

Lectura del documento

```
datos_csv<-read.csv(documento, header = TRUE, sep = "\t", encoding = "UTF-8")
```

	DENSIDAD	CAUDAL	PRESION	VOLUMEN
1	0.9986528	0	0.00000000	0
2	0.9974548	0	0.00689476	0
3	0.9974548	0	0.00689476	0
4	0.9974548	0	0.00689476	0
5	0.9986528	0	0.00689476	0
6	0.9986528	0	0.45505416	0

	DENSIDAD	CAUDAL	PRESION	VOLUMEN
295	0.9986528	1060.874	0.97905592	2.368906
296	0.9986528	1044.499	1.39274152	2.893563
297	0.9986528	0.000	0.04826332	3.084348
298	0.9986528	0.000	0.08963188	3.084348
299	0.9969756	0.000	0.07584236	3.084348
300	0.9969756	0.000	0.06205284	3.084348

Figura 3.21: Código para lectura del documento y datos leídos.

Determinar valor óptimo

Para determinar el estado del indicador es necesario establecer el valor óptimo de la muestra, para el estudio se tuvo en cuenta que el 75% de los datos cumpliera con la norma de cada variable

```
optimo<-(75*nrow(datos_csv))/100
```

Figura 3.22: Código para establecer valor óptimo de la muestra

Matriz de distancia

La matriz de distancia se puede calcular usando la función `dist()`. Esta función calcula y devuelve la matriz de distancia calculada utilizando la medida de distancia especificada para calcular las distancias entre las filas de una matriz de datos. Para ejecutar esta función.

El argumento `x` especifica una matriz numérica, un marco de datos o un objeto “dist”. El método del segundo argumento especifica la medida de distancia que se utilizará (“euclidiana”)

```
> matriz.distancia <- dist(data, method = "euclidean")
> matriz.distancia
```

	DENSIDAD	CAUDAL	PRESION
CAUDAL	5.664195		
PRESION	10.516806	7.111036	
VOLUMEN	6.904267	4.933109	6.836388

Figura 3.23: Matriz de distancia Visualización *Rstudio*

Agrupamiento divisional jerárquico

Para la función ‘`diana`’, se requieren los valores de distancia que se pueden calcular en R utilizando la función ‘`dist`’. La medida predeterminada para la función `dist` es ‘Euclidiana’

```
# computar agrupamiento jerárquico divisivo
hc <- diana(data, d = matriz.distancia)

# Coeficiente de División
hc$dc
## [1] 0.9305939

# Número óptimo de clusters
hc$cluster
## [1] 3

# Generar Dendograma
fviz_dend(x = res.hc, cex = 0.8, lwd = 0.8, k = hc$cluster,
          k_colors = c("red", "green3", "blue", "magenta"),
          rect = TRUE,
          rect_border = "gray",
          rect_fill = FALSE)
```

Figura 3.24: Agrupamiento divisional jerárquico.

El software R agrupa los parámetros por la similitud de los datos en clusters, esta asociación por grupos homogéneos (dendograma) son los indicadores a evaluar. En la figura 3.25 se observa la definición de tres grupos (indicadores):

Indicador 1: Densidad.

Indicador 2: Volumen y Caudal.

Indicador 3: Presión.

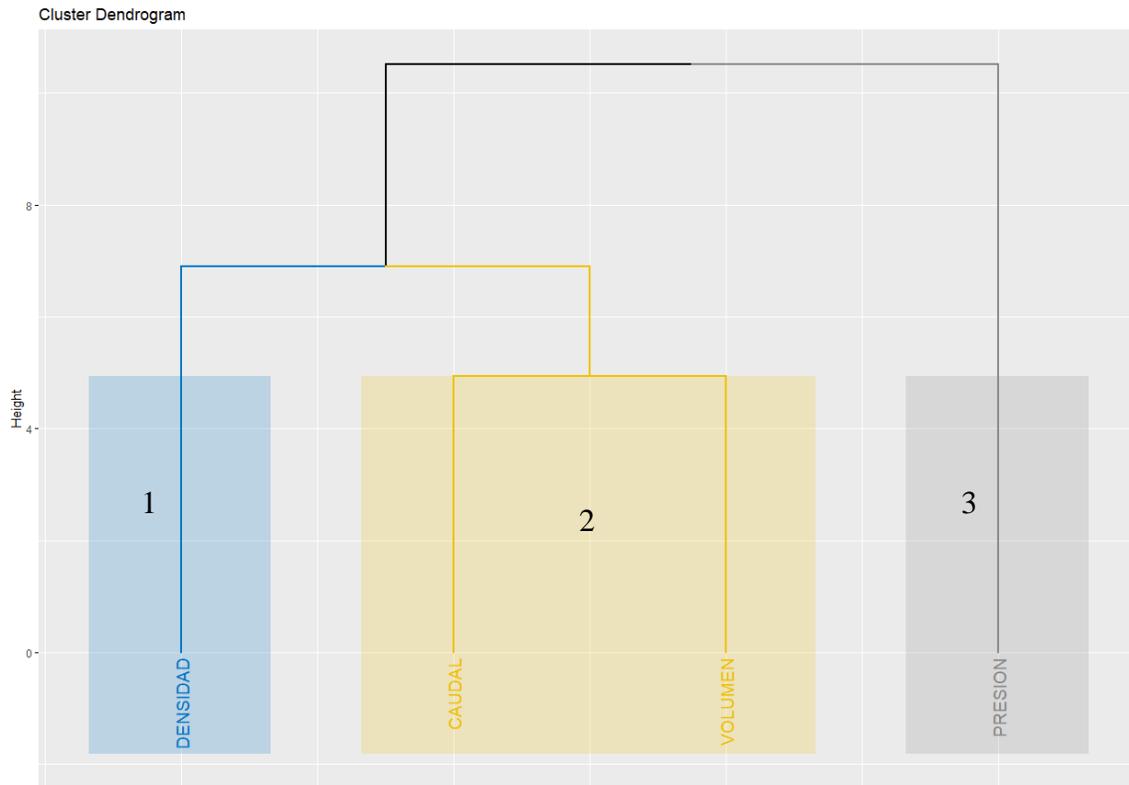


Figura 3.25: Dendrograma

Fase 2

Determinar los estados de las variables

Para evaluar cada punto de la muestra de los diferentes parámetros se tienen en cuenta las especificaciones operacionales de cada uno. Para la evaluación total de cada parámetro según los puntos analizados se consideró que con más del 75 % dentro del rango especificado el parámetro se clasifica como bueno y el resto como malo (Tabla 3.22).

```

> Contador_presion(presion)
[1] 292
> Contador_caudal(caudal)
[1] 287
> Contador_densidad(densidad)
[1] 134
> Contador_volumen(volumen)
[1] 300

```

Figura 3.26: Cantidad de elementos que cumplen con la norma de cada variable.

Tabla 3.22: Especificaciones de los parámetros operacionales y su clasificación.

Parámetros tecnológicos	Especificación	Clasificación
Densidad	1,00-1,90 g/cm ³	Mal
Caudal	Máx. 1000 L/min	Bien
Presión	Máx. 21 MPa	Bien
Volumen	Máx. 140 m ³	Bien

Determinar el estado de los indicadores a partir de las variables

Los indicadores se clasifican en bien o mal, según la evaluación general de cada parámetro que los compone, más del 75 % en bien y menos de mal:

```

> ind1<-indicador1(cont_densidad,optimo)
> ind1
[1] ``MAL``
> ind2<-indicador2(cont_caudal,cont_volumen,optimo)
> ind2
[1] ``BIEN``
> ind3<-indicador3(cont_presion,optimo)
> ind3
[1] ``BIEN``

```

Figura 3.27: Estado general de los indicadores.

El indicador 1 (densidad) fue clasificado como mal según la evaluación general del parámetro al analizar dato por dato pues solo contaba con el 40 % de los datos dentro de las especificaciones, sin embargo al ser un parámetro tan importante se realizó un análisis por

tramos para comprobar qué tan fuera de rango se encontraban los valores y si se respetó la jerarquía de los fluidos durante la cementación, resultando que la misma fue respetada pero solo se encontraba dentro de rango el 70 % de los datos por tramo y el criterio utilizado para clasificar su estado requiere un mínimo del 75 % para ser considerado como bueno.

Construcción del índice a partir de los indicadores

Se determina el estado del índice a partir de los siguientes criterios:

Tabla 3.23: Criterio de clasificación del índice

Estado	Criterio
BIEN	3 indicadores bien
REGULAR	2 indicadores bien
MAL	1 indicador bien

```

> indice(ind1, ind2, ind3)
  Ind1 ind2 ind3
1  MAL BIEN BIEN
> estado_indice<-indice(ind1, ind2, ind3)
> estado_indice
[1] ``REGULAR``

```

Figura 3.28: Determinación del estado general del índice.

La implementación del índice sintético evaluó el estado general de funcionamiento del proceso de cementación de camisas de revestimiento como Regular.

3.2.2 Resultados del método de estratificación

Las principales causas que afectan los parámetros operacionales en el proceso son los equipos, el mantenimiento, la mano de obra y las mediciones, el material afecta también a la densidad y el volumen (figura 3.29).

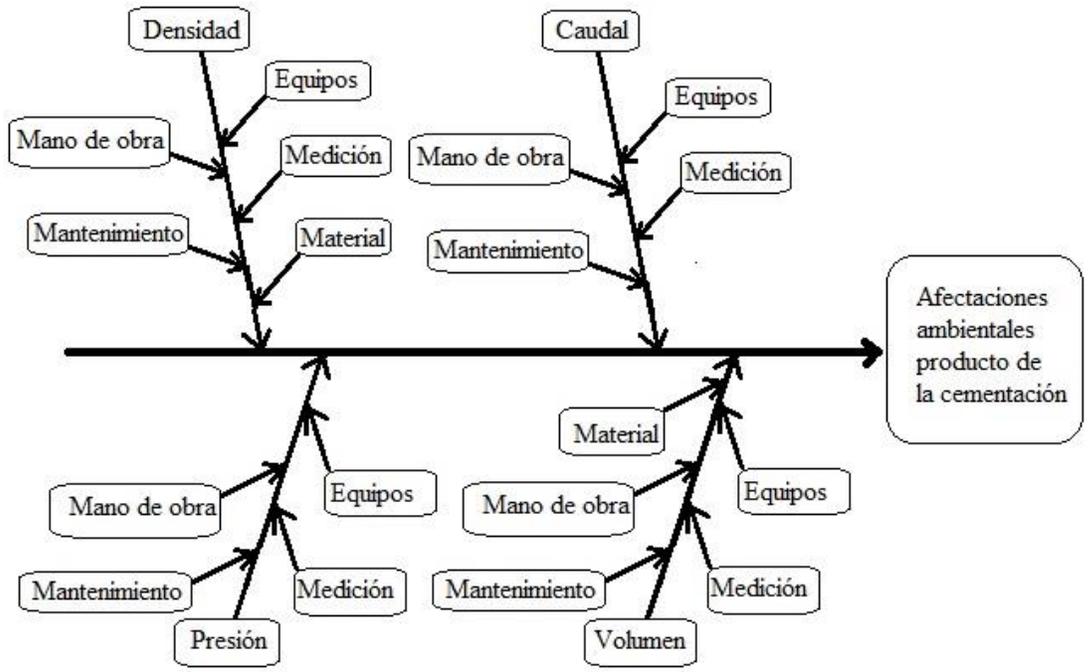


Figura 3.29: Diagrama de Ishikawa.

Una operación de cementación primaria de camisas de revestimiento deficiente, origina continuas dificultades en la vida productiva del pozo y a largo plazo al medio ambiente, además de las costosas operaciones necesarias para corregir estas fallas.

El correcto control de los parámetros tecnológicos es primordial para una cementación exitosa. Por ello se realizan diversas pruebas antes, durante y después, de la misma para verificar su calidad.

La presión de fractura de la formación, es la presión que provocará la ruptura de determinado estrato o formación en las profundidades, originando pérdida de lodos hacia la misma, puede ser parcial o total. Si se rebasa la máxima presión permisible a la fractura puede ocurrir un reventón subterráneo, pudiendo alcanzar la superficie por fuera de la TR. La presión hidrostática provocada por los fluidos dentro del pozo más la presión aplicada por las bombas para inducir el flujo no debe sobrepasar dicha presión de fractura. La presión provocada por la columna de fluidos en el pozo es tal que, las condiciones de fragüe son muy diferentes a las obtenidas en superficie y presión atmosférica. La presión de poro indica la permeabilidad de la formación, las rocas con alta permeabilidad y porosidad tienen más posibilidad de provocar un brote que una roca con baja permeabilidad y porosidad.

El desbalance entre la presión de formación y presión hidrostática de los fluidos puede ocasionar brotes. Si los brotes son detectados a tiempo, aplicando las medidas inmediatas y correctas para manejarlo en superficie no causa daños industriales, ecológicos o al personal. Pero en caso contrario, se incrementan los tiempos y costos de la intervención. Si el brote no es detectado a tiempo, y no se aplican las medidas correctas en superficie para manejarlo o no se tiene integridad en los sistemas superficiales de control; este puede manifestarse de forma violenta en superficie, con todo el potencial contenido en la formación productora. En algunos de los casos un descontrol puede alcanzar la magnitud de siniestro, causando la pérdida total del equipo, del mismo pozo y daños severos al personal, al entorno social y ecológico.

Cuando hay un aumento de la presión en el pozo, la tubería de revestimiento se expande hacia el exterior. Esta expansión, aunque relativamente pequeña, genera tensiones de tracción en el cemento. Cuando el cemento no tiene la flexibilidad para moverse con el cambio de diámetro interno, las tensiones inducidas en el revestimiento hacen que el cemento falle en tracción. Se debe esperar un tiempo prudente para que la lechada de cementación desarrolle una resistencia a la compresión necesaria para poder apoyar la tubería de revestimiento y logre soportar diferentes presiones antes de continuar con las operaciones, sino puede ocurrir un reventón, en casos extremos podría colapsar el pozo incurriendo en modificaciones permanentes a la formación.

En el pozo, “Adherencia de corte” y “Adherencia hidráulica” son dos criterios a menudo considerados para efectivizar la zona de aislamiento a lo largo de las interfaces cemento/tubería de revestimiento y cemento/formación. La adherencia de corte mecánicamente soporta la tubería en el pozo y es determinada por medición de fuerzas requeridas para inicializar el movimiento de la tubería en un revestidor de cemento. La adherencia hidráulica bloquea la migración de fluidos en un anillo cementado, de lo contrario gases ácidos como el Sulfuro de Hidrógeno y el Dióxido de Carbono pueden escapar a la superficie. Para la zona de aislamiento es más importante la adherencia hidráulica que la adherencia de corte.

La DSTPIP no cuenta con equipos para determinar con precisión la geometría del pozo, por lo que al calcular el volumen de lechada de cemento a utilizar se hacen estimaciones a las que se le suma un porcentaje de exceso. Si el volumen del cemento es subestimado, el tope

del cemento puede ser menor que el deseado lo cual en el caso del *liner* puede resultar en una operación de remediación extremadamente cara. Información errónea de la litología y geometría del pozo ocasiona la utilización de parámetros de diseño incorrectos. Cálculo erróneo en la cantidad de cemento, propiedades erróneas de la lechada. Un volumen de cemento insuficiente debido a datos de registro de calibración incorrectos o desconocidos. TOC irregular. Lo que indica que el aislamiento zonal, el cual es objetivo principal de la cementación, no es efectivo, a largo plazo, si no se realizan trabajos de remediación, puede ocurrir migración de gases a la superficie, corrosión de las tuberías y colapso del pozo.

La presión que es impuesta a la lechada por el peso hidrostático de los fluidos que están dentro del pozo reduce el tiempo de bombeabilidad. La resistencia a la compresión de la lechada y la deshidratación de la misma también se ven afectadas por la presión. Un tiempo de bombeo insuficiente puede provocar el fragüe de la lechada dentro de la tubería provocando la falla total del proceso, por eso, el diseño de la lechada considera un porcentaje de exceso de tiempo bombeable.

Una señal de la existencia de pobre aislamiento zonal es que presente valores de presión de revestimiento en superficie. En estos casos, tratamientos remediales son necesarios. La zona productora de gas donde se evidencia la fuga debe ser ubicada por diferentes métodos para conocer el lugar exacto donde debe repararse el trabajo de cementación.

El control de la densidad de los fluidos utilizados durante el proceso es primordial para una cementación homogénea y exitosa. El parámetro requiere un estricto control de lo que se conoce como la jerarquía de las fricciones, durante la perforación del agujero se utiliza el lodo de perforación, según su composición y densidad se elige un fluido lavador (para disminuir la viscosidad y la carga química del lodo) y un fluido separador, no hacerlo puede llevar a que el cemento deje un canal de lodo originando una canalización, esto provoca desestabilización de la cementación entre la tubería y el agujero, la cual puede llevar al colapso del mismo. Cuando se utilizan lechadas de cemento de alta densidad en pozos con fluidos de control de baja densidad, se forma una interface inestable, el cemento se canaliza y se diluye con el lodo (se puede arreglar con la colocación de un volumen viscoso u otra técnica de puenteo y con el uso de un difusor).

Para determinar la densidad en una lechada se deben tomar en cuenta dos propiedades importantes de las formaciones perforadas: la presión de poro y la presión de fractura.

Siempre se deberá diseñar con la máxima densidad permisible por la presión de fractura, ya que proporciona una mayor resistencia compresiva en el cemento. Densidad equivalente de circulación (ECD) elevada que fractura la formación y ocasiona pérdidas.

La canalización del cemento puede ocurrir por diferentes causas, como el diámetro del hueco muy ancho. Al ser muy ancho va a afectar la centralización de la tubería de revestimiento, provocando que el desplazamiento de los fluidos no sea uniforme afectando directamente la remoción del fluido de perforación. Cuando la tubería no está centralizada, los efectos de las fuerzas que resisten el arrastre del fluido de perforación no serán uniformes a través del área de flujo en el espacio anular, aumentando la probabilidad de que el fluido de perforación se canalice en el lado angosto del espacio anular. La descentralización de la tubería de revestimiento afecta la velocidad de flujo en el lado angosto del espacio anular, provocando incrementar la velocidad de flujo para iniciar el movimiento del fluido de perforación situado en el espacio anular. Antes de bombear la lechada de cementación, se bombean unos preflujos, cuya función es remover y arrastrar eficazmente el fluido de perforación, evitando que el fluido de perforación quede en el espacio anular afectando la cementación primaria. Los preflujos que se bombean son el lavador químico y el espaciador mecánico. La función principal del lavador químico es la dilución y remoción del fluido de perforación que se encuentra en el espacio anular, con el fin de que exista una buena adherencia del cemento a la tubería de revestimiento. Si no se acondiciona el fluido de perforación antes de empezar con la operación de cementación, la resistencia de gel y la viscosidad plástica de este fluido van a ser altos debido a los ripios producidos por los trabajos de perforación, provocando una disminución en la eficiencia del desplazamiento, debido al aumento de las fuerzas de arrastre de desplazamiento necesarias para retirar el fluido de perforación gelificado.

Hay diversos factores que inciden en la cementación por ejemplo inyección de gas, cambios de temperatura durante la producción, cambios de presión, cambios en la formación por tectónica, completación de los pozos, perforación, etc. Estos factores podrían producir en el cemento fracturas, es decir, agrietamiento del cemento, micro anillos, pérdida de aislamiento zonal, comunicación entre zonas productoras, pérdida de adherencia entre el cemento – tubería de revestimiento y formación.

La migración de Gas es un problema de gran importancia en las operaciones de cementación primaria. Cuando el cemento es bombeado y comienza a desarrollar esfuerzos compresivos,

hay una caída de presión hidrostática debida a la adhesión de la lechada tanto a la tubería como a la formación. Esta adhesión ocurre gracias al desarrollo de las fuerzas estáticas de gel en el cemento en adición a una pérdida de volumen de la lechada. La adherencia del cemento disminuye cuando la presión cae por debajo de la presión de la formación adyacente y aún está en un estado deformable, permitiendo de esta manera la migración de gas hacia el anular.

El revestimiento de superficie debe ser cementado para sellar y proteger las fuentes de agua natural en el subsuelo y para soportar el peso de la sarta de tubería más profunda. El revestimiento intermedio se cementa para sellar formaciones sobre presionadas, aislar formaciones que no son de interés en la operación y zonas de pérdida de circulación. Y finalmente el revestimiento de producción se cementa para prevenir la migración de fluidos al anular y para garantizar el aislamiento zonal. La comunicación interzonal y la migración de fluidos pueden contaminar las fuentes de agua fresca en el subsuelo.

Los reventones originan severos daños a las TR y al equipo superficial, pueden provocar comunicación, fisuras naturales o fracturas detrás del revestimiento, canales o fracturas inducidas o el agotamiento de la producción.

Una deficiente operación de cementación ocasiona consecuencias como incremento de los costos, riesgo de pérdida del pozo, riesgo de impacto ambiental, fuga de gases, grietas que presentan fugas de agua e inseguridad en general, por lo que es importante el control de sus parámetros tecnológicos para evitar consecuencias tecnológicas, ambientales y al ser humano. Para evitar eventos posiblemente catastróficos se deben aplicar sistemas adecuados de:

- Fluidos de perforación
- Conexiones superficiales de control
- Equipos superficiales de parámetros
- Practicas operativas
- Personal debidamente capacitado y entrenado

Riesgos, oportunidades y acciones durante el proceso de cementación de camisas de revestimiento.

Riesgo

- Incumplimiento del Plan de trabajo de la operación
- Incumplimiento de las indicaciones técnicas

- Insuficiente cemento para ejecutar las operaciones.
- Utilización de cemento no adecuado para las operaciones.
- Falta de cultura de producción: mantenimiento y conservación.
- Disponibilidad de aditivos químicos para garantizar las cementaciones previstas.

Oportunidad

- Asegurar la correcta ejecución del Plan de trabajo percibiendo y tomando medidas para mejorar el desempeño del proceso.
- Garantizar la calidad de las cementaciones.
- Prever la paralización de las actividades por falta de cemento.
- Garantizar la calidad de las cementaciones, evitando el atrapamiento de la tubería por fragüe anticipado, espacio anular no hermético, entrada no deseada de hidrocarburos líquidos y gaseosos evitando atraso en las operaciones.
- Disminuir el deterioro de las partes y componentes del equipo (bombas, tuberías, uniones giratorias, juntas, estructura del equipo, cabezas de cementación, *chikzan* y válvulas, así como sustitución de mangueras.
- Evitar las paradas de las operaciones.
- Cumplir con las solicitudes de los servicios a clientes.

Acción a tomar

- Análisis de las salidas para determinar si hay oportunidad que pueden considerarse como parte de la mejora.
- Chequear que se realice las operaciones de cementación con el análisis de diseño.
- Verificar que se realice seguimiento de las operaciones teniendo en cuenta la disponibilidad de cemento para las operaciones.
- Verificar que la fábrica entregue el certificado de calidad de cada lote de cemento y tener el análisis de laboratorio antes del servicio.
- Chequear que al término de cada operación se limpie las partes y piezas del equipo y se engrase y/o conserve las roscas y conexiones.
- Realizar las solicitudes en tiempo teniendo en cuenta los planes de perforación.

3.3 Conclusiones parciales

- El análisis estadístico de los parámetros tecnológicos, ofrece que los datos no presentan una distribución normal. Sin embargo, al analizar la homogeneidad de los tramos estos siguen un orden lógico.
- El índice sintético construido a partir de los indicadores hallados, arroja que el estado global de funcionamiento del proceso es regular.
- Las principales causas que afectan al proceso son los equipos, el mantenimiento, la mano de obra, las mediciones y el material utilizado.

Conclusiones

- La aplicación de un índice sintético permitió evaluar, el estado global de funcionamiento del proceso de cementación de camisas de revestimiento regular.
- El proceso de cementación de camisas de revestimiento es un proceso de bombeo que se aplica para cada fase en la construcción del pozo, se debe llevar a cabo para los diferentes agujeros en la perforación: conductor, superficial, intermedio y de producción. Se bombea un volumen de lechada de cemento, con la intención de cubrir el espacio anular entre las paredes del agujero y la camisa.
- Los parámetros tecnológicos medidos en el proceso de cementación de camisas de revestimiento fueron evaluados como: Densidad – Mal, Caudal – Bien, Volumen – Bien y Presión – Bien.
- Para la evaluación del proceso se agrupan los parámetros tecnológicos en tres indicadores: Indicador 1 – Densidad, Indicador 2 – Caudal y Volumen e Indicador 3 – Presión; los cuales fueron evaluados de Mal, Bien y Bien respectivamente.
- Las principales causas que afectan los parámetros operacionales en el proceso son los equipos, el mantenimiento, la mano de obra y las mediciones, el material afecta también a la densidad y el volumen.
- Los principales impactos que provoca el proceso en el medio ambiente son la contaminación de fuentes de agua fresca en el subsuelo, liberación de gases como el Sulfuro de Hidrógeno y el Dióxido de Carbono a la atmósfera y modificación irremediable de la formación.

Recomendaciones

- Realizar un taller participativo en la DSTPIP en pos de debatir los resultados de la implementación del índice sintético y realizar una lluvia de ideas para determinar modificaciones tecnológicas con vista al mejoramiento del proceso de cementación de camisas de revestimiento.
- Complementar la investigación realizada con un estudio de la limpieza de los equipos y disposición final de los residuales, los desechos de lodo y lechada de cemento son peligrosos, pues cuentan con un alto valor de DBO y DQO, las investigaciones existentes sobre el tema prueban que con tres lavados no es suficiente para obtener diluciones dentro de los parámetros regulados, sin embargo, se desconoce la cantidad de lavados necesarios para una correcta disposición de los desechos.
- Se recomienda la aplicación del procedimiento utilizado teniendo en cuenta indicadores medioambientales en la DSTPIP.

Referencias Bibliográficas

- Alimov, S. (2020). *Impact of total quality management practices on sustainability of manufacturing companies*. European Journal of Molecular & Clinical Medicine, 7(2). ISSN 2515-8260.
- Antúnez, A. S. (2019). *El Derecho Forestal en el ordenamiento jurídico cubano*. Revista de La Facultad de Derecho de México, 2(274), 593-626. <https://doi.org/10.22201/fder:2488933e.2019.274-2>.
- Arjomand, E. (2018). *Cement Sheath Integrity Assessment Subject to Pressure and Temperature Variations*. The University of Adelaide.
- Aslani, F., Zhang, Y., Manning, D., Valdez, L. C., & Manning, N. (2022). *Additive and alternative materials to cement for well plugging and abandonment: A state-of-the-art review*. Journal of Petroleum Science and Engineering. ELSEVIER., 215. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110728>.
- Aust, J. & Pons, D. (2020). *A Systematic Methodology for Developing Bowtie in Risk Assessment: Application to Borescope Inspection*. Journal: Aerospace, 7(86). <https://doi.org/10.3390/aerospace7070086>. www.mdpi.com/journal/aerospace.
- Barstow, D. R. (1985). *Artificial Intelligence at Schlumberger*. AI Magazine, 5(4).
- Bertinetto, C., Engel, J., Jansen, J. (2020). *ANOVA simultaneous component analysis: A tutorial review*. Journal: Analytica Chimica Acta: X 6. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.acax.2020.100061>.
- Broni-Bediako, E., Joel, O. F., & Ofori-Sarpong, G. (2016). *Oil Well Cement Additives: A review of the Common Types*. Oil and Gas Research, 2(1). <https://doi.org/10.4172/ogr.1000112>.
- Cadix, A., & James, S. (2022). *Chapter 5 - Cementing additives*. Fluid Chemistry, Drilling and Completion. In Oil and Gas Chemistry Management Series. ELSEVIER., 187-254. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822721-3.00008-3>.
- Cahyana, R. (2018). *A preliminary investigation of information system using Ishikawa diagram and sectoral statistics*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/434/1/012050>.

- Cañizares Pentón, M. I. (2015). *Integración de la Gestión Ambiental y Energética en Industrias de Procesos*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Castillo, P. M. (2019). *Eficiente remoción de lodos para asegurar un exitoso trabajo de cementación en campos marginales*. Universidad Nacional de Piura. <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/2012>.
- Christensen, R. (1998). *Analysis of Variance, Design and Regression. Applied statistical methods*. CRC Press LLC.
- Clare, R., & Wandersee, J. (2010). *Fishbone diagram, organize reading content with a 'bare bones' strategy*. *Science and Scope*, 6(1), 31-37.
- Coccia, M. (2018). *The Fishbone Diagram to identify, systematize and analyze the sources of general purpose technologies*. Arizona State University & CNR--National Research Council of Italy.
- DSTPIP. (2022). *Programa de Trabajo Pozo X*.
- EMPERCAP (2021). *Diagnóstico Ambiental*.
- Fan, J., Santos, L. Y., Taleghani, A. D., & Li, G. (2020). *Stimuli-responsive petroleum cement composite with giant expansion and enhanced mechanical properties*. *Construction and Building Materials*. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119783>.
- Fernández, M. A., Rodríguez, D., I., Santana, M. d., & Córdoba, V. (2015). *Comportamiento de la contaminación orgánica de la bahía de Santiago de Cuba*. Santiago de Cuba, Cuba: Centro de información y gestión tecnológica de Santiago de Cuba.
- Finch, W. H. (2020). *Multivariate analysis of variance for multilevel data: a simulation study comparing methods*. *The Journal of Experimental Education*. <https://doi.org/10.1080/00220973.2020.1718058>.
- Freire, F. C., & Bermúdez, A. V. (2016). *Value indicators for regional broadcasters: accountability at EITB, CCMA and CRTVG*. 29(4). <https://dadun.unav.edu/handle/10171/41833>.
- Freund, R. J. & Wilson, W. J. (2003). *Statistical Methods*. Second Edition. Academia Press. An imprint of ELSEVIER Science (USA).
- Galindo, E. L., Flores-Domínguez, Á. D., & Zulaica, M. L. (2018). *Evaluación de las condiciones de habitabilidad de la ciudad de Puebla (México), mediante la*

- construcción de índice sintético*. I+A Investigación + Acción (21), 23-42.
<https://revistasfaud.mdp.edu.ar/ia/article/view/265>.
- Gowida, A. H., Ahmad, Z., Elkatatny, S., Mahmoud, M., & Fahd, K. (2018). *Cement Evaluation Challenges*. Society of Petroleum Engineers.
- He, Z., Staples, M., Ross, M., & Court, I. (1996). *Fourteen Japanese quality tools in software process improvement*. The TQM Magazine, 8(4), 40-44.
- Herbet, J. H. (2020). *Ingeniería de la perforación de pozos de petróleo y gas. Vol. III: Sistemas básicos y procesos de los equipos de perforación*. Universidad Politécnica de Madrid. <https://doi.org/10.20868/UPM.book.62720>.
- Hlevnjak, T., Gotal Dmitrović, L., Čerepinko, D. (2021). *Development of Ishikawa Diagram of Oil Spreading in the Sea*. 3rd International Conference on Resources and Environment Sciences 2021. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/837/1/012001>.
- Huang, S., Feng, B., Li, Z., Tang, S., Li, J., Su, D., & Qi, L. (2021). *Remediation of oil-based mud contaminated cement with talcumin shale gas well primary cementing: Mechanical properties, microstructure, and hydration*. Construction and Building Materials. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124047>.
- Ingeniería de Cementaciones. (s.f.). Tomo 7.
https://www.academia.edu/25205528/Ingenieria_de_cementacion.
- Jackson, W. J. (2018). *Unconventional Lift for Unconventional Wells*. Society of Petroleum Engineers.
- Jolicoeur, C., & Simard, M.-A. (1998). *Chemical admixture-cement interactions: Phenomenology and physico-chemical concepts*. Cement and Concrete Composites, 20(2-3), 87-101. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00062-0).
- Kamenskih, S., Ulyasheva, N., Buslaev, G., & Voronik, A. (2018). *Research and Development of the Lightweight Corrosion-Resistant Cement Blend for Well Cementing in Complex Geological Conditions*. Society of Petroleum Engineers.
- Kim, H. (2019). *Propensity score analysis in non-randomized experimental designs: An overview and a tutorial using R software*. In S. Hein & J. Weeland (Eds.), *Randomized Controlled Trials (RCTs) in Clinical and Community Settings*:

- Challenges, Alternatives and Supplementary Designs. *New Directions for Child and Adolescent Development*, 167, 65–89. <https://doi.org/10.1002/cad>
- Liu, K., Cheng, X., Zhang, X., Li, Z., Zhuang, J., & Guo, X. (2018). *Relationship Between the Microstructure/Pore Structure of Oil-Well Cement and Hydrostatic Pressure*. Springer. <https://doi.org/10.1007/s11242-01801078-2>.
- Liu, X., Zhang, M., & Fang, C. (2015). *Synthesis and Performance of a High Temperature Filter Loss Reducer for Oil Well Cementing*. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 32(6), 61-64. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5620.2015.06.016>.
- López, D. X. (2021). *Estudio de los resultados de la aplicación de VACS (Vectored Annular Cleaning System) para la limpieza de arena en el fondo de un pozo productor de la arenisca M-1*. Quito. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21630>.
- Lucas, A., Stokkeland, T. A., Jackson, D., Ingram, S., & Hughes, B. (2018). *Improving the Understanding, Application and Reliability of the Perforate, Wash and Cement Technique through the Use of Cement Bond Logs, Tool Enhancements and Barrier Verification via Annular Pressure Monitoring*. Society of Petroleum Engineers.
- Mamund, M. S., & Lownes, N. E. (2011). *A composite index of public transit accessibility*. *Journal of Public Transportation*, 14(2), 69-87. <https://doi.org/10.5038/2375-0901.14.2.4>.
- Martínez, R. Q. (2009). *Guía metodológica para desarrollar indicadores ambientales y de desarrollo sostenible en países de América Latina y el Caribe*. CEPAL.
- Mishra, P., Singh U., Pandey C. M., Mishra P., Pandey G. (2019). *Application of Student's t-test, analysis of variance, and covariance*. *Annals of Cardiac Anaesthesia*, 22(4). Published by Wolters Kluwer – Medknow. https://doi.org/10.4103/aca.ACA_94_19.
- Mitra, P., & Boruah, A. (2022). *Synthesizing bio-additive from bio-wastes for the effective cement settling process*. *Materials Today: Proceedings*. ELSEVIER., 60(3), 2250-2253. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.397>.
- Namkon, L., Abhinav, P., Gary, O. K., Juhuyuk, M., Min-Hong, Z., Arthur, C. C., Klaus, H., & Hau, K. K. (2018). *Experimental design of a well cement slurry for rapid gel strength development*. *Construction and Building Materials*. ELSEVIER., 191, 1093-1102. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.074>.
- Nelson, E. B. (2006). *Well Cementing*. Schlumberger.

- Neto, J. d., Torre, A. G., & Kirchheim, A. P. (2021). *Effects of sulfates on the hydration of Portland cement - A review*. Construction and Building Materials. ELSEVIER., 279(122), 428-444. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122428>.
- Nwankwo, C. O., Bamigboye, G. O., Davies, I. E., & Michaels, T. A. (2020). *High volume Portland cement replacement: A review*. Construction and Building Materials. ELSEVIER., 260(120), 445-456. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120445>.
- Palomeque, F. L., Torres-Delgado, A., Urgell, X. F., & Miracle, D. S. (2018). *Gestión sostenible de destinos turísticos: la implementación de un sistema de indicadores de turismo en los destinos de la provincia de Barcelona*. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 77, 428-461. <https://doi.org/10.21138/bage.2547>.
- Pérez Martínez, L. (2022). *Instrumento metodológico para la evaluación de la gestión ambiental empresarial basado en índice sintético*. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos".
- Pérez Martínez, L., Tápanes Suárez, E., Santos Pérez, O., Cabrera Hernández, J.A., Nogueira Rivera, D. (2021). *Procedimiento para Índice Sintético de Gestión Ambiental: validación con minería de datos*. Revista Ingeniería Industrial, 42(2). ISSN 1815-5936. Disponible en: <https://rii.cujae.edu.cu/index.php/revistaind/article/view/1111>.
- Pilkington, P. E. (1992). *Cement Evaluation -Past, Present and Future*. Journal Of Petroleum Technology, 44(02), 132-140. <https://doi.org/10.2118/20314-PA>.
- Practical Guide to Design and effect primary cementations. (2018). REMEX.
- Rodgers, M., & Oppenheim, R. (2019). *Ishikawa diagrams and Bayesian belief networks for continuous improvement applications*. The TQM Journal, 31(3), 294-318. <https://doi.org/10.1108/TQM-11-2018-0184>.
- Rodríguez, H. M. (2019). *Primary Cementation with lows of low density cements in low pressure formations*. Faculty of Mining Engineering.
- Saedi, A., Jamshidi-Zanjani, A., & Darban, A. K. (2021). *A review of additives used in the cemented paste tailings: Environmental aspects and application*. Journal of Environmental Management. ELSEVIER., 289. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112501>.

- Salas, D. S., Pérez, L. I., Calderín, A. C., & Suárez, I. I. (2020). *Gestión para la protección medioambiental en la Universidad de Ciencias Médicas de Santiago de Cuba*. MEDISAN.
- Sánchez, A. B. (2018). *Estudio para la optimización de la limpieza de hoyo en pozos horizontales y altamente desviados del campo Edén Yuturi*. Escuela Politécnica Nacional. Quito. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19374>.
- Santos, A. D., Rodrigues, K., Oskarsson, H., Jankowski, S., & Ferm, P. (2021). *Smart Retarder for Cementing Systems with Accelerated Set and Gel Strength Properties with Potencial for Improved Operational Safety*. Abu Dhabi: Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/208074-MS>.
- Shadravan, A. (2013). *A method for cement integrity evaluation in unconventional wells*. Office of Graduate and Professional Studies of Texas A&M University.
- Smith, D. (1990). *Cementing*. Society of Petroleum Engineers.
- StatPoint Technologies, Inc. (2009). *STATGRAPHICS Centurion XVI User Manual*. www.STATGRAPHICS.com
- Stefanovic, S., Kiss, I., Stanojevic, D., & Janjic, N. (2014). *Analysis of technological process of cutting logs using Ishikawa diagram*. Acta Technica Corviniensis Bulletin of Engineering, 7(4), 92-97.
- Suárez-Barraza, M. F., & Rodríguez-González, F. G. (2018). *Cornerstone root causes through the analysis of the Ishikawa diagram, is it possible to find them?: A first research approach*. International Journal of Quality and Service Sciences. <https://doi.org/10.1108/IJQSS-12-2017-0113>.
- Tabatabaei, M., & Taleghani, A. D. (2020). *Nanoengineered Cement for More Effective Remedial Cementing Jobs*. Society of Petroleum Engineers.
- Tayupanta, R. C., & Cajamarca, C. J. (2019). *Evaluación de indicadores sintéticos de desarrollo sostenible para destinos turísticos consolidados caso Mindo (PICHINCHA, ECUADOR)*. Quito: UCE. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/20269>.
- Thakkar, A., Raval, A., Chandra, S., Shah, M., & Sircar, A. (2019). *A comprehensive review of the application of nano-silica in oil well cementing*. Petroleum. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2019.06.005>.

- Venables, W. N., Smith, D. M., R Core Team (2022). *An Introduction to R. Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics*. R Core Team Publishing. <https://CRAN.R-project.org>.
- Well Petroleum Cementing. (2009).
- Yousuf, N., Olayiwola, O., Guo, B., & Liu, N. (2021). *A comprehensive review on the loss of wellbore integrity due to cement failure and available remedial methods*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. ELSEVIER. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109123>.
- Yugay, A., Nestyagin, A., Vorozhikhin, S., Silchenok, M., & Dadhmouni, H. (2019). *Consolidated Approach for Effective Zonal Isolation, Evaluation and Remediation*. Society of Petroleum Engineers.
- Zabala Arguelles, M. D., & Fundora Nevot, G. (2018). *Desarrollo Local y Equidad en Cuba*. La Habana: FLACSO-Cuba.
- Zaror Zaror, D. C. (2000). *Introducción a la Ingeniería Ambiental para la industria de procesos*. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.
- Zhang, X., Wang, L., Yang, C., Chang, X., Guo, Y., Bi, Z., & Yang, H. (2021). *Integrity Analysis of the Sheath Considering Temperature Effect under Deep and Large-Scale Multi-Section Hydraulic Fracturing*. *Energies*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/en14217162>.
- Zihan, G., Ziyang, L., Kai, L., & Xianghui, Y. (2021). *Research Status of Synthetic Oil Well Cement Retarder*. *Recent Patents on Engineering*, 15(1), 53-59. <https://doi.org/10.2174/1872212114999200710144827>.

Anexos

Anexo 1: Objetivos de la cementación primaria.

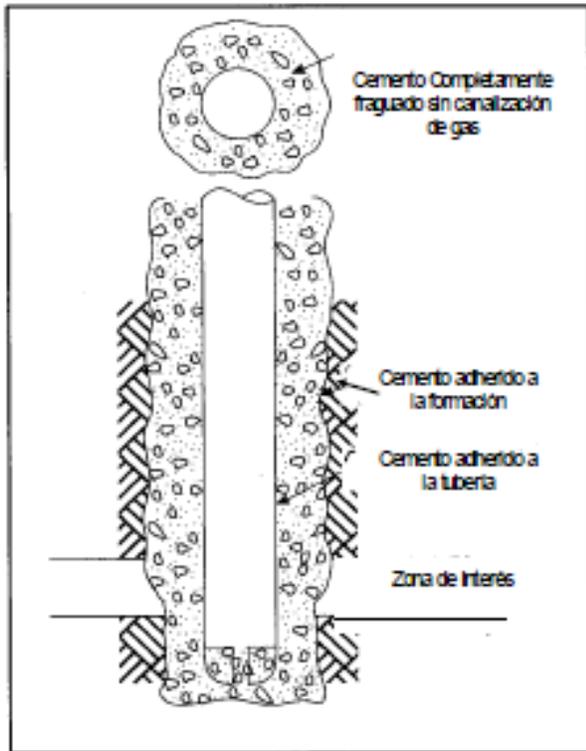


Figura 1.1: Objetivos de la cementación primaria

Fuente: (Ingeniería de Cementaciones).

Anexo 2: Trabajo de cementación primaria típico.

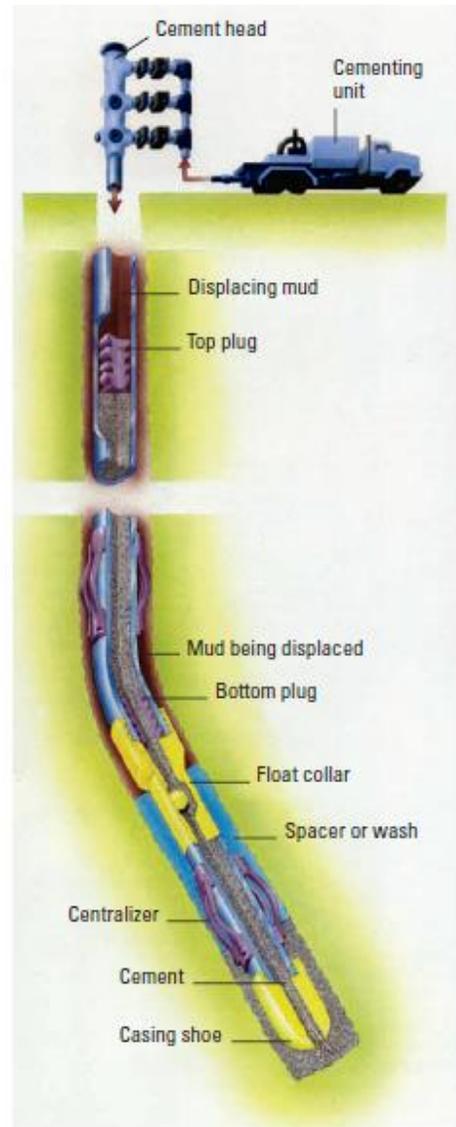


Figura 1.2 a: Método de los dos tapones en típica cementación primaria.

Fuente: (Nelson, 2006)

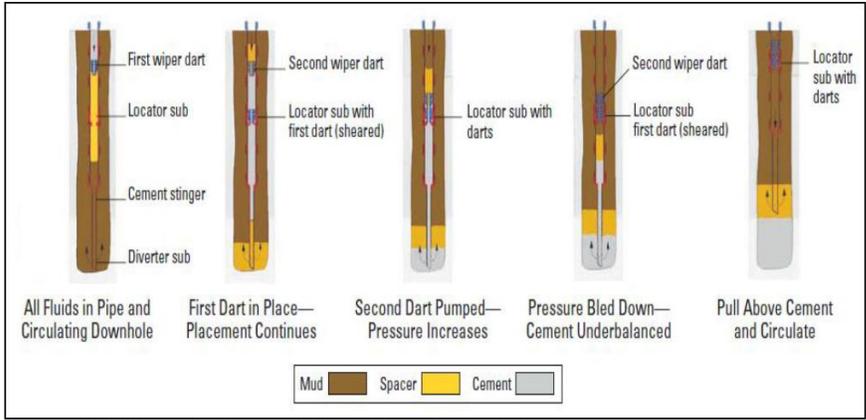


Figura 1.2 b: Método de los dos tapones en colocación de un tapón de cemento.

Fuente: (Nelson, 2006)

Anexo 3: Varias técnicas de cementación forzada.

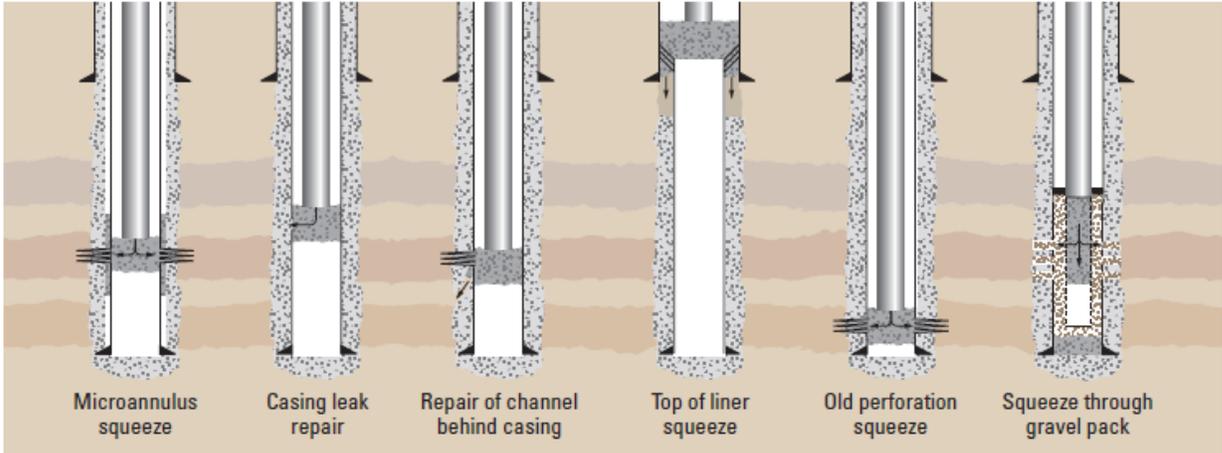


Figura 1.3: Varias técnicas de cementación forzada.

Fuente: (Nelson, 2006)

Anexo 4: Tapones de cemento.

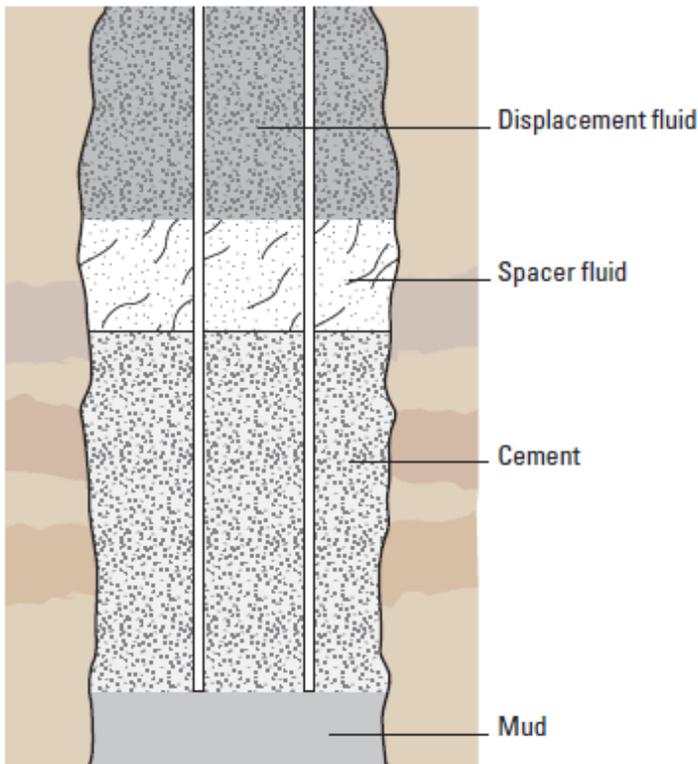


Figura 1.4: Tapón de cemento.

Fuente: (Nelson, 2006)

Anexo 5: Posibles rutas de filtración en una camisa de revestimiento.

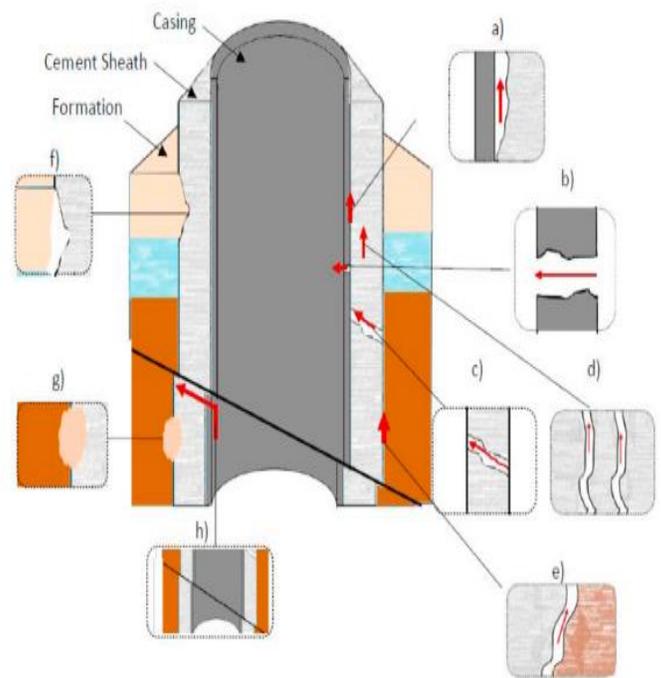


Figura 1.5: Posibles rutas de filtración en una camisa de revestimiento.

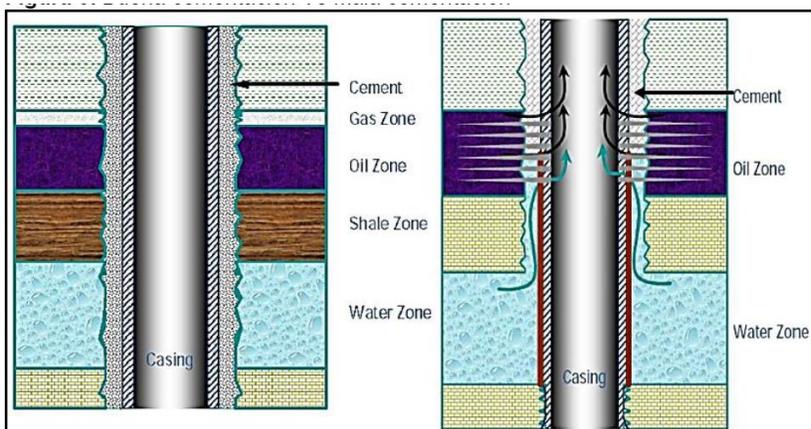
Fuente: (Arjomand, 2018)

Anexo 6: Fabricación del cemento Portland.

Cuadro 1.1: Pasos para la fabricación y venta del cemento Portland.

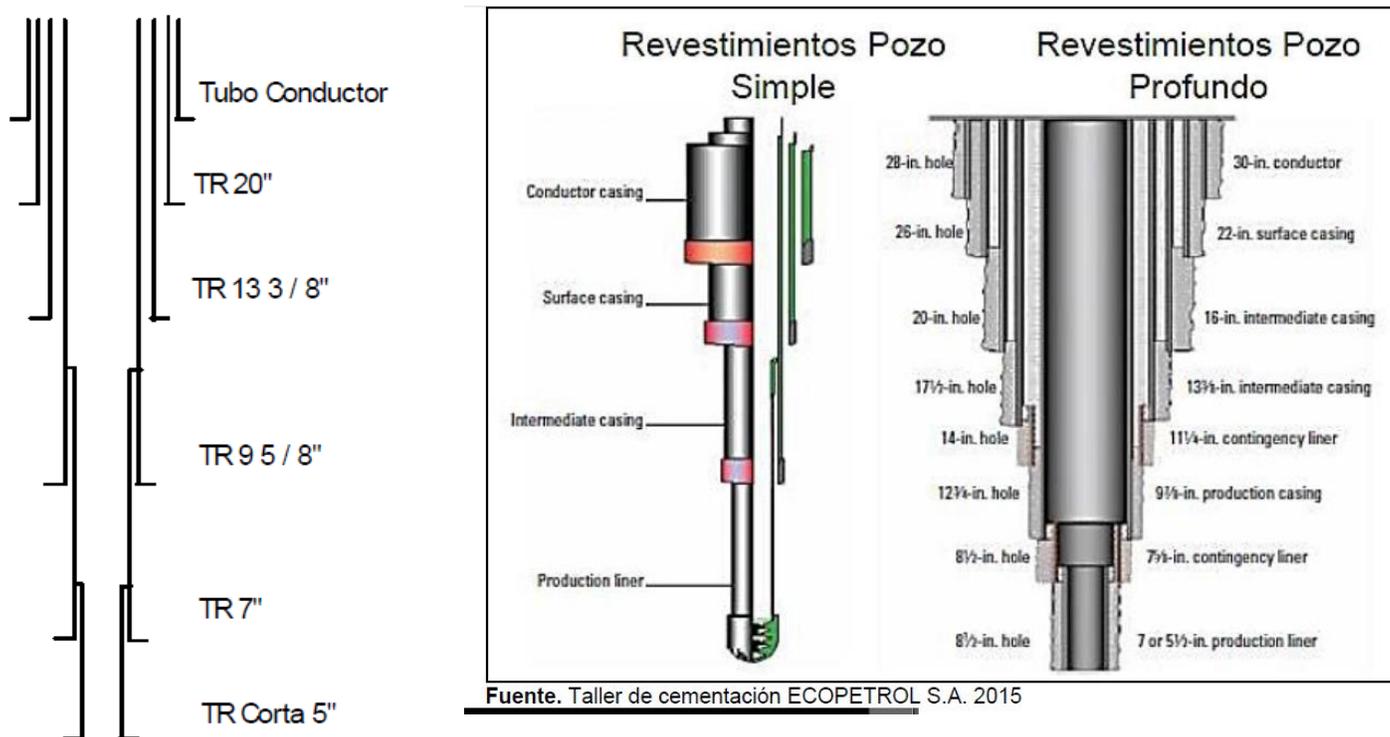


Anexo 7: Buena cementación vs mala cementación.



Fuente. Taller de cementación ECOPETROL S.A. 2015

Anexo 8: Arreglo típico de las tuberías de revestimiento.



Fuente. Taller de cementación ECOPETROL S.A. 2015

Figura 1.6 a: Arreglo típico de las TR, b: tipos de revestimiento.

Fuente: (Ingeniería de cementaciones)

Anexo 9: Clasificación de pozos horizontales.

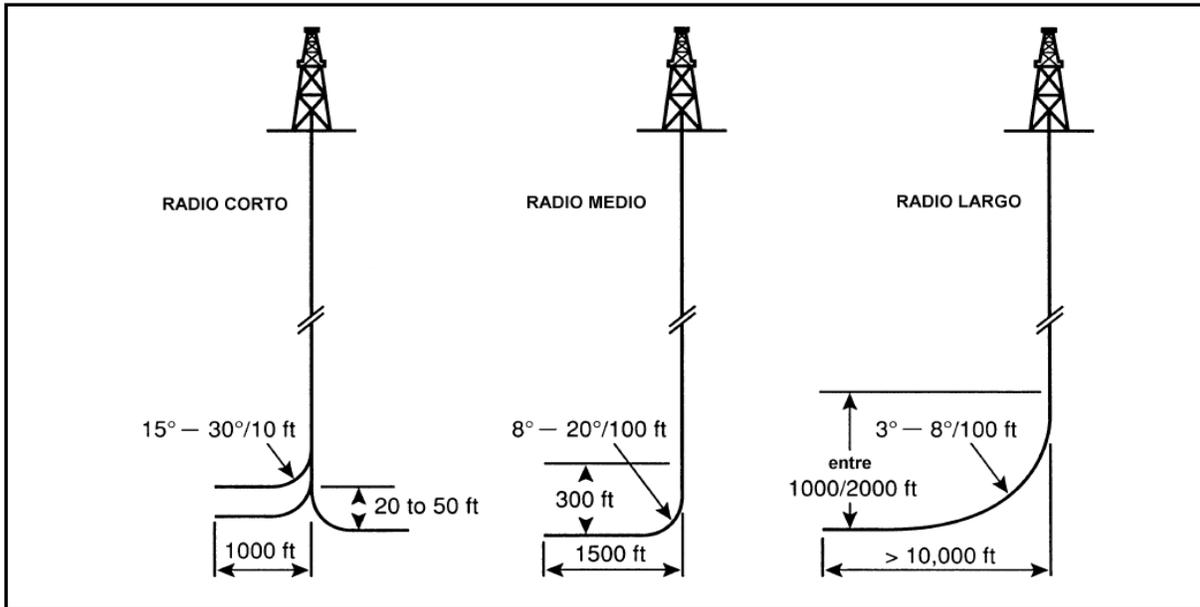


Figura 1.7: Clasificación de pozos horizontales.

Fuente: (Ingeniería de cementaciones)

Anexo 10: Unidades de medida de alcance en pozos horizontales.

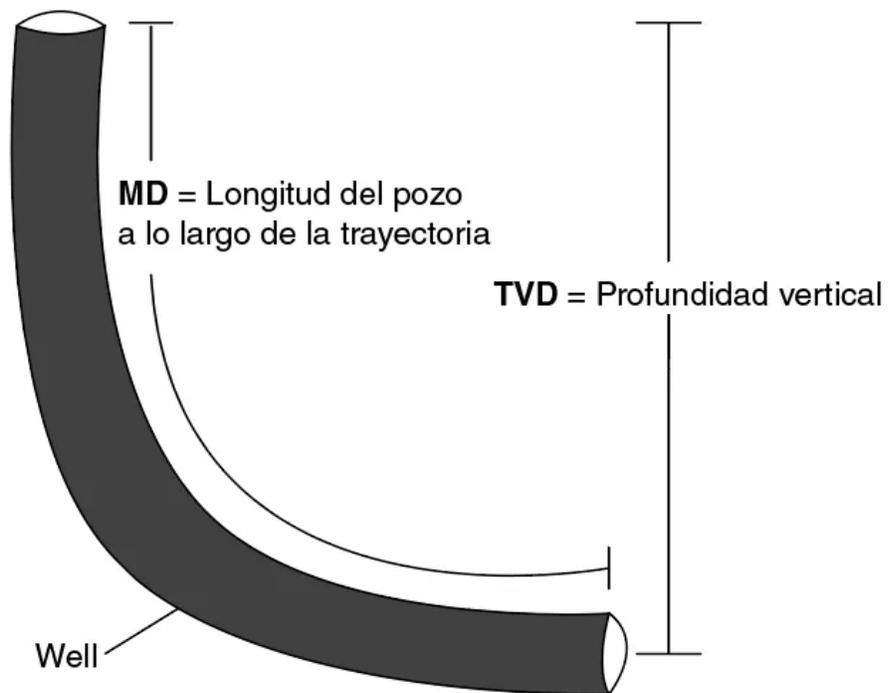


Figura 1.8: Unidades de medida de longitud en pozos horizontales.

Anexo 11: Modelo de Gestión Ambiental Empresarial mediante el ISGAE.

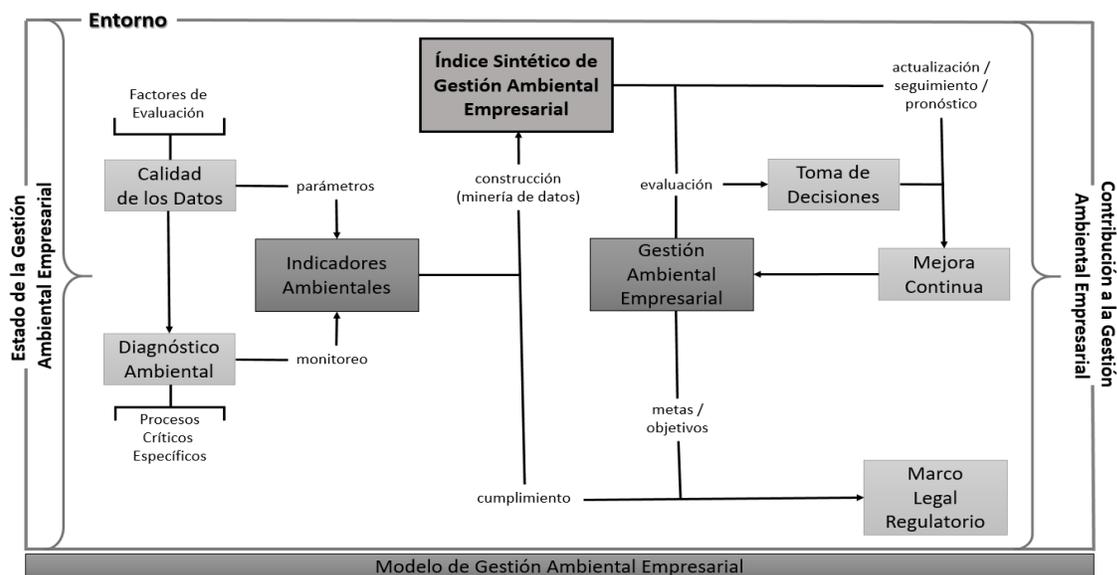


Figura 1.9: Modelo de Gestión Ambiental Empresarial mediante el ISGAE.

Fuente: (Pérez, 2022)

Anexo 12: Secuencia de bombeo en la primera etapa de cementación

Tabla 2.1: Secuencia de bombeo de la primera etapa

Fluido	Volumen (m ³)	Caudal (m ³ /min)	Tiempo (hr/min)	Tiempo acumulado (hr/min)	Comentarios
Lavador	5,0	0,6-1,0	00:07	00:07	Bombeo de lavador con RH4
Separador por delante 1,55 g/cm ³	14,0	0,6-1,0	00:23	00:30	Bombeo de separador por delante (preflujo).
Lechada de cemento	63,7	0,50-0,80	02:07	02:37	Mezcla y bombeo de lechada de 1,90 g/cm ³ .
Liberar tapón	-	-	00:10	02:47	Liberar tapón.
Agua	3,0	0,6-1,0	00:05	02:52	
Lodo	141,0	0,70-1,00	03:21	06:13	Desplazar la lechada con lodo de 1,37 g/cm ³

Anexo 13: Posición de los fluidos posterior a la primera etapa de cementación

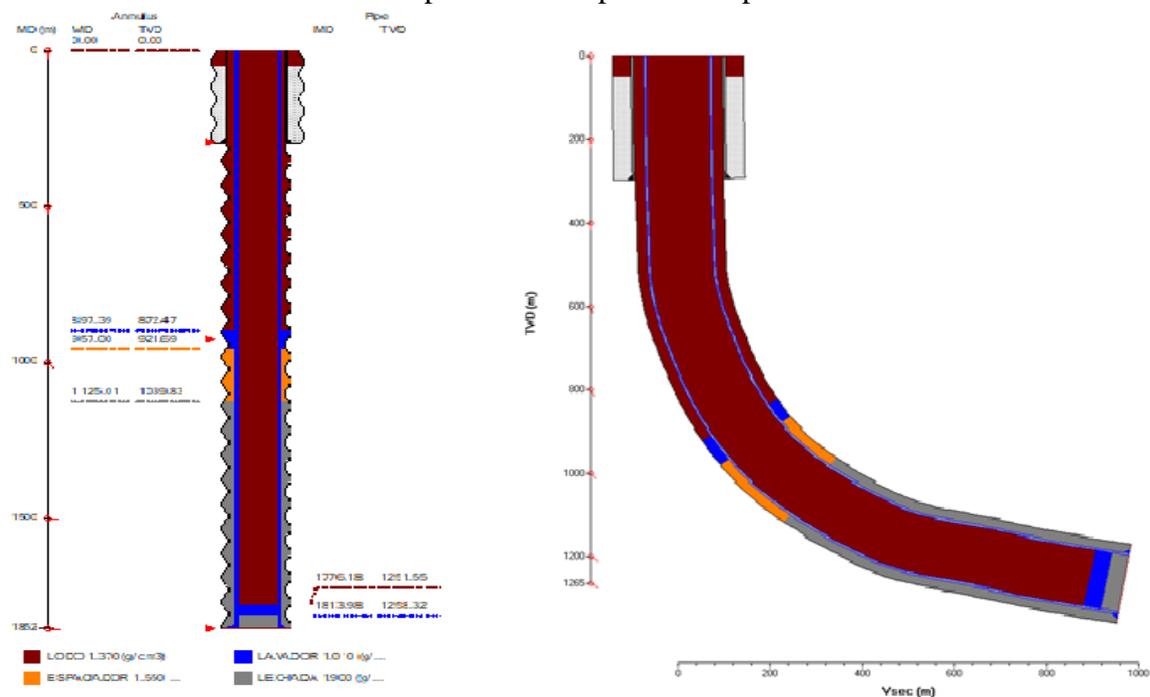


Figura 2.1: Posición de los fluidos posterior a la primera etapa de la cementación

Anexo 14: Secuencia de bombeo en la segunda etapa de la cementación

Tabla 2.3: Secuencia de bombeo de la segunda etapa

Fluido	Volumen (m ³)	Caudal (m ³ /min)	Tiempo (hr/min)	Tiempo acumulado (hr/min)	Comentarios
Lavador	5,0	0,6-1,0	00:07	00:07	Bombeo de lavador con RH4
Separador por delante 1.55 g/cm ³	10,0	0,6-1,0	00:16	00:23	Bombeo de separador por delante (preflujo).
Lechada de cemento	47,3	0,50-0,80	01:34	01:57	Mezcla y bombeo de lechada de 1,90 g/cm ³ .
Liberar tapón	-	-	00:10	02:07	Liberar tapón.
Agua	3,0	0,6-1,0	00:05	02:12	

Lodo	70,4	0,70-1,00	01:40	03:52	Desplazar la lechada con lodo con densidad de 1,37 g/cm ³ .
------	------	-----------	-------	-------	------------------------------------------------------------------------

Anexo 15: Posición de los fluidos posterior a la segunda etapa de la cementación

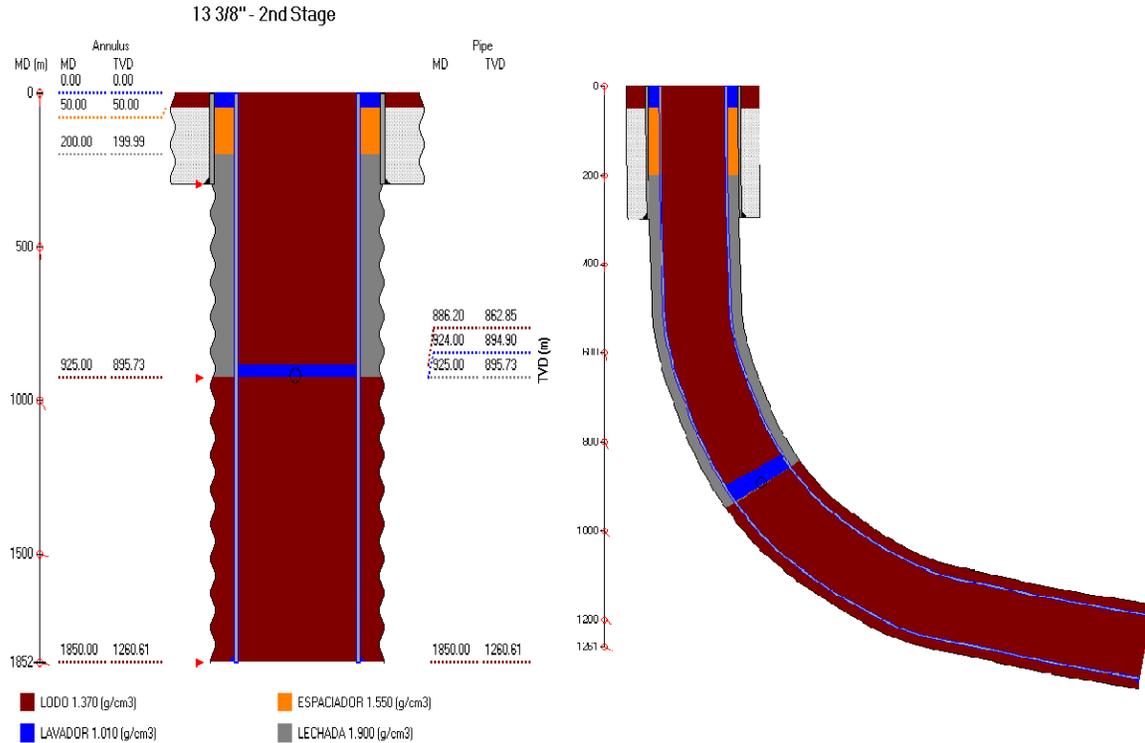


Figura 2.2: Posición de los fluidos posterior a la segunda etapa de la cementación.

Anexo 16: Datos de los parámetros tecnológicos estudiados

Tabla 3.1: Datos Unidad Single, Pozo X, camisa intermedia 13^{3/8"}, primera etapa

Marca de tiempo	Densidad (g/cm ³)	Caudal (L/min)	Presión (MPa)	Volumen (m ³)	Tramos
1:46:02	0,998653	0	0	0	Puesta en marcha de la cementación. Prueba de línea Se comprueba el correcto funcionamiento y hermeticidad de las líneas y conexiones
1:46:32	0,997455	0	0,006895	0	
1:47:02	0,997455	0	0,006895	0	
1:47:32	0,997455	0	0,006895	0	
1:48:02	0,998653	0	0,006895	0	
1:48:32	0,998653	0	0,455054	0	Prueba de Presión Se comienza a bombear el lavador para verificar que no existan fugas Se comprueba el correcto funcionamiento y hermeticidad de todo el equipamiento que participará en la cementación
1:49:02	0,998653	0	0,379212	0	
1:49:32	0,996976	147,2155	0,875635	0,158987	
1:50:02	0,997455	400,9476	1,558216	0,461062	
1:50:32	0,996976	0	0,572265	0,524657	
1:51:02	0,998653	0	0,337843	0,524657	
1:51:32	0,998653	0	0,310264	0,524657	
1:52:02	0,998653	0	3,840381	0,588252	
1:52:32	0,998653	0	23,64213	0,604151	
1:53:02	0,998653	0	22,92508	0,604151	

1:53:32	0,996976	0	22,69755	0,604151	
1:54:02	0,996976	0	22,58034	0,604151	
1:54:34	0,996976	0	22,5045	0,604151	
1:55:04	0,996976	0	22,43555	0,604151	
1:55:34	0,998653	0	22,38729	0,604151	
1:56:04	0,998653	0	22,33902	0,604151	
1:56:34	0,998653	0	0,034474	0,604151	
1:57:04	0,998174	0	0,034474	0,604151	
1:57:34	0,998174	125,4352	0,668792	0,604151	
1:58:04	0,998174	796,3308	2,606219	0,969821	
1:58:34	0,996976	872,6412	3,01301	1,399086	
1:59:04	0,996976	861,8306	3,440485	1,828351	
1:59:34	0,996976	878,2055	3,72317	2,257615	
2:00:04	0,996976	864,5332	3,371538	2,702779	
2:00:34	0,998174	793,6282	3,261221	3,084348	
2:01:04	0,998174	763,5809	3,46117	3,481815	
2:01:34	0,998174	777,2532	3,440485	3,863384	
2:02:04	0,998174	1055,468	1,613374	4,308548	
2:02:34	0,937195	1115,404	0,668792	4,849104	
2:03:04	0,930726	1153,559	0,482633	5,421457	
2:03:34	0,839798	1126,373	0,455054	5,99381	
2:04:04	0,846627	0	0,441265	6,216392	
2:04:34	0,901255	0	0,43437	0	
2:05:04	0,907605	0	0,413686	0	
2:05:34	0,765522	0	0,393001	0	
2:06:04	0,984996	0	0,379212	0	
2:06:34	0,911678	0	0,365422	0	
2:07:04	0,879691	0	0,365422	0	
2:07:34	0,905209	0	0,365422	0	
2:08:04	0,898021	0	0,365422	0	
2:08:34	0,911678	0	0,365422	0	
2:09:04	0,904849	0	0,358528	0	
2:09:34	0,911678	0	0,358528	0	
2:10:04	0,904011	0	0,358528	0	
2:10:34	0,897661	0	0,358528	0	
2:11:04	0,895625	0	0,351633	0	
2:11:34	0,902453	0	0,351633	0	
2:12:04	0,899698	0	0,351633	0	
2:12:34	0,852976	0	0,351633	0	
2:13:04	0,855731	0	0,351633	0	
2:13:34	0,857409	0	0,351633	0	
2:14:04	0,852137	0	0,351633	0	
2:14:34	0,876936	0	0,351633	0	
2:15:04	0,849382	0	0,351633	0	
2:15:34	0,866873	0	0,351633	0	
2:16:04	0,851778	0	0,351633	0	
2:16:34	0,871665	0	0,351633	0	
2:17:04	0,847825	0	0,351633	0	
2:17:36	0,842553	0	0,351633	0	
2:18:06	0,854533	0	0,351633	0	
2:18:36	0,830573	0	0,351633	0	
2:19:06	0,852617	0	0,351633	0	
2:19:36	0,846627	0	0,351633	0	
2:20:06	0,846627	0	0,351633	0	
2:20:36	0,861003	0	0,351633	0	
2:21:06	0,832969	0	0,351633	0	
2:21:36	0,847825	0	0,351633	0	
2:22:06	0,840996	0	0,351633	0	
2:22:36	0,870107	0	0,351633	0	
2:23:06	0,857409	0	0,351633	0	
2:23:36	0,842553	0	0,351633	0	
2:24:06	0,861721	0	0,351633	0	
2:24:36	0,829016	0	0,351633	0	
2:25:06	0,822187	0	0,351633	0	
2:25:36	0,797149	0	0,351633	0	
2:26:06	0,779898	0	0,351633	0	

Se continua
bombeando el lavador hasta alcanzar alrededor de 5 m³

Preparación de la lechada de cemento buscando densidad
La operación se realiza en otro equipo (*Twin* estático), el cual no cuenta con registro de datos, por lo que no se guardan los datos de caudal y volumen
La unidad *Single* continúa verificando la densidad y presión en la línea de bombeo

2:26:36	0,770314	0	0,351633	0	
2:27:06	0,762407	0	0,351633	0	
2:27:36	0,769116	0	0,351633	0	
2:28:06	0,757136	0	0,351633	0	
2:28:36	0,761209	0	0,351633	0	
2:29:06	0,753183	0	0,351633	0	
2:29:36	0,751985	0	0,351633	0	
2:30:06	0,758334	0	0,351633	0	
2:30:36	0,745995	0	0,351633	0	
2:31:06	0,757136	0	0,351633	0	
2:31:36	0,763605	0	0,351633	0	
2:32:06	0,745276	0	0,358528	0	
2:32:36	0,753183	0	0,358528	0	
2:33:06	0,750427	0	0,351633	0	
2:33:36	0,750427	0	0,351633	0	
2:34:06	0,749229	0	0,351633	0	
2:34:36	0,751625	0	0,351633	0	
2:35:06	0,757136	0	0,351633	0	
2:35:36	0,747672	0	0,351633	0	
2:36:06	0,757615	0	0,351633	0	
2:36:36	0,751985	0	0,351633	0	
2:37:06	0,755579	0	0,351633	0	
2:37:36	0,755219	0	0,351633	0	
2:38:06	0,743599	0	0,351633	0	
2:38:36	0,754381	0	0,351633	0	
2:39:06	0,742401	0	0,351633	0	
2:39:36	0,748031	0	0,351633	0	
2:40:06	0,749229	0	0,351633	0	
2:40:36	0,734853	0	0,351633	0	
2:41:06	0,751625	0	0,351633	0	
2:41:36	0,739645	0	0,351633	0	
2:42:08	0,751625	0	0,351633	0	
2:42:38	0,743599	0	0,351633	0	
2:43:08	0,738447	0	0,413686	0	
2:43:38	0,751625	0	0,324054	0	
2:44:08	0,738088	0	0,296475	0	
2:44:38	0,747672	0	0,28958	0	
2:45:08	0,742401	0	0,28958	0	
2:45:38	0,98859	0	0,282685	0	
2:46:08	0,979485	0	0,282685	0	
2:46:38	0,987392	0	0,282685	0	
2:47:08	0,987392	0	0,282685	0	
2:47:38	0,990267	0	0,282685	0	
2:48:08	0,96475	0	0,282685	0	
2:48:38	0,961874	0	0,282685	0	
2:49:08	0,996616	0	0,282685	0	
2:49:38	1,152236	0	0,282685	0	
2:50:08	1,334572	0	0,282685	0	
2:50:38	1,482285	0	0,282685	0	
2:51:08	1,604721	0	0,282685	0	
2:51:38	1,69541	0	0,282685	0	
2:52:08	1,773998	0	0,489528	0,079494	
2:52:38	1,830664	755,473	2,709641	0,206683	Bombeo de la lechada de cemento hasta los 53 m ³
2:53:08	1,715656	722,7231	3,426696	0,588252	
2:53:38	1,831383	768,9863	3,916224	0,938023	
2:54:08	1,916441	815,4084	4,709121	1,335491	
2:54:38	1,935249	973,5935	6,225968	1,748857	
2:55:08	1,925665	976,2962	6,612075	2,241717	
2:55:38	1,909612	978,9988	6,681022	2,734576	
2:56:08	1,884933	989,9685	6,501759	3,227436	
2:56:38	1,907216	815,4084	5,329649	3,6726	
2:57:08	1,925665	834,486	5,550282	4,085966	
2:57:38	1,912487	807,3004	5,212439	4,499332	
2:58:08	1,893319	810,0031	5,143491	4,8968	
2:58:38	1,873313	976,2962	6,074284	5,341963	
2:59:08	1,856541	834,486	5,419281	5,818924	

2:59:38	1,849832	842,753	5,329649	6,23229
3:00:08	1,852587	796,3308	5,019385	6,661555
3:00:38	1,876547	864,5332	5,59165	7,09082
3:01:08	1,88685	801,7361	5,019385	7,504186
3:01:38	1,900507	908,0938	5,73644	7,917553
3:02:08	1,911289	886,3135	5,915704	8,362716
3:02:38	1,896075	739,098	5,074543	8,776082
3:03:08	1,881699	927,1714	6,081178	9,253043
3:03:38	1,897632	932,7357	6,281126	9,714106
3:04:10	1,912487	853,5636	5,708861	10,17517
3:04:40	1,917639	880,9082	5,88123	10,62033
3:05:10	1,920394	861,8306	5,743335	11,0655
3:05:40	1,917998	733,5337	4,626384	11,44706
3:06:10	1,908414	744,5033	4,454015	11,81273
3:06:40	1,888527	880,9082	5,550282	12,242
3:07:10	1,866963	883,6108	5,371018	12,68716
3:07:40	1,870198	891,7188	5,564071	13,11643
3:08:10	1,876547	902,6884	5,639914	13,57749
3:08:40	1,883256	883,6108	5,502018	14,02265
3:09:10	1,888527	861,8306	5,384808	14,46782
3:09:40	1,88685	839,8913	5,177965	14,88118
3:10:10	1,884454	842,753	5,177965	15,31045
3:10:40	1,884454	807,3004	4,840122	15,70792
3:11:10	1,892481	638,1457	3,72317	16,08948
3:11:40	1,89883	777,2532	4,426436	16,47105
3:12:10	1,893679	774,5506	4,440225	16,85262
3:12:40	1,888527	894,5805	5,233123	17,26599
3:13:10	1,877745	889,0162	5,343439	17,71115
3:13:40	1,876547	790,9255	4,59191	18,12452
3:14:10	1,885652	758,1756	4,260962	18,50609
3:14:40	1,887689	760,8783	4,198909	18,88766
3:15:10	1,899309	717,3178	3,88175	19,26922
3:15:40	1,887329	725,4257	3,778328	19,619
3:16:10	1,864567	733,5337	3,674907	19,98467
3:16:40	1,848155	886,3135	4,571226	20,38213
3:17:10	1,863369	859,1279	4,598805	20,8114
3:17:40	1,868521	839,8913	4,805648	21,24066
3:18:10	1,881699	782,6585	4,336804	21,65403
3:18:40	1,897632	747,206	3,998961	22,0515
3:19:10	1,900507	790,9255	4,205804	22,43307
3:19:40	1,916441	768,9863	4,212698	22,83053
3:20:10	1,916441	768,9863	4,129961	23,2121
3:20:40	1,902903	774,5506	3,957592	23,59367
3:21:10	1,897632	779,9559	4,116172	23,99114
3:21:40	1,897632	777,2532	4,102382	24,37271
3:22:10	1,91081	796,3308	4,185119	24,77017
3:22:40	1,91081	709,0508	3,647328	25,13584
3:23:10	1,914883	736,3954	3,537012	25,50151
3:23:42	1,917998	736,3954	3,668012	25,86718
3:24:12	1,917279	741,8007	3,716276	26,23286
3:24:42	1,918837	741,8007	3,633539	26,61442
3:25:12	1,917639	744,5033	3,626644	26,98009
3:25:42	1,906857	755,473	3,750749	27,36166
3:26:12	1,902065	788,2228	4,01275	27,75913
3:26:42	1,905659	807,3004	4,109277	28,1566
3:27:12	1,887329	924,4687	4,764279	28,56996
3:27:42	1,889725	826,378	4,17133	28,99923
3:28:12	1,888048	747,206	3,495643	29,3967
3:28:42	1,896075	670,8956	2,999221	29,74647
3:29:12	1,890923	659,926	2,806167	30,08034
3:29:42	1,896434	670,8956	2,757904	30,41421
3:30:12	1,87499	720,0204	2,909589	30,76398
3:30:42	1,890923	823,6754	3,474959	31,12965
3:31:12	1,87499	834,486	3,702486	31,54302
3:31:42	1,801433	760,8783	3,46117	31,95639
3:32:12	1,876188	760,8783	3,43359	32,33796

3:32:42	1,872594	804,4388	3,73696	32,73542
3:33:12	1,87499	706,3481	3,061273	33,11699
3:33:42	1,860135	662,6286	2,647588	33,46676
3:34:12	1,856181	820,8137	3,1578	33,83243
3:34:42	1,849832	768,9863	3,371538	34,2299
3:35:12	1,837373	774,5506	3,268116	34,61147
3:35:42	1,825393	790,9255	3,454275	35,00894
3:36:12	1,849832	335,4478	1,441005	35,21562
3:36:42	1,849832	779,9559	2,351113	35,4382
3:37:12	1,840967	778,5648	2,344218	35,67668
3:37:42	1,830304	795,4621	2,413166	35,67668
3:38:12	1,887329	820,1784	2,378692	35,67668
3:38:42	1,889725	848,2471	2,668272	35,67668
3:39:12	1,888048	863,6472	2,164955	35,67668
3:39:42	1,896075	875,3659	1,813322	35,67668
3:40:12	1,890923	924,4687	1,958112	36,12185
3:40:42	1,896434	845,4556	1,137635	36,55111
3:41:12	1,87499	872,2418	1,703006	36,91678
3:41:42	1,849832	854,7158	1,537531	36,91678
3:42:12	1,890564	820,4871	1,889164	36,91678
3:42:42	1,84516	843,6748	1,951217	36,91678
3:43:12	1,860135	735,3685	1,30311	36,91678
3:43:42	1,856181	747,206	1,337583	37,01217
3:44:12	1,849832	992,6711	3,330169	37,44144
3:44:44	1,837373	921,766	2,854431	37,9025
3:45:14	1,825393	1107,296	3,557696	38,37946
3:45:44	1,849832	1109,998	3,799013	38,93592
3:46:14	1,849832	967,5426	2,895799	38,96771
3:46:44	1,856181	834,1485	2,468324	38,96771
3:47:14	1,849832	795,3456	1,896059	38,96771
3:47:44	1,837373	738,2475	1,468584	38,96771
3:48:14	1,825393	645,3652	1,165214	38,96771
3:48:44	1,827429	582,8714	1,061793	38,96771
3:49:14	1,860135	512,7105	1,027319	39,079
3:49:44	1,856181	1292,666	1,323794	39,60366
3:50:14	1,860135	534,4908	0,99974	40,00113
3:50:44	1,856181	531,7881	0,99974	40,27141
3:51:14	1,849832	537,1934	0,99974	40,54169
3:51:44	1,837373	537,1934	0,99974	40,81196
3:52:14	1,825393	537,1934	0,99974	41,08224
3:52:44	1,849832	537,1934	0,99974	41,35252
3:53:14	1,849832	534,4908	0,99974	41,6228
3:53:44	1,884095	510,0078	0,972161	41,73409
3:54:14	1,877386	602,6932	1,86848	42,06796
3:54:44	1,89296	616,3655	1,682321	42,37004
3:55:14	1,873792	689,9732	1,882269	42,71981
3:55:44	1,884095	889,0162	3,206063	43,11727
3:56:14	1,889725	927,1714	3,647328	43,57834
3:56:44	1,890923	927,1714	3,971382	44,0394
3:57:14	1,872115	921,766	4,047224	44,50046
3:57:44	1,889725	957,2186	4,260962	44,97742
3:58:14	1,876907	932,7357	3,771434	45,45438
3:58:44	1,859416	867,2359	3,1578	45,91545
3:59:14	1,866963	869,9386	3,047484	46,34471
3:59:44	1,866963	869,9386	2,950957	46,78987
4:00:14	1,889725	875,3439	2,916483	47,21914
4:00:44	1,757586	842,753	3,040589	47,6484
4:01:14	1,866963	801,7361	3,288801	48,06177
4:01:44	1,872115	796,3308	3,081958	48,45924
4:02:14	1,847675	766,2836	2,930273	48,85671
4:02:44	1,872115	771,8479	3,019905	49,23827
4:03:14	1,89296	820,8137	3,254327	49,63574
4:03:44	1,872115	834,486	3,123326	50,04911
4:04:14	1,8091	842,753	3,088852	50,46247
4:04:44	1,872115	867,2359	3,123326	50,89174
4:05:14	1,799516	869,9386	2,992326	51,321

4:05:44	1,82108	861,8306	2,744114	51,76617	
4:06:16	1,887689	864,5332	2,847536	52,19543	
4:06:46	1,899309	853,5636	2,695851	52,6247	
4:07:16	1,887329	878,2055	2,978536	53,05396	
4:07:46	1,864567	825,3146	2,516587	53,38783	
4:08:16	1,848155	792,3541	1,675427	53,38783	
4:08:46	1,863369	816,3478	0,86874	53,38783	
4:09:16	1,868521	0	0,655002	0	Liberación del Tapón
4:09:46	1,881699	0	0,524002	0	Se comprueba la densidad y presión de desplazamiento
4:10:16	1,897632	0	0,310264	0	
4:10:46	1,900507	0	0,089632	0	
4:11:16	0,996976	1077,248	1,902954	0,381569	Se bombea 3 m ³ de agua para limpiar las líneas y desplazar la lechada al presionar el tapón
4:11:46	0,997455	1058,345	1,820217	0,842631	Se deja de medir caudal cuando se alcanzan los m ³ de agua deseados
4:12:16	0,996976	1044,499	1,372057	1,303693	
4:12:46	0,998653	1071,843	1,123846	1,828351	
4:13:16	0,998653	1060,874	0,979056	2,368906	
4:13:46	0,998653	1044,499	1,392742	2,893563	
4:14:16	0,998653	0	0,048263	3,084348	
4:14:46	0,998653	0	0,089632	3,084348	
4:15:16	0,996976	0	0,075842	3,084348	
4:15:46	0,996976	0	0,062053	3,084348	

Fuente: EMPERCAP, 2022.

Anexo 17: Pruebas de Múltiple Rangos para Densidad (g/cm³) por Tramos

Tabla 3.5: Pruebas de Múltiple Rangos para Densidad (g/cm³) por Tramos. Contraste entre Tramos.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
T1 - T2		0,000220346	0,0990114
T1 - T3		0,0316186	0,101141
T1 - T4	*	0,128001	0,085539
T1 - T5	*	-0,876931	0,0844492
T1 - T6	*	-0,88895	0,136945
T1 - T7		0,000277251	0,107673
T2 - T3		0,0313983	0,0799589
T2 - T4	*	0,12778	0,0589988
T2 - T5	*	-0,877151	0,0574074
T2 - T6	*	-0,889171	0,122139
T2 - T7		0,000056905	0,0880758
T3 - T4	*	0,0963821	0,0625067
T3 - T5	*	-0,90855	0,0610069
T3 - T6	*	-0,920569	0,123872
T3 - T7		-0,0313414	0,0904632
T4 - T5	*	-1,00493	0,0284478
T4 - T6	*	-1,01695	0,111497
T4 - T7	*	-0,127724	0,0726018
T5 - T6		-0,0120192	0,110663
T5 - T7	*	0,877208	0,0713146
T6 - T7	*	0,889227	0,12926

* indica una diferencia significativa.

Anexo 18: Gráfico ANOVA para Densidad.

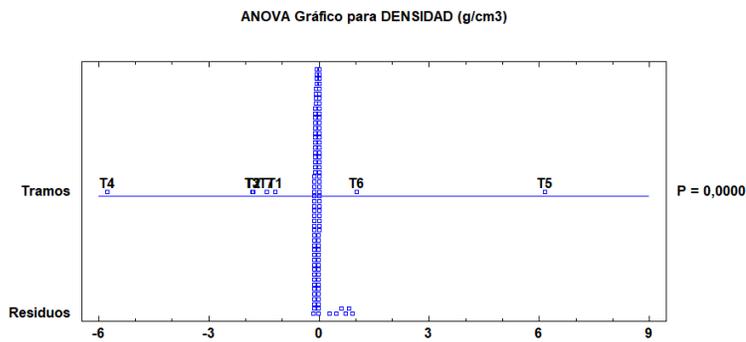


Figura 3.3: Gráfico ANOVA para Densidad.

Anexo 19: Gráfico Caja y Bigotes

Densidad por Tramos

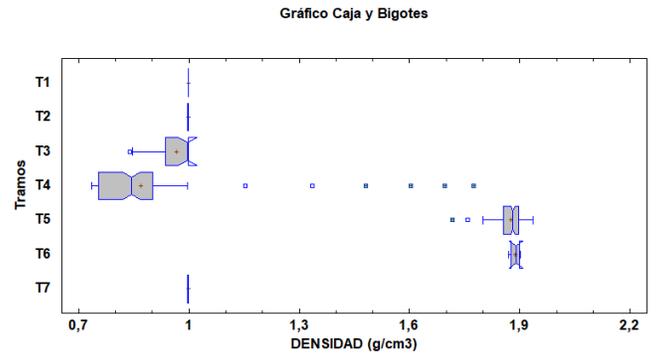


Figura 3.4: Gráfico Caja y Bigotes Densidad por Tramos

Anexo 20: Gráfico de Dispersión por Código de Nivel para Densidad por Tramos

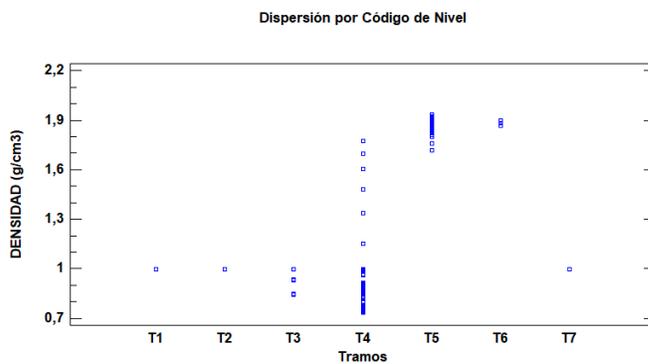


Figura 3.5: Gráfico de Dispersión por Código de Nivel para Densidad por Tramos

Anexo 21: Pruebas de Múltiple Rangos para Caudal (L/min) por Tramos. Contraste entre Tramos.

Tabla 3.10: Pruebas de Múltiple Rangos para Caudal (L/min) por Tramos. Contraste entre Tramos.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
T1 - T2		-34,2602	134,307
T1 - T3	*	-798,875	137,195
T1 - T4		0	116,032
T1 - T5	*	-801,972	114,553
T1 - T6		0	185,763
T1 - T7	*	-635,731	146,056
T2 - T3	*	-764,614	108,462

T2 - T4		34,2602	80,0306
T2 - T5	*	-767,712	77,8718
T2 - T6		34,2602	165,679
T2 - T7	*	-601,471	119,473
T3 - T4	*	798,875	84,789
T3 - T5		-3,09766	82,7544
T3 - T6	*	798,875	168,029
T3 - T7	*	163,144	122,711
T4 - T5	*	-801,972	38,5888
T4 - T6		0	151,244
T4 - T7	*	-635,731	98,4827
T5 - T6	*	801,972	150,112
T5 - T7	*	166,241	96,7366
T6 - T7	*	-635,731	175,338

* indica una diferencia significativa.

Anexo 22: Gráfico ANOVA para Caudal.

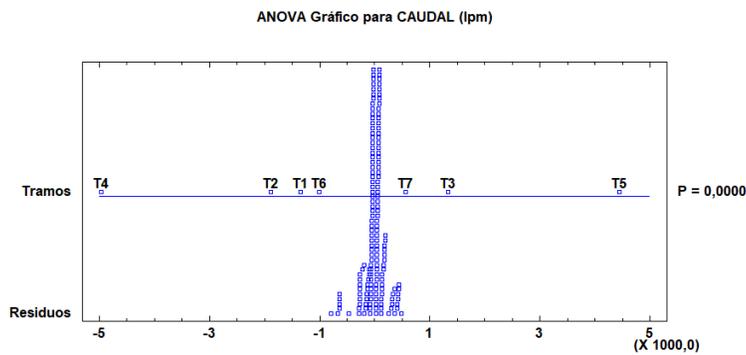


Figura 3.8: Gráfico ANOVA para Caudal.

Anexo 23: Gráfico Caja y Bigotes

Caudal por Tramos

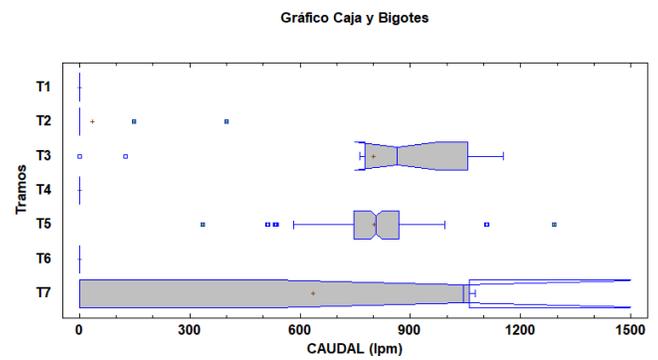


Figura 3.9: Gráfico Caja y Bigotes Caudal por Tramos

Anexo 24: Gráfico de Dispersión por Código de Nivel para Caudal por Tramos

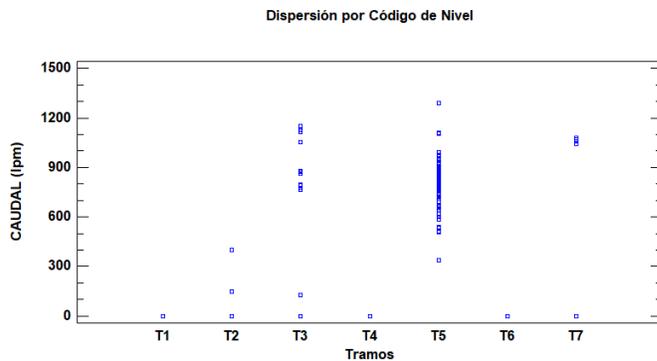


Figura 3.10: Gráfico de Dispersión por Código de Nivel para Caudal por Tramos

Anexo 25: Pruebas de Múltiple Rangos para Presión (MPa) por Tramos. Contraste entre Tramos.

Tabla 3.15: Pruebas de Múltiple Rangos para Presión (MPa) por Tramos. Contraste entre Tramos.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
T1 - T2	*	-11,6941	2,47694
T1 - T3		-2,06597	2,53021
T1 - T4		-0,222479	2,1399
T1 - T5	*	-3,4339	2,11264
T1 - T6		-0,271604	3,42592
T1 - T7		-0,763545	2,69362
T2 - T3	*	9,6281	2,00031
T2 - T4	*	11,4716	1,47596
T2 - T5	*	8,26017	1,43614
T2 - T6	*	11,4225	3,05552
T2 - T7	*	10,9305	2,20337
T3 - T4	*	1,84349	1,56371
T3 - T5		-1,36793	1,52619
T3 - T6		1,79436	3,09886
T3 - T7		1,30242	2,26309
T4 - T5	*	-3,21142	0,71167
T4 - T6		-0,0491252	2,7893
T4 - T7		-0,541066	1,81626
T5 - T6	*	3,1623	2,76844
T5 - T7	*	2,67035	1,78406
T6 - T7		-0,491941	3,23366

* indica una diferencia significativa.

Anexo 26: Gráfico ANOVA para Presión.

Anexo 27: Gráfico Caja y Bigotes Caudal por Tramos

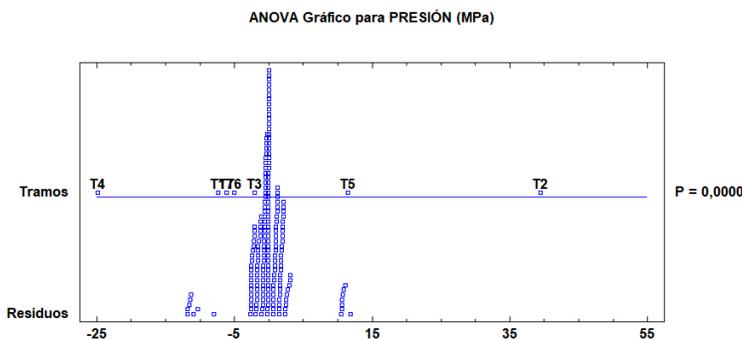


Figura 3.13: Gráfico ANOVA para Presión.

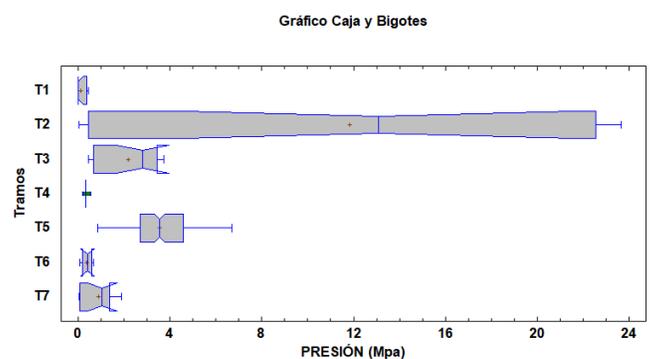


Figura 3.14: Gráfico Caja y Bigotes Presión por Tramos

Anexo 28: Gráfico de Dispersión por Código de Nivel para Presión por Tramos

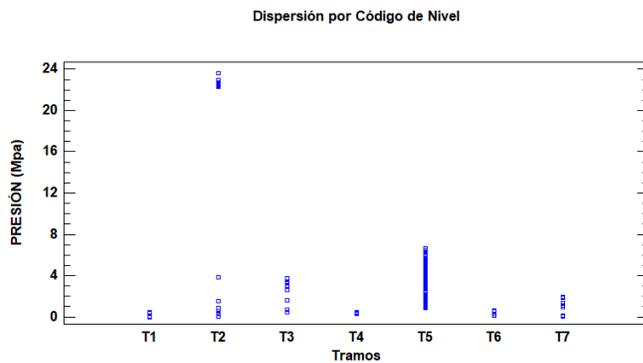


Figura 3.15: Gráfico de Dispersión por Código de Nivel para Presión por Tramos

Anexo 29: Pruebas de Múltiple Rangos para Presión (MPa) por Tramos. Contraste entre Tramos.

Tabla 3.20: Pruebas de Múltiple Rangos para Presión (MPa) por Tramos. Contraste entre Tramos.

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
T1 - T2		-0,551486	9,58231
T1 - T3		-3,35576	9,7884
T1 - T4		-0,000828057	8,27845
T1 - T5	*	-28,6976	8,17298
T1 - T6		0	13,2536
T1 - T7		-2,19561	10,4205
T2 - T3		-2,80428	7,73841
T2 - T4		0,550658	5,7099
T2 - T5	*	-28,1461	5,55588
T2 - T6		0,551486	11,8206
T2 - T7		-1,64412	8,52397
T3 - T4		3,35493	6,04939
T3 - T5	*	-25,3418	5,90423
T3 - T6		3,35576	11,9883
T3 - T7		1,16015	8,75501
T4 - T5	*	-28,6967	2,75317
T4 - T6		0,000828057	10,7907
T4 - T7		-2,19478	7,02639
T5 - T6	*	28,6976	10,71
T5 - T7	*	26,502	6,90181
T6 - T7		-2,19561	12,5098

* indica una diferencia significativa..

Anexo 30: Gráfico ANOVA para Volumen.

Anexo 31: Gráfico Caja y Bigotes
Volumen por Tramos

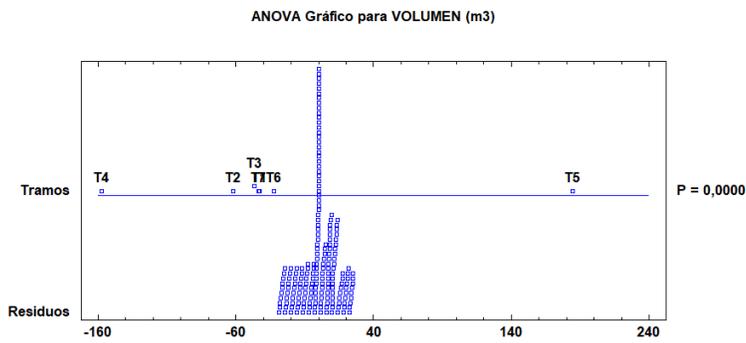


Figura 3.18: Gráfico ANOVA para Volumen.

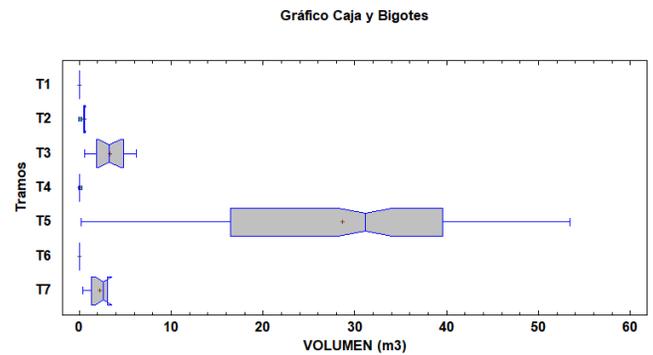


Figura 3.19: Gráfico Caja y Bigotes Volumen por Tramos

Anexo 32: Gráfico de Dispersión por Código de Nivel para Volumen por Tramos

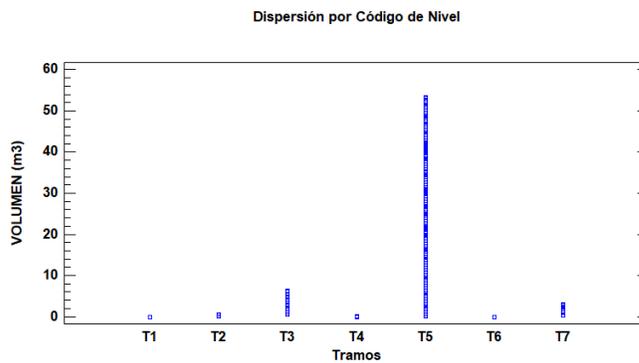


Figura 3.20: Gráfico de Dispersión por Código de Nivel para Volumen por Tramos

Anexo 33: Estructura del Excel

Variable_1	Variable_2	...	Variable_n
Valor 1	Valor 2	...	Valor n
...
...
Valor n	Valor n	...	Valor n

Anexo 34: Código Construcción del Índice

```

procesar_datos<- funcion(documento) {

datos_csv<-read.csv(documento, header = TRUE,sep = "\t", encoding = "UTF-8")
optimo<-(75*nrow(datos_csv))/100

contador_densidad<-function(data){
  cont=0

```

```
for (i in data){
  if(i>1){
    if(i<1.90){
      cont=cont+1
    }
  }
}
return(cont)
}
```

```
contador_caudal<-function(data){
  cont=0
  for (i in data){
    if(i>700){
      if(i<1000){
        cont=cont+1
      }
    }
  }
  return(cont)
}
```

```
contador_volumen<-function(data){
  cont=0
  for (i in data){
    if(i<=140){
      cont=cont+1
    }
  }
  return(cont)
}
```

```
contador_presion<-function(data){
  cont=0
  for (i in data){
    if(i<21){
      cont=cont+1
    }
  }
  return(cont)
}
```

```
densidad<-datos_csv$DENSIDAD
cont_densidad<-contador_densidad(densidad)
```

```
caudal<-datos_csv$CAUDAL
```

```

cont_caudal<-contador_caudal(caudal)

volumen<-datos_csv$VOLUMEN
cont_volumen<-contador_volumen(volumen)

presion<-datos_csv$PRESION
cont_presion<-contador_presion(presion)

maxs <- apply(datos_csv, 2, max)
mins <- apply(datos_csv, 2, min)
escalado <- as.data.frame(scale(datos_csv, center=mins, scale=maxs-mins))

data <- data.frame(t(escalado))
matriz.distancia <- dist(data, method = "euclidean")
hc <- diana(data)
dendrograma<-fviz_dend(hc, cex = 1, lwd = 1, k = 3,rect = TRUE, k_colors = "jco",rect_border =
"jco",rect_fill = TRUE, ggtheme = theme_gray())

indicador1<- function(cont_densidad,optimo){
  if(cont_densidad>=optimo){
    return("BIEN")
  }else{
    return("MAL")
  }
}

indicador2<- function(cont_caudal,cont_volumen,optimo){
  if(cont_caudal>=optimo && cont_volumen>=optimo){
    return("BIEN")
  }else{
    return("MAL")
  }
}

indicador3<- function(cont_presion,optimo){
  if(cont_presion>=optimo){
    return("BIEN")
  }else{
    return("MAL")
  }
}

ind1<-indicador1(cont_densidad,optimo)
ind2<-indicador2(cont_caudal,cont_volumen,optimo)

```

```

ind3<-indicador3(cont_presion,optimo)

indice<-function(ind1,ind2,ind3){
  count=0
  result= data.frame(ind1,ind2,ind3)
  for(i in result){

    if (i=="MAL"){
      count=count+1
    }
  }
  if(count==1){
    return ("Regular")
  }
  else if(count==2){
    return ("MAL")
  }
  else{
    return("BIEN")
  }
}

estado_indice<-indice(ind1,ind2,ind3)

return(estado_indice)
}

```

Anexo 35: Clusters.

Agrupamiento Jerárquico + Proyección PCA

Distancia euclídea, K=3

