

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
SANTIAGO-CHILE



**ESTUDIO DE LA TASA DE DESGASTE EN
MINERODUCTOS Y RELAVEUCTOS DE ACERO SIN
RECUBRIMIENTO DEL NORTE DE CHILE**

MIRKO FABRIZZIO FIGUEROA FIERRO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PROFESOR GUÍA:
JORGE MARTINEZ VARAS

PROFESORA CO-REFERENTE:
VIVIAN CLARISA ARANDA NUÑEZ

SANTIAGO
JULIO 2023

RESUMEN

La presente memoria busca estudiar la relación entre las variables operacionales de sistemas de transporte de pulpa de mineral y pulpa de relave con el desgaste erosivo producido en las tuberías de acero API X65 buscando correlaciones empíricas que permitan construir un modelo predictivo para dos tuberías que transportan pulpa de mineral de cobre y tres tuberías que transportan relave de cobre.

Los sistemas estudiados corresponden a tuberías que se encuentran operando actualmente en Chile: dos mineroductos de 24'' y 28'' y tres relaveductos de 28'', 36'' y 14-16'' para los cuales se cuenta con sus registros operacionales y mediciones de espesores de pared de la tubería en un período de aproximadamente ocho años. Las pulpas estudiadas poseen características similares, esto es, gravedad específica de sólidos con valores cercanos a 2.6 en el caso de los relaveductos y 2.8 en el caso de los mineroductos y un d_{80} de 300 [μm] aproximadamente.

Se realiza un procesamiento de los datos con el fin de obtener valores representativos del desgaste de la tubería a lo largo de todo su perfil longitudinal y su distribución dentro de la sección transversal de la tubería, así como también se realiza un análisis de frecuencia para obtener valores representativos de cada período de estudio. Finalmente, con estos datos se construye un modelo de regresión lineal múltiple utilizando herramientas de *Machine Learning* y se evalúa la capacidad predictiva de este mediante pruebas estadísticas y probabilísticas, comparándolo además con los modelos propuestos en la literatura estudiada.

De los resultados se concluye que no es posible obtener un modelo predictivo que permita estimar la tasa de desgaste de manera certera utilizando los datos operacionales de este estudio, sin embargo, se confirma que la velocidad del fluido es el parámetro más influyente en el comportamiento de la tasa de desgaste en sistemas que transportan pulpa de mineral de cobre y relave de cobre.

Índice de Contenido

Capítulo 1 : Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
Capítulo 2 : Marco Teórico	3
2.1. Proceso de flotación	3
2.2. Parámetros de diseño de pipeline	5
2.2.1. Distribución de partículas solidas	5
2.2.2. Concentración de sólidos	7
2.2.3. Densidad de la pulpa	7
2.2.4. Reología	7
2.2.1. Régimen del flujo	9
2.2.2. Velocidad en flujos de pulpa	9
2.2.3. Materiales y espesores de tubería	9
2.3. Desgaste en tuberías	10
2.3.1. Fenómeno y tipos de desgaste	10
2.3.2. Mecanismo de desgaste	12
2.3.3. Factores que afectan el desgaste	13
Capítulo 3 : Metodología	19
3.1. Recopilación de datos	19
3.1.1. Sistemas en estudio	19
3.1.2. Antecedentes de desgaste	21
3.1.3. Antecedentes operacionales	22
3.2. Procesamiento de datos	23
3.2.1. Procesamiento de espesores y tasa de desgaste histórica	23
3.2.2. Tasa de desgaste por campañas	24
3.2.3. Valores representativos de variables operacionales	26

3.2.4. Modelo predictivo de la tasa de desgaste	27
Capítulo 4 : Resultados	34
4.1. Tasa de desgaste histórica.....	34
4.2. Discretización por períodos	37
4.2.1. Tasa de desgaste.....	37
4.2.1. Variables operacionales	38
4.3. Correlación de variables	39
4.4. Modelo predictivo.....	42
4.4.1. Modelo predictivo mineroductos.....	42
4.4.1. Modelo predictivo relaveductos	45
Capítulo 5 : Discusión y Análisis.....	48
5.1. Caracterización del desgaste	48
5.2. Parámetros operacionales	51
5.3. Modelo predictivo.....	53
Capítulo 6 : Conclusiones	56

Índice de Tablas

Tabla 2-1 Factores relevantes en el proceso de desgaste	13
Tabla 2-2: Exponente de velocidad en el desgaste.....	14
Tabla 2-3: Exponente de tamaño de partícula en el desgaste.....	16
Tabla 3-1 Características de las tuberías en estudio.....	20
Tabla 3-2 Características de las pulpas en estudio	20
Tabla 3-3 Información disponible de espesores	22
Tabla 3-4 Información operacional disponible para estudio.....	23
Tabla 3-5: Discretización temporal campañas mineroductos	24
Tabla 3-6: Discretización temporal campañas relaveductos.....	25
Tabla 4-1: Rangos de Correlación.....	39
Tabla 4-2: Intervalo de confianza del modelo de mineroducto	44
Tabla 4-3: Intervalo de confianza del modelo de relaveducto	46

Índice de Figuras

Figura 2-1: Diagrama de proceso de concentración de sulfuros de cobre.....	4
Figura 2-2: Clasificación de flujos de mezcla bifásica de acuerdo con su distribución de pulpa.....	6
Figura 2-3: Diagrama reológico para fluidos no-newtonianos	8
Figura 2-4: Mecanismos de desgaste	11
Figura 2-5 Dependencia de la erosión con el ángulo de impacto para materiales	15
Figura 2-6 Ejemplo de formas de partículas.	17
Figura 2-7 Impacto de la dureza en la erosión.....	18
Figura 3-1: Perfil de elevación de los trazados de las tuberías	21
Figura 3-2 Ubicación de cámara de inspección de desgaste	21
Figura 3-3 Puntos de medición en anillos	22
Figura 3-4 Análisis de frecuencia – periodo agosto 2016 a marzo 2017	27
Figura 4-1 Mediciones de espesores km 40+000 de la tubería M24	34
Figura 4-2 Ubicación del desgaste máximo en la tubería.....	35
Figura 4-3 Distribución tasa de desgaste representativa a lo largo del perfil	36
Figura 4-4 Discretización temporal para la tasa de desgaste por periodos – km 18+400 R28	37
Figura 4-5 Banda de desgaste utilizada	38
Figura 4-6 Información operacional disponible de M24	39
Figura 4-7 Coeficientes de correlación entre variables operacionales y tasa de desgaste	40
Figura 4-8: Matriz de correlaciones para el relaveducto	41
Figura 4-9: Matriz de correlaciones para el mineroducto.....	41
Figura 4-10: Primera iteración de modelo de mineroductos.....	42
Figura 4-11: Modelo predictivo de mineroductos.....	43
Figura 4-12: Modelo predictivo de mineroducto	44
Figura 4-13: Primera iteración de modelo de relaveductos	45
Figura 4-14: Modelo predictivo de relaveductos	46

Figura 4-15: Modelo predictivo de relaveducto.....	47
Figura 5-1: comparación entre tasa de desgaste del punto 1 y punto 4.....	49
Figura 5-2 Tubería M24 en abandono luego de 20 años de operación	49
Figura 5-3: Zona de mayor desgaste en zonas de curvas	50
Figura 5-4: Distribución de la tasa de desgaste en los puntos adyacentes al punto más bajo en zona de curvas.....	50
Figura 5-5 Influencia de operación en la TD	51
Figura 5-6 Evolución espesores tubería R16-14	52
Figura 5-7: Comparación modelos obtenidos con literatura.....	55

Capítulo 1: Introducción

1.1. Motivación

El proceso de producción de mineral en el norte de Chile produce y transporta grandes volúmenes de fluido denominado pulpa¹ a través de grandes distancias. Dentro de las alternativas de transporte más utilizadas se encuentra el transporte mediante tuberías de larga distancia, también denominadas *pipeline*.

Parte importante del diseño de estos sistemas de transporte corresponde a la integridad de estas tuberías y su correcta estimación de vida útil lo cual permite programar reemplazos de forma anticipada previniendo fallas y roturas producto del desgaste por la operación con pulpa, las cuales traen como implicancia directa pérdidas económicas para las compañías mineras, así como también, posibles daños al medio ambiente y comunidades aledañas.

El desgaste en las tuberías que transportan pulpa se produce principalmente debido a mecanismos erosivos-corrosivos relacionados con la velocidad y la concentración de los fluidos ya que, para operar estos sistemas de forma segura, se requiere imponer al fluido (de características no-newtoniano) velocidades que permitan una turbulencia adecuada que evite la sedimentación y la segregación de partículas.

Dado lo anterior, diferentes empresas mineras en Chile dedican esfuerzos humanos y financieros en realizar estudios y crear modelos que representen los fenómenos asociados al desgaste en las tuberías. En este contexto, actualmente para evaluar el desgaste se realizan mediciones de espesores periódicas en tuberías de acero sin recubrimiento interno, sin embargo, las tasas de desgaste utilizadas solo consideran la disminución de espesores en el tiempo sin considerar las variables operacionales de los fluidos transportados. Por otra parte, las investigaciones que involucran parámetros operacionales se han llevado a cabo mediante ensayos de laboratorio y plantas piloto lo cual, si bien ayuda a entender los mecanismos de desgaste, posee limitaciones debido a que no representa a cabalidad las operaciones de los sistemas ya que en algunos casos consideran tamaños de partícula homogéneos, o bien, poseen registros temporales acotados.

¹ Mezcla de partículas sólidas dispersas en un fluido transportador, generalmente agua de cualquier calidad, que se trata en las operaciones mineras. Según el tipo de material transportado se habla de pulpas de mineral molido, de relaves o ripio, y de concentrados (Rayo, J., 2019)

El presente trabajo tiene como propósito realizar un análisis empírico del desgaste de cinco tuberías que transportan pulpa en Chile: dos tuberías de pulpa de mineral de cobre y tres tuberías de relave de cobre utilizando los datos de mediciones de espesores históricas realizados durante la operación y relacionándolos con los parámetros operacionales disponibles para obtener la influencia de cada uno de estos en el desgaste de las tuberías. Finalmente, estos resultados y relaciones serán comparadas con las disponibles en la literatura.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo de memoria es buscar correlaciones empíricas que permitan proyectar las tasas de desgaste en función de la información operacional disponible para cinco tuberías de acero desnudo de calidad API 5L X65 que se encuentran operando actualmente en Chile transportando relave o pulpa de mineral².

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar la tasa de desgaste representativa en las tuberías utilizando la información de mediciones de espesores disponible.
- Caracterizar el comportamiento del desgaste en la sección transversal de la tubería y su distribución a lo largo del eje longitudinal.
- Obtener de la información operacional disponible valores para caudal, velocidad, concentración de sólidos, granulometría, entre otros, que permitan representar la operación de las tuberías en los períodos donde se mide el desgaste y obtener correlaciones entre dichas variables con las tasas de desgaste producidas en cada período de operación.
- Comparar, concluir y recomendar respecto a las correlaciones obtenidas con las propuestas en la literatura disponible.

² Las características de las pulpas estudiadas poseen valores de gravedad específica de sólidos $SG \approx 2.7$ y $\%+65 \text{ Mesh} \approx 24$. El detalle de las características de cada pulpa se encuentra en la sección 3.1.1.

Capítulo 2: Marco Teórico

En Chile, existe a lo largo de la Cordillera de Los Andes mineral de cobre presentado como una mezcla de roca mineralizada con roca estéril. El tipo de mineral de cobre presente en la corteza terrestre se puede dividir en dos grandes grupos: los compuestos oxidados y los compuestos sulfurados del metal.

Los óxidos corresponden a aquellos que en su composición química integran elementos como el oxígeno como su componente principal y su proceso de extracción del cobre está asociado a la presencia de soluciones ácidas, mientras que los minerales sulfurados de cobre contienen azufre en su composición y, por lo general, se extrae el cobre mediante concentración de minerales y pirometalurgia.

Dependiendo de las características químicas del mineral de cobre y su mineralogía se escoge el proceso mediante el cual será extraído el metal. Para óxidos y minerales mixtos se escoge la hidrometalurgia, mientras que los sulfuros de cobre normalmente están asociados a procesos de flotación y concentración.

Las tuberías estudiadas en este trabajo pertenecen al proceso de extracción de sulfuro de cobre, específicamente al transporte de pulpa de mineral de cobre desde la mina a la planta de flotación y relave de cobre desde la planta de flotación al depósito de relaves. A continuación, se presenta una descripción general del proceso de concentración del sulfuro de cobre.

2.1. Proceso de flotación

En el proceso de extracción de mineral desde el sulfuro de cobre se puede distinguir cuatro grandes áreas: área mina, donde se extrae el mineral desde el macizo rocoso; sector de molienda, donde el mineral es reducido de tamaño; área de flotación, donde se realizan los procesos químicos para la obtención del concentrado de cobre y área de tranque, donde se depositan los relaves que son obtenidos como residuos del proceso de flotación.

Extracción

El proceso comienza con la extracción del mineral en yacimientos mediante mecanismos de perforación y tronadura para luego ser cargado mediante palas y/o cargadores frontales a correas transportadoras que conducen el mineral a la planta de molienda.

Molienda

El proceso de molienda tiene como finalidad reducir el tamaño de la roca mediante chancadores y molinos con el fin que este alcance el tamaño de la liberación de partículas de cobre. Una vez obtenido el tamaño requerido, este puede ser mezclado con agua para su transporte como pulpa de mineral hasta la planta de flotación.

Flotación

Corresponde a un proceso fisicoquímico que permite la separación de los minerales sulfurados de cobre y otros elementos del resto de los minerales que componen la mayor parte de la roca original. Durante el proceso de flotación el mineral de cobre es mezclado con agua, reactivos y aire para luego ser agitado hasta hacerlo burbujear, consiguiendo que el mineral se arrastre a la superficie para obtener el concentrado de cobre.

Tranque

Una vez extraído el cobre de la roca, el residuo es transportado a un tranque de relaves donde la fracción gruesa de las rocas es utilizada para la construcción del muro y la fina es depositada en el tranque.

La Figura 2-1 muestra un diagrama general del proceso de obtención de concentrado de cobre. Durante este proceso de producción se generan tres tipos de pulpa: pulpa de mineral (mezcla de agua con mineral triturado y molido), concentrado de cobre y relave.

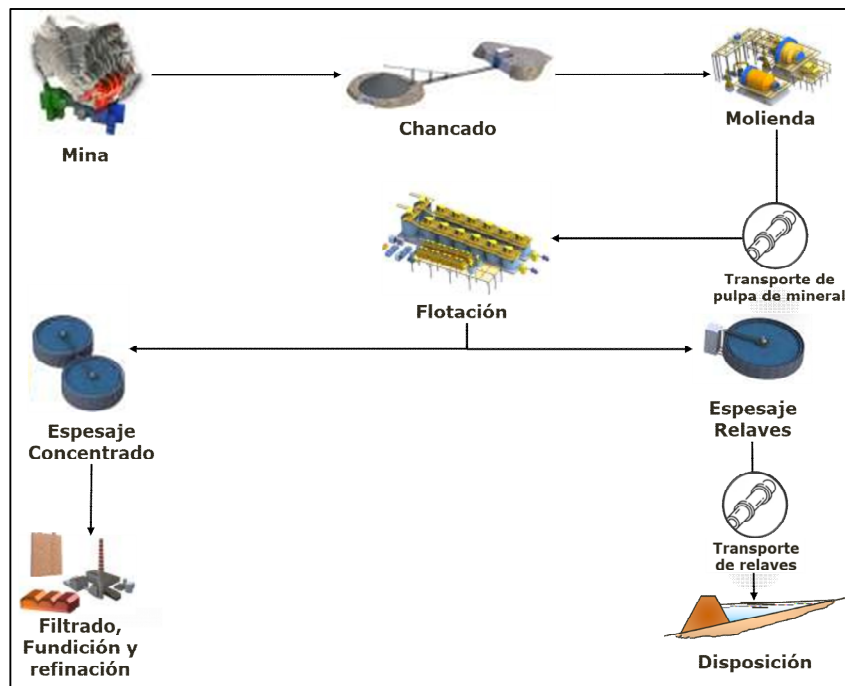


Figura 2-1: Diagrama de proceso de concentración de sulfuros de cobre

Fuente: Curso CIV349 Proyecto Hidráulico 2018-1, UTFSM

Para el transporte hidráulico de pulpa las tuberías son las más utilizados debido a sus ventajas económicas producto de su eficiencia en el transporte de sólido a larga distancia, su capacidad de mantener una operación continua en el tiempo y la posibilidad de operar los sistemas de manera remota, además del bajo impacto ambiental y en las comunidades. Lo anterior, sumado a las dificultades geográficas que presenta el país para la inspección, diseño y operación de los sistemas hace que el transporte hidráulico sea una de las etapas fundamentales del proceso de explotación de la minería el cobre (Rayo, J., 2015).

2.2. Parámetros de diseño de pipeline

El diseño de los sistemas hidráulicos de transporte mediante tuberías considera como base la elección de las variables operacionales y materiales necesarios para permitir el transporte continuo del fluido evitando la sedimentación de las partículas sólidas, el desgaste excesivo, la obstrucción de las líneas y las sobrepresiones que pudiesen afectar la integridad de los ductos. Los principales parámetros por considerar al momento de diseñar líneas de transporte de pulpa son los siguientes:

- Distribución de las partículas sólidas y su granulometría
- Densidad de la pulpa
- Concentración de sólidos
- Propiedades reológicas
- Velocidad del fluido
- Tipo de régimen del flujo
- Materiales y espesores de tuberías

2.2.1. Distribución de partículas solidas

De acuerdo con lo indicado en el libro “*Fluid-solid transport in ducts*” (Dhodapkar, K., Jacob, K., Hu, S., 2006), la distribución de partículas se puede clasificar en cuatro modelos principales:

1. **Suspensión homogénea:** Corresponde a cuando los sólidos se encuentran distribuidos de manera uniforme en la fase líquida. Para mantener este tipo de suspensión la velocidad media del flujo debe ser lo suficientemente alta para mantener en suspensión las partículas finas.

2. **Suspensión heterogénea:** Cuando el fluido reduce su velocidad, las partículas de mayor tamaño y más densas tienden a separarse del líquido y pierden su distribución uniforme, generando un gradiente de concentración en la sección vertical de la tubería que aumenta a medida que se acerca al fondo del tubo.
3. **Flujo con lecho móvil:** En aquellos casos que la velocidad del fluido se reduce por debajo de la velocidad mínima de sedimentación, las partículas de mayor tamaño y densidad se depositan en el fondo de la tubería, sin embargo, el esfuerzo cortante ejercido por el fluido es capaz de mover la cama de material depositado.
4. **Flujo con lecho estacionario:** Cuando la velocidad está muy por debajo de la velocidad crítica las partículas de mayor tamaño permanecen estacionarias en el fondo de la tubería pudiendo provocar un bloqueo de la línea.

La Figura 2-2 muestra una representación de la clasificación de los flujos de acuerdo con la distribución de partículas sólidas.

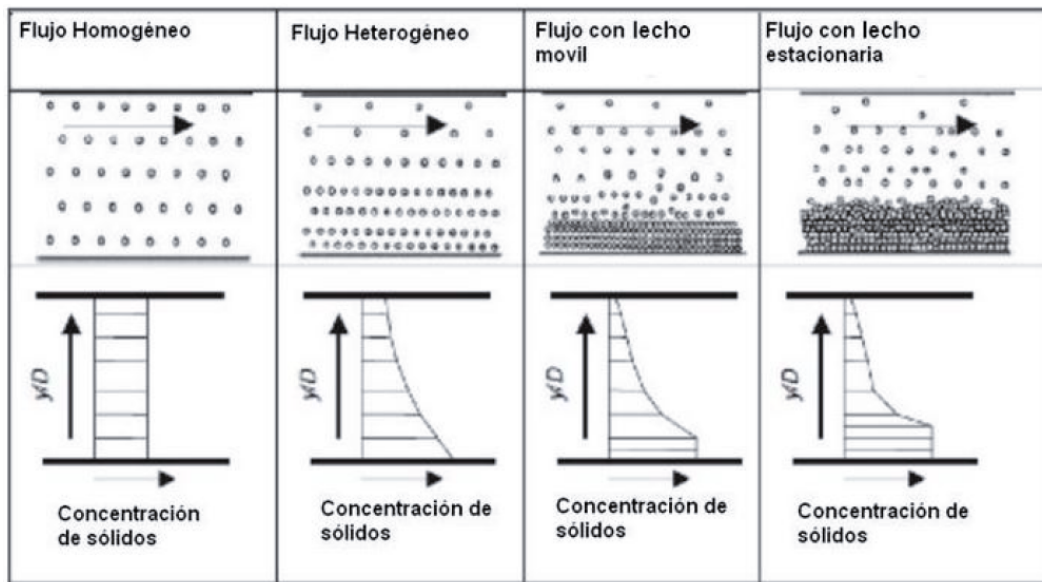


Figura 2-2: Clasificación de flujos de mezcla bifásica de acuerdo con su distribución de pulpa.

Fuente: Fluid-solid transport in ducts, 2006

2.2.2. Concentración de sólidos

La concentración en peso de la pulpa (C_p) indica la cantidad de sólidos presentes en una mezcla en términos del peso.

$$C_p (\%) = \frac{\text{peso del sólido}}{\text{peso de la mezcla}} \quad \text{Ec. 2-1}$$

2.2.3. Densidad de la pulpa

La densidad de la pulpa (ρ_p) depende de la densidad de los sólidos transportados, junto con su concentración en peso y la densidad del fluido transportador (ρ_a).

$$\rho_p = \frac{1}{\left(\frac{C_p}{\rho_s} + \frac{1 - C_p}{\rho_a}\right)} \quad \text{Ec. 2-2}$$

Donde:

ρ_p : densidad de la pulpa $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

C_p : concentración de sólidos $[\%]$

ρ_s : densidad del sólido en suspensión $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

ρ_a : densidad del fluido transportador $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

2.2.4. Reología

La reología del fluido corresponde al vínculo existente entre la fuerza que ejerce un material y la deformación que este experimenta al fluir. Los principales conceptos que están asociados a la reología son:

- Viscosidad: propiedad de un fluido mediante la cual se ofrece resistencia al esfuerzo tangencial.
- Tensión de fluencia: esfuerzo inicial que es necesario aplicar al fluido para iniciar el movimiento.

Según el comportamiento viscoso del fluido estos se pueden clasificar en dos grupos:

- Fluido Newtoniano: se denomina fluidos newtonianos a aquellos que el esfuerzo de corte τ es directamente proporcional a la tasa de deformación $\dot{\gamma}$, donde la constante de proporcionalidad corresponde a la viscosidad dinámica μ

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad \text{Ec. 2-3}$$

Donde:

τ : esfuerzo de corte $[Pa]$

μ : viscosidad dinámica $[Pa \cdot s]$

$\dot{\gamma}$: Velocidad o tasa de deformación $[s^{-1}]$

- Fluido No-newtoniano: son fluidos que se caracterizan por no tener una viscosidad constante, es decir, esta varía de acuerdo con variables como el tiempo o la velocidad de deformación, o bien, requiere un esfuerzo de corte mínimo para comenzar a fluir. Dentro de los fluidos no-newtonianos se encuentran los fluidos plásticos, pseudoplásticos y dilatantes: los fluidos plásticos son aquellos que no fluyen hasta recibir un esfuerzo de corte límite o límite de fluencia (τ_f), los fluidos pseudoplásticos se caracterizan porque la tasa de crecimiento de la velocidad de deformación aumenta cuando aumenta su esfuerzo de corte y los fluidos dilatantes son aquellos que la tasa de crecimiento de la velocidad de deformación disminuye a medida que el esfuerzo cortante aumenta.

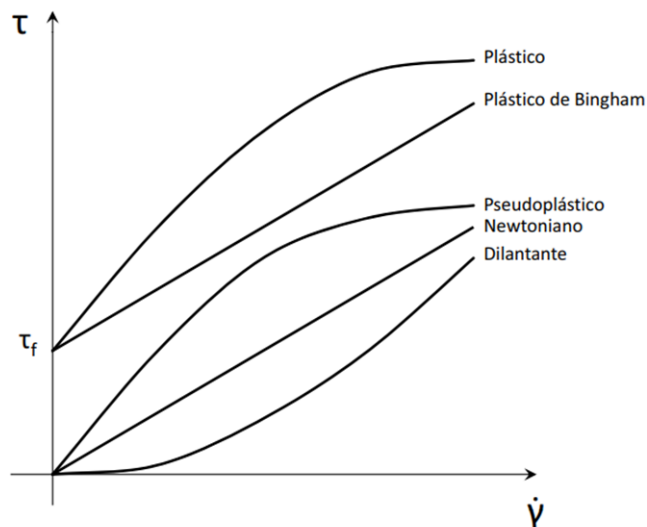


Figura 2-3: Diagrama reológico para fluidos no-newtonianos

Fuente: Curso CIV349 Proyecto Hidráulico 2018-1, UTFSM

2.2.1. Régimen del flujo

Los flujos se clasifican de acuerdo con el número adimensional de Reynolds el cual caracteriza el movimiento del fluido mediante una relación entre sus fuerzas inerciales y viscosas, este movimiento puede ser laminar o turbulento.

- Régimen laminar: posee líneas de escurrimientos paralelas, cada partícula sigue una trayectoria suave denominada línea de corriente.
- Régimen turbulento: no posee un movimiento definido, se caracteriza por la formación de torbellinos y la alta inestabilidad puntual del flujo.

2.2.2. Velocidad en flujos de pulpa

La velocidad a la que es transportado el fluido en régimen turbulento está definida por los siguientes límites:

- Velocidad mínima: es la velocidad que permite que el sistema opere en régimen turbulento y evita la depositación, corresponde a la mayor entre la velocidad de transición laminar-turbulenta y la velocidad límite de depósito.
- Velocidad máxima: definida para evitar desgastes excesivos o por la limitante de capacidad del sistema de transporte.

2.2.3. Materiales y espesores de tubería

En Chile el material más utilizado para sistemas de transporte hidráulico por tuberías es el acero al carbono debido a su buena ductilidad, su capacidad de resistencia y disponibilidad en el mercado. El diseño de estas tuberías está principalmente relacionado con soportar las presiones internas producidas por el fluido, para esto la determinación del espesor mínimo que soporta las presiones máximas, en operación normal y transiente, evitando la rotura, se estima de acuerdo con la Ec. 2-4

$$e_{min} = \frac{P \cdot \phi_{ext}}{2 \cdot f \cdot E \cdot F} \quad Ec. 2-4$$

Donde:

P: presión de trabajo en la tubería [psi]

ϕ_{ext} : diámetro externo de la tubería [mm]

f : factor de acuerdo con la norma utilizada

F : factor de corrección por soldadura (normalmente 1)

E : límite de fluencia del material [psi]

2.3. Desgaste en tuberías

2.3.1. Fenómeno y tipos de desgaste

El desgaste se puede definir como el daño superficial o la eliminación de material de una o ambas superficies debido al desplazamiento, rodadura o impacto entre ellas. Sin producir necesariamente un cambio significativo en el peso o volumen de este.

Es relevante destacar que el desgaste no corresponde directamente a una propiedad de los materiales, sino más bien a una respuesta de estos al sistema. Por lo tanto, al momento de estudiar los desgastes de materiales se debe observar también, además de la superficie desgastada, las características de los materiales que interactúan con ella.

El origen del desgaste en los materiales es asociado principalmente a fenómenos mecánicos, químicos o una combinación de estos. Dentro de la literatura, se definen distintos tipos de desgaste los cuales coinciden con los expuestos en el libro *Introduction to Tribology* (Brushan, B., 2013):

- **Desgaste por adherencia:** se desarrolla cuando dos cuerpos sólidos se deslizan sobre una superficie plana, produciendo efectos de cizalle de ambas superficies, facilitando el desprendimiento de material de ambas.
- **Desgaste por abrasión:** el efecto abrasivo ocurre cuando una superficie dura, o bien, partículas de alta dureza deslizan sobre una superficie de menor dureza provocando daño en la superficie más blanda.
- **Desgaste por fatiga:** se produce debido a ciclos reiterados de carga y descarga produciendo grietas que eventualmente desencadenan en la fractura de material.
- **Desgaste por corrosión:** el desgaste corrosivo se produce debido a la interacción química o electroquímica entre el material y el medio. En el caso de la interacción pulpa-acero esta puede estar relacionada con la reacción química del oxígeno disuelto en el medio.

- **Desgaste por erosión:** consiste en la pérdida de material de una superficie sometida a impactos repetitivos de partículas sólidas o líquidas.

La Figura 2-4 muestra un esquema que resume los mecanismos de desgaste.

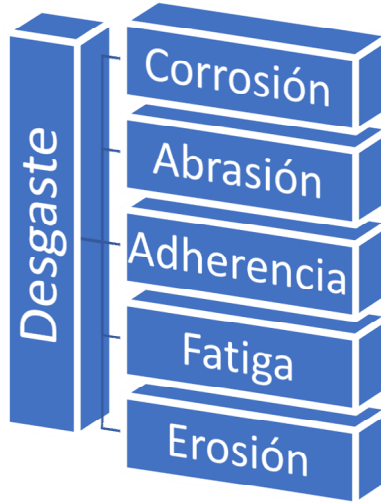


Figura 2-4: Mecanismos de desgaste

Fuente: Elaboración propia

Se define como tasa de desgaste en una tubería a la disminución de espesor medida durante un período de tiempo:

$$TD_{total} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t}$$

Ec. 2-5

Donde:

TD: tasa de desgaste [mm/año]

$\Delta \varepsilon$: pérdida de espesor [mm]

Δt : período de tiempo entre mediciones de espesor [años]

El desgaste total de un material puede ser una combinación de uno o más de los tipos de desgaste de la Figura 2-4. De acuerdo con el libro *Design of Slurry Transport Systems* (Jacobs, B. E., 1991) las dos primeras causas del desgaste de estos sistemas de transporte corresponden a la erosión y corrosión, pudiendo actuar estas de forma conjunta o separada.

$$TD_{total} = f(TD_{corrosión}, TD_{erosión})$$

Ec. 2-6

Donde:

TD_{total} : tasa de desgaste total [mm/año]

$TD_{corrosión}$: tasa de desgaste debido a variables corrosivas [mm/año]

$TD_{erosión}$: tasa de desgaste debido a variables erosivas [mm/año]

Cabe destacar que en esta investigación se asumirá que los desgastes corrosivos y erosivos afectan de manera independiente a la tubería, siendo posible entonces separar sus efectos. Esta investigación se centra en el desgaste erosivo producido por la pulpa.

2.3.2. Mecanismo de desgaste

Un parámetro de diseño de líneas de conducción es que la velocidad de la mezcla sólido-líquido supere la velocidad crítica de sedimentación y se transporte en régimen turbulento cuyo grado es determinada por el número de Reynolds. Este grado de turbulencia es el responsable de la formación de remolinos y el movimiento de las partículas sólidas que se encuentran en el fluido, las que, debido a su alta velocidad, golpean las paredes de la tubería transfiriendo energía en el impacto, provocando daño en el material. La fuerza del impacto y el tiempo de contacto con la pared están determinadas por la velocidad de las partículas en suspensión y el ángulo de impacto produciendo principalmente dos tipos de desgaste mecánico: deformación y corte.

El desgaste por deformación es la remoción del material cuando las partículas en suspensión impactan repetidas veces en las paredes de la tubería lo que eventualmente se traduce en un desprendimiento de material y, por lo tanto, disminución del espesor. Mientras que el desgaste por corte es la eliminación de materia por partículas que se mueven tangencialmente a lo largo de la superficie produciendo una especie de ranurado.

2.3.3. Factores que afectan el desgaste

El desgaste en las tuberías depende de una gran variedad de parámetros lo cuales pueden clasificarse en tres grupos: características del material, propiedades erosivas y características del flujo y de la pulpa las cuales son listadas en la Tabla 2-1. En esta sección se revisará la influencia de alguno de estos parámetros en el desgaste erosivo.

Tabla 2-1 Factores relevantes en el proceso de desgaste

Características del material	Propiedades erosivas	Características del flujo y la pulpa
Dureza	Dureza	Velocidad y Turbulencia
Módulo de Elasticidad	Tamaño	Angulo de impacto
Tenacidad	Forma	Concentración
Composición Química	Densidad	pH
Microestructura	--	Viscosidad

2.3.3.1. Velocidad de la pulpa

Los efectos de la velocidad de la partícula de mineral han sido estudiados por diferentes autores en las últimas décadas (ver Tabla 2-2) debido al efecto dominante en la tasa de remoción de material. Los estudios coinciden en que un aumento en la velocidad de las partículas contribuye con un aumento en la tasa de desgaste, proponiendo diversas relaciones empíricas que relacionan ambas variables de manera potencial como se representa en la ecuación Ec. 2-7.

$$TD = k \cdot V^n \quad \text{Ec. 2-7}$$

Donde:

TD: tasa de desgaste $\left[\frac{mm}{año}\right]$

n : exponente de la velocidad [1]

V: velocidad de la pulpa $\left[\frac{m}{s}\right]$

k : constante empírica [1]

La Tabla 2-1 muestra los resultados obtenidos por alguno de los autores estudiados. En la sección 5.3 se analizará con mayor profundidad las relaciones empíricas obtenidas de diferentes estudios que permiten predecir la tasa de desgaste.

Tabla 2-2: Exponente de velocidad en el desgaste

Autor	n_{min}	n_{max}	n
Salazar (1977)	1.5	2.2	-
Shou et al. (2007)	-	-	1.85
CIMM (1977)			1.891
Gupta et al. (1994)			2.148

Los autores mencionados poseen condiciones similares en los estudios realizados y los exponentes obtenidos se encuentran en valores cercanos a 2. El incremento de la tasa de desgaste con la velocidad está asociado principalmente al incremento de la energía cinética de las partículas la cual genera un daño más efectivo en las superficies, de acuerdo con la literatura partículas con mayor energía generan deformaciones plásticas en los materiales, mientras que aquellas que poseen baja energía solo generan deformaciones elásticas, sin contribuir a la tasa de erosión (Islam M. A., Farhat, Z., 2014).

2.3.3.2. Ángulo de impacto

El ángulo de impacto (θ) se define como el ángulo entre el vector velocidad de la partícula y la superficie objetivo (Hutchings, I. M., 1992) como se muestra en la Figura 2-5. Para materiales dúctiles, la máxima erosión ocurre entre 20° y 30° disminuyendo a un tercio aproximadamente de la erosión máxima para ángulos cercanos a los 90° lo que muestra que el principal mecanismo de erosión presente en esta condición corresponde a deformaciones plásticas debido a la acción de corte provocada por la partícula.

En materiales frágiles, la erosión máxima ocurre más cercano a la incidencia normal de la partícula en la superficie, siendo removido el material por la formación de grietas que comienzan en el punto de impacto de la partícula.

La Figura 2-5 muestra la dependencia la relación entre la tasa de desgaste y el ángulo de impacto para materiales dúctiles y frágiles.

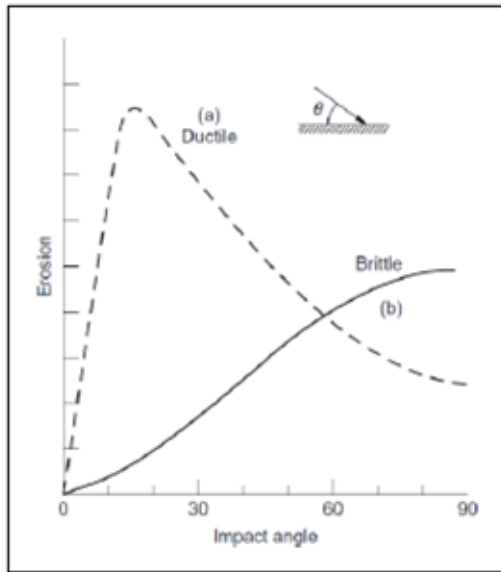


Figura 2-5 Dependencia de la erosión con el ángulo de impacto para materiales (a) dúctiles y (b) frágiles.

Fuente: Hutchings, I. M., 1992

2.3.3.3. Tamaño de la partícula

El tamaño de la partícula es una variable significativa en la erosión de los materiales. La mayoría de los autores estudiados (Desale G. R., Gandhi B. K., Jain, S. C., 2009; Gupta et al., 1995; Clark, H. M., Hartwich R. B, 2001; Sheldon G., Kanhere A., 1972) establecen una correlación entre el diámetro de las partículas y la tasa de desgaste indicando que, a mayor tamaño, estas transfieren mayor energía en la colisión con las superficies generando mayor desgaste erosivo (Clark, H., 2001). Por otra parte, partículas más pequeñas se mantienen suspendidas en el flujo, disminuyendo la interacción con la superficie de la tubería.

Según los varios investigadores, la tasa de desgaste erosiva puede expresarse como una relación potencial con el diámetro representativo de las partículas presentes en la pulpa como se muestra en la siguiente ecuación:

$$TD = d_i^n \quad Ec. 2-8$$

Donde:

TD: tasa de desgaste $\left[\frac{mm}{año}\right]$

n: exponente [1]

d_i : diámetro representativo [mm]

El valor exponencial n , y los parámetros utilizados en algunas investigaciones se encuentran en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3: Exponente de tamaño de partícula en el desgaste

Autor	n	<i>Superficie</i> Erosionada	Partícula Erosionante
Clark	2	Aluminio T-6061	SiC
Clark	4	Vidrio (Pypex)	SiC
Gupta	0.344	Acero dulce	Relave de cobre
Gupta	0.291	Latón	Relave de cobre
Sheldon & Kanhere	3	Aluminio T-6061	Acero

2.3.3.1. Forma de la partícula

La forma de las partículas también afecta en el mecanismo de erosión. Si bien, la angularidad de sus caras es difícil definirlas en tres dimensiones, a menudo se clasifican estas en tres tipos: esféricas, caras redondeadas o caras con bordes angulares siendo las últimas las que más aportan al desgaste del material debido al mecanismo de erosión de cada una.

Hutchings (Hutchings, I.M, 1992 ; Winter R. E., Hutchings, I. M., 1974) sugiere que existen dos mecanismos diferentes para el desgaste en partículas redondeadas y angulares proponiendo que el impacto de las partículas redondeadas elimina el material como una especie de barrido produciendo fisuras redondeadas y poco profundas que más bien desplazan el material hacia los lados. Por otra parte, las partículas angulares eliminan material por acción de corte produciendo fisuras profundas y afiladas requiriendo menos impactos para eliminar material. La Figura 2-6 muestra un ejemplo de la forma de las partículas presentes en la pulpa.

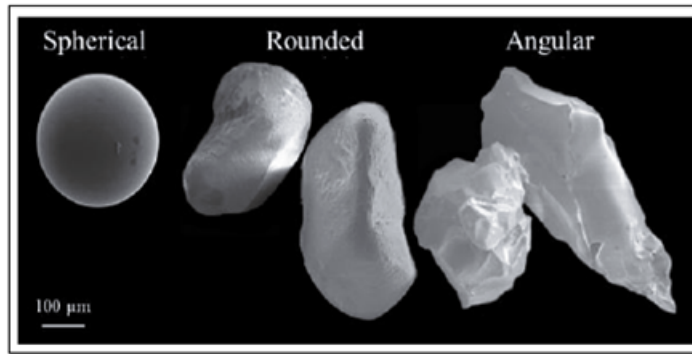


Figura 2-6 Ejemplo de formas de partículas.

Fuente: (Aguirre, J., 2019)

2.3.3.2. Dureza de la partícula

La dureza de las partículas involucradas influye en la tasa de desgaste ya que partículas con menor dureza causan menos daños a la superficie que aquellas que poseen una dureza mayor (Hutchings, I. M., 1992). En la literatura, se utiliza comúnmente la relación entre dureza de partícula y dureza del material objetivo para describir este efecto.

$$\text{Relación Dureza} = \frac{H_a}{H_s} \quad \text{Ec. 2-9}$$

Donde:

H_a : Dureza de la partícula $\left[\frac{Kgf}{mm}\right]$

H_s : Dureza de la superficie $\left[\frac{Kgf}{mm}\right]$

Generalmente, un aumento de la relación dureza $\frac{H_a}{H_s}$ provoca un aumento en la erosión total, dicho fenómeno ocurre hasta cierto valor máximo, luego del cual, un aumento adicional en relación dureza no posee efecto aparente en la erosión. Experimentalmente, se espera que una partícula de cualquier forma raye una superficie si $\frac{H_a}{H_s} > 1.2$ como se muestra en la Figura 2-7 (Hutchings, I. M., 1992).

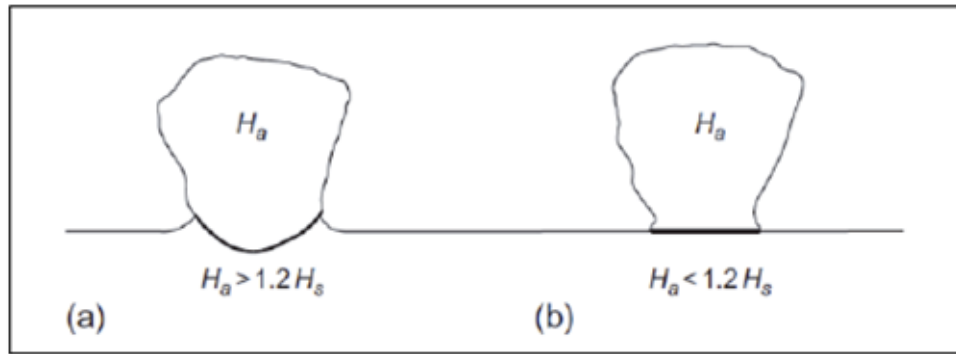


Figura 2-7 Impacto de la dureza en la erosión

Fuente: Hutchings, I. M., 1992

2.3.3.3. Concentración de sólidos

Un incremento en la concentración de sólidos incrementa la tasa de desgaste de la tubería (Gupta, R., Prasad, B., Jha, A., 1998) debido a que más partículas se encuentran impactando las paredes por unidad de tiempo. Sin embargo, la relación lineal entre la concentración y la tasa de desgaste es válida solo para concentraciones bajas ya que superado cierto nivel de porcentaje de sólidos se ha observado cambios y efectos decrecientes en las tasas de desgaste (Turenne, S., et al, 1989) esto producto de que al aumentar la concentración de partículas, la eficiencia de la erosión disminuye ya que aumenta la colisión entre partículas, reduciendo el impacto de estas con la superficie.

2.3.3.4. Corrosión

La corrosión en las tuberías, y por consecuencia, la pérdida de material, posee una dependencia del pH de la pulpa y de la cantidad de oxígeno disuelto presente (Madsen, B. W., 1986). Un aumento de pH da como resultado una disminución de la tasa de desgaste, así como también, un aumento de oxígeno disuelto da como resultado un aumento de la corrosión y, por lo tanto, un aumento en la tasa de desgaste.

Capítulo 3: Metodología

3.1. Recopilación de datos

Con el fin de poder realizar el estudio con datos de tuberías reales que se encuentren operando con pulpa es que se ha solicitado a compañías mineras antecedentes de mediciones de espesores de las tuberías y datos operacionales disponibles tales como flujo, dureza, densidad, concentración, pH y granulometría.

3.1.1. Sistemas en estudio

De la recopilación de información se ha obtenido datos históricos de operación y desgaste de dos mineroductos (tubería que transporta pulpa de mineral de cobre), y tres relaveductos (tuberías que transportan relave de cobre). La data histórica utilizada corresponde a un período de diez años aproximadamente:

- Mineroducto de 24'' que opera con pulpa de cobre (M24)
- Mineroducto de 28'' que opera con pulpa de cobre (M28)
- Relaveducto de 28'' que transporta relave de cobre (R28)
- Relaveducto de 36'' que transporta relave de cobre (R36)
- Relaveducto de 16-14'' que transporta relave de cobre (R16-14)

La Tabla 3-2 muestra las características generales de las tuberías a estudiar. Se puede notar que todas poseen la misma materialidad y que poseen extensiones cercanas a los 50 [km].

Tabla 3-1 Características de las tuberías en estudio

TAG Pipeline	Diámetro [in]	Largo [km]	Materialidad
M24	24	56	Acero API 5L X65
M28	28	52	Acero API 5L X65
R28	28	49	Acero API 5L X65
R36	36	49	Acero API 5L X65
R16-14	14-16	49	Acero API 5L X65

La Tabla 3-2 muestra las características principales de la pulpa en estudio: gravedad específica de sólidos, diámetros característicos y porcentaje % +65 Mesh.

Tabla 3-2 Características de las pulpas en estudio

TAG Pipeline	SG	$d_{50}[\mu m]$	$d_{80}[\mu m]$	% +65 Mesh
M24	2.8	60	320	20.2
M28	2.8	103	309	24
R28	2.64	84	323	21.6
R36	2.64	84	323	21.6
R14-16	2.8	70	(1)	(1)

(1) Nota: Dentro de la información disponible para el análisis no se cuenta con todas las características del relave transportado por la tubería R14-16.

La Figura 3-1 muestra el perfil de elevación de las tuberías en estudio. Se puede observar que los relaveductos de 28'' y 36'' poseen una diferencia de elevación menor que las otras tres tuberías. Además, se destaca que las tuberías M24, M28 y R16-14 comparten el mismo perfil de elevación a lo largo de su trazado, al igual que R28 y R36.

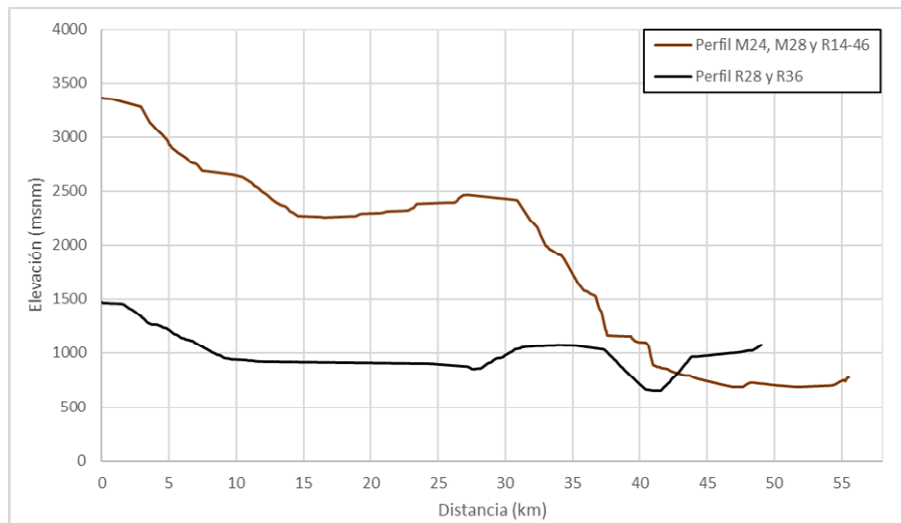


Figura 3-1: Perfil de elevación de los trazados de las tuberías

Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Antecedentes de desgaste

Para evaluar el desgaste en las tuberías, las mineras en estudio realizan mediciones de espesores periódicas en cámaras de inspección ubicadas en puntos estratégicos a lo largo de todo el trazado como se muestra en la Figura 3-2.

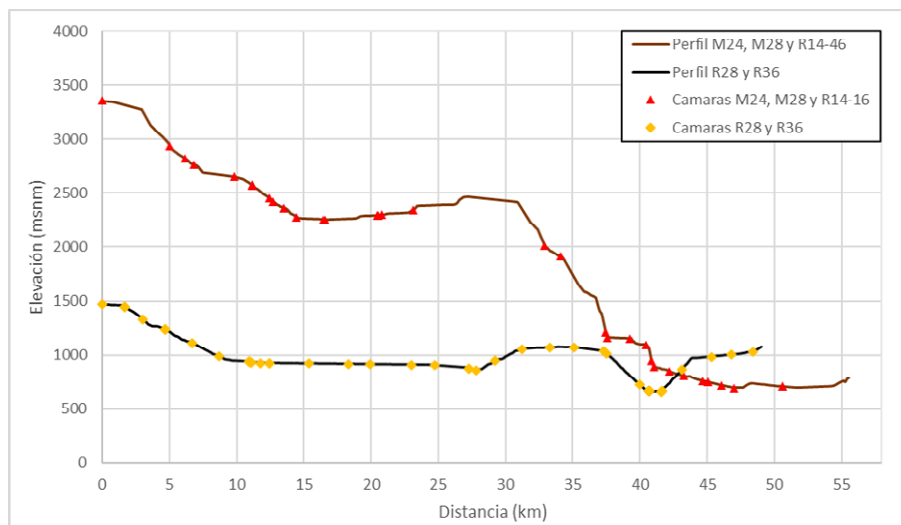


Figura 3-2 Ubicación de cámara de inspección de desgaste

Fuente: Elaboración propia

Estas cámaras de inspección permiten acceder a la tubería y medir espesores en su sección transversal en seis u ocho puntos como muestra la Figura 3-3.

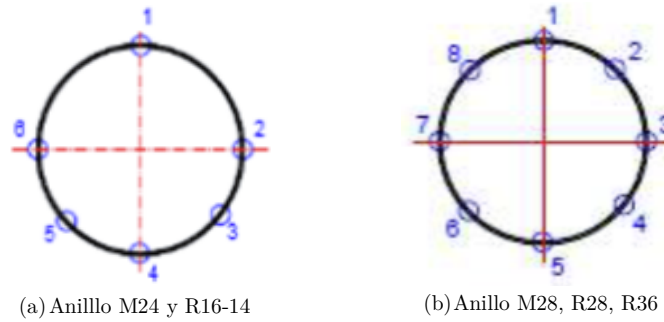


Figura 3-3 Puntos de medición en anillos

Fuente: Informe medición ultrasonido. PyC, 2018

La Tabla 3-3 muestra la cantidad de cámaras de inspección que posee cada una de las tuberías, el período del cual se cuenta con data de mediciones de espesores y la cantidad de campañas de medición realizadas durante ese período.

Tabla 3-3 Información disponible de espesores

TAG Pipeline	Numero de cámaras	Período de medición	Cantidad de campañas
M24	86	Noviembre 2012 a marzo 2019	13
M28	69	Mayo 2012 a marzo 2019	19
R28	49	Febrero 2010 a diciembre 2018	38
R36	39	Mayo 2010 a diciembre 2018	36
R16-14	40	Octubre 2000 a febrero 2017	17

3.1.3. Antecedentes operacionales

Con el fin de relacionar la tasa de desgaste de los sistemas con las variables operacionales se ha recopilado información operacional de los sistemas dentro de las fechas en las que se cuenta con campañas de medición indicadas en la Tabla 3-3. Esta información es extraída de los registros históricos de los sistemas con mediciones cada una hora.

La Tabla 3-4 muestra la información que se ha podido recopilar para realizar este estudio. Como se aprecia, las tuberías de relave solo poseen información relacionada con flujo y concentración, mientras que en las tuberías de pulpa de mineral se cuenta con información parcial de pH y dureza.

Tabla 3-4 Información operacional disponible para estudio

TAG Pipeline	Flujo	Concentra- ción en peso	Densidad de pulpa	pH	Dureza
M24	Si	Si	Si	Parcial	Parcial
M28	Si	Si	Si	Parcial	Parcial
R28	Si	Si	No	Parcial	Parcial
R36	Si	Si	No	Parcial	Parcial
R16-14	No	No	No	No	No

3.2. Procesamiento de datos

Previo al análisis de relaciones entre las variables operacionales con las tasas de desgaste es necesario procesar los datos recopilados con el fin de definir sectores de la tubería a estudiar, discretización temporal de análisis y valores representativos para las variables en estudio.

3.2.1. Procesamiento de espesores y tasa de desgaste histórica

Se define como tasa de desgaste histórica la pendiente de regresión lineal entre los espesores medidos en cada cámara y todo el rango de fechas de medición disponible. Para esto, es requerido realizar una revisión de los datos de medición de espesores de modo de limpiar aquellas mediciones que no sean representativas bajo los siguientes criterios:

- Para asegurar la consistencia de los datos a utilizar, se realiza una inspección de la evolución de los espesores eliminando aquellas que muestren un aumento de espesor en el tiempo.
- En cada punto de medición se obtiene la regresión lineal entre los espesores medidos y el delta de tiempo para definir la tasa de desgaste histórica del punto.
- Finalmente, se define como tasa de desgaste histórica de cada cámara a la mayor tasa de desgaste histórica obtenida en el anillo de medición.

Una vez obtenida la tasa de desgaste histórica, esta puede ser graficada junto al perfil longitudinal de modo de identificar el comportamiento del desgaste a lo largo del trazado e identificar las zonas de desgaste en las que se presume un desgaste erosivo.

3.2.2. Tasa de desgaste por campañas

De acuerdo con lo indicado en la Tabla 3-3 se cuenta con aproximadamente siete años de información de mediciones de espesores para cuatro de las cinco tuberías. Con el fin de tener intervalos de tiempo más acotados que permitan relacionar el desgaste con los parámetros operacionales, es que para cada sistema se agrupa el cálculo de desgaste en intervalos de tiempo cercanos a medio año.

Tabla 3-5: Discretización temporal campañas mineroductos

M24			M28		
Desde	Hasta	Días	Desde	Hasta	Días
nov-2012	may-2013	197	may-2012	oct-2012	152
may-2013	nov-2013	180	oct-2012	mar-2013	169
nov-2013	may-2014	184	mar-2013	oct-2013	212
may-2014	oct-2014	160	oct-2013	oct-2014	342
oct-2014	feb-2015	106	oct-2014	mar-2015	176
feb-2015	mar-2016	385	mar-2015	mar-2016	342
mar-2016	ago-2016	175	mar-2016	ago-2016	176
ago-2016	mar-2017	210	ago-2016	mar-2017	209
mar-2017	sept-2017	187	mar-2017	sept-2017	188
sept-2017	mar-2018	176	sept-2017	mar-2018	182
mar-2018	sept-2018	189	mar-2018	sept-2018	182
sept-2018	mar-2019	167	sept-2018	mar-2019	168

Para el caso de las tuberías de relave R28 y R36 la frecuencia de medición de espesores es aproximadamente cada un año, por lo tanto, la discretización temporal de estas mediciones es distintas a las utilizadas para los mineroductos.

Es importante mencionar que para la obtención de la tasa de desgaste de las tuberías se asume un supuesto de linealidad, por lo tanto, para evaluar el comportamiento del sistema se deben agrupar en series temporales homogéneas siempre que sea posible en la misma tubería para no inducir error en la obtención de correlaciones y los modelos predictivos.

Tabla 3-6: Discretización temporal campañas relaveductos

R28			R36		
Desde	Hasta	Días	Desde	Hasta	Días
nov-2009	sept-2010	304	may-2010	may-2011	378
sept-2010	sept-2011	351	may-2011	jun-2012	371
sept-2011	nov-2012	427	jun-2012	jul-2013	401
nov-2012	sept-2013	316	jul-2013	jun-2014	345
sept-2013	oct-2014	393	jun-2014	mar-2015	285
oct-2014	sept-2015	320	mar-2015	may-2016	412
sept-2015	sept-2016	364	may-2016	may-2017	356
sept-2016	sept-2017	363	may-2017	may-2018	378
sept-2017	sept-2018	361	may-2018	jun-2019	392

Dado que para la tubería de relave R16-14 no se cuenta con data de operación histórica, no se ha realizado discretización temporal de esas campañas de medición de espesores.

Finalmente, con la discretización temporal realizada se obtiene la tasa de desgaste representativa de cada cámara para cada uno de los periodos de operación. Para esto, se ha definido la tasa de desgaste como sigue:

- **Anillo con 6 puntos de medición:** promedio de las tasas de desgaste de los puntos (3), (4) y (5), ver Figura 3-3 (a)
- **Anillo con 8 puntos de medición:** promedio de las tasas de desgaste de los puntos (5), (6) y (7), ver Figura 3-3 (b)

Se define esta metodología ya que se espera que esos puntos corresponden a la zona de mayor desgaste en la tubería representando de mejor manera el comportamiento erosivo del desgaste producido por la pulpa. Este supuesto debe ser confirmado en el análisis de resultados.

3.2.3. Valores representativos de variables operacionales

Según la discretización temporal de las tasas de desgaste definidas en la sección 3.2.2, se deben agrupar las variables operacionales disponibles de modo que se pueda obtener valores representativos para cada uno de los períodos definidos.

Una vez agrupados los datos operacionales en los períodos definidos se debe realizar una inspección de los datos para eliminar aquellos que se encuentran fuera del rango normal de operación de cada sistema, es decir, que exceden los valores para los que fueron diseñados los sistemas, valores nulos, partidas del sistema, lavados de línea y drenados.

Finalmente se realiza un análisis estadístico de cada variable obteniéndose la distribución normal, frecuencia absoluta y relativa acumulada. Una vez realizado este análisis se calcula la moda, media y mediana de cada variable para definir cual se ajusta mejor a la distribución espacial de los datos.

- **Media:** se escoge cuando los datos se ajustan a una distribución normal.
- **Mediana:** se escoge cuando los datos presentan una distribución heterogénea o asimétrica.
- **Moda:** se escoge cuando los datos son simétricos y más del 50% de ellos se encuentran en el mismo rango de frecuencia.

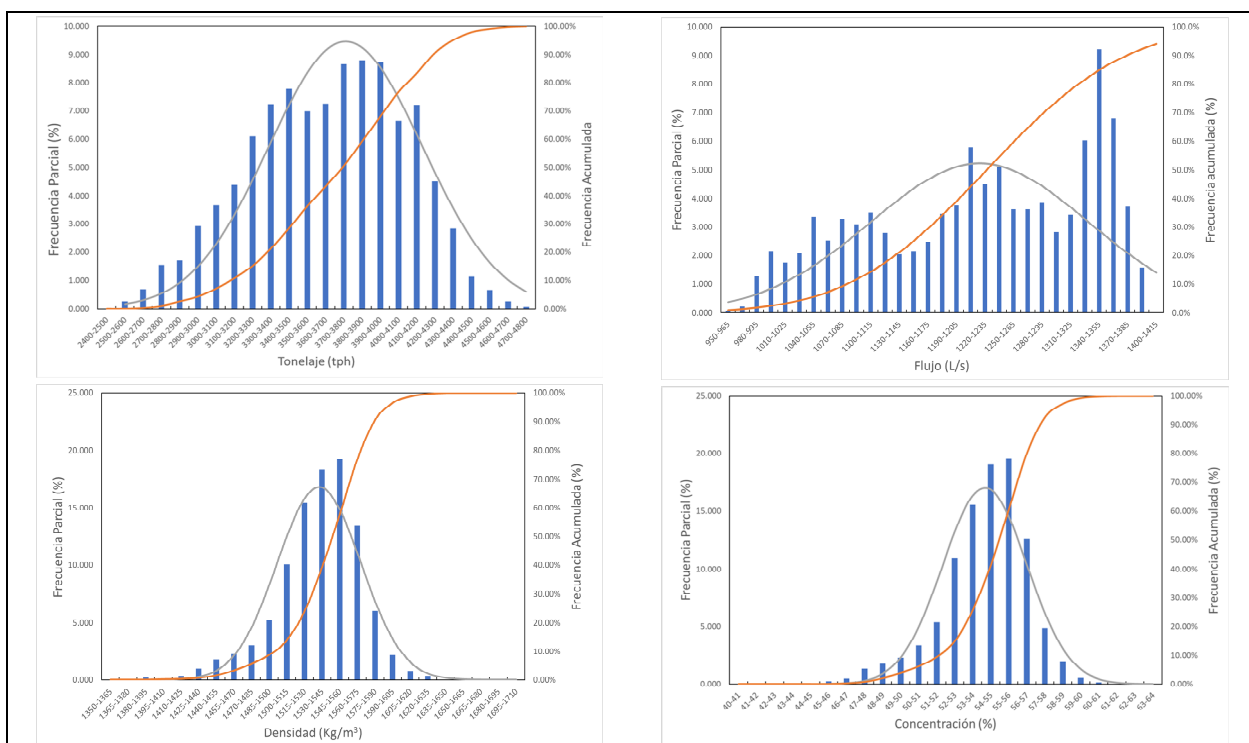


Figura 3-4 Análisis de frecuencia – periodo agosto 2016 a marzo 2017

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-4 muestra un ejemplo del análisis de frecuencia realizado para el período entre agosto 2016 y marzo 2017 de la tubería M28. Se puede observar que algunas variables como la densidad de la pulpa y la concentración en peso se ajustan a una distribución normal por lo tanto, en este caso, se utiliza como valor representativo la media de los datos mientras que para el caso del flujo, se muestra claramente que este no se ajusta a una distribución normal, por lo tanto, se utiliza la mediana como parámetro representativo.

3.2.4. Modelo predictivo de la tasa de desgaste

Una vez obtenidos valores representativos para los parámetros operacionales y el desgaste de las tuberías se procede a buscar una relación matemática que permita predecir la tasa de desgaste erosiva en función de las variables operacionales del fluido. Para esto se propone utilizar el modelo de regresión lineal múltiple y confirmar su validez por medio de pruebas estadísticas y probabilísticas.

Debido a sus características, se construirán dos modelos predictivos de tasa de desgaste:

- **Pulpa Mineral:** para la construcción de este modelo se utilizará los datos de tasa de desgaste y variables operacionales de los mineroductos M24 y M28.

- **Relave:** para la construcción de este modelo se utilizará los datos de tasa de desgaste y variables operacionales de los relaveductos R28 y R36. Se excluye el relaveducto R16-14 debido a que no se cuenta con datos de su operación.

3.2.4.1. Regresión lineal múltiple

Una regresión lineal múltiple es un modelo lineal que relaciona una variable dependiente (conocida como variable de observación) con una o más variables independientes (conocidas como predictores). Con esto, y considerando hipótesis de linealidad, se puede obtener una relación empírica que permita la predicción de la variable dependiente por medio de los predictores.

La definición matemática es la que se presenta en la siguiente ecuación:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \epsilon \quad \text{Ec. 3-1}$$

Donde:

Y : corresponde la variable de interés, variable de respuesta o dependiente.

X_p : conjunto de variables explicativas o regresoras

β_0 : corresponde al valor de la variable de observación cuando los predictores son nulos.

β_p : corresponde a los coeficientes parciales de regresión que indican la incidencia de las variables predictivas en la variable de observación

ϵ : corresponde al residuo o error, es decir, la diferencia entre lo observado y la predicción obtenida por el modelo.

Así, considerando un espacio muestral como el de la Ec. 3-2,

$$\begin{array}{cccc} y_1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ y_2 & x_{21} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_n & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{array} \quad \text{Ec. 3-2}$$

Se tiene que la expresión matemática del modelo de regresión lineal general se reduce a:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \dots + \beta_p X_{ip} + \epsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \quad \text{Ec. 3-3}$$

De lo anterior, se puede re-escribir la Ec. 3-3 de manera matricial como:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_0 \\ \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3-4}$$

Asignando la notación a las matrices, se podría reescribir esta ecuación de la siguiente forma:

$$Y = X\beta + \epsilon \quad \text{Ec. 3-5}$$

De acuerdo con la ecuación Ec. 3-4, la solución al sistema consiste en encontrar el conjunto de parámetros $\hat{\beta}$ que minimice el error asociado a la diferencia entre el vector de observaciones y la predicción obtenida con el modelo utilizando el método de los mínimos cuadrados, resultando el siguiente estimador:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad \text{Ec. 3-6}$$

donde X^T corresponde a la matriz traspuesta de X .

Dado que la resolución de la Ec. 3-6 involucra cálculos matriciales complejos, estos serán desarrollados utilizando modelos las librerías disponibles en el lenguaje computacional **R** que será expuesto en la sección 3.2.4.4.

Los modelos de regresión lineal se consideran válidos cuando se verifica un conjunto de hipótesis bajo la cual se basa el modelo matemático, sin embargo, se debe considerar que este se está desarrollando con datos empíricos por lo tanto existe una alta probabilidad de que existan errores aleatorios y sistemáticos existiendo la posibilidad de no cumplir todas las hipótesis. Además, para su validez se debe aplicar métricas que permitan demostrar que el modelo y sus variables son capaces de predecir un fenómeno.

3.2.4.2. Supuestos del modelo

Las hipótesis en las que se basan los modelos de regresión lineal múltiple son:

1. **Discretización temporal:** se espera que tanto los predictores como la variable respuesta presenten la misma discretización temporal. Para este análisis se ha considerado una discretización semestral en el caso de los mineroductos y anual en el caso de los relaveductos.
2. **Linealidad del modelo:** los predictores de deben poder expresarse de forma lineal con la variable dependiente.

3. **Relación lineal independiente entre variable observada y cada predictor:** los predictores numéricos tienen que estar linealmente relacionados con la variable observada mientras los demás predictores se mantienen constantes.
4. **Predictores no colineales:** las variables predictivas deben ser independientes entre ellas, es decir, no debe ser posible obtener una variable independiente como combinación lineal de otras. Para verificar la presencia de colinealidad se utiliza la correlación de Pearson con la totalidad de las variables, corroborando que las distintas variables presenten valores inferiores a 0.5.
5. **Distribución Normal de la variable dependiente:** la variable observada se debe distribuir de forma normal. Esto se comprueba mediante la construcción de un histograma.
6. **Homocedasticidad:** se debe cumplir que la varianza de la variable de respuesta debe ser constante en todo el rango de los predictores. Para comprobarlo se utilizará el coeficiente de correlación de Pearson entre la variable observada y las variables de predicción.
7. **Eliminación de Outliers:** Se debe identificar y eliminar aquellas variables que son atípicas o que alteren la predicción del modelo. Para esto, se realiza un procesamiento tanto de los datos operacionales (para que se ajusten a los rangos de operación de los sistemas) y de las tasas de desgaste (para que se ajuste el registro histórico de desgaste).

3.2.4.3. Métodos de validación del modelo

Una vez realizado obtenido el modelo es necesario verificar su validez mediante herramientas probabilísticas y estadísticas. Ellas son:

1. **Calidad de ajuste:** corresponde al coeficiente de determinación (R^2), el cual representa la proporción de la varianza de la respuesta variable respuesta del modelo con la varianza total.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\widehat{y}_i - y_i)^2}{\sum(\widehat{y}_i - \bar{y})^2} \quad \text{Ec. 3-7}$$

El coeficiente R^2 debe ser ajustado debido a que al presentar el modelo más de una variable este no representa bien el rango de validez. Para esto, se incorpora una penalización que depende del número de predictores en estudio y su tamaño muestral.

$$R_{ajustado}^2 = R^2 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - p - 1} \quad \text{Ec. 3-8}$$

2. **Modelo F-test:** corresponde al test de significancia F e indica si el modelo en su conjunto es capaz de predecir una variable respuesta mejor que lo esperado por azar, o si al menos uno de los predictores que forman el modelo contribuye de forma significativa. Para esto se compara la suma de los residuos cuadrados del modelo con la del modelo sin predictores, formado solo por la media (conocido como suma de cuadrados corregidos por la media, TSS)

$$F = \frac{(TSS - RSS)/(p - 1)}{RSS/(n - p)} \quad \text{Ec. 3-9}$$

Se observa que, si el valor de la función F es mayor a cero, quiere decir que el modelo presenta cierto grado de validez, debido a que la probabilidad de obtener el valor sugerido por los predictores es superior al azar.

3. **Significancia de los predictores:** la incidencia de cada predictor en la variable de observación se estudia con el test estadístico t-test, el cual permite evaluar la significancia (conocida como p-value) de cada predictor de forma separada, por medio de sus coeficientes parciales de regresión.

Para esta prueba de significancia se utiliza los coeficientes parciales β_i del modelo, considerando las siguientes dos hipótesis principales:

- **Hipótesis nula (H_0):** corresponde a cuando el predictor x_i no incide en la variable de respuesta del modelo, en presencia de los demás predictores por lo tanto no es significativo estadísticamente.
- **Hipótesis alternativa (H_a):** corresponde a cuando el predictor x_i incide en la variable de respuesta del modelo, en presencia de los demás predictores.

Para considerar que se cumple la hipótesis alternativa (H_a), el valor de p-value obtenido en el test de hipótesis debe ser lo suficientemente bajo como para considerar que el valor del modelo y la variable observada poseen una diferencia pequeña que permita rechazar la hipótesis nula (H_0). A menudo se considera que para valores $p - value < 0.05$ hay solo un 5% de probabilidad de llegar a la hipótesis nula.

3.2.4.4. Construcción del modelo lineal

Para la construcción del modelo se considerará que la tasa de desgaste erosiva se relaciona con las variables operacionales según lo que se indica en la literatura:

$$TD = f(V, Cp, pH, Dureza, \rho)$$

Y la relación buscada, según lo planteado por Gupta et al. (1994) tiene la siguiente forma:

$$TD_i = k_i \cdot V_i^n \cdot Cp_i^m \cdot pH_i^q \cdot \left(\frac{H_a}{H_s}\right)_i^p \cdot \rho_i^r \quad Ec. 3-10$$

Donde:

TD_i : Tasa de desgaste en el período i $\left[\frac{mm}{año}\right]$

V_i : Velocidad en el período i $\left[\frac{m}{s}\right]$

Cp_i : Concentración en el período i [1]

pH_i : pH en el período i [1]

$\left(\frac{H_a}{H_s}\right)_i$: Relación de dureza en el período i [1]

ρ_i : Densidad i $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

k_i : constante [1]

m, n, p, q, r : exponentes de cada una de las variables [1]

Da la linealidad que presupone el método de regresión lineal múltiple que se utilizará, se debe aplicar una transformación lineal de la función logaritmo natural:

$$\ln(TD_i) = \ln(k_i) + n \cdot \ln(V_i) + m \cdot \ln(Cp_i) + q \cdot \ln(pH_i) + p \cdot \ln\left(\frac{H_a}{H_s}\right)_i + r \cdot \ln(\rho_i) \quad Ec. 3-11$$

Por lo tanto, para obtener los valores de n, m, q, p, r y k se debe resolver el sistema ecuación aplicando el método de regresión lineal múltiple. Para la resolución de este sistema se utilizará el lenguaje y entorno de programación para análisis estadístico y gráfico

R (<http://www.r-project.org>) el cual es un software libre que permite cargar diferentes librerías o paquetes con finalidades de cálculo o gráfico³.

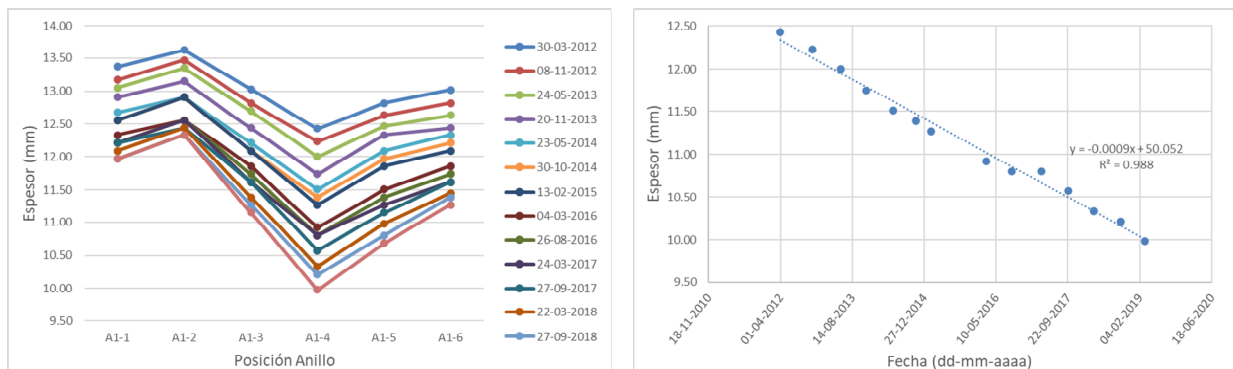
En particular se utilizará la función de **R** llamada `lm()` que permite definir un modelo lineal que describa una variable dependiente Y en función de una variables independiente X .

³ Ximénez, C., Revuelta, J., (2022) Análisis de datos en Lenguaje R

Capítulo 4: Resultados

4.1. Tasa de desgaste histórica

Utilizando las campañas de mediciones de espesores disponibles de cada tubería y luego del procesamiento de estos datos que se indicó en la sección 3.2.1, se obtiene la tasa de desgaste de cada uno de los puntos de los anillos mostrados en la Figura 3-3 como la regresión lineal de los espesores en el tiempo.



(a) Distribución de espesores por campaña

(b) Distribución de espesores en punto A-4 del anillo

Figura 4-1 Mediciones de espesores km 40+000 de la tubería M24

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-1 muestra como ejemplo la evolución de los espesores de una cámara ubicada aproximadamente en el Km 40+000 de la tubería M24. De la imagen de la izquierda (Figura 4-1(a)) se observa que para el anillo de sección transversal de la tubería el mayor desgaste y, por consiguiente, la mayor disminución de espesor a lo largo de las campañas corresponde al punto (4), es decir el punto inferior de la tubería. Luego de una inspección general de todas las cámaras disponibles para cada una de las tuberías, se confirma que el mayor desgaste en la sección transversal se produce en la parte baja del tubo, es decir, puntos (3), (4) y (5) de los anillos con seis (6) puntos de medición y puntos (4), (5) y (6) en el caso de las tuberías con ocho (8) puntos de medición.

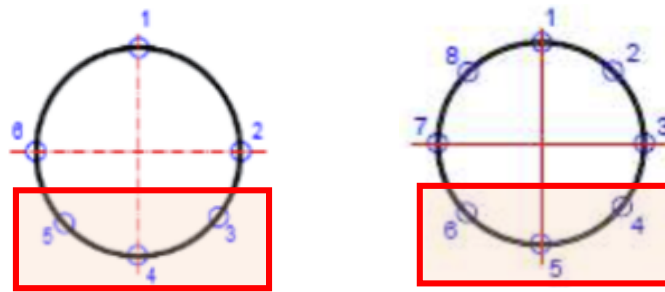


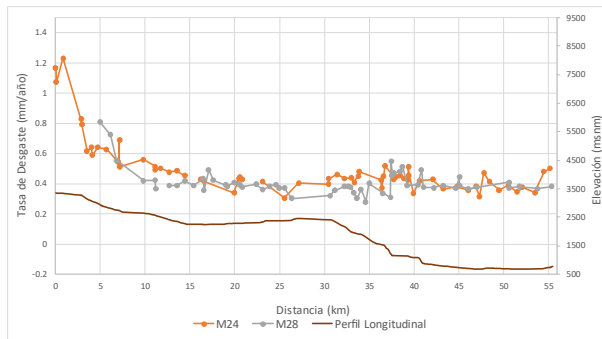
Figura 4-2 Ubicación del desgaste máximo en la tubería.

Fuente: Elaboración propia

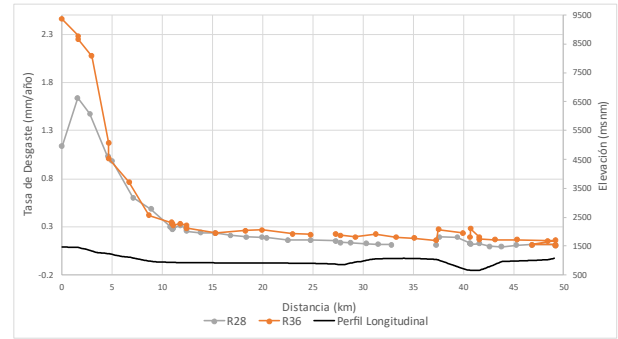
La Figura 4-1(b) muestra la evolución de espesores de dicha cámara en el tiempo, se observa que distribución de estos se ajusta de manera correcta a una tendencia lineal obteniendo coeficientes de correlaciones R^2 con valores cercanos a 0.9.

Luego de una inspección a todos los puntos de las cámaras disponibles se observa que este es un comportamiento general en el desgaste en tuberías que transportan pulpa, por lo tanto, se puede asumir de manera correcta que la tasa de desgaste corresponde al ajuste lineal de la distribución de espesores en el tiempo.

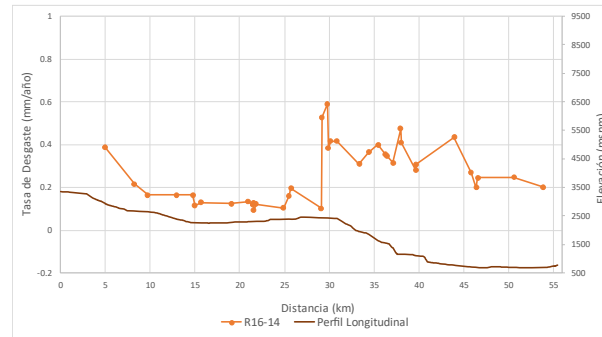
Con lo anterior, se define como desgaste histórico representativo de cada cámara la mayor tasa de desgaste de cada uno de los anillos. La Figura 4-3 muestra su distribución a lo largo de la tubería.



(a) Distribución tasa de desgaste M24 y M28



(b) Distribución tasa de desgaste R28 y R36



(c) Distribución tasa de desgaste R16-14

Figura 4-3 Distribución tasa de desgaste representativa a lo largo del perfil

Fuente: Elaboración propia

A partir de los gráficos presentados en la Figura 4-3 se observa que, en todos los sistemas estudiados, el primer tramo en operación presenta una mayor tasa de desgaste que en el resto del perfil longitudinal. Para los casos de las tuberías M24, M28, R28 y R36 la tasa de desgaste se estabiliza aproximadamente del km 15+000, mientras que para la tubería R16-14 esta estabilización pareciera ser luego de los primeros cinco kilómetros existiendo un tramo intermedio entre el km 5 y km 10.

Considerando que los parámetros operacionales a lo largo del perfil permanecen constantes (flujo, concentración, densidad, pH, etc) se infiere que en los primeros kilómetros existe una acción conjunta del desgaste erosivo con otra componente que pudiese provocar el aumento de la tasa la cual podría tener naturaleza corrosiva. Dado esto, y considerando que este trabajo se centra en el análisis del desgaste erosivo, es que para el estudio se utilizará las tasas de desgaste de las cámaras que se encuentran posteriores a los quince primeros kilómetros de cada tubería.

Es importante destacar que para la tubería R16-14 existe un aumento del desgaste posterior al Km 30+000 el cual se explica porque existe un cambio de diámetro en el ducto pasando de 16'' a 14'', lo que provoca un aumento de velocidad dentro de la línea y, por lo tanto, un aumento en la tasa de desgaste.

4.2. Discretización por períodos

4.2.1. Tasa de desgaste

Una vez obtenido la tasa de desgaste histórica representativa para cada cámara de todas las tuberías, se procede a discretizar el tiempo de análisis en periodos más acotados que permitan obtener información del desgaste y relacionarlo con los parámetros operacionales.

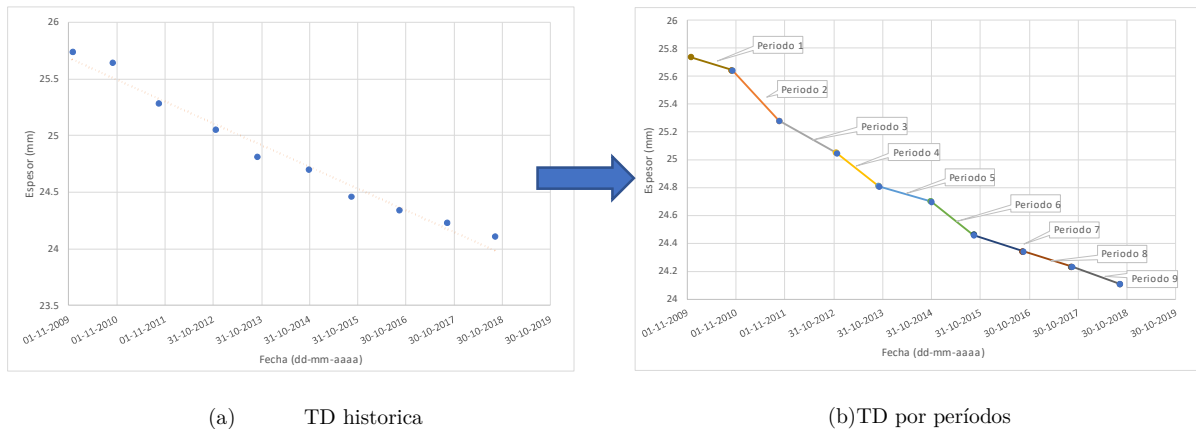
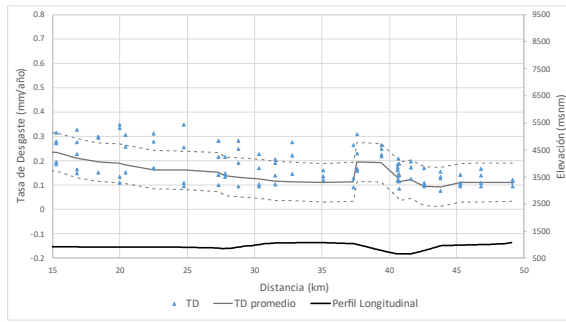


Figura 4-4 Discretización temporal para la tasa de desgaste por periodos – km 18+400 R28

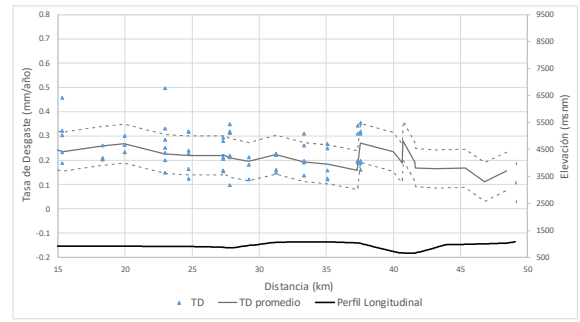
Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-4 muestra un ejemplo gráfico de la obtención de la tasa de desgaste de cada uno de los períodos definidos en la sección 3.2.2, los cuales comprenden discretizaciones de aproximadamente 180 días para el caso de los mineroductos y 365 días en el caso de los relaveductos.

Con esto, se obtiene para cada período el desgaste en la parte baja de la tubería. Con el fin de evitar incluir en el análisis valores de desgaste que puedan inducir en error es que se tomará como dato válido aquellos que se encuentren dentro de la banda de desgaste correspondiente a la tasa de desgaste histórica más/menos dos veces la desviación estándar. La Figura 4-5 muestra un ejemplo de la selección de datos considerados válidos para el análisis.



(a) TD R28



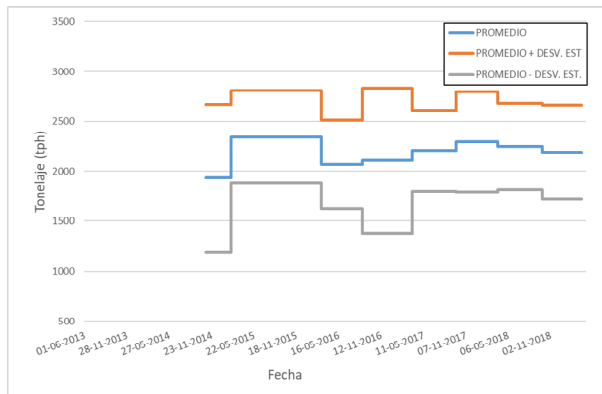
(b)TD R36

Figura 4-5 Banda de desgaste utilizada

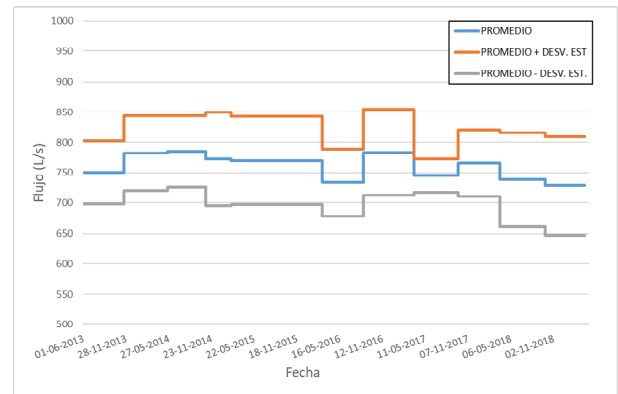
Fuente: Elaboración propia

4.2.1. Variables operacionales

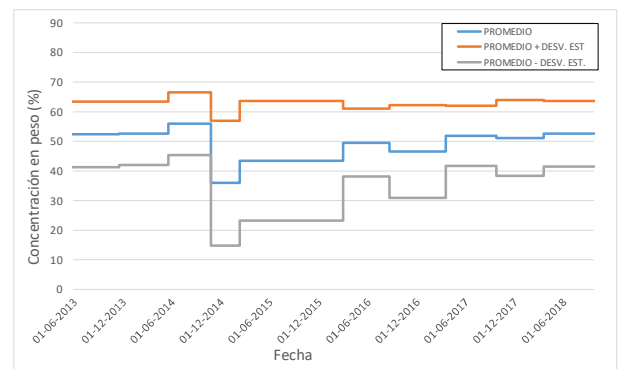
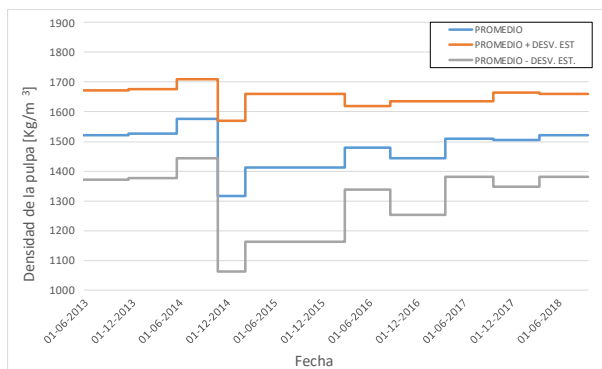
Por otro lado, se realizó un análisis estadístico de las variables operacionales disponibles de los sistemas para obtener los valores que serán contrastados con las tasas de desgaste en cada período, como ejemplo la Figura 4-6 muestra los resultados del análisis operacional para la tubería M24.



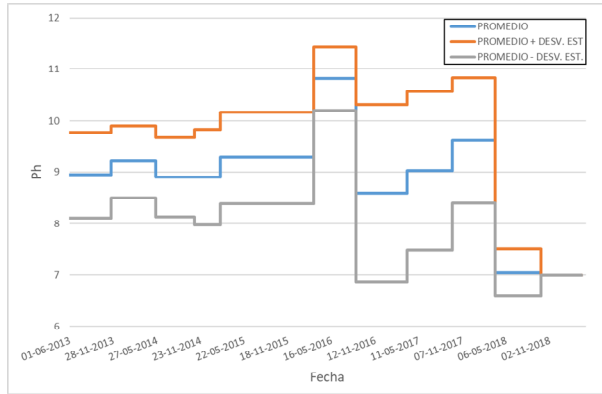
(a) Tonelaje M24



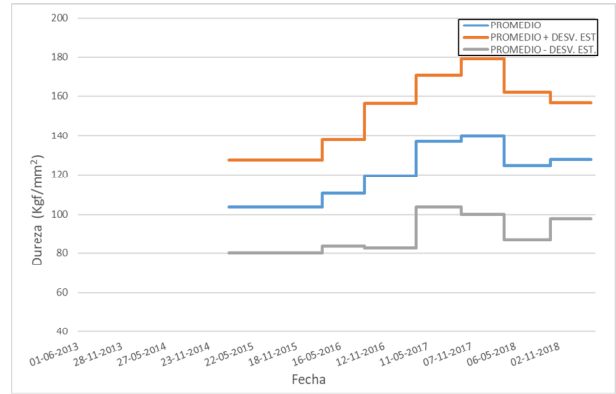
(b) Flujo M24



(c) Densidad M24



(d) Concentración



(e) pH M24



(f) Dureza M24



Figura 4-6 Información operacional disponible de M24

Fuente: Elaboración propia

4.3. Correlación de variables

Previo a la construcción del modelo de regresión lineal múltiple se realiza un estudio de la influencia de las variables operacionales en el desgaste de la tubería. Para esto se utiliza el coeficiente de correlación lineal de Pearson (ρ) que cuantifica con valores entre -1 y 1 la relación entre dos variables, correspondiendo a valores negativos relaciones indirectas, si uno aumenta, el otro disminuye, y valores positivos a relaciones directas. La Tabla 4-1 muestra los rangos del coeficiente de correlación.

Tabla 4-1: Rangos de correlación

$ \rho $	Asociación Lineal
0	Nula
0.1	Pequeña
0.3	Mediana
0.5	Moderada
0.7	Alta
0.9	Muy Alta
1	Completamente relacionada

Para el cálculo de los coeficientes de correlación se ha utilizado las variables operacionales disponibles y códigos computacionales de los cuales se ha obtenido los valores indicados en la Figura 4-7.

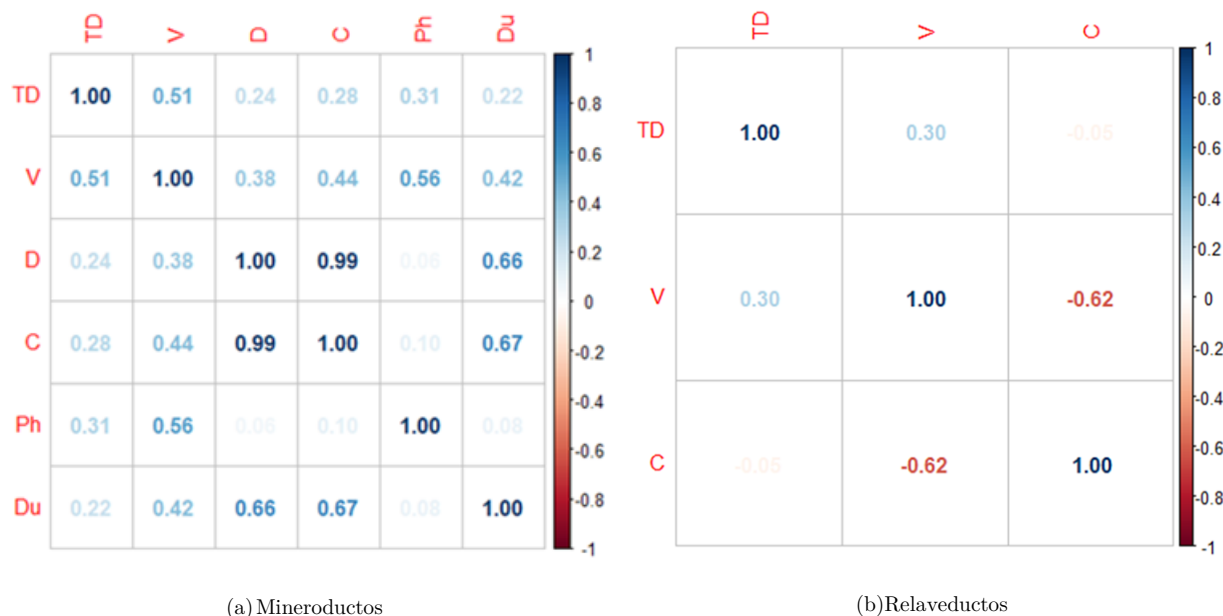


Figura 4-7 Coeficientes de correlación entre variables operacionales y tasa de desgaste

Fuente: Elaboración propia

Según lo que se puede apreciar en la figura anterior, el parámetro más incidente en la tasa de desgaste es la velocidad del fluido con valores de 0.51 en el caso de los mineroductos y 0.30 en los relaveductos. Respecto a los otros parámetros operacionales, se puede apreciar que en los mineroductos poseen una correlación baja con valores menores que 0.3, sin embargo, en el caso de la concentración en peso se observa que en los relaveductos el valor es muy cercano a cero, esto se debe principalmente a que en la base de datos analizada la variación de la concentración en peso es poco significativa.

Finalmente, respecto a la colinealidad entre las variables de predicción se observa la alta relación entre la concentración en peso (C_p) y la densidad (ρ), con un coeficiente de correlación de Pearson de 0.99. Esto es esperable debido a que la definición de densidad de pulpa está relacionada directamente con la concentración en peso como se muestra en la ecuación Ec. 2-2.

Adicionalmente a lo anterior, y para estudiar más en profundidad la correlación y la distribución de las variables, se ha construido mediante códigos computacionales en **R** histogramas y gráficos de dispersión para ambos sistemas en estudio, los resultados se observan en la Figura 4-8 y Figura 4-9.

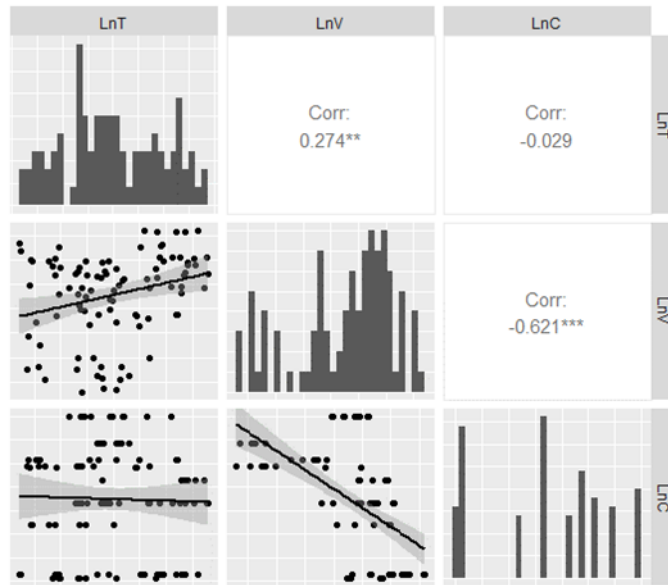


Figura 4-8: Matriz de correlaciones para el relaveducto

Fuente: Elaboración propia

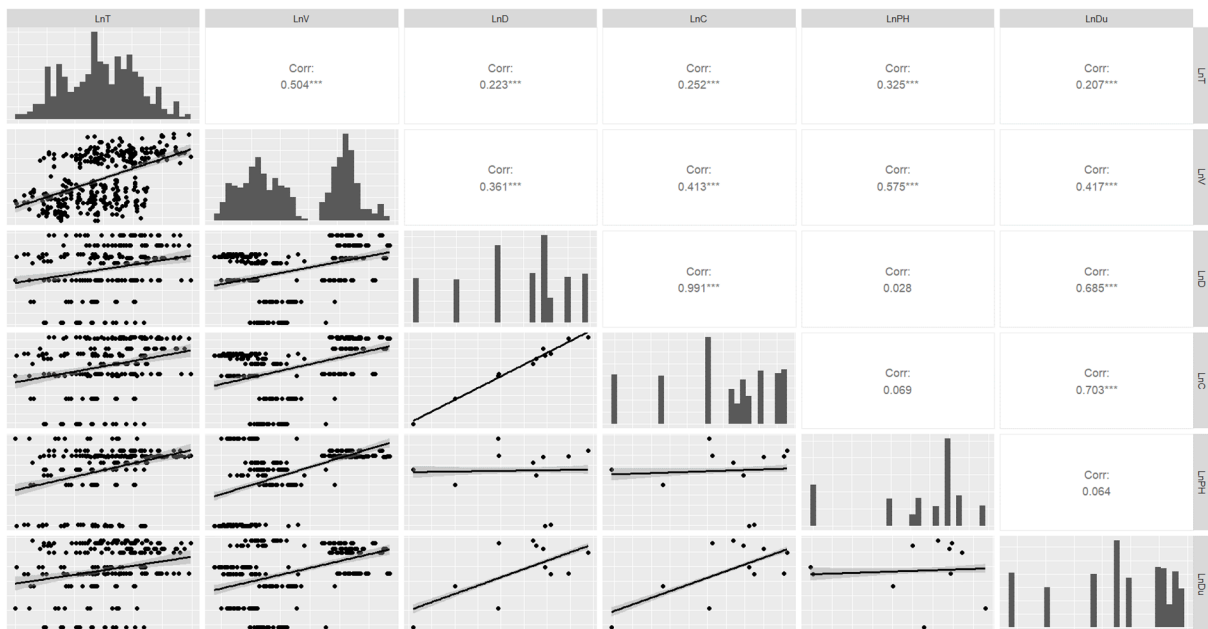


Figura 4-9: Matriz de correlaciones para el mineroducto

Fuente: Elaboración propia

De las gráficas anteriores se puede observar que salvo en algunos puntos, la variable de respuesta del modelo (en este caso la tasa de desgaste) tiene a una distribución normal concentrando gran cantidad de datos cercanos a la media, esto dice relación la distribución constante de los espesores a lo largo del tiempo observados en la Figura 4-1.

Por otra parte, se observa que respecto a la correlación entre cada una de las variables de predicción (variables operacionales) y la variable de respuesta (tasa de desgaste) no existe una relación lineal que permita dar cumplimiento a la condición de linealidad del modelo.

4.4. Modelo predictivo

De acuerdo con lo observado en la sección 4.3, los antecedentes recopilados no permiten validar las hipótesis que permitan construir un modelo de regresión lineal múltiple. Sin embargo, se construirá un modelo predictivo para ambos sistemas con el fin de buscar su validación mediante parámetros estadísticos y/o probabilísticos. Para esto, se ha procurado eliminar de la base de datos aquellos valores que se encuentren fuera de los rangos normales de operación de los sistemas, ya sea en cuanto a velocidad de operación, rango de concentración en peso o valores de tasas de desgaste que no estén cercanos a la histórica.

4.4.1. Modelo predictivo mineroductos

Utilizando códigos computacionales con el lenguaje R se ha construido un modelo de regresión lineal, el cual se presenta en la Figura 4-10.

```
Call:
lm(formula = LnT ~ LnV + LnC + LnPH + LnDu, data = Datos_STP)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.64887 -0.21983 -0.00059  0.22000  0.64533

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -4.1385     0.9036  -4.580 6.29e-06 ***
LnV           1.7095     0.2359   7.245 2.37e-12 ***
LnC           0.4451     0.2766   1.609  0.108
LnPH          0.1546     0.1346   1.149  0.251
LnDu         -0.1870     0.2148  -0.871  0.384
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2737 on 385 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2609,    Adjusted R-squared:  0.2532
F-statistic: 33.98 on 4 and 385 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Figura 4-10: Primera iteración de modelo de mineroductos

Fuente: Elaboración propia

De esta primera iteración se observa que el modelo propuesto posee la siguiente forma:

$$TD = 0.0159 \cdot V^{1.7095} \cdot Cp^{0.4451} \cdot pH^{0.1546} \cdot H_v^{-0.1870} \quad Ec. 4-1$$

Se observa que el modelo cuenta con un ajuste de los datos bajo, ya que el valor de $R^2_{ajustado}$ tiene un valor de 0.25, es decir, es capaz de explicar el 25% de la variabilidad observada en la tasa de desgaste. El valor de $p-value$ ($< 2.26 \cdot 10^{-16}$) del modelo global permite aceptar que los valores obtenidos no son producto del azar, sino que al menos una de las variables parciales puede explicar la variable observada.

Dado que los valores de $p-value$ individuales de las variables de predicción poseen valores sobre 0.05 (con excepción de la variable velocidad), no es posible descartar la hipótesis nula que permita suponer que el modelo es capaz de entregar una predicción mejor a la aleatoriedad.

Se procede entonces a construir un modelo con la variable que de acuerdo a los resultados obtenidos explique mejor la variable observada, que, en este caso, corresponde a la velocidad. La Figura 4-11 muestra los resultados de este modelo.

```
Call:
lm(formula = LnT ~ LnV, data = Datos_STP)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.64334 -0.21362 -0.00041  0.22053  0.61413

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -3.1911     0.1895  -16.84  <2e-16 ***
LnV           1.9211     0.1671   11.49  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2739 on 388 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.254,    Adjusted R-squared:  0.2521
F-statistic: 132.1 on 1 and 388 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Figura 4-11: Modelo predictivo de mineroductos

Fuente: Elaboración propia

De esta nueva modelación se obtiene que el valor de $R^2_{ajustado}$ sigue siendo similar y cercano a 0.25, sin embargo, las otras variables se ajustan a lo esperado, permitiendo descartar la hipótesis nula. De esta manera el modelo predictivo de los mineroductos quedaría como:

$$TD = 0.0411 \cdot V^{1.921}$$

Ec. 4-2

La Tabla 4-2 muestra el intervalo de confianza del modelo obtenido.

Tabla 4-2: Intervalo de confianza del modelo de mineroducto

Variable	2.5%	97.5%
k	0.0283	0.0596
Exponente V	1.5925	2.2496

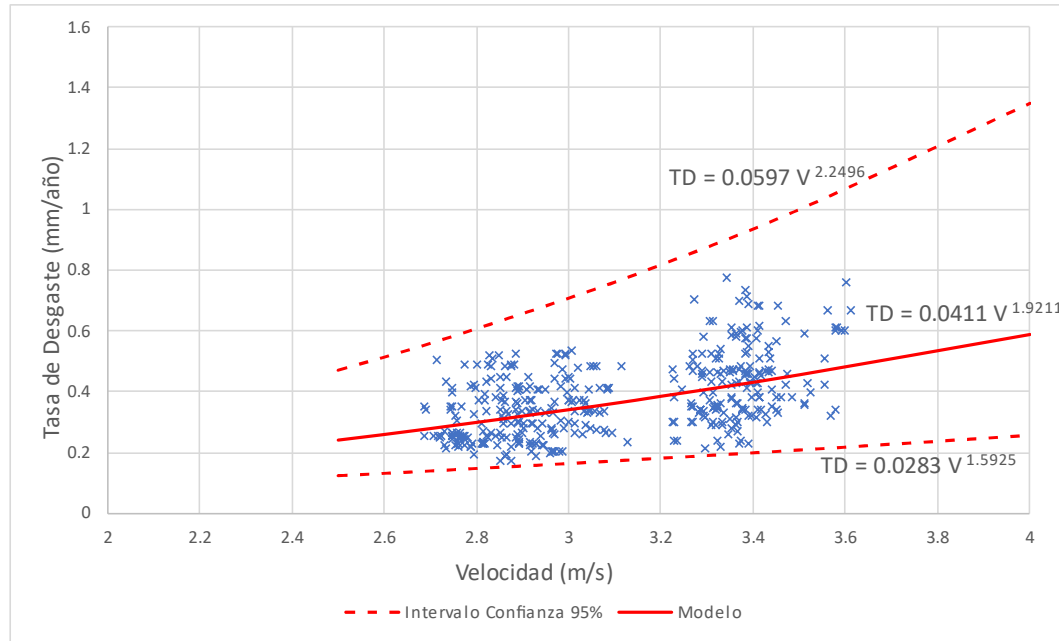


Figura 4-12: Modelo predictivo de mineroducto

Fuente: Elaboración propia

4.4.1. Modelo predictivo relaveductos

Utilizando códigos computacionales con el lenguaje R se ha construido un modelo de regresión lineal, el cual se presenta en la Figura 4-13.

```
Call:
lm(formula = LnT ~ LnV + LnC, data = Datos_STR)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.48707 -0.17875  0.01776  0.19278  0.40455

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -13.866      5.236   -2.648  0.00951 **
LnV             3.834      1.152    3.328  0.00126 **
LnC             1.953      1.066    1.832  0.07015 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2324 on 93 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.1072,    Adjusted R-squared:  0.08797
F-statistic: 5.581 on 2 and 93 DF,  p-value: 0.005138
```

Figura 4-13: Primera iteración de modelo de relaveductos

Fuente: Elaboración propia

De esta primera iteración se observa que el modelo propuesto posee la siguiente forma:

$$TD = (9.5 \cdot 10^{-7}) \cdot V^{3.834} \cdot Cp^{1.953} \quad \text{Ec. 4-3}$$

Se observa que el modelo cuenta con un ajuste de los datos muy bajo ya que el $R^2_{ajustado}$ tiene un valor de 0.08797, es decir, el modelo no es capaz de explicar la tasa de desgaste. El valor de $p\text{-value}$ de 0.0513 del modelo global, así como también los individuales de cada variable de predicción tampoco permiten aceptar que el modelo es capaz de entregar una predicción mejor a la aleatoriedad debido a que posee valores mayores a 0.05 (con excepción de la velocidad).

Se procede entonces a construir un modelo con la variable que de acuerdo con los resultados obtenidos explique mejor la variable observada, que, en este caso, corresponde a la velocidad. La Figura 4-14 muestra los resultados de este modelo.

```

Call:
lm(formula = LnT ~ LnV, data = Datos_STR)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.52407 -0.17386  0.00665  0.17533  0.41867

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -4.4740     1.0778  -4.151 7.27e-05 ***
LnV           2.5235     0.9144   2.760 0.00696 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2353 on 94 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.07495,    Adjusted R-squared:  0.06511
F-statistic: 7.616 on 1 and 94 DF,  p-value: 0.006956

```

Figura 4-14: Modelo predictivo de relaveductos

Fuente: Elaboración propia

De esta nueva modelación se obtiene que el valor de $R^2_{ajustado}$ se mantiene bajo, es decir, 0.07495 y por lo tanto se puede suponer que el modelo posee poca capacidad de explicar la variable de tasa de desgaste, sin embargo, las otras variables, p-value y F-test, se ajustan a lo esperado, lo que podría permitir descartar la hipótesis nula. De esta manera el modelo predictivo de los relaveductos quedaría como:

$$TD = 0.0114 \cdot V^{2.524} \quad \text{Ec. 4-4}$$

La Tabla 4-3 muestra el intervalo de confianza del modelo obtenido.

Tabla 4-3: Intervalo de confianza del modelo de relaveducto

Variable	40%	60%
k	0.00867	0.01498
Exponente V	2.2918	2.7552

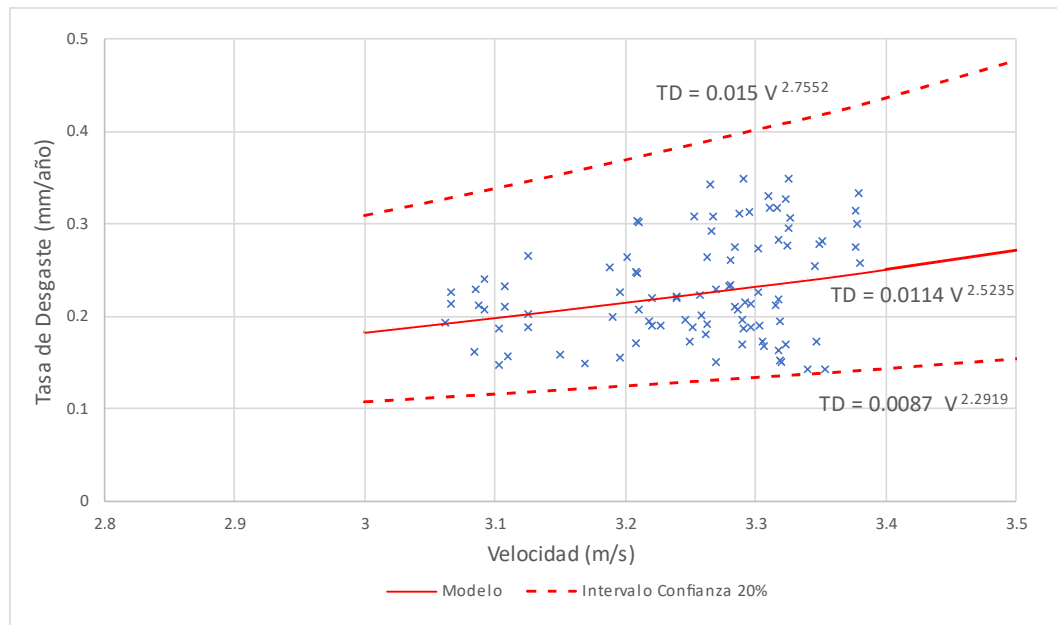


Figura 4-15: Modelo predictivo de relaveducto

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4-15 muestra el modelo predictivo obtenido en el estudio. Se puede observar que en comparación con los mineroductos, la cantidad de datos disponibles para el estudio es menor y está concentrada en rango acotado de tasa de desgaste y velocidad por lo que la confianza del modelo predictivo es baja.

Capítulo 5: Discusión y Análisis

5.1. Caracterización del desgaste

Según los resultados obtenidos en el cálculo del desgaste, se puede observar lo siguiente respecto al mecanismo de desgaste en tuberías que transportan pulpa de mineral o relave.

Desgaste en los primeros kilómetros:

En la Figura 4-3 se muestra que el desgaste máximo a lo largo del perfil longitudinal tiene dos zonas con diferente comportamiento. Una primera zona, de aproximadamente 10-15 km en la que los valores de la tasa de desgaste son elevados y comienza a disminuir a medida que avanza el trazado de la tubería, y una segunda zona de desgaste más bien constante sin variación.

Con esto, se puede suponer que en la primera zona existe una sinergia entre dos tipos de desgaste: corrosivo más erosivo. El desgaste corrosivo que afecta al primer tramo puede tener relación con la cantidad de oxígeno disuelto que existe dentro de la tubería, ya que previo al ingreso de la pulpa al ducto estos son sometidos a procesos de aireación aportando oxígeno a la mezcla, el cual se va disolviendo a medida que el fluido avanza debido a la turbulencia.

Otra explicación posible del mayor desgaste en los primeros tramos tiene relación con la forma de las partículas ya que estas al ingresar a la tubería poseen caras más angulosas y, luego de las múltiples colisiones a lo largo del trazado, estas se podrían ir redondeando, impactando menos en el desgaste. Este fenómeno es conocido como atricción.

Desgaste dentro de la tubería:

Al comparar los desgastes obtenidos en cada uno de los puntos de la sección transversal de la tubería, se observa que para todos los casos de análisis el mayor desgaste se produce en la parte baja del tubo, ver Figura 4-1 y Figura 4-2. Esto confirma el supuesto que el mecanismo de desgaste es principalmente erosivo provocado por la colisión de las partículas que, debido a su velocidad y su peso, impactan principalmente en el fondo de la tubería. La Figura 5-1 muestra una comparación entre el desgaste en el punto superior (1) y el punto inferior (4) de la tubería M24, mientras

que la Figura 5-2 muestra una imagen de un tubo desgastado luego de operar cerca de 20 años.

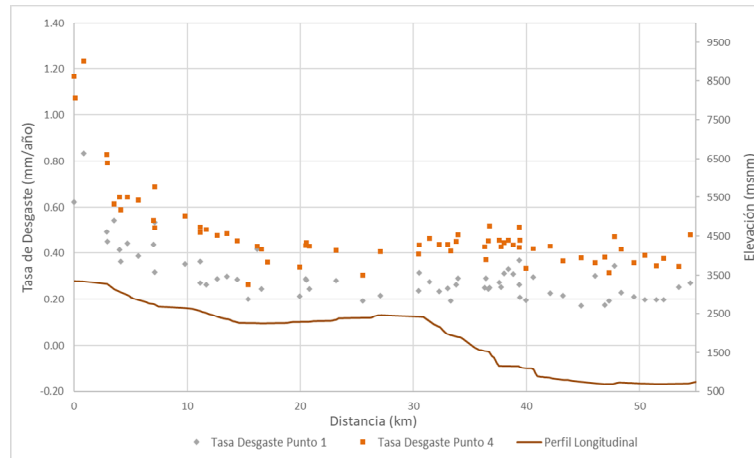


Figura 5-1: comparación entre tasa de desgaste del punto 1 y punto 4

Fuente: Elaboración propia

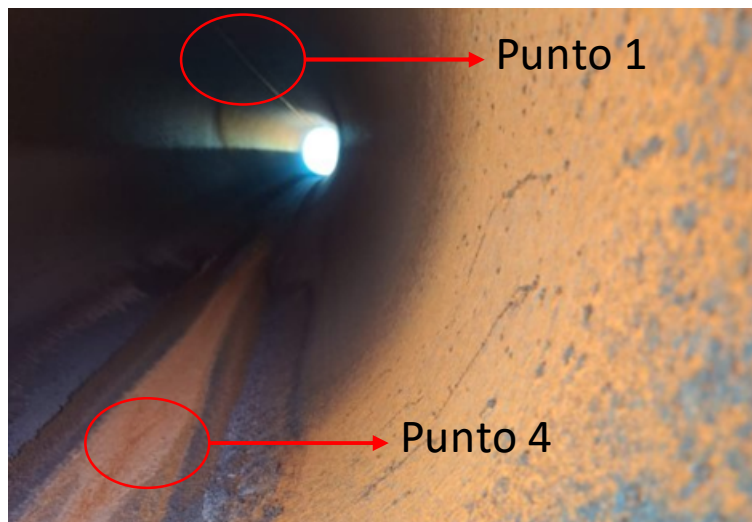


Figura 5-2 Tubería M24 en abandono luego de 20 años de operación

Fuente: Registro fotográfico proyecto reemplazo tubería M24. 2022

Se observa también que, para tramos rectos, el mayor desgaste se produce en el punto central del fondo de la tubería (punto 4 o punto 5 dependiendo de la tubería) sin embargo, en zonas donde debido a la geografía la tubería deja el tramo recto y entra a una curva el desgaste máximo en la sección transversal se desplaza hacia los puntos laterales del sentido de la curva.

La Figura 5-3 muestra una representación de cómo se desplaza la zona de mayor desgaste hacia los costados de la tubería cuando esta ingresa en zona de curvas.

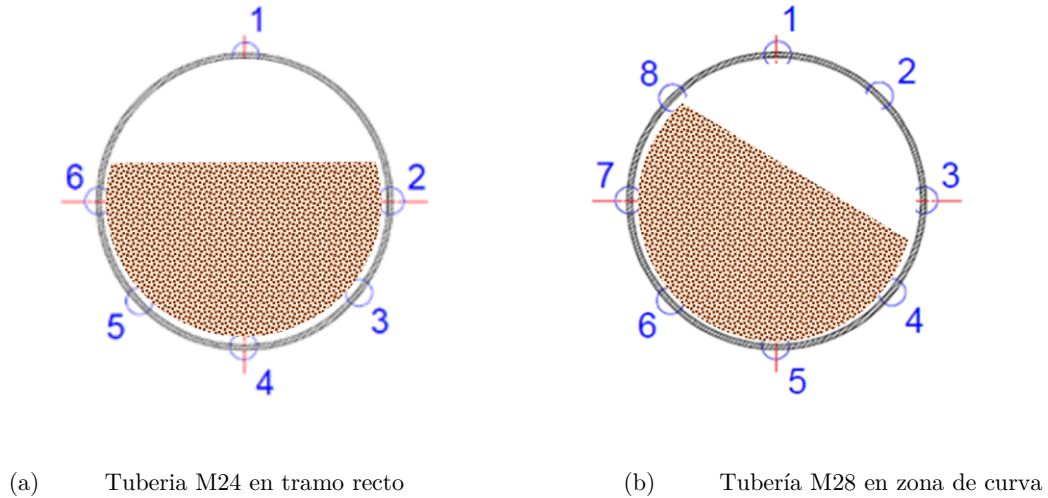


Figura 5-3: Zona de mayor desgaste en zonas de curvas

Fuente: Elaboración propia

Dado que las tuberías M24 y M28 comparten el mismo trazado, se realiza un análisis de las tasas de desgaste en los puntos laterales entre los km 9+000 y km 16+000 los cuales corresponden a zona de curvas. La Figura 5-4 muestra como la tasa de desgaste alterna su valor máximo entre los puntos 4 y 6, en el caso de M28, y entre 3 y 5, en el caso de M24, de la misma manera en ambas tuberías, lo que confirma que en curvas la zona de mayor desgaste se desplaza a los sectores laterales de la tubería.

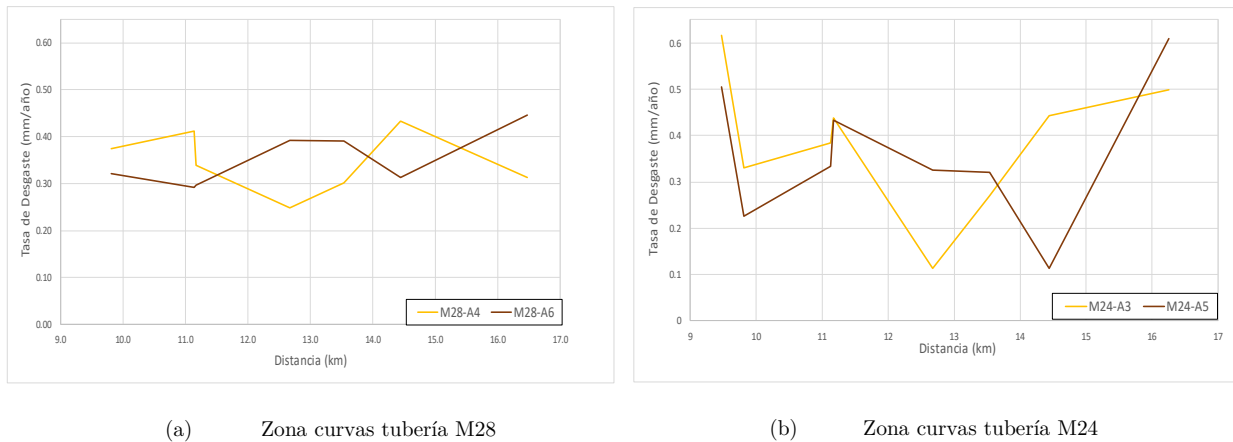


Figura 5-4: Distribución de la tasa de desgaste en los puntos adyacentes al punto más bajo en zona de curvas

Fuente: Elaboración propia

5.2. Parámetros operacionales

Si bien la data operacional con la que se ha realizado el estudio abarca aproximadamente 10 años, se observa que la operación de los sistemas posee pocas variaciones en el tiempo, teniendo rangos acotados de fluctuación. Esto se debe a que en el diseño de los sistemas de transporte por tubería se procura que los rangos de operación no posean mayores variaciones, moviéndose por ejemplo en valores cercanos a 3 [m/s] en caso de la velocidad de la pulpa y 50-58% en concentración en peso. Lo anterior permite que el desgaste de las tuberías sea constante y pueda proyectarse la vida útil a futuro con mayor certeza.

Variación en la Operación

Si bien la operación de la tubería ha sido constante en el tiempo, se observa que cuando existe un cambio significativo de los parámetros, la tasa de desgaste se ve directamente afectada. A modo de ejemplo, se presenta la Figura 5-5 la cual muestra un cambio de operación en la tubería R28 donde se refleja una disminución en el flujo de operación luego del año 2015 lo cual impacta en una disminución en la tasa de desgaste observada.

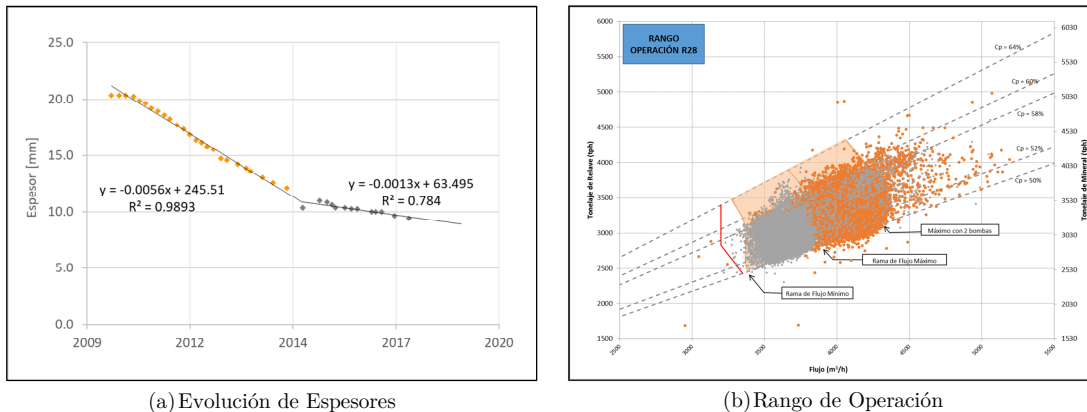


Figura 5-5 Influencia de operación en la TD

Fuente: Elaboración propia

Otro ejemplo que confirma el impacto de la operación en el desgaste de la tubería se puede desprender de la data de evolución de espesores de la tubería R16-14 como lo muestra en la Figura 5-6. En ella se puede apreciar que en los dos primeros tramos la tubería estuvo operando con relaves con una tasa de desgaste bastante constante en el tiempo, sin embargo, cuando cambia la operación a agua en el tramo 3 el desgaste de la tubería disminuye bruscamente a valores cercanos a cero. Esto último

confirma además que las partículas sólidas son las principales responsables del desgaste en las tuberías.

Finalmente, la tubería R16-14 comienza a operar con yeso y nuevamente la tasa de desgaste aumenta debido a la variación de la operación.

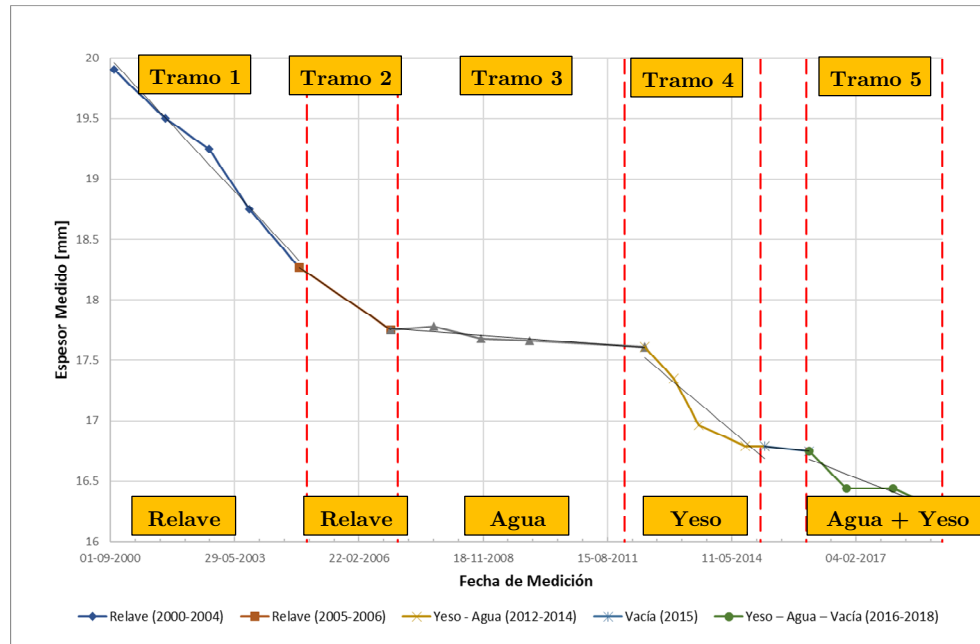


Figura 5-6 Evolución espesores tubería R16-14

Fuente: Elaboración propia

Influencia de los parámetros operacionales

Dado que los sistemas de transporte operan procurando mantener constante (o dentro de un rango definido) sus parámetros operacionales, no resulta fácil determinar directamente la influencia de estos en la tasa de desgaste. Sin embargo, con certeza se puede observar que la velocidad corresponde al parámetro más relevante al momento de cuantificar la tasa de disminución de espesores en una tubería.

Como ejemplo de lo anterior se puede considerar la operación de la tubería R16-14 la cual, luego del km 30+000 posee una disminución de diámetro de dos pulgadas lo que se traduce en menos sección transversal y, por lo tanto, a igual flujo, un aumento de la velocidad. Al observar la tasa de desgaste histórica de esta tubería se refleja un aumento en la tasa de desgaste producto del aumento de esta velocidad.

Se debe considerar también que otros parámetros operacionales deben influir en la tasa de desgaste tales como son la dureza de las partículas, la reología, la granulometría, entre otros, que puedan explicar la diferencia de magnitud existente entre la tasa de desgaste de pulpa de mineral y del relave ya respecto a parámetros

operacionales tales como velocidad, diámetro, concentración en peso, todos los sistemas poseen características similares.

5.3. Modelo predictivo

Se ha obtenido modelos predictivos para la tasa de desgaste de ambos sistemas que solo dependen de la velocidad, descartando como variables de predicción las otras variables operacionales. Esto producto de que, para parámetros distintos a la velocidad, las variaciones son pequeñas en el tiempo y nulas a lo largo de la tubería.

En el caso de la velocidad, además de ser físicamente el parámetro más influyente, esta varía a lo largo del tubo debido a la variación en los espesores de diseño de cada uno de los sistemas, permitiendo tener mayor nube de puntos para el análisis.

Se procede a comparar los modelos predictivos obtenidos en este estudio con los siguientes encontrados en la literatura disponible:

- CIMM (1997), realizado por el centro de investigaciones mineras y metalúrgicas. Se estudió el desgaste en tuberías con muestras de pulpa de la Compañía Minera Disputada de Las Condes (Chile). Se propuso la siguiente fórmula:

$$TD = 0.1096 \cdot V^{1.8989} \quad \text{Ec. 5-1}$$

- Gupta, et al (1994), realizaron estudios usando post-tester y test-loop para determinar la influencia de la velocidad, el diámetro de partícula y la concentración en peso en la tasa de desgaste de tuberías de acero transportando relaves de cobre (SG=2.82). Para concentraciones entre 15-45% y velocidades entre 3.92-8.06 [m/s] se propuso la siguiente fórmula:

$$TD = 0.2232 \cdot V^{2.148} \cdot d^{0.344} \cdot C^{0.556} \quad \text{Ec. 5-2}$$

- Planta Piloto, se realizó durante el diseño de la tubería de relaves R36. En la descarga del espesador se instaló una planta piloto con el fin de determinar la tasa de desgaste de diseño. La fórmula propuesta es:

$$TD = 0.085757 \cdot V^{2.006} \quad \text{Ec. 5-3}$$

- Andina (1978-1987), División Andina (Codelco) realizó estudios de desgaste en tuberías de relaves de 14'' y 18'' con concentraciones en peso de aproximadamente 50%, SG 2.7, $d_{50} = 46 [\mu m]$, $d_{90} = 230 [\mu m]$ y malla + #65=13.4%. La fórmula propuesta es:

$$TD = 0.07864 \cdot V^{2.2139} \quad \text{Ec. 5-4}$$

Debido a que la ecuación propuesta considera pulpas de diferentes características, se propone una corrección de la siguiente forma:

$$K' = K \cdot \left(\frac{+65'}{+65} \right) \cdot \left(\frac{C'_p}{C_p} \right) \quad \text{Ec. 5-5}$$

- Martínez, Chapman (2017). Con datos de desgaste de tuberías operando en Chile propusieron modelos predictivos para relave y pulpa de mineral por separado:

$$TD = 0.07307 \cdot V^{1.9010}, \text{ para mineral} \quad \text{Ec. 5-6}$$

$$TD = 0.0061 \cdot V^{3.1205}, \text{ para relave}$$

La Figura 5-7 muestra una comparación entre los principales modelos predictivos de desgaste con los obtenidos en este estudio. Se observa que, si bien los modelos que se han obtenidos no cumplen con las condiciones para ser validados mediante métodos probabilísticos y/o estadísticos, estos se asemejan con bastante cercanía a los encontrados en la literatura.

El uso de mediciones de espesores de tuberías operando permite tener una aproximación a la tasa de desgaste más cercana a la observada en terreno como es el caso de los resultados obtenidos en este estudio y en el realizado por Martínez, J. & Chapman, J. Sin embargo, al comparar con los modelos obtenidos con pruebas de laboratorio, se nota que estos últimos son más conservadores arrojando valores de tasas de desgaste más elevadas, lo cual se puede explicar a la sinergia corrosiva-erosiva del desgaste en el inicio de los sistemas y que, al ser modelos de prueba de baja longitud no alcanzan a separar ambos fenómenos.

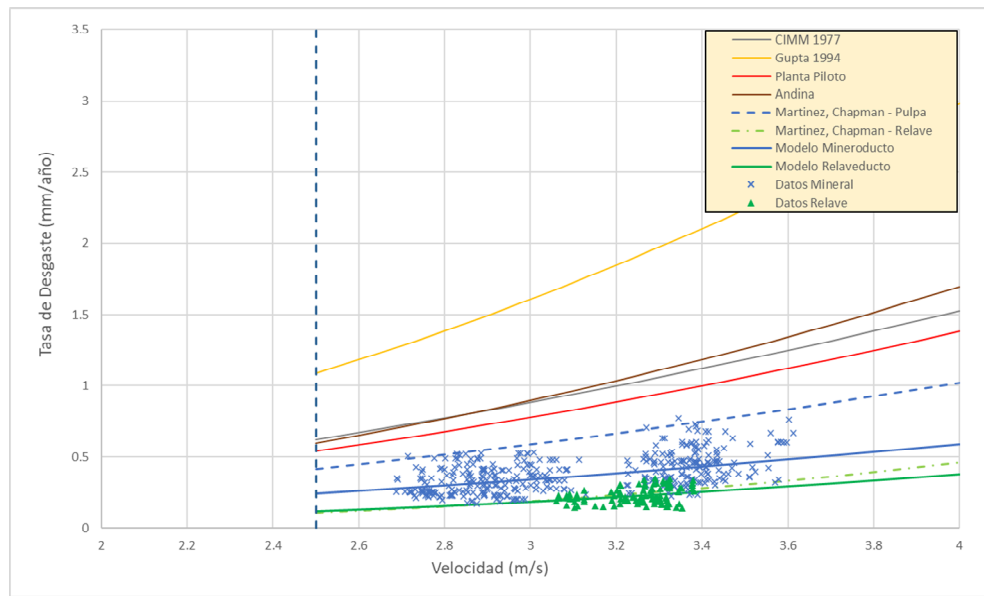


Figura 5-7: Comparación modelos obtenidos con literatura

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 6: Conclusiones

1. En tuberías de larga distancia el mecanismo de desgaste que predomina en el ducto es de tipo erosivo, esto debido principalmente a que las partículas sólidas colisionan constantemente con las paredes del tubo a medida que avanzan en el trazado y, dada su concentración y su peso, el desgaste mayoritario se produce en el fondo de la tubería.
2. En los primeros kilómetros de una tubería de larga distancia existe una sinergia de desgaste erosivo y corrosivo, lo cual explica que en los sistemas estudiados los primeros 10-15 km el desgaste sea mayor permaneciendo casi constante luego. El fenómeno corrosivo debe estudiarse en profundidad para entender su origen, se propone que existen dos causas:
 - a. Presencia de oxígeno disuelto en los primeros kilómetros, el cual disminuye gradualmente.
 - b. Angulosidad de las partículas las cuales se van redondeando y fragmentando luego de las colisiones.
3. No fue posible encontrar con los datos operacionales disponibles algún modelo predictivo de tasa de desgaste que pudiese cumplir con las hipótesis de correlación que permitieran definirlo como estadísticamente aceptable. Se concluye que para poder incorporar en el análisis otras variables operacionales, estas deben tener un rango de variabilidad que permita representar diferentes escenarios de operación.
4. La información con la que se ha realizado el estudio no ha sido suficiente para determinar la influencia en el desgaste de parámetros como la dureza de las partículas, la granulometría, la angulosidad o el ángulo de incidencia de estas. Se propone como estudio futuro centrar el análisis en el comportamiento del desgaste y su relación con estos parámetros, esto podría dar explicación a la diferencia en la magnitud del desgaste entre el relave y la pulpa de mineral.
5. Se han construido modelos predictivos para los sistemas de mineroductos y relaveductos basados en la operación y en las características específicas de la pulpa mencionadas en la Tabla 3-2. Se observa que tanto estadísticamente como con cercanía a sus datos operacionales el modelo del mineroducto puede considerarse como de confiabilidad baja, mientras que el modelo de relaveductos es solo referencial debido a su confiabilidad prácticamente nula.
6. Se confirma que el parámetro operacional más influyente en el desgaste erosivo de las tuberías corresponde a la velocidad.

7. El modo de operar los sistemas de transporte de pulpas es crucial al momento de asegurar un desgaste constante a lo largo del tiempo en las tuberías. Operar fuera del rango de diseño, o con altos cambios en parámetros como la velocidad o concentración podrían impactar en la estimación del desgaste y por consiguiente en la vida útil de la tubería.
8. Si bien los modelos predictivos obtenidos no cuentan con validez estadística o grados de correlación aceptables, se observa que existe bastante similitud con lo expuesto por diferentes autores en la literatura.
9. Finalmente, considerando la operación constante de los sistemas, parece acertado proyectar el desgaste de una tubería hacia el futuro considerando sus mediciones de espesores históricas a fin de determinar su vida útil y programar reemplazos. Mientras que para el diseño de una tubería nueva, la estimación de desgaste de la Planta Piloto o Martínez, J. & Chapman, J. parecen ser acordes como proyección conservadora del desgaste.

Bibliografía

Aguirre, J., Walczak, M. (2018). Multifactorial study of erosion–corrosion wear of a X65 steel by slurry of simulated copper tailing.

Aguirre, J., Walczak, M., Rohwerder, M. (2019). The mechanism of erosion–corrosion of API X65 steel under turbulent slurry flow: effect of nominal flow velocity and oxygen content.

Bitter J. G. A. (1962). A study of erosion phenomena

Brushan B. (2013). Introduction to Tribology, Editorial John Wiley & Sons

Clark, H., Y Hartwich, R. B. (2001). A re-examination of the “particle size effect” in slurry erosion

Clark, H. M., Hartwich R. B (2001). A re-examination of the “particle size effect” in slurry erosion.

Desale G. R., Gandhi B. K., Jain, S. C. (2011). Development of correlations for predicting the slurry erosion of ductile material.

Dhodapkar, K., Jacobs, K., Hu, S. (2006). Fluid-solid transport in ducts. *Multiphase flow handbook*.

Elkholy A, (1983). Prediction of abrasion wear for slurry pump materials.

Gupta, R., Singh, S. N., Seshadri, V. (1995). Study on the uneven wear rate in a slurry pipeline. *Bulk Solids Handling*.

Gupta, R., Prasad, B., Jha, A. (1998) Effect of sand concentration on slurry erosion of steels.

Gupta, R., Singh, S. N., Seshadri, V. (1995). Prediction of uneven wear in a slurry pipeline based on measurements in a pot tester, Applied Mechanics Department, Indian Institute of Technology, Hauz Khas, New Delhi-110016

Hutchings, I. M. (1992). Tribology: Friction and wear of engineering materials, Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.

Islam, M. A., & Farhat, Z. (2014). Effect of impact angle and velocity on erosion of API X42 pipeline steel under high abrasive feed rate.

Islam, M. A., & Farhat, Z. (2017). Erosion-corrosion mechanism, and comparison of erosion-corrosion performance of API steel.

- Jacobs, B. E. (1991). Design of slurry transport systems. Crc Press.
- Karabelas, A. J. (1978). An Experimental Study of Pipe Erosion by Turbulent Slurry Flow. E2, Hydrotransport 5, Fifth International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, Hannover, Alemania
- Martinez, J., Chapman, J. (2017). Wear Rates in slurry pipelines, Rio Pipeline.
- Mckibben, Y Melissa, J. (1993). Wall rate in slurry pipelines. The University of Saskatchewan, Canada.
- Molina, N., Walczak, M., Michalczewski, R. (2019). Erosion under turbulent slurry flow : An experimental determination of particle impact angle, impact direction, and distribution thereof by image processing.
- Rayo, J. (2019) Historia del manejo de pulpas mineras en Chile, Centro de Investigación Minería sustentable, JRI.
- Shou. G., Zhen, Y. (2007). Wear rate prediction for long distance pipelines. HYDRO-TRANSPORT 17, The 17th Conference on Slurry Handling and Pipeline Transport, BHRA, Cape Town, South Africa
- Sheldon G., Kanhere A., (1972). An investigation of impingement erosion using single particles
- Steward, N.R., (1988) The wear of materials in hydraulic transport pipelines. Tesis (Master of Science in Applied Science), University of Cape Town, Faculty of Engineering
- Turenne, S., Fiset, M., Masounave, J. (1989) The effect of sand concentration on the erosion of materials by slurry jet.
- Wasp, Edward J., (1977) Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation, Series on Bulk Materials Handling
- Winter R. E., Hutchings, I. M. (1974). Solid particle erosion studies using single angular particles.
- Ximénez, C., Revuelta, J., (2022) Análisis de datos en Lenguaje R