

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**PROYECTO DE GRADO**  
**“DISEÑO DE UN SEDIMENTADOR PARA LA**  
**RECUPERACIÓN DE ORO CONTENIDO EN LOS LODOS EN**  
**UNA COOPERATIVA MINERA AURÍFERA”**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL**

**POSTULANTE: DELIA RÍOS GARCÍA**

**TUTOR: ING. WILLIAM CUSI ARUQUIPA**

**LA PAZ – BOLIVIA**

**NOVIEMBRE 2022**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**



## DEDICATORIA

*A Dios de Israel, mi salvador, sin quien yo nada sería., quien me conforta y consuela siempre.*

*A mi madre Feliza García Sánchez por sus jalones de oreja y a mi padre Ramón Ríos Mamani por su apoyo incondicional.*

*A Wilmar R. y Olívia, D. gracias.*

## AGRADECIMIENTOS

*Profundamente agradecida a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes.*

*Agradezco a la Universidad Mayor de San Andrés-Facultad de Ingeniería por brindarme un proceso de aprendizaje singular, basado en la construcción del conocimiento, la crítica y por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación de este proyecto.*

*Le agradezco la confianza, apoyo a mi tutor **Ing. William Cusi Aruquipa**, quien con sus conocimientos me guio a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba.*

*A mis profesores y tribunales: **Ing. Omar salinas Prudencio** e **Ing. Jesús Góngora Beltrán**. Por haber compartido conmigo sus conocimientos y sobre todo su amistad.*

*Reiterar que para mí es una gran satisfacción poder agradecer a mi querida familia que son la motivación de culminar mis metas y quienes han sido mis pilares para seguir adelante.*

*A mis amigos queridos con quienes compartí las aulas durante todos los años de la carrera: Fabiana Saida, Elva, Marianela, Zulma, Neysa, Mauricio, María Esther, y muchos más, gracias por su linda amistad.*

*Muy atentamente, Delia Ríos García*



## RESUMEN

Se diseñó un sistema de sedimentación de aguas residuales para el proceso de lavado de material explotado para separar por gravedad el contenido de oro de una cooperativa minera aurífera, ubicada en el departamento de la Paz, provincia Palca, cantón Ventilla.

Para la realización de la presente investigación se hizo el reconocimiento del área, se determinó el punto de muestreo, el caudal mediante el método de flotación con un valor de  $57.6 \text{ m}^3/\text{h}$ . Se procedió a la toma de muestra simple para la determinación de la velocidad de sedimentación. El muestreo compuesto empleado consistió en recoger un total de 5 muestras para determinar los parámetros físico-químicos respectivamente.

Los sedimentadores son equipos de separación sólido- líquido, donde se alimenta a un tanque provisto de elementos internos que mediante la acción de la gravedad se logra la separación de líquidos y sólidos, aumentando la densidad de la pulpa de descarga final y para recuperar la mayor cantidad de agua del proceso de explotación de mineral de oro. El diseño del sedimentador para la actividad minera de explotación de oro en Palca Ventilla se basa en el Método de Talmage y Fitch, el método gráfico Fair, Geyer y Okum, y el método de Coe y Clevenger. El análisis de sedimentación se realizó bajo el proceso de Talmage y Fitch para la sedimentación batch, basándose en la esencia de los primeros diseños, se estima que la dimensión del sedimentador circular de cono profundo tiene un diámetro de 4.7 m de longitud y una altura de 3 m, con el área de  $50.19 \text{ m}^2$ . Una vez terminado de construir el sedimentador circular a escala laboratorio, previo armado y ajuste del sistema se realizaron pruebas, obteniéndose un 72% de rendimiento; que indica que el objetivo de clarificar las descargas se cumplió y alcanzado un contenido de oro de 1 g por tonelada de lodo, según los resultados del laboratorio de investigación de la carrera de Ingeniería Metalurgia.

## ABSTRACT

A wastewater sedimentation system was designed for the washing process of exploited material to separate the gold content by gravity from a gold mining cooperative, located in the department of La Paz, Palca province, Ventilla canton.

To carry out this investigation, the area was recognized, the sampling point was determined, the flow rate was determined using the flotation method with a value of 57.6 m<sup>3</sup>/h. A simple sample was taken to determine the sedimentation rate. The composite sampling used consisted of collecting a total of 5 samples to determine the physical-chemical parameters, respectively.

The settlers are solid-liquid separation equipment, where it is fed into a tank provided with internal elements that, through the action of gravity, separate liquids and solids, increasing the density of the final discharge pulp and recovering the greatest amount of water from the gold ore exploitation process. The design of the settler for the mining activity of gold exploitation in Palca Ventilla is based on the Talmage and Fitch Method, the Fair, Geyer and Okum graphical method, and the Coe and Clevenger method. The sedimentation analysis was carried out under the Talmage and Fitch process for batch sedimentation, based on the essence of the first designs, it is estimated that the dimension of the deep cone circular settler has a diameter of 4.7 m in length and a height of 3 m, with the area of 50.19 m<sup>2</sup>. Once the construction of the circular settler on a laboratory scale was completed, tests were carried out after assembly and adjustment of the system, obtaining a 72% yield; which indicates that the objective of clarifying the discharges was met and reached a gold content of 1 g per ton of sludge, according to the results of the research laboratory of the Metallurgy Engineering career.

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	xv
GLOSARIO.....	xvi
 CAPÍTULO 1	
INTRODUCCIÓN	
1.1 INTRODUCCION.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 DIAGNOSTICO .....	3
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.5 LOCALIZACION .....	4
1.6 OBJETIVOS .....	5
1.6.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.7 JUSTIFICACIÓN .....	5
1.7.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA .....	5
1.7.2 JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA.....	6
1.7.3 JUSTIFICACIÓN SOCIAL.....	6
1.7.4 JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL.....	7
 CAPÍTULO 2	
DIAGNOSTICO	
2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO ASENTAMIENTO DE LA COOPERATIVA .....	8
2.1.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA .....	8

2.1.2	TOPOGRAFÍA.....	9
2.1.3	CARACTERÍSTICAS ECOLÓGICAS.....	9
2.1.4	ASENTAMIENTO HUMANO.....	9
2.1.5	CUENCA HIDROGRÁFICA .....	10
2.1.6	EXPLOTACIÓN MINERA .....	10
2.2	EXPLOTACIÓN DE ORO ALUVIAL.....	11
2.2.1	EXTRACCIÓN .....	11
2.2.2	PROCESAMIENTO .....	12
2.2.3	CONCENTRACIÓN .....	13
2.2.4	AMALGAMACIÓN .....	13
2.2.6	REFINACIÓN .....	14
2.3	PRODUCCION DE ORO EN BOLIVIA.....	14
2.4	PROPIEDADES DEL ORO.....	17
2.5	USOS DEL ORO .....	18
2.6	TOXICIDAD DEL ORO .....	19
2.7	IMPACTO AMBIENTAL DE LA EXPLOTACIÓN DEL ORO ALUVIAL EN BOLIVIA	20
2.8	IMPACTO AMBIENTAL EN DEPARTAMENTO DE LA PAZ.....	21
2.9	MEDIDAS DE PREVENCIÓN, MITIGACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES	22
2.10	MARCO LEGAL.....	23
 CAPÍTULO 3		
BASES TEÓRICAS		
3.1	SOLIDOS SUSPENDIDOS.....	25
3.1.1	SOLIDOS SEDIMENTABLES.....	25
3.1.2	SOLIDOS NO SEDIMENTABLES.....	25
3.2	TEORÍA DE LA SEDIMENTACIÓN .....	26
3.3	TIPOS DE SEDIMENTACIÓN .....	26
3.3.1	SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS DISCRETAS.....	27
3.3.2	SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS FLOCÚLENTAS .....	32
3.3.3	SEDIMENTACIÓN ZONAL O RETARDADA.....	32
3.3.4	SEDIMENTACIÓN POR COMPRESIÓN .....	35



3.4	SEDIMENTADORES .....	35
3.4.1	TANQUE DE SEDIMENTACIÓN IDEAL, TIPO 1 .....	35
3.4.3	TANQUES DE TASA ALTA .....	37
3.5	CRITERIOS DE DISEÑO.....	39
3.5.1	ZONA DE SEDIMENTACIÓN .....	39
3.5.1.1	CARGA SUPERFICIAL. ....	39
3.5.1.2	PROFUNDIDAD Y TIEMPO DE RETENCIÓN.....	40
3.5.2	ZONA DE SALIDA.....	41
3.5.3	ZONA DE ENTRADA.....	42
3.5.4	ZONA DE LODOS. ....	43
CAPÍTULO 4		
CARACTERIZACIÓN, DETERMINACIÓN DE CAUDAL Y VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN		
4.1	MÉTODOS Y TÉCNICAS .....	44
4.1.1	ETAPA 1.....	44
4.1.2	ETAPA 2.....	44
4.1.2.1	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN.....	44
4.1.2.2	PLAN DE MUESTREO .....	45
4.1.3	ETAPA 3.....	45
4.2	EQUIPOS .....	47
4.3	PRUEBAS PRELIMINARES .....	48
4.3.1	DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE MUESTREO.....	48
4.3.1.1	UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO .....	48
4.3.1.2	TOMA DE MUESTRA.....	49
4.3.2	DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN.....	50
4.3.2.1	MÉTODO DE COE Y CLEVINGER .....	53
4.3.2.2	MÉTODO VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN POR ZONAS .....	55
4.3.2.3	MÉTODO STOKES .....	56
4.3.3	CURVAS DE SEDIMENTACIÓN .....	59
4.4	DETERMINACIÓN DEL CAUDAL .....	63

4.5	CARACTERIZACIÓN DE LA DESCARGA .....	67
4.5.1	DETERMINACIÓN DE SOLIDOS SEDIMENTABLES .....	67
4.5.2	DETERMINACIÓN DE SOLIDOS VOLÁTILES.....	68
4.5.3	DETERMINACIÓN DE ACIDEZ “pH”.....	69
4.5.4	DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD .....	70
4.5.5	DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD.....	71
4.5.6	DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DE LA MUESTRA .....	72
4.6	DISEÑO DEL SEDIMENTADOR .....	73
4.6.1	MÉTODO DE TALMAGE Y FITCH .....	74
4.6.2	MÉTODO GRAFICO FAIR, GEYER Y OKUM .....	85
CAPÍTULO 5		
DISEÑO, DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL SEDIMENTADOR		
5.1	INTRODUCCION.....	93
5.1.1	DESCRIPCION DEL PROCESO .....	93
5.1.2	NECESIDADES QUE CUBRE EL PRODUCTO .....	94
5.2	DISEÑO DEL SEDIMENTADOR .....	94
5.2.1	CRITERIOS DE DISEÑO.....	94
5.2.2	CÁLCULO DEL ÁREA SUPERFICIAL.....	95
5.2.3	CÁLCULO DEL DIÁMETRO DEL SEDIMENTADOR.....	95
5.2.4	CÁLCULO DEL VOLUMEN .....	96
5.2.5	CÁLCULO DEL FONDO DEL SEDIMENTADOR.....	97
5.2.6	CÁLCULO DE LA CANALETA DE ENTRADA.....	97
5.2.7	CALCULO DE LA VELOCIDAD DE SALIDA DEL LODO DEL SEDIMENTADOR .....	98
5.2.8	CALCULO DE LA CANALETA DE SALIDA DEL SEDIMENTADOR .....	100
5.2.9	CARGA SUPERFICIAL .....	101
5.2.10	CALCULO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN .....	101
5.2.11	CALCULO DEL ESPESOR DE LA PARED DEL SEDIMENTADOR .....	102
5.3	ESCALAMIENTO DEL SEDIMENTADOR .....	104
5.3.1	SEMEJANZA GEOMÉTRICA .....	104
5.3.2	SEMEJANZA CINÉTICA.....	105
5.3.3	SEMEJANZA DINÁMICA.....	106

5.4	CONSTRUCCIÓN DEL SEDIMENTADOR A ESCALA .....	106
5.4.1	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN .....	107
5.4.2	ELECCION DEL MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN .....	107
5.4.3	DIMENSIONES DEL SEDIMENTADOR A ESCALA.....	108
5.4.3.1	ESCALA GEOMÉTRICA .....	108
5.4.3.2	ESCALA CINÉTICA.....	108
5.4.3.3	ESCALA DINÁMICA .....	109
5.4.3.4	DIMENSIONES DEL SEDIMENTADOR A ESCALA LABORATORIO ...	109
5.4.3.5	CONSTRUCCIÓN DEL SEDIMENTADOR A ESCALA LABORATORIO	110
5.4.4	RENDIMIENTO DEL SEDIMENTADOR A ESCALA LABORATORIO.....	110
5.4.5	BALANCE DE MASA DEL SEDIMENTADOR.....	113
CAPÍTULO 6		
ESTIMACIÓN ECONÓMICA		
6.1	ANÁLISIS DE COSTOS DEL SEDIMENTADOR .....	116
6.1.1	PRESUPUESTO DE COSTO DE CONSTRUCCIÓN .....	116
6.1.1.1	COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL SEDIMENTADOR E INSTALACIÓN .....	116
6.1.1.2	COSTO DE ACCESORIOS TUBERÍAS, BOMBAS Y CONEXIONES.....	119
6.1.1.3	COSTO DE OPERACIÓN.....	120
CAPÍTULO 7		
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
7.1	CONCLUSIONES.....	124
7.2	RECOMENDACIONES.....	126
BIBLIOGRAFÍA.....		127
ANEXO A: IMÁGENES DE GOOGLE EARTH DE LA ZONA DE EXPLOTACIÓN .....		130
ANEXO B: <i>SISTEMA DE SEDIMENTACIÓN A ESCALA LABORATORIO</i> .....		131
ANEXO B: PLANOS 3D DEL <i>SISTEMA DE SEDIMENTACIÓN</i> .....		132
ANEXO B: DIMENCIONES DEL SEDIMENTADOR .....		134

ANEXO B: HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL ESPESADOR PROTOTIPO .....	135
ANEXO C: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CONTENIDO DE ORO EN LOS LODOS LABORATORIO DE INGENIERÍA DE METALURGIA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA .....	136
ANEXO D: RMCH ANEXO A2 LIMITES PERMISIBLES PARA DESCARGAS LIQUIDAS ..	138
ANEXOS E: IMPACTOS AMBIENTALES .....	139
IDENTIFICACION DE IMPACTOS AMBIENTALES .....	141
MEDIDAS DE PREVENCION Y MITIGACION.....	142
ANEXO F: COTIZACIÓN DE ACERO DE CONSTRUCCIÓN POR ÁREA.....	143
ANEXO F: COTIZACIÓN DE ESPERADORES CIRCULARES.....	144
ANEXO G: ESPESOR MÍNIMO PARA PLANCHAS DE TANQUES.....	145
ANEXO H: VALORES DE RUGOSIDAD EQUIVALENTE K.....	147

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA DEL MUNICIPIO DE PALCA.....	8
Figura 2. MAPA POLÍTICO DE PALCA.....	9
Figura 3. PIRÁMIDE POBLACIONAL .....	10
Figura 4. EXPLOTACIÓN DE ORO ALUVIAL.....	12
Figura 5. DEMANDA PROMEDIO 2018-2035 POR SECTOR PARA EL ORO – CASO CONTINUIDAD.....	19
Figura 6. DISTRIBUCIÓN DE COOPERATIVAS MINERAS EN BOLIVIA.....	21
Figura 7. SÓLIDO NO SEDIMENTABLE.....	25
Figura 8. ESQUEMA DE LAS ZONAS DE SEDIMENTACIÓN PARA UN FANGO ACTIVADO .....	32
Figura 9. ESQUEMA DE LAS ZONAS EN UN TANQUE SEDIMENTADOR CONVENCIONAL .....	35
Figura 10. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DISEÑO DEL SEDIMENTADOR .....	46
Figura 11. VISTA DEL ÁREA DE EXTRACCIÓN Y LAVADO DEL MINERAL.....	48
Figura 12. TOMA DE MUESTRA SIMPLE PARA LA CARACTERIZACION.....	49
Figura 13. TOMA DE MUESTRA COMPUESTA.....	49
Figura 14. TOMA DE MUESTRA COMPUESTA.....	53
Figura 15. MONTAJE DEL SISTEMA DE SEDIMENTACIÓN .....	54
Figura16. VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN POR ZONAS .....	55
Figura 17. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LA PARTICULA.....	57
Figura 18. PUNTO DE MUESTREO .....	65
Figura 19. VISTA DEL CANO IMHOFF CON EL SOLIDO SEDIMENTABLE .....	67
Figura 20. VISTA DEL CANO IMHOFF CON EL SOLIDO SEDIMENTABLE .....	68
Figura 21. DETERMINACIÓN DE SOLIDOS VOLATILES .....	69
Figura 22. DETERMINACIÓN DEL pH .....	69

Figura 23. DETERMINACIÓN DE DENSIDAD .....	70
Figura 24. DETERMINACIÓN DE VISCOSIDAD .....	71
Figura 25. DETERMINACIÓN GRANULOMETRICA.....	73
Figura 26. PRUEBAS DE SEDIMENTACION .....	74
Figura 27. PRUEBAS DE SEDIMENTACION EN EL COMO INHOFF .....	76
Figura 28. ABACO VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO Y FLOTACIÓN DE ESFERAS DISCRETAS EN UN FLUIDO ESTÁTICO $V_s = K^2X^2$ .....	85
Figura 29. VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO Y FLOTACIÓN DE ESFERAS DISCRETAS EN UN FLUIDO ESTÁTICO $V_s = K^2X^2$ .....	86
Figura 30. SEDIMENTADOR CIRCULAR.....	96
Figura 31. DIMENSIONES DEL SEDIMENTADOR .....	106
Figura 32. SEDIMENTADOR CONSTRUIDO A ESCALA LABORATORIO.....	110
Figura 33. ESQUEMA DEL SISTEMA DEL SEDIMENTADOR CONSTRUIDO A ESCALA LABORATORIO.....	111
Figura 34. ESQUEMA DEL SISTEMA SEDIMENTACION PARA EL BALANCE DE MASA.....	113

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. REGALÍA MINERA SE ASIGNA A CADA MUNICIPIO PRODUCTOR 2019 .....	11
Tabla 2.2. DERECHOS DE CONCESIÓN SOBRE TIERRAS AURÍFERAS.....	15
POR SUBSECTORES, AÑOS 1983, 2007 Y 2013 (EN HECTÁREAS) .....	15
Tabla 2.3. DAÑOS CAUSADOS POR INTOXICACIÓN POR MERCURIO .....	20
Tabla 2.4. IMPACTOS SOBRE LOS FACTORES AMBIENTALES .....	23
Tabla 3.1. DIFERENTES MODELOS DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN POR SEDIMENTACIÓN.....	27
Tabla 3.2. VALORES DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE “ CD” .....	30
Tabla 4.1. PLAN DE MUESTREO.....	45
Tabla 4.2. LISTA DE EQUIPOS UTILIZADOS .....	47
Tabla 4.3. UBICACIÓN GPS DE LOS PUNTOS DE MUESTREO .....	48
Tabla 4.4. MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN.....	50
Tabla 4.5. VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN EXPERIMENTAL.....	52
Tabla 4.6. VARIABLES PARA EL PRIMER MÉTODO .....	54
Tabla 4.8. DATOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE Y CALCULADOS .....	57
Tabla 4.9. VARIABLES PARA EL TERCER METODO .....	58
Tabla 4.10. PRUEBAS DE SEDIMENTACION.....	59
Tabla 4.11. PRUEBAS DE SEDIMENTACION.....	61
Tabla 4.12. PRUEBAS DE SEDIMENTACION.....	62
Tabla 4.13. FACTOR DE CORRECCIÓN DEL CAUDAL, DE ACUERDO AL TIPO DE ARROYO.....	65
Tabla 4.14. PRUEBAS DE CAUDAL.....	66
Tabla 4.15. PRUEBAS DE CAUDAL.....	66
Tabla 4.16. PRUEBAS DE SOLIDOS TOTALES .....	68
Tabla 4.17. PRUEBAS DE pH .....	70

Tabla 4.18. PRUEBAS DETERMINACION DE DENSIDAD .....	71
Tabla 4.19. DETERMINACION DE LA VISCOSIDAD .....	72
Tabla 4.20. DETERMINACION DE LA COMPOSICION PORCENTUAL DEL SOLIDO .....	73
Tabla 4.21. CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA .....	75
Tabla 4.22. CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA .....	82
Tabla 4.23. DATOS REQUERIDOS.....	87
Tabla 4.24. DATOS DE LA PROBETA GRADUADA UTILIZADA.....	88
Tabla 4.25. VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN EXPERIMENTAL.....	89
Tabla 4.26. VARIACIÓN DE ALTURA DEL LODO.....	91
Tabla 4.27. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS.....	92
Tabla 5.1. TABLA DE ITERACION .....	100
Tabla 5.2. DIMENSIONAMIENTO DEL SEDIMENTADOR.....	107
Tabla 5.3. DIMENSIONAMIENTO DEL SEDIMENTADOR.....	109
Tabla 5.4. DATOS RECOPIADOS.....	112
Tabla 5.5. DATOS EXPERIMENTALES DEL SEDIMENTADOR .....	113
Tabla 6.1. DATOS DIMENSIONALES DEL SEDIMENTADOR .....	116
Tabla 6.2 COSTO DE INVERSIÓN DE MOVIMIENTO DE TIERRAS .....	117
Tabla 6.3. COSTO DE COMSTRUCION DEL SEDIMENTADOR DE MURO DE HORMIGON ARMADO .....	118
Tabla 6.4. COSTO DE COMSTRUCION DEL SEDIMENTADOR DE ACERO DE CONSTRUCCIÓN .....	118
Tabla 6.5. COSTO DE ACCESORIOS TUBERÍAS, BOMBAS Y CONEXIONES .....	120
Tabla 6.6. ESTIMACION ECONOMICA DE COMSTRUCION DEL SEDIMENTADOR DE HORMIGÓN ARMADO .....	122
Tabla 6.7. ESTIMACIÓN ECONÓMICA DE COMSTRUCION DEL SEDIMENTADOR CON ACERO.....	123



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. SUPERFICIE EXPLOTADA	15
Gráfico 2. VALOR DE PRODUCCIÓN DE MINERALES ENERO- MARZO	16
Gráfico 3. PRODUCCIÓN DE ORO	16
Gráfico 4. ALTURA (cm) vs. TIEMPO (mn)	61
Gráfico 5. ALTURA (cm) vs. TIEMPO (mn)	62
Gráfico 6. VOLUMEN (cm <sup>3</sup> ) vs. TIEMPO (mn)	63
Gráfico 7. CURVA DE SEDIMENTACIÓN	80
Gráfico 8. CURVA DE SEDIMENTACIÓN JUNTO A LAS RECTAS TANGENTES	81
Gráfico 9. CURVA DE SEDIMENTACIÓN Y LAS RECTAS TANGENTES PARA DETERMINAR TMAX	82
Gráfico 10. REGRESIÓN LINEAL A LA CURVA DE SEDIMENTACIÓN	89

## GLOSARIO

- AGUAS RESIDUALES CRUDAS:  
Aguas procedentes de plantas de tratamiento para satisfacer los requisitos de calidad en relación, o una combinación de ellas, sin tratamiento posterior a su uso.
- CAUCE DE RIO:  
Corresponde a la superficie que el agua ocupa y desocupa en crecidas periódicas ordinarias.
- CONTAMINACIÓN DE AGUA:  
Alteración de las propiedades físico-químicas y/o biológicas de aguas por sustancias ajenas, por encima o debajo de los límites máximos permisibles o mínimos permisibles, según corresponda según que produzca daños a la salud del hombre deteriorando su salud o su medio ambiente.
- CUENCA:  
Zona geográfica que contribuye con la escorrentía de las aguas pluviales hacia un cauce natural.
- CUERPO DE AGUA:  
Arroyos, ríos, lagos y acuíferos que conforman el sistema hidrográfico de una zona geográfica.
- CUERPO RECEPTOR:  
Medio donde se descargan aguas residuales crudas o tratadas.
- DESCARGA:  
Vertido de aguas residuales crudas o tratadas en un cuerpo receptor.
- DESLIZAMIENTO:  
Movimiento de una parte del terreno, pendiente abajo, constituida de material detrítico, escombros, rocas blandas, etc.
- EFLUENTE:  
Arroyo o río secundario que desemboca o desagua en otro principal.
- EFLUENTE CONTAMINADO:

Toda descarga líquida que contenga cualquier forma de materia inorgánica y/u orgánica o energía, que no cumpla los límites establecidos en el reglamento en materia de contaminación hídrica.

- FANGOS O LODOS:  
Parte sólida que se produce, decanta o sedimenta durante el tratamiento de aguas.
- FOSAS DE SEDIMENTACIÓN:  
Piscinas o depósitos de lodos, en las cuales se precipitan las sustancias limosas procedentes del lavado de áridos.
- LECHO DE RIO:  
Porción de tierra por la que corren aguas. Constituye el fondo del cauce, por lo tanto, en algunos casos por el lecho escurren aguas permanentemente.
- PREVENCIÓN:  
Disposiciones y medios anticipados para evitar el deterioro de la calidad del agua.
- SÓLIDOS SEDIMENTABLES:  
Volumen que ocupan las partículas sólidas contenidas en un volumen definido de agua, decantadas en dos horas, su valor se mide en mililitros por litro.
- SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES:  
Peso de las partículas sólidas suspendidas en un volumen de agua, retenidas en papel filtro N° 42.
- TRATAMIENTO:  
Proceso físico químico y/o biológico que modifica alguna propiedad física, química y/o biológica del agua residual cruda.

## ÍNDICE DE SÍMBOLOS

Q	Caudal de Entrada a la Estructura ( $M^3/D$ )
Ah	Área Horizontal de la Zona De Sedimentación ( $M^2$ )
Av	Área Vertical de la Zona De Sedimentación ( $M^2$ )
d	Profundidad del Tanque (M)
vh	Velocidad Horizontal (cm/s)
Vsc	Velocidad Crítica de Asentamiento (Carga Superficial)
L	Longitud de la Zona de Sedimentación
a	Ancho de la Zona de Sedimentación
Vc	Velocidad Crítica de Arrastre (M/S)
k	Para Material Unigranular
K	Para Material Viscoso
f	Factor de Fricción de Darcy-Weisbach
s	Densidad Relativa de las Partículas
g	Aceleración Gravitacional ( $9.81 M/S^2$ )
d	Diámetro de las Partículas (M)
E	Eficiencia Fraccional Del Sedimentador Primario
So	Sólidos Suspendidos Del Afluente (Mg/L)
Cs	Carga Superficial (M/D)
U	Velocidad de sedimentación (M/D)
A	Área superficial de la zona de sedimentación ( $m^2$ )
V	Volumen
$t_R$	Tiempo de Retención
Vexp	Volumen Experimental
As	Área del Sedimentador
Rc	Diámetro de Reparto
Hc	Altura de Reparto
$m_{SS}$	Masa del solido
$\rho_p$	<i>Densidad de la partícula</i>
$\rho$	Densidad del fluido
F	Fuerza resistente del fluido



# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## CAPÍTULO 1



## INTRODUCCIÓN

## 1.1 INTRODUCCION

A lo largo del tiempo el concepto del agua ha sufrido cambios radicales, pasando de ser un recurso renovable a no renovable y se está tornado en un recurso escaso en el mundo. Existe 525 millones de kilómetros cúbicos de agua y solo el 0.007% del agua existente en el planeta es potable, que cada año reduce a causa del calentamiento global y para empeorar el panorama cada año va aumentando el uso de agua dulce en procesos industriales.

En Bolivia existen 1.700 cooperativas mineras y de esa cantidad 1.100 se dedican a la explotación de oro (65%) en todo el país. De este porcentaje, el 91% (1.000) están en el departamento de La Paz, según datos de la Federación Regional de Cooperativas Mineras Auríferas (FERRECO).

A menudo la pequeña minería puede incluso ser considerada como un sector industrial especialmente difícil de controlar y manejar; la razón se encuentra en la realidad geológica de los yacimientos que produce núcleos aislados y muy dispersos en la zona rural. Ejemplo contundente son las empresas mineras en los andes bolivianos, de las cuales varias se encuentran muy por encima del nivel del mar, y son solamente accesibles a pie, en caminatas de varios días.

La problemática ambiental de la pequeña minería tiene muchas facetas, y su origen está en los riesgos inherentes a la minería, en las condiciones generales de la pequeña minería, en la mentalidad de los mineros y en el notorio desconocimiento de los criterios ambientales.

Por este motivo, el presente proyecto está dirigido principalmente para planificar y ejecutar planes que tienen que ver con el manejo ambiental en la pequeña minería. También será de interés para personas que trabajan en protección ambiental a nivel de empresas o pequeña industria.

Uno de los principales problemas de la pequeña minería aurífera es el uso indiscriminado de insumos altamente contaminantes como el mercurio, aspecto que genera una profunda



preocupación en el Gobierno Nacional. Además, las descargas líquidas presentan un alto nivel de residuos sólidos suspendidos totales, mismas que son descargadas directamente en los diferentes ríos, provocando una colmatación de sólidos en el lecho del río, causando desbordamiento del río en épocas de lluvia.

El tratamiento del agua de descarga de las micro plantas es de vital importancia para la obtención de agua apta para el consumo humano, a su vez de la fauna y flora. El proceso de tratamiento de agua está, generalmente, compuesto por los procesos de mezcla rápida, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. En determinados casos puede ser necesaria la inclusión de otro tipo de procesos, como la aireación o la aplicación de cal para poder cumplir con los requisitos mínimos para el agua potable.

Cada uno de estos procesos tiene una metodología de diseño para el dimensionamiento de las estructuras y sus interconexiones, que posteriormente conformaran lo que denominamos planta de tratamiento de agua. El presente estudio se centró en analizar el proceso de sedimentación una vez que se han formado los flocs en el proceso de floculación.

El presente proyecto analizara el desarrollo del estudio, describe los elementos básicos de la dinámica de fluidos, muestra la metodología para el dimensionamiento de los sedimentadores convencionales o de flujo horizontal, posteriormente detalla el análisis realizado y presenta las conclusiones del mismo.

## 1.2 ANTECEDENTES

Año tras año el hombre ha hecho uso de los recursos naturales del medio ambiente sin identificar y analizar las consecuencias de sus acciones. Hoy en día las sociedades se plantean diferentes formas particulares de dar soluciones a sus necesidades específicas, estando estas presentes en el comportamiento individual, de los miembros de la comunidad, la familia y la naturaleza, necesidades que se traducen en la explotación de recursos naturales. La forma de relacionarse con el medio ambiente no es única y absoluta. Por el contrario, desde el momento en que la naturaleza es afectada por las relaciones sociales de producción y explotación, los procesos biológicos son determinados por los datos históricos de afectación, en los cuales el hombre y la naturaleza se insertan. Uno de los retos antropológicos más relevantes de los últimos tiempos es la protección del medio ambiente, la conservación de nuestro planeta; promoviendo el desarrollo sostenible.



El desarrollo sostenible es aún un deseo vehemente en el departamento de La Paz; siendo el segundo territorio del país que tiene mayor actividad minera, según muestra un estudio del Servicio Geológico y Técnico de Minas (Sergeotecmin) y la Corporación Minera de Bolivia (Comibol). En la región paceña se encuentran 36 distritos que agrupan al menos a 695 depósitos metalíferos. De los yacimientos identificados, 163 corresponden a estaño (Sn), 153 de oro (Au), 124 de cobre (Cu), 103 de wólfram (W), uranio (U), vanadio (Va) y otros. [2] (INDUSTRY, 2012)

Específicamente en el área del municipio de Palca del departamento de La Paz, existe una importante cantidad de cooperativas mineras de explotación de oro. Y esta explotación supone una importante demanda de agua por el proceso del lavado de oro y molienda del mismo. Esto implica un impacto ambiental significativo sobre los cuerpos de agua naturales, que está causando una alteración al estado natural del agua. No solo existe impacto en el área ambiental sino también social, ya que la mayor parte de las comunidades del municipio de Palca consumen el agua del río para el riego de sus parcelas, además de otros tipos de consumo

Implementar nuevas tecnologías para la explotación de oro es de vital importancia para reducir el impacto ambiental en los diferentes factores (agua, aire, flora y fauna),

### 1.3 DIAGNOSTICO

Muchas de las cooperativas auríferas no poseer asesoramiento técnico para su explotación artesanal y para empeorar el panorama muchas de estas no están registradas y explotan de manera clandestina. Muy pocas cooperativas poseen todos los documentos exigidos por el gobierno nacional para la explotación legal, a pesar de eso aún no tienen diseños debidamente aprobados por ingenieros peritos en área de sus plantas de extracción de oro.

Se necesita el mejoramiento del proceso de explotación en su conjunto de las plantas cooperativista aurífera. Es más preocupante la problemática de los residuos sólidos y líquidos que se producen durante el proceso, mismos que son vertidos directamente al medio ambiente. Por tal motivo es muy importante tener dispositivos que coadyuven al desarrollo sostenible, además de mejorar la explotación del oro.





#### 1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sedimentadores son dispositivos diseñados acorde a las descargas de los procesos de las plantas auríferas, el propósito de estos es mejorar la calidad de las descargas líquidas que poseen altas concentraciones en sólidos, sólidos que enturbian los cuerpos de agua y provocan una alteración a los ecosistemas acuáticos. Un alto grado de turbidez principalmente dificulta la transmitancia del haz de luz de los rayos solares y por ende afecta a la fotosíntesis de los lechos de ríos, lagos, etc. Este impacto desencadena una serie de daños colaterales a lo largo de la cadena trófica de la fauna y por ende a la humanidad.

Con el presente proyecto se pretende determinar el diseño adecuado de un dispositivo para clarificar las descargas líquidas de una cooperativa aurífera y mejorar así intrínsecamente la recuperación de oro.

#### 1.5 LOCALIZACION

La cooperativa minera aurífera “Ventilla” explota oro en yacimientos aluviales que se localizan en el municipio de Palca, en la comunidad de Ventilla, sobre el río Choquekota. Explota material aluvial y solo procede al lavado del material de manera artesanal, para extraer el oro por gravedad. La toma de muestra y medición de caudal se relocalizó en las inmediaciones de la ribera del río, donde se ubica la canaleta de lavado de la cooperativa con ubicación GPS 19k 0612091 y 8170590 UTM a una altitud de 3588 m.s.n.m.

Para desarrollar el proyecto en su parte experimental se lo realiza en los laboratorios que se encuentra en instalaciones del Instituto de Investigaciones de Procesos Químicos (IIDEPROQ) perteneciente a la Carrera de Ingeniería Química, Ambiental, Alimentos y Petroquímica ubicado en la zona sur en el campus Universitario en la ciudad de La Paz. Las pruebas fisicoquímicas tales como determinación sólido total, sólido volátil, turbiedad, pH, conductividad y velocidad de sedimentación, además de otros necesarios para el diseño del sedimentador, se los realizaron en el Instituto de servicios de Laboratorio del instituto de investigación perteneciente a la carrera de ingeniería química, petroquímica, ambiental y alimentos (IIDPROC).



## 1.6 OBJETIVOS

### 1.6.1 OBJETIVO GENERAL

- ✓ Diseñar y construir un sedimentador a escala laboratorio para la recuperación de oro contenido en los lodos de las cooperativas mineras auríferas.

### 1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar experimentalmente el caudal de agua residual a tratar y realizar la toma de muestra del agua residual.
- Caracterizar los parámetros físico – químicos del agua residual del proceso del lavado de material.
- Determinar la velocidad de sedimentación experimental.
- Realizar los cálculos de ingeniería necesarios para el diseño del sedimentador.
- Realizar los cálculos de ingeniería para el respectivo escalamiento del diseño del sedimentador. para la construcción a escala laboratorio.
- Determinar el rendimiento de la sedimentación.
- Realizar un presupuesto de los costos para la ejecución del sedimentador.
- Determinar el contenido de oro contenido en los lodos y posible disposición final de estos.

## 1.7 JUSTIFICACIÓN

### 1.7.1 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

Desarrollar este tipo de proyectos, además de proponer una solución que minimizará la concentración de sólidos sedimentables, nos dará a conocer datos muy importantes acerca las características de las descargas líquidas de las plantas auríferas.

Con este análisis se pretende incentivar el desarrollo tecnológico por medio de la propuesta de la implementación de un sedimentador para un tratamiento primario de las descargas líquidas auríferas.



Los resultados que nos dará el proyecto: nos dará un mejor enfoque a estudios posteriores respecto al mismo tema, en cuanto al rendimiento, además de mejorar el método utilizado. De tal manera que estos resultados le darán al proyecto los siguientes beneficios:

- ✓ Conocer en forma más detallada y mejorar el proceso del diseño de sedimentadores.
- ✓ Calcular la cantidad de agua utilizada para el proceso por día, nos permitirá conocer características fisicoquímicas de los suelos, descargas y otros. Con estos datos se podrá plantear estudios de diseño de proyectos que contemplen la mejora de producción de manera sostenible con el medio ambiente.

### 1.7.2 JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

El costo de la recuperación de la contaminación provocada por los residuos sólidos industriales es muy alto, con métodos que requieren mucha tecnología, y por ende es importante buscar ideas innovadoras, preventivas para abaratar costos y tiempo; el proceso que se propone tiene la finalidad de buscar la viabilidad económica y acortar tiempo de implementación. La planificación de proyectos que minimicen la producción de los residuos industriales, resulta ser más económica, a comparación del costo de recuperación de la calidad del aire, agua y suelo.

### 1.7.3 JUSTIFICACIÓN SOCIAL

La alta tasa de crecimiento demográfico en las áreas urbanas del Municipio, queda reflejada con la expansión de las viviendas. Por tanto, la demanda de fuentes laborales es una necesidad imperiosa, por lo que muchas familias se dedican a la explotación aurífera indiscriminada en las poblaciones de Palca.

Sin embargo, debido a un incremento de la conciencia ambiental de la población del municipio Palca, tienen una inquietud de desarrollar una adecuada explotación aurífera. Para este propósito se ha demandado la planificación de proyectos que vayan enfocados a la minimización de los residuos sólidos y líquidos de la explotación aurífera.

Desarrollar proyectos de implementación de sedimentadores será de mucho beneficio para la sociedad en su conjunto, ya que el efecto sobre la salud por la contaminación de residuos es múltiple dependiendo del factor en estudio; en el caso del suelo es a causa de la escorrentía pluvial, promueven la infiltración de estos hasta las bolsas freáticas de agua, causando



debilitamiento de la capa superficial, produciéndose así deslizamientos. El panorama es aún peor en los otros factores, especialmente el de la fauna. Cabe mencionar que el impacto visual paisajístico también afecta al estado emocional de la población y su entorno.

Los efectos sobre la salud de la sociedad si bien no es directa, pero si lo es para la fauna y flora.

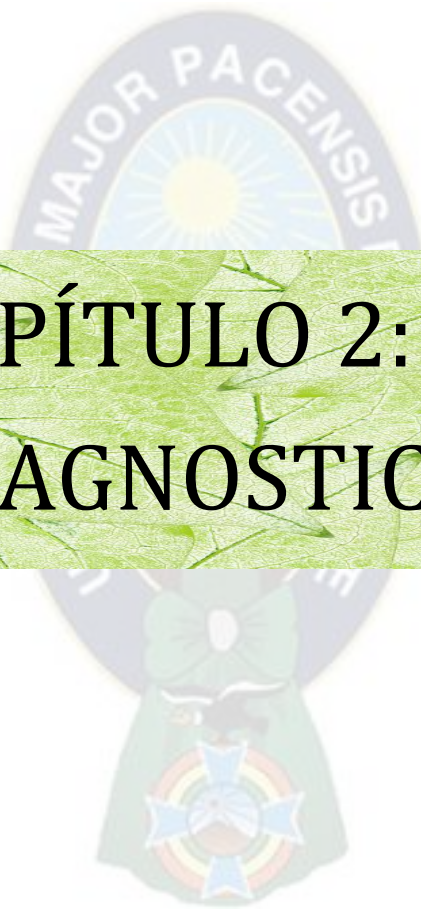
Por tanto, el proponer proyectos de diseño de sedimentadores adecuados para el proceso de explotación aurífera será muy beneficioso, para preservar nuestros efluentes.

#### 1.7.4 JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL

El impacto ambiental directo que se produce a los cuerpos de agua por el vertido de las descargas líquidas, es la alteración en la turbiedad natural del efluente. Un alto contenido de sedimentos hace que la transparencia sea baja, al igual que la conductividad, ya que los sólidos en suspensión indican que estos son compuestos orgánicos como arcillas y arena que no aportan iones al agua, causando una dificultad al paso de la luz solar hasta el fondo del lecho del río; inhibiendo así la fauna del ecosistema de los ríos, puntualmente hablando de los seres vivos unicelulares (plancton y fitoplancton). Siendo una alteración a la cadena alimenticia del mundo acuático y por ende a la cadena trófica de los seres vivos. Como se puede entender un impacto directo a uno de los factores del medio ambiente, se reproduce como impactos intrínsecos no directos a los demás factores. Preservar el equilibrio es lo que se pretende con este tipo de proyectos orientados a la producción más limpia.



# CAPÍTULO 2: DIAGNOSTICO



## CAPÍTULO 2



## DIAGNOSTICO

**2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO ASENTAMIENTO DE LA COOPERATIVA**

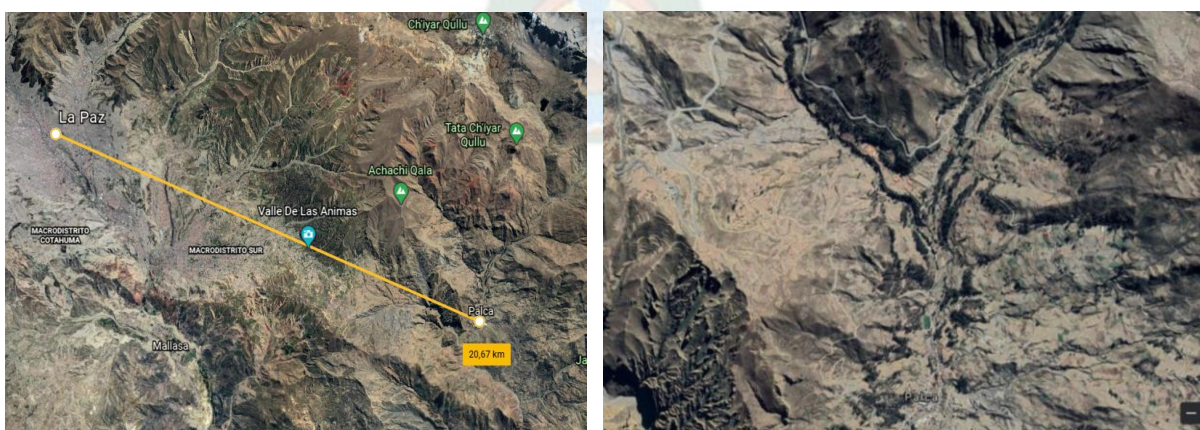
La investigación se realizó en el Departamento de La Paz - Provincia Murillo - Municipio de Palca, específicamente en la comunidad de Ventilla de la cuenca del Río Choquecota.

Para entender los impactos de las descargas líquidas de la explotación de oro sobre las comunidades de la cuenca del Río Choquecota, y para poder identificar las adaptaciones necesarias, hay que entender los aspectos sociales, económicos, y políticos que influyen a la vulnerabilidad de los cuerpos de agua.

**2.1.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA**

El Municipio de Palca, es la primera sección de la Provincia Murillo del Departamento de La Paz, se encuentra aproximadamente a 68 Km al Sudeste de la ciudad del mismo nombre. Esta geográficamente ubicada a 16° 34' 00" Latitud Sur y 67° 57' 00" de Longitud Oeste varía entre altitudes de 5.880 m.s.n.m. (Mururata) y los 2.398 m.s.n.m. (Tahuapalca) (PRAA, 2012; PDM Palca 2014). Abarca una extensión territorial de aproximadamente de 743,71 km<sup>2</sup> (PDM Palca 2014). (Ver Figura 1).

**Figura 1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA DEL MUNICIPIO DE PALCA**



*Fuente: Google Earth*



### 2.1.2 TOPOGRAFÍA

Palca, segunda sección de la provincia Murillo, se encuentra ubicada entre serranías y valles, topografía que configura un paisaje particular, por sus espectaculares contrastes de cumbres andinas y vegetación.

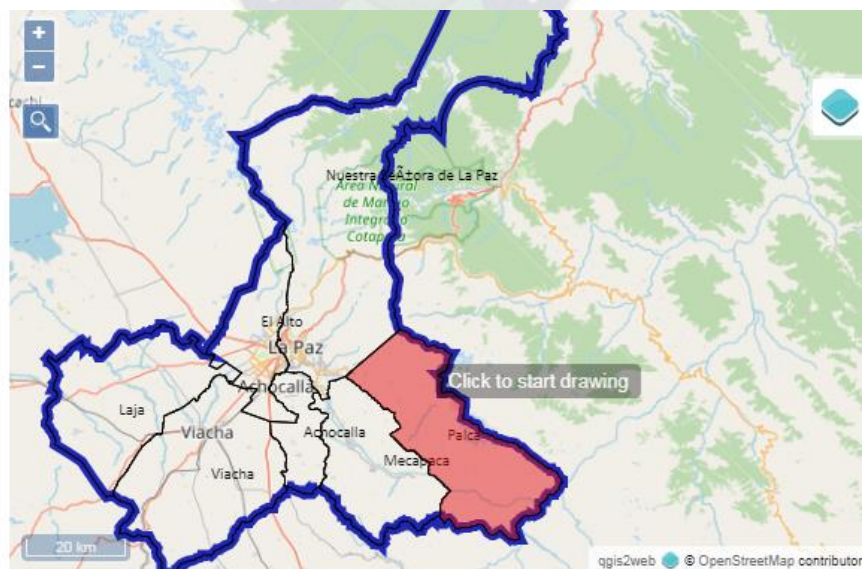
### 2.1.3 CARACTERÍSTICAS ECOLÓGICAS

En lo referente a la calidad de los suelos, la erosión constituye un problema latente, en tanto afecta a una extensión promedio de seis hectáreas por comunidad. La vegetación predominante en el municipio varía de acuerdo con los pisos ecológicos existentes. Así, en el alto andino o la parte de la puna se observa una vegetación arbustiva con predominancia de paja brava, tholares y yaretas (pastura andina seca); en tanto que en la parte del subandino, que constituye la mayor parte del Municipio, se aprecia una vegetación herbácea, con presencia de arbustos nativos y eucaliptos introducidos.

### 2.1.4 ASENTAMIENTO HUMANO

Se seleccionaron 20 Comunidades del Municipio de Palca del Departamento de La Paz, como unidades de observación o de análisis, utilizando un muestreo no probabilístico estratificado o por conveniencia. En función al Enfoque de Cuencas, se incluyó comunidades situadas en el área alta, media y baja de la cuenca, con un número representativo de población.

**Figura 2. MAPA POLÍTICO DE PALCA**



Fuente: Sistema de Información municipal regionalizado SEDALP



Figura 3. PIRÁMIDE POBLACIONAL



Fuente: Sistema de Información municipal regionalizado SEDALP

### 2.1.5 CUENCA HIDROGRÁFICA

La micro cuenca del Río Choquecota se ubica en el Municipio de Palca en la Provincia Murillo en el Departamento de La Paz, a unos 20 Km al sudeste del capital de este departamento (Figura No 1). Está ubicada en el valle al oeste del Nevado de Mururata (5.884 msnm) y Nevado del Zora (4800msnm) en la Cordillera de Los Andes, cuyos glaciares son una fuente importante de agua para toda la microcuenca. Con un área total de 743 km<sup>2</sup>, 41,4% de esta superficie es cultivable. (PALCA, 2011)

### 2.1.6 EXPLOTACIÓN MINERA

La minería en el departamento de La Paz se basa especialmente en la explotación del Wolfrang, Estaño, Cobre, Zinc, Plomo, Oro y Tugsteno, de todos estos minerales el principal productor de oro con una participación del 57% sobre el total de producción departamental.

Más de 800 cooperativas auríferas que explotan oro en el departamento de La Paz no cuentan con licencia ambiental. Un estudio de la Fundación Jubileo evidenció que de 981 cooperativas existentes en el sector aurífero, solamente 160 lograron adecuar sus actividades a la Ley de Medio Ambiente (Córdova, 2018)

En el caso del Municipio de Palca posee una producción minería, especialmente de oro, wolframio y zinc, a lo largo de las riveras del río Choquecota se encuentran asentadas distintas cooperativas auríferas explotando el lecho del río en busca de oro aluvial. Gracias al





asentamiento de no solo de cooperativas, también de empresas consolidadas de explotación en el municipio de Palca es beneficiada por los ingresos de las regalías mineras.

El departamento de La Paz aumentó sus ingresos por Regalías Mineras en 41,8%; de 17,6 millones de dólares el 2019 a 25,0 millones de dólares el 2019, este incremento se debe al dinamismo de la minería aurífera. Los municipios más beneficiados con estos recursos son; Colquiri (productora de zinc y estaño) y los municipios productores de oro como: Sorata, Mapiri, Guanay, Pelechuco, Tacacoma, Irupana y Tipuani. (METALURGIA, 2019)

**Tabla 0.1. REGALÍA MINERA SE ASIGNA A CADA MUNICIPIO PRODUCTOR 2019**

Otros Municipios	
• Tacacoma Bs. 697,9 Mil	• Ixiamas Bs.83,1 Mil
• Ayata Bs. 598,8 Mil	• Ichoca Bs.80,0 Mil
• Guanay Bs.550,9 Mil	• Caranavi Bs.74,9 Mil
• Tipuani Bs. 438,7 Mil	• Achacachi Bs.64,0 Mil
• Carabuco Bs. 427,6 Mil	• Cajuata Bs. 63,2 Mil
• G.J.J. Pérez Bs. 386,8 Mil	• Coripata Bs.56,4Mil
• El Ato Bs. 368,1 Mil	• La Asunta Bs.54,9 Mil
• Aucapata Bs. 319,9 Mil	• Collana Bs. 40,7 Mil
• Coroico Bs. 311,9 Mil	• Yaco Bs. 22,5 Mil
• La Paz Bs. 291,1 Mil	• Viacha Bs. 15,3 Mil
• Quime Bs. 264,1 Mil	• Malla Bs.12,9 Mil
• Palca Bs. 243,7 Mil	• Chuma Bs. 12,5 Mil
• Cairoma Bs. 221,0 Mil	• Curva Bs. 8,9Mil
• Inquisivi Bs.173,1 Mil	• S. Callapa Bs. 2,8 Mil
• Teoponte Bs. 167,4 Mil	• Laja Bs.2,2 Mil
• Yanacachi Bs. 160,8 Mil	• Caquiaviri Bs. 2,2 Mil
• Pucarani Bs.146,5 Mil	• Comanche Bs. 1,2 Mil
• Apolo Bs. 121,4 Mil	• Calacoto Bs. 867
• Corocoro Bs.116,1 Mil	• Jesús de Machaca Bs.138
• Colquencha Bs. 92,3 Mil	• Villa Aroma Bs.89
• Quiavaya Bs.83,4 Mil	

*Fuente: Servicio de Impuestos Nacionales (SIN), Unidad de Análisis y Política Minera (Ministerio de Minería y Metalurgia)*

No existe información certificada de cuantas familias dependen de la explotación de oro, ya que esta actividad genera mucha reserva y recelo en proporcionar información al respecto.

## 2.2 EXPLOTACIÓN DE ORO ALUVIAL

### 2.2.1 EXTRACCIÓN

La explotación llevada a cabo en el municipio de Palca, es por Minería Artesanal y Pequeña Escala (MAPE), que practican tres tipos de extracción:



1. Artesanales con carretillas e implementos muy simples (palas, picotas, mallas, etc.).
2. Extracción con diversos tipos de dragas en los lechos de los ríos.
3. Extracción con maquinaria pesada (cargadores frontales y volquetes).

Los mineros explotan depósitos aluviales (sedimentos fluviales) o yacimientos de roca dura. El sedimento o el recubrimiento se eliminan y el mineral se extrae al excavar la superficie, mediante la tunelización o el dragado (en el caso de la minería aluvial) (OMS, 2017)

Las arenas y gravas son sacadas del lugar y transportadas a las instalaciones de lavado, en que el material al final pasa sobre una alfombra o lona de yute. Estas instalaciones de lavado se ubican en la misma riberena del río.

**Figura 4. EXPLOTACIÓN DE ORO ALUVIAL**



*Fuente: Rio Madre de Dios Bolivia Energía libre*

### 2.2.2 PROCESAMIENTO

En este paso, el oro se separa del resto de minerales. Los métodos utilizados para el procesamiento pueden variar en función del tipo de depósito. Las partículas de oro en los depósitos aluviales a menudo ya están separadas y requieren de poco tratamiento mecánico, mientras que en los yacimientos de roca dura se requiere la trituración y la molienda. La trituración primaria puede realizarse de forma manual, por ejemplo, utilizando martillos, o con máquinas. Luego se utilizan molinos para moler los minerales en partículas más pequeñas y, finalmente, obtener un polvo fino. (OMS, 2017)

El sistema de recuperación de oro es muy simple, consistente de una etapa de lavado y clasificación (mecanizada en plataformas y terrazas; manual y rudimentaria en cauces



antiguos), y otra etapa de concentración en canaleta (desde la más primitiva cubierta con piedras de rodado, hasta algo más avanzada con rejillas de metal), que retiene solamente el oro grueso, arrojando el oro fino al río junto con las colas. ( Wotruba, Hruschka, Hentsche, & Priester, 1998)

### 2.2.3 CONCENTRACIÓN

La densidad del oro en comparación con los otros materiales con los que está mezclado es normalmente más elevada. Por lo tanto, muchas técnicas utilizan la gravedad para la concentración. La arenilla aurífera, que es un concentrado, se recoge en recipientes (baldes y similares) y se aplica mercurio para la amalgamación.

### 2.2.4 AMALGAMACIÓN

Es el proceso más utilizado por los cooperativistas que explotan el río Choquekota, es la más accesible y rápida para extraer el oro de las arenillas obtenidas mediante el lavado. La amalgamación se realiza en sus centros de acopio de las cooperativas.

El mercurio elemental se utiliza para obtener una aleación de mercurio y oro llamada “amalgama” (el mercurio y el oro prácticamente a partes iguales). Existen dos métodos principales utilizados en la MAPE para la amalgamación: la amalgamación de todo el mineral y la amalgamación concentrada. En la amalgamación de todo el mineral, el mercurio elemental se añade tras una breve trituración y concentración previas. Normalmente se usan grandes cantidades de mercurio (entre 3 y 50 unidades por unidad de oro recuperado) y la mayoría se desecha como residuo entre los relaves mineros debido a la ineficacia resultante de este proceso. (OMS, 2017)

La amalgama obtenida tiene una proporción de 60% de mercurio y 40% de oro, y se le da el nombre de perla o botón de amalgama. (PERU, 2011).

### 2.2.5 QUEMA

La quema se refiere a la etapa en que la amalgama se calienta para vaporizar el mercurio y separar el oro. Este proceso se basa en la temperatura de fusión del mercurio (270 °C), se utiliza un envase con las características de los crisoles termo resistente; el cual va a contener a la amalgama y se somete a un calentamiento mediante a un equipo artesanal similar al mechero bunsen.



La “quema abierta”, todo el vapor de mercurio se emite al aire. Por lo tanto, la quema abierta de amalgama o amalgama procesada también se considera como una “acción para eliminar”. El oro producido mediante la quema de amalgama es poroso y se refiere al mismo como “oro esponjoso”. (OMS, 2017)

La “quema cerrada” se realiza en los equipos llamados retorta, que se basa en un caldero provisto de un tubo por el cual circunda el vapor de mercurio durante el proceso de la fusión; este tubo conduce a un contenedor de agua, donde el gas de mercurio se burbujea y precipita al fondo por la variación de temperatura, volviendo el mercurio al estado elemental.

### 2.2.6 REFINACIÓN

Refinación una aleación de varios procesos técnicos la principal misión es desunir la impureza que contenga el oro, ya extraído de minas, chatarra o de subproductos industriales. Lo principal de refinar este metal es para obtener una pureza.

Para refinar el oro existen tres métodos connotados: El refinamiento químico, El refinamiento electroquímico y Técnica Miller.

Todos los métodos se basan en utilizar reactivos químicos como el ácido clorhídrico, el gas de cloro, el ácido nítrico, el ácido sulfúrico, agua regia de manera usual, cambiando solo el proceso de la utilización de los mismos.

### 2.3 PRODUCCION DE ORO EN BOLIVIA

En el año 2010, existen en toda Bolivia 1.126 cooperativas mineras con 46.367 socios 62, el 90,42% se concentra en La Paz, Potosí y Oruro (ver Cuadro 9). Entre 2000 y 2010, se registran 351 nuevas cooperativas, el 34,21% del total registrado desde 1957. Estas nuevas cooperativas están concentradas en La Paz (71,22%), Cochabamba (11,97%), Potosí (9,40%) y Oruro (5,13%). En La Paz, son 162 cooperativas auríferas y 57 tradicionales, es decir, el 62,39% de las nuevas cooperativas. (ÁVILA, 2014).

El departamento de La Paz geológicamente se caracteriza por presentar cinco de las seis provincias geológicas de Bolivia, tales como la cordillera Oriental, Altiplano, Cordillera Oriental, el Sub andino y la llanura claco Beniana, en donde se tiene distribuido, diferentes yacimientos metalíferos, siendo los más importantes depósitos de metales preciosos (Oro, Plata) elementos nativos (Cu, Hg), minerales polimetálicos (Plomo, Zinc, Estaño, Antimonio, Molibdeno).

En lo que corresponde al metal Oro, el departamento de la Paz se caracteriza dos tipos de yacimientos auríferos: Primarios (estructuras de vetas), los más importantes se encuentran en el distrito Pelkechuco (Au), distrito Yani – Aucopata (Au) , Illinami (Rosario de Araca- Au), Pacuani- Laurani (Au, Ag, Cu) y Secundarios (Depósitos de la formación de Cangalli), plataformas , terrazas aluviales, Fluvio- glasiaras, playas entre otros) los más importantes son sector Apolo, Mapiri, sector Challana, Teopomte, Guanay – Tipuani (Molibdeno, Oro), Caranavi y Sector Suches. (GDLP, 2019).

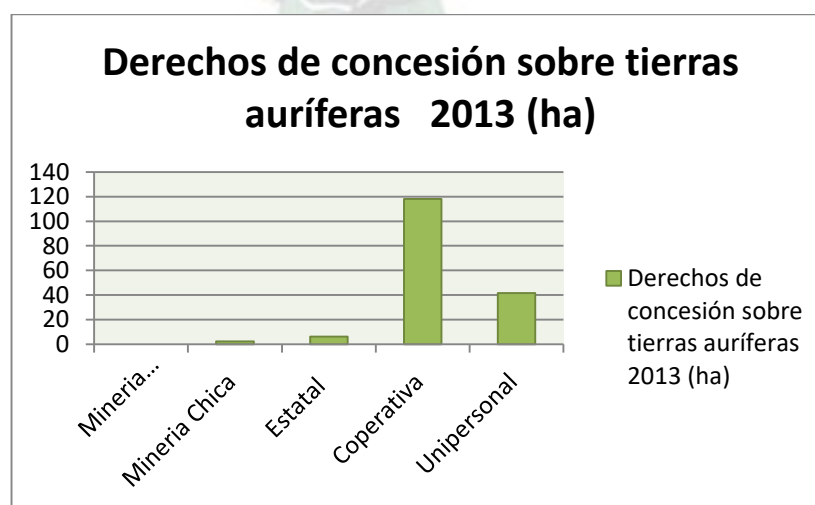


**Tabla 0.2. DERECHOS DE CONCESIÓN SOBRE TIERRAS AURÍFERAS POR SUBSECTORES, AÑOS 1983, 2007 Y 2013 (EN HECTÁREAS)**

Peticionarios	1983 ha	2007 ha	2013 ha
Minería mediana	5.763	0	0
Minería chica	127.983	229.443	2.228
Estatal	1.283.198	16.579	6.054
Cooperativas	18.452	29.675	118.026
Unipersonales		59.550	41.633
<b>Total</b>	<b>1.435.396</b>	<b>335.247</b>	<b>167.941</b>

Fuente: El oro en Bolivia. (Poveda Avila, Niogales Vera , & Calla Ortega , 2015)

**Gráfico 1. SUPERFICIE EXPLOTADA**

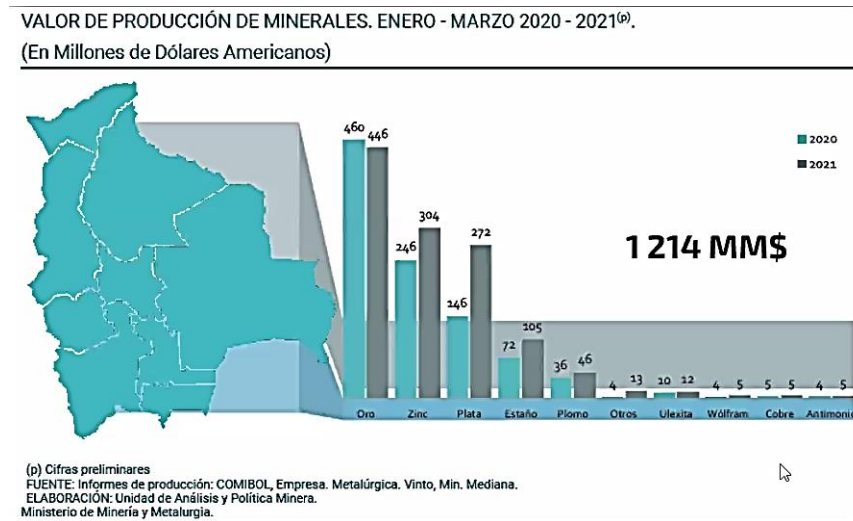


Fuente: Concentración porcentual de cooperativas. Ávila ,2014



Como se observan en los gráficos el departamento de La Paz es productor de oro de exportación.

**Gráfico 2. VALOR DE PRODUCCIÓN DE MINERALES ENERO- MARZO 2020-2021**



Fuente: Informes de producción COMIBOL

**Gráfico 3. PRODUCCIÓN DE ORO**

PRODUCCIÓN DE ORO. ENERO - DICIEMBRE 2016 - 2020<sup>(p)</sup>.  
(En T.M.F. y Millones de Dólares Americanos)



Fuente: Minería Mediana (Informes de producción COMIBOL, 2020)



## 2.4 PROPIEDADES DEL ORO

### ➤ Propiedades químicas

El oro es llamado un metal noble (un término alquímico) porque no se oxida en condiciones normales. Su símbolo químico es Au, que viene de la palabra latina aurum, de ahí los términos derivados como aúreo, aúrico, auroso, aurífero. (Giraldo, 2013, pág. 8)

El oro es un elemento y, junto con la plata y el cobre, es un miembro del grupo IB de la tabla periódica, los denominados metales de acuñación. Su número atómico es 79, su peso atómico es 197.2 y la configuración electrónica es  $[Xe]6s^14f^{14}5d^{10}$ . (Giraldo, 2013, pág. 8)

El oro sólo tiene un isótopo estable (con masa 197) con spin nuclear de  $s = 3/2$ . Debido a sus propiedades físicas este núcleo no es accesible a las técnicas convencionales de espectroscopia (Giraldo, 2013, pág. 8).

Los principales estados de oxidación del oro son +1 (auroso) y +3 (aúrico), una razón plausible para explicar la estabilidad de los estados de oxidación del oro es la energía de ionización, su elevado valor para la primera ionización, 890 kJ/mol, es el resultado de la contracción relativística del orbital 6s, del cual se remueve este electrón. Mientras que el valor para la tercera ionización, estimado en 2900 kJ/mol, es relativamente bajo y está de acuerdo con la estabilidad del estado +3, reforzado por el gran campo ligando que parte del ión  $5d^8$ , de modo que la preferencia del oro por el estado +3, se debe a efectos relativísticos; Debido a estos potenciales el oro es insoluble aún en los ácidos fuertes calientes, pero se disuelve en cianuro bajo condiciones oxidantes formando el complejo  $[Au(CN)_2]^-$ , esta propiedad se utiliza para hacer que el oro pase a soluciones acuosas, también se disuelve en agua regia mezcla de una parte de ácido nítrico y tres de ácido clorhídrico, llamada así porque disuelve al rey de los metales, para dar el complejo  $[AuCl_4]^-$ . (Giraldo, 2013, pág. 9)

Además de estas propiedades químicas, el otro atractivo del oro es su relativa escasez en la corteza terrestre, pues se estima que en la litosfera superior el contenido promedio es de 0.005 ppm, y va desde 0.003 ppm en la caliza y el granito-riolita hasta 0.03 ppm en las rocas sedimentarias (Giraldo, 2013, pág. 10).



### ➤ **Propiedades Físicas y Mecánicas del Oro**

La estructura cristalina del oro es cúbica de cara centrada con un parámetro de red de 28,8 nm y número de coordinación 12, funde a 1063° C y ebulle a 2600° C. En forma pura el oro tiene lustre metálico y es del color amarillo del sol, pero mezclado con otros metales como plata, cobre, níquel, platino, paladio, telurio y hierro, adquiere varios tintes que van desde el blanco de la plata hasta el verde y el anaranjado a rojo. (Giraldo, 2013, pág. 11)

El oro es uno de los metales nativos y minerales más apreciados por los seres humanos debido a su belleza y por sus propiedades físicas y químicas que lo hace el metal más útil de todos, se aplica en joyería, tecnología, premios, monedas, odontología, medicina, en autos, en naves, etc

Para los geólogos es conocido que el oro nativo se encuentra principalmente asociado con depósitos vetiformes, orogénicos y epitermales de baja y alta sulfuración

El oro, en el mercado mundial se pesa en onzas troy, una onza troy es igual 31.10348 gramos y un gramo equivale a 15.4324 granos, de modo que un grano troy son 0.0648 gramos y así una onza troy equivale a 480 granos troy. El oro en estado endurecido tiene una dureza de 49 Brinnell, una resistencia a la tracción de 200 MPa, un alargamiento del 2% y un módulo de elasticidad de 74 GPa; en estado recocido la dureza es de 28 Brinnell, la resistencia a la tracción es de 120 MPa y el alargamiento del 40%. (Giraldo, 2013, pág. 12)

## **2.5 USOS DEL ORO**

El uso del oro se incorporó desde su descubrimiento, debido a su maleabilidad y su gran empleabilidad como material de trabajo debido a su dureza, la que con el paso de los años fue incorporándose en la industria

En la actualidad todas las naciones del mundo utilizan este mineral del oro como reserva de valor, en el área de las finanzas como un bien de diversificación de cartera regulando y disminuyendo riesgos de inversión, debido a la volatilidad de activos financieros. Ahí radica la importancia de la explotación y exportación de este mineral, Para la aleación con metales para dar un acabado fino, como en las monedas. (GARAY, 2013, pág. 58)

### ➤ **Usos medicinales del oro**



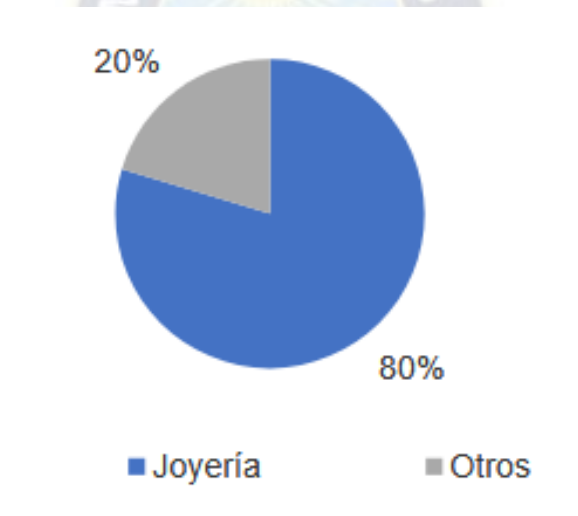


En la rama de la medicina como el oro coloidal se usa en la administración sistémica de sustancias biológicas. s. Por ejemplo, los pacientes diabéticos podrían verse favorecidos al recibir la dosis exacta de insulina, la cual estaría encapsulada en nanopartículas de oro y sería liberada cuando aumente la concentración de glucosa en la sangre, concentración que sería monitorizada mediante nanosensores (Nerlis Pájaro Castro, 2013) la que aún es un proyecto que está en prueba .

➤ **Usos en la gastronomía**

A pesar que la unión europea aprueba el uso de oro en la gastronomía, no se la considera necesario; pero se usa en decorado, para hacer más sugestivos algunos de sus platos.

**Figura 5. DEMANDA PROMEDIO 2018-2035 POR SECTOR PARA EL ORO – CASO CONTINUIDAD**



Fuente: Minería Mundial CRU

## 2.6 TOXICIDAD DEL ORO

El metal puro no tiene ni presenta toxicidad.

Puede causar irritación a la piel, ojos y tracto respiratorio si tiene aleación con otros metales. El llamado "polvo de oro" contiene limadura de bronce (aleación de cobre y estaño), y es utilizado con frecuencia en la actividad artesanal. En la intoxicación aguda por este producto es el cobre el que determina la sintomatología. (DRES. ANTONIO PASCALE, 2003, pág. 2)

Los métodos más usados para la recuperación del oro son la amalgamación con mercurio en forma exclusiva (57.1%) o junto con la lixiviación por cianuro (42.9%).



Los daños a la salud están más relacionados con la exposición al mercurio son: los temblores en párpados, lengua y labios (64.3%), la disminución de la agudeza visual (50.0%) y el dolor de cabeza (48.2%) y pérdida de la memoria (32.1% cada uno). (Luisa Fernanda Muñoz-Vallejo, 2012).

**Tabla 0.3. DAÑOS CAUSADOS POR INTOXICACIÓN POR MERCURIO**

DAÑOS PARA LA SALUD	RELACION EN %
Irritación en la piel	33,9
Temblores en manos, parpados, lengua y labios	64,3
Pérdida de memoria	44,6
Perdida del sueño	37,3
Dolor de cabeza	48,2
Daño en los riñones	42,9
Perdida de dientes	42,9
Irritación nasal	39,3
bronquitis	32,1
Depresión grave	26,8
Disminución de la visión	50.0
gingivitis	28,6
Gastroenteritis	12,5

Fuente: (Luisa Fernanda Muñoz-Vallejo, 2012)

## 2.7 IMPACTO AMBIENTAL DE LA EXPLOTACIÓN DEL ORO ALUVIAL EN BOLIVIA

La explotación de oro aluvial tiene un impacto de importancia en la etapa de explotación, desde la implementación del campamento, movimiento de tierras, uso de maquinaria pesada, abertura de senderos de acceso al área, extracción y transporte del material explotado; son una serie de intervenciones al medio ambiente que van causando un impacto a cada uno de los factores del medio ambiente de manera aguda y crónica.

La Contaminación ambiental más frecuente y de alto impacto ambiental es a consecuencia de los malos manejos de las represas de relaves, que ocasionan en un radio de acción donde se disponen y confinan, que, al realizarse sin ningún cuidado y manejo técnico recomendado,

puede ocasionar daños en cuerpos acuíferos (ríos, fuentes de agua, capa freática, lagunas), suelos y atmósfera.



El aire se altera por la introducción de contaminantes de material particulado, que están presentes en los polvos, combustibles tanto tóxicos como inertes, que son capaces de ingresar hasta los pulmones, procedentes de las diversas etapas del proceso.

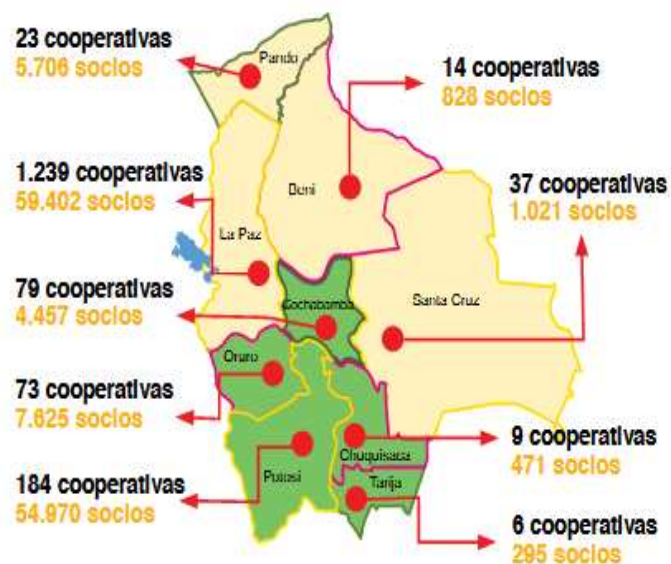
Afectación de las aguas superficiales: el material particulado de las operaciones de explotación minera ocasiona una elevada capa de sedimentos en los cauces de los ríos cercanos a las operaciones mineras.

Afectación de las aguas subterráneas o freáticas: Estas son ocasionadas por la introducción de residuos de aceite, reactivos, metales pesados provenientes de la lixiviación de pilas o botaderos de desmontes mineros.

## 2.8 IMPACTO AMBIENTAL EN DEPARTAMENTO DE LA PAZ

El departamento de La Paz, se posicionó en los últimos años como la principal región productora y exportadora de oro en Bolivia. Esta situación se traduce en regalías para el departamento de La Paz, pero también implica contaminación ambiental. La explotación de oro está centrada en el subsector cooperativo, sector que ha crecido vertiginosamente, tanto en número como en áreas de trabajo y en producción.

**Figura 6. DISTRIBUCIÓN DE COOPERATIVAS MINERAS EN BOLIVIA**



Fuente: Viceministerio de Cooperativas del Ministerio de Minería y Metalurgia



El 90% de las cooperativas están centradas en el departamento de la Paz como lo refleja la imagen, sin contar con la explotación clandestina.

Las cooperativas mineras no están obligadas a realizar medidas rigurosas de prevención y mitigación por la cantidad de explotación que aparentemente no es significativo. Al analizar la cantidad de cooperativas mineras asentadas en un mismo efluente, como el caso del río de Ventilla en el municipio de Palca, la explotación total de todas las cooperativas ya no es una explotación de pocas toneladas. Por tanto, los desechos vertidos al mismo efluente, o incluso el mismo uso del efluente ya se torna en un impacto ambiental que nadie estima en costo beneficio real de la explotación cooperativista.

Los impactos causados directamente sobre los efluentes naturales es causar impacto sobre una gran fuente de agua para los seres vivos y de hábitat de la biodiversidad, que incluyen gran cantidad de organismos como bacterias, plancton, hongos, vegetales, invertebrados y vertebrados. El impacto ambiental a un solo factor causa impactos transversales a la fauna, flora y a la humanidad, por la relación simbiótica existente entre los factores.

## **2.9 MEDIDAS DE PREVENCIÓN, MITIGACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES**

Medidas preventivas son planes y acciones que se realizan cuando ya se han identificado los posibles impactos ambientales generados durante el proceso de la implementación, operación y cierre de una abra, operación o proyecto AOP. La mitigación son las acciones o medidas de contingencia ante un accidente ambiental.

El conjunto de las medidas preventivas y mitigadoras que se exponen a continuación, tienen como fin la minimización de los posibles impactos ambientales generados por el conjunto de las actividades de la explotación de oro, desde su etapa de diseño hasta su etapa de operación y mantenimiento. La identificación de los impactos ambientales es crucial para realizar un buen plan de medidas preventivas, que se anticipen ante cualquier eventualidad.



Tabla 2.4. IMPACTOS SOBRE LOS FACTORES AMBIENTALES

FACTORES AMBIENTALES		IMPACTO	
FACTORES AMBIENTALES	Físicos	Suelos	A nivel global, el contacto de este tipo de agua residual provoca una degradación significativa ya que el PH ácido, la presencia de metales disueltos y sales disueltas resultan agresivas para este factor ambiental. el efecto más importante es la
		Agua	Las acciones que comprende el proceso de concentración de metales mediante el proceso de flotación afecta directamente a este componente ambiental, debido a la solubilización del mineral y adición de reactivos propios de la flotación. Por otra parte la filtración del agua residual proveniente de colas del ingenio puede llegar a contaminar la escorrentía subterránea transportando contaminantes aguas abajo ya que el ingenio se encuentra en una pendiente
	Bióticos	Fauna	El efecto causado por la contaminación de agua con metales pesados sobre este factor ambiental se relaciona con la bioacumulación de metales en especies del ecosistema circundante. En el caso agua residual proveniente del ingenio el contenido plomo podría afectar varios sistemas, por ejemplo en el sistema nervioso llega a dañar a las neuronas especialmente las del cerebro, siendo este el más nocivo.
		Vegetación	La contaminación de la vegetación también resulta afectada por la contaminación del agua, dándose también una bioacumulación de metales pesados en plantaciones en el ecosistema circundante generando fitotoxicidad, otro efecto es la pérdida de vegetación por erosión de los suelos. Sin embargo algunas especies pueden comportarse como bio indicadores puesto que existen especies que absorben dichos metales.

Fuente: Factores Ambientales (Luisa Fernanda Muñoz-Vallejo, 2012)

## 2.10 MARCO LEGAL

La ley del medio ambiente 1333 y sus reglamentos, tiene por objeto proteger y conservar el medio ambiente y los recursos naturales, regulando las acciones del hombre con relación a la naturaleza. Regula las acciones del hombre en cuanto este inmerso en una actividad, obra o proyecto que pueda causar un impacto a uno de los factores del medio ambiente.



La actividad de explotación de oro en los cauces de río están bajo el marco legal de la ley 1333 y sus reglamentos: Reglamento general de gestión ambiental, reglamento en prevención y control ambiental. Reglamento en materia de contaminación atmosférica, reglamento en materia de contaminación hídrica y reglamento en gestión de residuos sólidos. Además de las siguientes leyes y reglamentos:

- Reglamento ambiental para actividades mineras.
- Decreto Supremo 3114 del 7 de julio de 1952, Crea una “Comisión para preparar el anteproyecto de Ley General de Cooperativas de la República.
- Ley De Reforma Agraria 1953 Capítulo Quinto Artículo 133 al 135.- Recomiendan el Cooperativismo Agropecuario.
- Ley General De Sociedades Cooperativas Permite el Funcionamiento legal de las cooperativas.
- Incorporación En Leyes Sectoriales 1990: Código de minería 1996 D.S. 24439  
Reglamento de Ley de Bancos





# **CAPÍTULO 3:** **BASES TEÓRICAS**



## CAPÍTULO 3

**BASES TEÓRICAS****3.1 SÓLIDOS SUSPENDIDOS**

Los sólidos suspendidos son partículas que permanecen en suspensión en el agua debida al movimiento del líquido o debida a que la densidad de la partícula es menor o igual que la del agua, dotando una coloración o una apariencia de turbidez. La concentración de sólidos en suspensión es un valor utilizado como uno de los indicadores de la calidad del agua.

Existen tres formas de clasificarlas según a su naturaleza requerida:

- Según su Naturaleza Química-Biológica: Sólidos Orgánicos (50-80 %) y Sólidos Inorgánicos (20-50 %).
- Según la Sedimentabilidad: Sólidos en suspensión o suspendidos (SS), Sólidos Sedimentables, Sólidos Coloidales y Sólidos Disueltos
- Según su volatilidad: Sólidos Fijos y Sólidos Volátiles:

**3.1.1 SÓLIDOS SEDIMENTABLES**

Los sólidos sedimentables son partículas que permanecen en suspensión debido a la turbulencia de los cuerpos de agua y que pueden sedimentar por acción de la fuerza de gravedad en un espacio con finado en 60 minutos de permanencia.

**3.1.2 SÓLIDOS NO SEDIMENTABLES**

Son los sólidos que no pueden sedimentar por la fuerza de gravedad, que requieren procesos químicos o físicos especiales para poder separarlos del agua. No sedimentan o ni flotan cuando el agua está parada, o por lo menos en un tiempo computable.

**Figura 7. SÓLIDO NO SEDIMENTABLE**



Fuente: Elaboración propia





### 3.2 TEORÍA DE LA SEDIMENTACIÓN

Las aguas negras se someten a la sedimentación para reducir su contenido de sólidos sedimentables, a fin de evitar la formación de depósitos de lodo y reducir la demanda bioquímica de oxígeno del agua de dilución (...). (BABBITT & BAUMANN)

La sedimentación y la filtración por tanto deben considerarse como procesos complementarios. La sedimentación realiza la separación de los sólidos más densos que el agua y que tiene una velocidad de caída tal que pueda llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable. (Teoría de la Sedimentación del Agua, 2000)

Se designa por sedimentación la operación por la cual se remueven las partículas sólidas de una suspensión mediante la fuerza de la gravedad; en algunos casos se denomina clarificación o espesamiento. Dos son las formas de sedimentación usadas en la purificación del agua: sedimentación simple y sedimentación después de la coagulación y floculación o ablandamiento. (Sedimentación, 2006)

### 3.3 TIPOS DE SEDIMENTACIÓN

En el agua se pueden encontrar partículas llamadas discretas, las cuales no cambian su tamaño, forma o peso cuando se sedimentan, y partículas floculentas y precipitantes en la densidad y el volumen cambian a medida que estas se adhieren unas a otros mediante mecanismos de floculación, precipitación y arrastre o barrido. La existencia de diferentes tipos de partículas en concentraciones distintas hace que sea necesario considerar tipos de desiguales de sedimentación. (Sedimentación, 2006)

- Sedimentación de partículas discretas  
Es la sedimentación de las partículas discretas en condiciones adecuadas de dilución que no permitan la floculación.
- Sedimentación Flocúlenla  
Es la sedimentación de las partículas floculentas, donde se deben considerar las propiedades de la partícula y del fluido, las cuales interactúan entre sí.
- Sedimentación zonal



Son las sedimentaciones de fluidos con concentraciones intermedias e interacción de partículas. Desarrollo de una fase solido-líquido creando una interface clara de separación entre el sobrenadante clarificado y el lodo.

- Sedimentación por Compresión

Este tipo de sedimentación ocurre en soluciones de concentración alta, donde las partículas están en contacto unas con otras y por tanto producen compresión las mismas partículas llegando a compactarse.

**Tabla 0.1. DIFERENTES MODELOS DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN POR SEDIMENTACIÓN**

CLARIFICACIÓN POR SEDIMENTACIÓN TIPO	CARACTERÍSTICAS DE LOS SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	EJEMPLOS
1	Partículas discretas y aisladas en soluciones diluidas	No hay interacción entre las partículas y entre la partícula y el resto del fluido	Movimiento de sedimentación de partículas en desarenadores o pre sedimentadores
2	Partículas aglomerables en soluciones relativamente diluidas	Las partículas se aglomeran agrupándose en partículas de mayor tamaño	Sedimentación de flocs en decantadores horizontales o de placas
3	Soluciones de concentraciones intermedias	Las partículas interfieren entre sí en su descenso manteniendo posiciones estables	Deposición de lodos en decantadores de flujo ascendentes
4	Solución de alta concentración	Se forma una estructura entre las partículas que va modificándose lentamente con el tiempo	Compactación de depósitos de lodos

Fuente: Teoría de la purificación del agua 3ed, Jorge Arboleda Valencia (2000)

### 3.3.1 SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS DISCRETAS

Se lo conoce como la sedimentación libre, donde la partícula no es interferida, se podría afirmar que es el escenario de las condiciones ideales de una sedimentación. Las fuerzas que interactuarán en este proceso serán: fuerza externa, el empuje y la fuerza de rozamiento.



Dónde:

$F_P$ : Fuerza Externa

$F_E$ : Fuerza de empuje

$F_R$ : Fuerza de Rozamiento

**Fuerza Externa;** es el peso de la partícula, en síntesis, es la fuerza resultante de la interacción de las partículas sometidas a la aceleración gravitatoria.

$$F_P = m * g \quad \text{Ecu. [1]}$$

Dónde:

$F_P$ : Fuerza externa o peso propio

$m$ : masa de la partícula

$g$ : aceleración de la gravedad

Sin embargo, deben considerarse igualmente como fuerza externa las fuerzas de inercia, las que pueden tener una acción preponderante en la separación. Tal es el caso de la separación de partículas en el aire por medio de las unidades denominadas "Ciclones" que toman en cuenta el efecto combinado del peso y una fuerza centrífuga. (Teoría de la Sedimentación del Agua, 2000)

**Fuerza de Empuje;** Todo cuerpo sumergido en un líquido recibe un empuje, de abajo hacia arriba, igual al peso del líquido desalojado.



$$F_E = -\frac{\rho}{\rho_p} * m * g \quad \text{Ecu. [2]}$$

En donde:

$F_E$ : Fuerza de empuje

$\rho_p$ : Densidad de la partícula

$\rho$ : Densidad del fluido

$m$ : Masa de la partícula

$g$ : Aceleración de la gravedad

### Fuerza de Rozamiento

La fuerza vertical de arrastre o fricción es función de la rugosidad de la forma, tamaño y velocidad vertical de la partícula, así como de la densidad y viscosidad del agua. Empíricamente, se ha encontrado que para partículas discretas:

$$F_R = \frac{C_D * A_n * \rho_w * U^2}{2} \quad \text{Ecu. [3]}$$

Dónde:

$C_D$ : Coeficiente de arrastre de Newton, adimensional

$A_n$ : Área de la sección transversal de la partícula normal a la dirección de asentamiento,  $m^2$

$\rho_w$ : Densidad del agua  $\frac{kg}{m^3}$

$U$ : Velocidad de asentamiento,  $\frac{m}{s}$

El valor del coeficiente de arrastre,  $C$ , es función del número de Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{D * U}{\nu} \quad \text{Ecu. [4]}$$

Dónde:



- D: Diámetro de la partícula, m
- U: Velocidad de asentamiento,  $\frac{m}{s}$
- $\nu$ : Viscosidad Cinemática,  $\frac{m^2}{s}$

Valores del Coeficiente de arrastre según al régimen de caudal, se muestra en la siguiente tabla 3.2:

**Tabla 0.2. VALORES DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE “ C<sub>D</sub> ”**

COEFICIENTE DE ARRASTRE “ C <sub>D</sub> ”	
$C_D = \frac{24}{N_{Re}}$	Zona Régimen Laminar, o sea $N_{Re} < 0.5$
$C_D = 0.44$	Zona Régimen Turbulento, o sea $N_{Re} > 10^3$
Zona de Transición	
$C_D = \frac{18.5}{N_{Re}^{0.6}}$	Según Rich
$C_D = \frac{14}{N_{Re}^{0.5}}$	Según Hatch
$C_D = \frac{24}{N_{Re}} + \frac{3}{\sqrt{N_{Re}}} + 0.34$	Según Fair, Geyer y Okun

*Fuente: Teoría de la purificación del agua 3ed, Jorge Arboleda Valencia (2000)*

**Velocidad terminal de sedimentación**

La sedimentación de partículas discretas no fluculentas puede analizarse mediante las leyes clásicas formuladas por Newton y Stokes. La ley de Newton proporciona la velocidad final de una partícula como resultado de igualar el peso efectivo de la partícula a la resistencia por rozamiento o fuerza de arrastre. (Eddy, 1995)

Cuando las fuerzas verticales están en equilibrio, de acuerdo con la segunda ley de Newton, la aceleración se hace cero y la velocidad se vuelve constante. (Sedimentacion, 2006) Por tanto para partículas esféricas:



$$F_I = F_P - F_E - F_R \quad \text{Ecu. [5]}$$

Donde  $F_I$  es igual a la fuerza que impulsa a la partícula para que descienda y se puede expresar como:  $m * g = \frac{\partial u}{\partial t}$

Reemplazando en la ecuación (5) las ecuaciones (1), (2) y (3), se obtiene:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = m * g - \frac{\rho_w}{\rho_p} * mg - \frac{C_D * A_n * \rho_w * U^2}{2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = m * g * \left( \frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_p} \right) - \frac{C_D * A_n * \rho_w * U^2}{2}$$

Analizando la expresión se observa que si la partícula inicialmente está en reposo, a medida que aumenta la velocidad, aumenta la fuerza de rozamiento y por lo tanto va disminuyendo la aceleración. La fuerza de rozamiento puede llegar así a un valor igual a la suma algebraica de las fuerzas de empuje y peso de la partícula. En ese caso la aceleración se reduce a cero y de allí en adelante la partícula se moverá con una velocidad constante llamada velocidad terminal de sedimentación,  $U$  la cual se alcanza casi inmediatamente después de empezado el movimiento.

En este caso:

$$F_R = F_P + F_E$$

Y, por tanto:

$$m * g * \left( \frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_p} \right) = \frac{C_D * A_n * \rho_w * U^2}{2}$$

$$U = \sqrt{\frac{2g * (\rho_p - \rho_w) * V_p}{C_D * \rho_p * A}} \quad \text{Ecu. [6]}$$

Esta es la ecuación general que describe la velocidad de sedimentación de una partícula en un fluido.



### 3.3.2 SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS FLOCÚLENTAS

En soluciones relativamente diluidas, las partículas no se comportan como partículas discretas, sino que tienden a agregarse unas con otras durante el proceso de sedimentación. Conforme se produce la coalescencia o floculación depende de la posibilidad de contacto entre las diferentes partículas, que a su vez es función de la carga de superficie, de la profundidad del tanque, del gradiente de velocidad del sistema, de la concentración de la partícula y de los tamaños de las mismas. (Eddy, 1995, pág. 258)

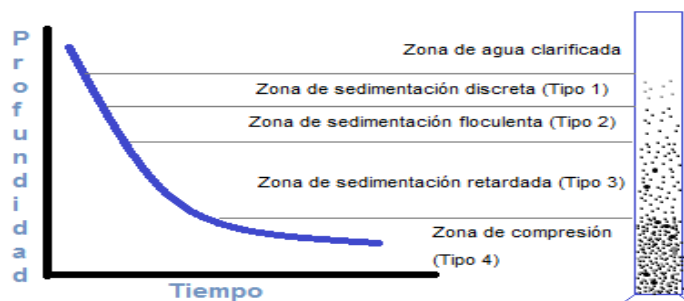
El efecto de estas variables sobre el proceso solo se puede determinar mediante ensayos de sedimentación. La sedimentación floculenta se evalúa con una columna de ensayos, provista de puntos de muestreo a diferentes profundidades. Prueba que nos proporcionara bastantes datos experimentales los cuales se podrán graficar y someter a métodos numéricos para su resolución y determinar así la velocidad de sedimentación.

### 3.3.3 SEDIMENTACIÓN ZONAL O RETARDADA

Este tipo de sedimentación se hace visible cuando se introduce en una probeta graduada una suspensión concentrada, que se esquematiza en la figura (8).

Debido a la alta concentración de partículas, el líquido tiende a ascender por los intersticios existentes entre aquellas. Como consecuencia de ello, las partículas que entran en contacto tienden a sedimentar en zonas o capas, manteniendo entre ellas las mismas posiciones relativas. Este fenómeno se conoce como sedimentación retardada. Conforme van sedimentando las partículas, se produce una zona de agua relativamente clara por encima de la región de sedimentación. (Eddy, 1995, pág. 262)

**Figura 8. ESQUEMA DE LAS ZONAS DE SEDIMENTACIÓN PARA UN FANGO ACTIVADO**



Fuente: Ingeniería de las Agua Residuales. Metcalf & Eddy 1995



La figura (8) nos ayuda a ver claramente la interface bien diferenciada entre la zona de sedimentación discreta y la región de sedimentación retardada. Formándose en el fondo del cilindro una capa de partículas comprimidas.

Según el autor Metcalf & Eddy existen dos tipos de ensayos de sedimentación para estos casos. Ensayo de sedimentación simple (batch) y el método de flujo de sólidos, donde se emplean una serie de datos obtenidos de ensayos de sedimentación realizadas con diferentes concentraciones.

Determinación de la superficie necesaria a partir de los resultados de un ensayo simple (batch). A efectos de proyecto, a determinación de la carga de superficie debe realizarse teniendo en cuenta tres factores:

- Superficie necesaria para la clarificación
- Superficie necesaria para el espesado
- Tasa de extracción del fango
- Los ensayos en las columnas

Generalmente la superficie necesaria para el espesado de fangos se determina por un método desarrollado por Talmadge y Fitch. Se llena una columna de altura  $H_0$  con una suspensión de sólido concentrado uniforme  $C_0$ . Con el paso del tiempo, al ir sedimentando la suspensión, la interface se va desplazando hacia abajo, siguiendo la curva de la figura la velocidad de descenso de la interface se corresponde con la pendiente de la curva en cada instante del tiempo según este método, el área crítica para el espesado viene dado por la siguiente expresión:

$$A_s = \frac{Q \cdot t_u}{H_0} \quad \text{Ecu. [7]}$$

Dónde:

$Q = [m^3/s]$  Caudal que entra al tanque

$A_s = [m^2]$  Superficie para el espesado de fangos

$t_u = [s]$  tiempo necesario para alcanzar la concentración de fangos

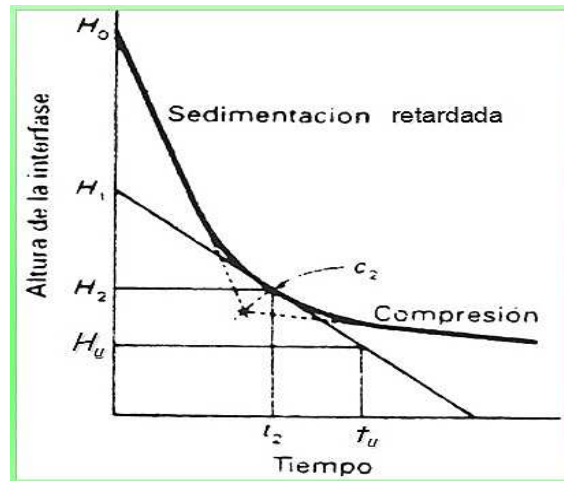
$H_0 = [m]$  Altura inicial de la interfase de la columna

La concentración crítica que controla la capacidad de manipulación del fango en un tanque se presenta a la concentración  $C_2$  cuando la interface se halla en una altura  $H_2$ . Determina



prolongando, hasta la intersección, las tangentes a las regiones de compresión y de sedimentación libre de la curva de descenso de la interface y trazando a continuación la bisectriz del ángulo formado por ambas rectas, como se muestra en el gráfico (4). El tiempo  $t_u$  se puede determinar con el siguiente procedimiento.

**Gráfico 4. MÉTODO GRAFICO TALMADGE Y FITCH**



Fuente: Ingeniería de las Agua Residuales. Metcalf & Eddy 1995

Trácese una línea horizontal a la profundidad  $H_u$  correspondiente a la profundidad a la que todos los sólidos se encuentran a la concentración deseada para el fango del fondo del tanque,  $C_u$ . El valor de  $H_u$  se determina por medio de la siguiente expresión:

$$A_u = \frac{C_0 * t_0}{C_u} \quad \text{Ecu. [8]}$$

Trácese la tangente a la curva de sedimentación en el punto  $C_2$ .

Para determinar el valor de  $t_u$  trácese la recta vertical que pase por el punto de intersección de las rectas trazadas en los pasos 1 y 2. La intersección de esta recta con el eje de los tiempos proporciona el valor de  $t_u$ .

Con este valor de  $t_u$  y la ecuación se puede determinar la superficie necesaria para la clarificación, y se adopta como valor que controla el proceso al mayor de ambos.

### 3.3.4 SEDIMENTACIÓN POR COMPRESIÓN

El volumen necesario para el fango de la región de compresión también suele determinarse mediante ensayos de sedimentación. Se ha comprobado que la velocidad de sedimentación en esta región es proporcional a la diferencia entre la altura de la capa de fango en el tiempo  $t$  y la altura del fango transcurrido en un periodo de tiempo prolongado. (Eddy, 1995, pág. 274)

Existen ecuaciones para representar este tipo de sedimentación en función de la altura del fango en un tiempo dado.

Autores como Dick y Ewing han observado que la agitación sirve para compactar el fango en la región de compresión, al promover la rotura de los floculos y la circulación del agua. Los equipos de los tanques de sedimentación incluyen rascadores de fango y conseguir una mayor compactación. Con esto se afirma que la agitación es de mucha influencia en la sedimentación.

## 3.4 SEDIMENTADORES

### 3.4.1 TANQUE DE SEDIMENTACIÓN IDEAL, TIPO 1

El análisis de tanques de sedimentación se la realiza dividiendo el tanque en 4 zonas como se indica en la figura (9):

**Figura 9. ESQUEMA DE LAS ZONAS EN UN TANQUE SEDIMENTADOR CONVENCIONAL**



Fuente: Purificación del Agua. Jairo Alberto Romero Rojas. 2006



La zona de entrada tiene como función de suministrar una transmisión suave entre el flujo de entrada y el flujo uniforme que se desea que exista en el sedimentador, un flujo laminar y horizontal sin perturbación alguna.

La zona de salida debe estar diseñada para prever una transición adecuada entre el flujo laminar del sedimentador a un turbulento de salida.

La zona de lodos es el espacio donde se depositan los sedimentos de la zona de sedimentación, esta zona debe prever que los lodos no sean otra vez arrastrados hacia la zona de sedimentación.

La zona de sedimentación es el espacio requerido por las partículas a sedimentar.

El análisis matemático para este tipo de sedimentadores ideales, está dado por Hazen (1904) y Camp (1946), que suponen un comportamiento de partículas discretas con igual velocidad de asentamiento. Quien demostró que, para cualquier caudal  $Q$ , la remoción de material suspendido es función del área superficial del tanque, hallando la ecuación (8):

$$R = \frac{a \cdot L \cdot U_p}{Q} \quad \text{Ecu. [9]}$$

Pero la remoción total del líquido clarificado está dada por:

$$x_t = (1 - x_0) + \frac{1}{U_0} \int_0^{x_n} U_p dx \quad \text{Ecu. [10]}$$

Dónde:

$x_t$  = Fracción total removida

$1 - x_0$  = Fracción de partículas con velocidad  $U_p$  mayor que  $U_0$

$\frac{1}{U_0} \int_0^{x_n} U_p dx$  = fracción de partículas removidas con velocidad  $U_p$  menor que  $U_0$



El último término de la ecuación (9) se cuantifica mediante integración gráfica de la curva para análisis de la sedimentación de partículas discretas entre los límites 0 y  $x_0$ , es decir en el área sombreada.

### 3.4.2 TANQUE DE SEDIMENTACIÓN IDEAL, TIPO 2

La remoción de partículas en un tanque de sedimentación ideal, para suspensiones diluidas floculentas, se puede determinar a partir de un análisis de columnas de sedimentación. (Sedimentacion, 2006, pág. 156)

Según el autor el análisis en las columnas de sedimentación nos permite determinar la concentración a diferentes profundidades, con intervalos de tiempo en distintos tiempos. Datos que se reflejan en un gráfico de fracción de remoción de partículas en función del tiempo y profundidad, obteniéndose las curvas de isoconcentración.

### 3.4.3 TANQUES DE TASA ALTA

Por sedimentación de tasa alta, son sedimentadores de poca profundidad, se entiende sedimentación en elementos poco profundos, en módulos de tubos circulares, cuadrados, hexagonales, octogonales, de placas planas paralelas, de placas onduladas o de otras formas, en tanque poco profundos, con tiempos de retención menores de quince minutos. (Sedimentacion, 2006, pág. 159)

Siendo las siguientes características de un sedimentador de alta tasa: poca profundidad y flujo laminar.

El modelo de Yao, analiza los sedimentadores inclinados, suponiendo: partículas discretas, flujo laminar y unidimensional.

Para una partícula, la ecuación de movimiento sería:

$$m \frac{dv_p}{dt} = (\rho_p - \rho)Vg - F \quad \text{Ecu. [11]}$$

Dónde:

$m$  = masa de la partícula

$v_p$  = velocidad de la partícula



$\rho_p$  = Densidad de la partícula

$\rho$  = Densidad del fluido

$V$  = Aceleración gravitacional

$F$  = Fuerza resistente del fluido

Reemplazando la fuerza de arrastre e ignorando la fuerza de inercia ,  $m \frac{dv_p}{dt}$  , se tiene :

$$v_p - v = \frac{(\rho_p - \rho)Vg}{3\pi\mu d_p} = v_s \quad \text{Ecu. [12]}$$

Dónde:  $v_s$  = velocidad de asentamiento de la partícula, o velocidad vertical de caída de la partícula.

La figura representa las coordenadas usadas por Yao, con la cual determina la ecuación diferencial de la trayectoria de la partícula, la cual al integrarla y utilizando algunos artificios matemáticos llego a desarrollar la ecuación general de la trayectoria de la partícula.

$$\int \frac{U}{v_0} dY - \frac{v_s}{v_0} * Y \sin \theta + \frac{v_s}{v_0} X \cos \theta = C_1 \quad \text{Ecu. [13]}$$

Dónde:

$C_1$  = constante de integración ajustada y,

$$Y = \frac{y}{d} \quad \text{Ecu. [14]}$$

$$X = \frac{x}{d} \quad \text{Ecu. [15]}$$

La ecuación (12) es la ecuación general de la trayectoria de la partícula.

Existen también otros tipos de sedimentadores de alta tasa, que varían en la forma o posición de las placas internas que contienen, algunas de estos son:

- ✓ Clarificador de placas inclinadas o tipo lamella
- ✓ Sedimentador de placas paralelas



- ✓ Sedimentadores con módulos plásticos
- ✓ Sistemas modulares de tubo multilateral
- ✓ Sedimentadores con módulos de tubo multilateral en tanques rectangulares
- ✓ Sedimentadores con módulos de tubo multilateral en tanques circulares

### 3.5 CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios de diseño de los sedimentadores proceden de valores obtenidos bajo la experiencia en la operación de prototipos de estos.

Se han intentado formular expresiones matemáticas que fueran aplicables a la determinación de las dimensiones de las cámaras de sedimentación. Son notables entre estos intentos los de Hazen , Slade Camp y Carpenter y Speiden . En vista del gran número de condiciones que intervienen y de las constantes desconocidas de la mayor parte de las formulas, se sigue acostumbrando a basar el proyecto de las cámaras de sedimentación en la experiencia. (Alcantarillado y Tratamiento de Aguas Negras )

El diseño de sedimentadores se realiza con un análisis de los diferentes factores que afectan el proceso de cada una de las zonas de un sedimentador.

- Zona de sedimentación
- Zona de entrada
- Zona de salida
- Zona de lodos

#### 3.5.1 ZONA DE SEDIMENTACIÓN

Existen 5 aspectos que se deben considerar para el diseño de esta zona, las cuales desarrollaremos a continuación.

##### 3.5.1.1 CARGA SUPERFICIAL.

El área superficial del tanque de sedimentación, es una de las principales características la cual depende de la carga superficial dada por la Ecuación (15), que es uno de los parámetros más utilizados en el diseño y clasificación de los sedimentadores.

Es una medida del gasto en relación con el área de la superficie total disponible para el proceso.

Un tiempo de retención más largo y una menor carga superficial implican mayor eficiencia en la remoción de sólidos.



$$C_s = \frac{Q}{A} \quad \text{Ecu. [16]}$$

Donde,

$C_s$  : Es la carga superficial (m/d)

Q: es caudal de entrada a la estructura (m<sup>3</sup>/d)

A: es el área superficial de la zona de sedimentación (m<sup>2</sup>)

La determinación de la carga superficial es experimental, realizando ensayos de sedimentación.

### 3.5.1.2 PROFUNDIDAD Y TIEMPO DE RETENCIÓN

Las profundidades del sedimentador varían entre 3 y 5 metros con más frecuencia 3.50 y 4.50 metros. Estos valores son debido a que la velocidad horizontal del flujo no puede hacerse muy alta; interferencias que revuelven el sedimentador; condiciones estructurales y de operación.

El periodo de detención es el tiempo máximo que la partícula con la mínima velocidad de sedimentación escogida, tarda en llegar hasta el fondo. Por lo tanto, es dependiente de la profundidad del tanque. (Teoria de la Sedimentacion del Agua, 2000)

Cuando menor sea la profundidad, menor será el periodo de detención necesario para recolectar dicha partícula.

$$t_R = \frac{V}{Q} \quad \text{Ecu. [17]}$$

Donde,

V: es el volumen

$t_R$ : es el tiempo de retención

Q: es caudal de entrada a la estructura (m<sup>3</sup>/d)



### 3.5.1.3 VELOCIDAD HORIZONTAL.

La velocidad horizontal, no será siempre uniforme en toda la sección transversal de la estructura perpendicular, a la dirección de flujo debido a la existencia de corrientes de densidad, corrientes de inercia, fenómenos de cortocircuito y operación de mecanismos de remoción de lodos. (Sedimentacion, 2006)

$$Q = v_{sc} * A_h \quad \text{Ecu. [18]}$$

$$Q = v_h * A_v \quad \text{Ecu. [19]}$$

$$A_h = a * L \quad \text{Ecu. [20]}$$

$$A_v = a * d \quad \text{Ecu. [21]}$$

Igualando las ecuaciones (17) y (18), después remplazando las ecuaciones (19) y (20), se obtiene la siguiente ecuación (21):

$$\frac{L}{d} = \frac{v_h}{v_{sc}} \quad \text{Ecu. [22]}$$

Donde,

Q: es caudal de entrada a la estructura (m<sup>3</sup>/d)

$A_h$  :es el área horizontal de la zona de sedimentación (m<sup>2</sup>)

$A_v$  :es el área vertical de la zona de sedimentación (m<sup>2</sup>)

d: es la profundidad del tanque (m)

$v_h$  :es la velocidad horizontal (cm/s)

$v_{sc}$  :es la velocidad crítica de asentamiento (carga superficial)

L: es la longitud de la zona de sedimentación

a : es el ancho de la zona de sedimentación

### 3.5.2 ZONA DE SALIDA.

Si bien el diseño de la zona de salida no es tan determinante en el funcionamiento del sedimentador, un adecuado diseño coadyuvará a obtener un mayor rendimiento del mismo.





La importancia del diseño de las estructuras de la zona de salida, radica en prevenir el ahogamiento o rebalse del sedimentador.

Existen gran variedad de estructuras de salida como: vertederos de rebose, canaletas de reboso, orificios y otros.

### 3.5.3 ZONA DE ENTRADA.

La entrada al sedimentador se diseña de tal forma que permita distribuir uniformemente el agua sobre el área transversal del tanque, esta zona es importante para controlar las corrientes de densidad e inercia, razón por la cual afecta la eficiencia del sedimentador. (Sedimentacion, 2006)

Según Ingersoll y colaboradores (1955), el diseño de la zona de entrada es más importante que el de la zona de salida para prevenir cortocircuitos.

Según Romero Rojas (2006), el propósito de la estructura de entrada es:

- a) Distribuir el agua tan uniformemente como sea posible en toda el área transversal del sedimentador.
- b) Evitar chorros de agua que puedan provocar movimientos rotacionales de la masa líquida u otras corrientes cinéticas.
- c) Disipar la energía que trae el agua.
- d) Evitar altas velocidades que puedan perturbar los sedimentos del fondo.

Las estructuras más utilizadas para la entrada del sedimentador, son las paredes de orificios, que afirma Romero Rojas, según experiencias anteriores han demostrado que a una distancia de 10 metros aguas abajo del orificio, la velocidad del chorro disminuye solamente un 40% y a 100 metros, un 94%.

Esto significa que un orificio de 10 cm de diámetro que introduzca agua a un sedimentador con una velocidad de 30cm/s, producirá disturbios hasta  $0.1 \cdot 100 = 10$  m de distancia dentro del tanque, donde la velocidad se reducirá a 1.8 cm/s, todavía mayor que la velocidad horizontal promedio, del sedimentador que suele ser menor de 1 cm/s. (Sedimentacion, 2006, pág. 252)

### 3.5.4 ZONA DE LODOS.

Al diseñar el sedimentador, es necesario considerar el volumen destinado al almacenamiento de los lodos producidos en el proceso de sedimentación. Dichos lodos son generalmente movidos hidráulicamente, para tal fin los tanques sedimentadores tendrán pendientes longitudinal y transversal hacia la tolva entre el 2 - 3% y el 10 – 12% respectivamente (8). (Sedimentacion, 2006)

Constituida por una tolva con capacidad para depositar los lodos sedimentados, y una tubería y válvula para su evacuación periódica.





## **CAPÍTULO 4:**

**CARACTERIZACIÓN,  
DETERMINACIÓN DE  
CAUDAL  
Y VELOCIDAD DE  
SEDIMENTACIÓN**



## CAPÍTULO 4

### CARACTERIZACIÓN, DETERMINACIÓN DE CAUDAL Y VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

#### 4.1 MÉTODOS Y TÉCNICAS

Se aplicará una metodología para desarrollar la investigación, dividida en tres etapas: etapa 1(reconocimiento), etapa 2(toma de muestra) y etapa 3 (diseño y construcción).

##### 4.1.1 ETAPA 1

En la primera etapa se realizó el reconocimiento del área, una inspección de campo para identificar el área de estudio y recaudar información fidedigna del proceso de explotación de poso o socavón, las canaletas concentradoras de recuperación y concentración utilizado por la planta aurífera

Determinar puntos de muestreo de las descargas líquidas. Además de saber cuál es el espacio físico ocupado. Se ubicaron los puntos para la toma de muestra para la caracterización del efluente antes del ingreso y salida al sistema.

##### 4.1.2 ETAPA 2

En esta etapa se realizó la medición del caudal de manera experimental y se colectó las muestras necesarias in situ, para la investigación según a un cronograma elaborado.

Para la toma de muestra se empleó el método de muestreo compuesto, por el lapso de 1 semanas, en los horarios de 9:00 am hasta las 16:00 pm. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio del instituto de Investigación IIDEPROC, de la Facultad de Ingeniería de la carrera de ingeniería Química, Petroquímica, Ambiental y Alimentos de la Universidad de Mayor de San Andrés.

##### 4.1.2.1 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN

La toma de muestra se basó en la norma boliviana NB/ISO 5667-10 Calidad del agua; se utilizaron materiales adecuados y preparados para asegurar su inocuidad.

Se realizaron dos tipos de recolección de muestreo; una muestra compuesta y una muestra simple. La muestra compuesta se basa en la toma de varias muestras en distintos intervalos



de tiempo, las cuales se colocan en un mismo recipiente. En cambio, una muestra simple es la toma de la muestra por una única vez.

La toma de muestra se realizó para determinar los parámetros físico- químicos; estas muestras se tomaron en recipientes de vidrio, tomadas durante el lavado del material minero de modo que al finalizar la jornada se obtuvo un volumen de 2 L; durante dos días 4 litros en total.

La toma de muestra para las prácticas experimentales en laboratorio se tomó alícuotas tomadas cada lavado de material; ya que el proceso de lavado de material no es continuo y la misma se realizaban en intervalos de 1 hora.

Para el traslado de las muestras se precauteló el llenado hasta el borde del frasco y un tapado hermético y las medidas correspondiente según norma. Las propiedades biológicas de esta pueden ser alteradas por variables medioambientales como: tiempo, contenedor, contaminación externa.

#### 4.1.2.2 PLAN DE MUESTREO

El plan de muestreo se realizó vasados en la disponibilidad de la cooperativa minera, la cual reflejamos en la siguiente tabla:

**Tabla 4.1. PLAN DE MUESTREO**

Día 1		Día 2	
Hora	Q[l/s]	Hora	Q[l/s]
10:00	16,4937	11:00	15,9616
10:03	15,4628	11:05	14,1375
10:10	16,4937	11:12	17,0625
10:15	17,6718	11:16	16,4937
10:20	17,4229	11:24	15,4628
10:25	18,1916	11:30	14,1375
10:30	19,7925	11:35	18,3263
10:35	18,7428	11:41	17,0625
10:38	17,6718	11:45	15,9616
10:43	18,3263	11:51	18,3263
10:50	17,6718	12:02	14,9943

*Fuente: Elaboración Propia*

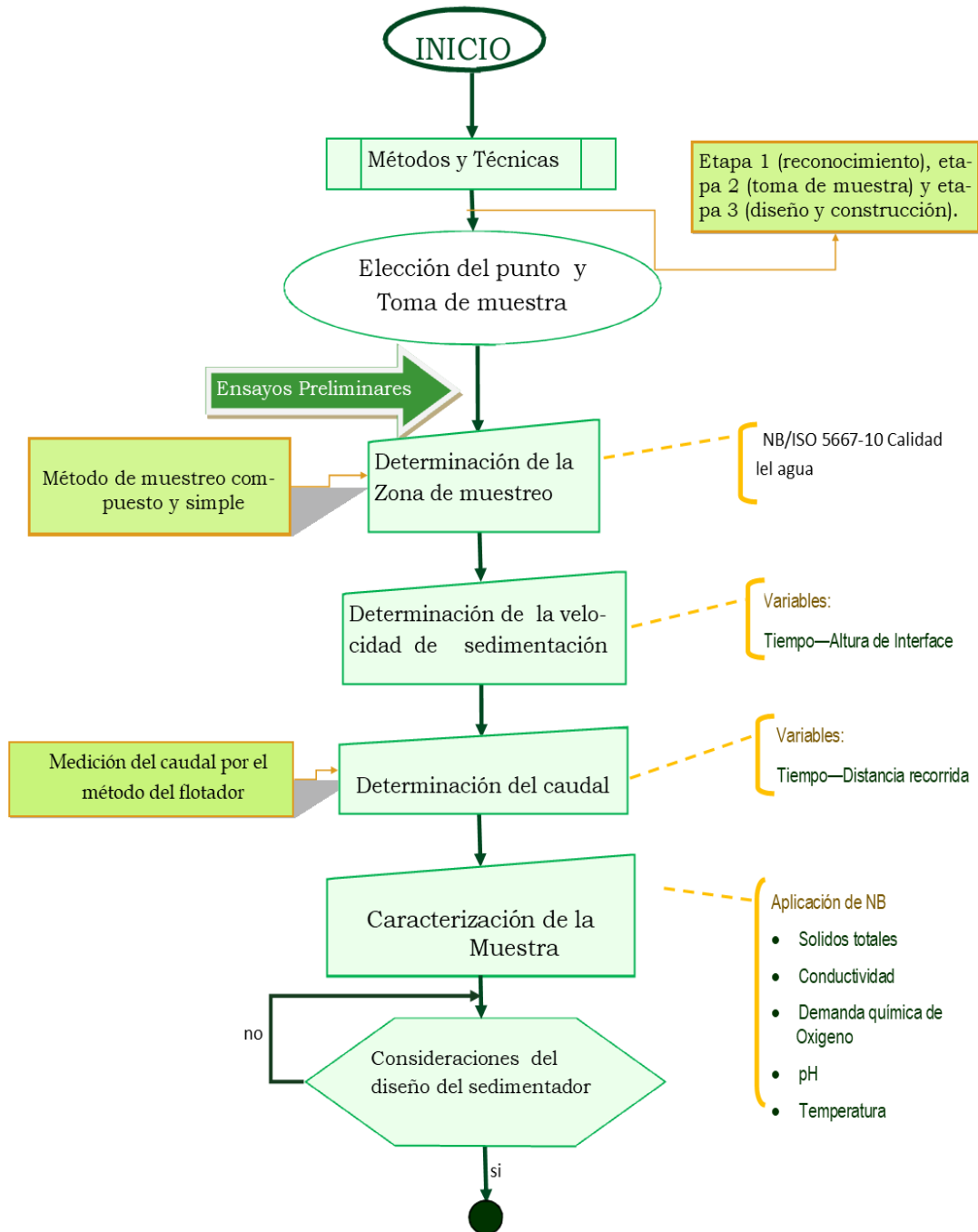
#### 4.1.3 ETAPA 3

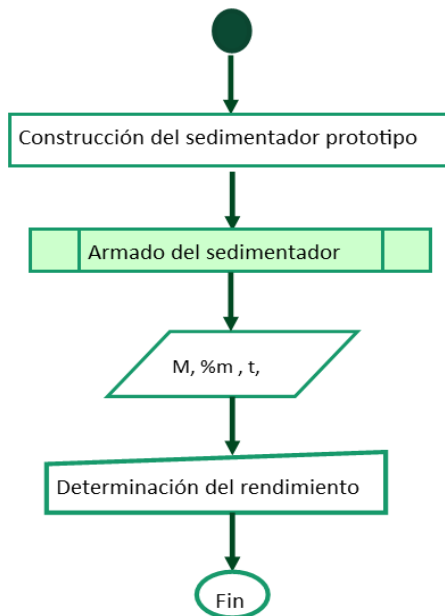
Esta inicia con ensayos de laboratorio para la caracterización de las descargas de agua y determinación de la velocidad de sedimentación, mediante métodos experimentales.



Posteriormente en base a los resultados obtenidos, se procede a diseñar el sedimentador según el conocimiento teórico práctico ingenieril. Finalizando con la construcción del prototipo de este sedimentador a escala laboratorio.

Figura 10. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DISEÑO DEL SEDIMENTADOR





Fuente: Elaboración propia

#### 4.2 EQUIPOS

Los equipos utilizados para los análisis fisicoquímicos, microbiológicos y el proceso de elaboración, se detallan en la siguiente tabla:

**Tabla 4.2. LISTA DE EQUIPOS UTILIZADOS**

EQUIPOS PARA EL ANÁLISIS FISICOQUÍMICO	EQUIPOS PARA LA DETERMINACION DE VELOCIDAD DE SEDIMENTACION	EQUIPOS PARA EL PROCESO DE PRUEBAS DEL RENDIMIENTO DEL PROTOTIPO
Balanza analítica	Balanza	Balanza de precisión
Conductímetro	Equipo cono Imhoff	Hornilla regulable
Densímetro	Estufa de secado regulada 105°C	Cronometro
Equipo Soxhlet	Microscopio	Estufa de Secado regulada
Equipo de filtrado al vacío	Probetas 1000 ml	
Espectrofotómetro UV/Visible	Probetas 100 ml	
Estufa de secado regulada 105°C	Tamices ASTM N° 70	
Mufla	Tamices ASTM N° 100	
pH metro		

Fuente: Elaboración Propia

### 4.3 PRUEBAS PRELIMINARES

#### 4.3.1 DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE MUESTREO

##### 4.3.1.1 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

La determinación del área se basó por el método de muestreo dirigido, ya que es un método para muestreos rápidos y de bajo presupuesto.

La selección de la localización de los puntos de muestreo se basa sólo en el conocimiento de la causa de la contaminación y su posible evolución, sin ninguna aleatoriedad.

**Figura 11. VISTA DEL ÁREA DE EXTRACCIÓN Y LAVADO DEL MINERAL**



Fuente: Google Earth

**Tabla 4.3. UBICACIÓN GPS DE LOS PUNTOS DE MUESTREO**

Ubicación Geográfica			
		GPS	ALTITUD
1	Punto P1	8170602 UTM	3588
2	Punto P2	8170598 UTM	3588
Ubicación Política			
1	Municipio de Palca, comunidad Ventilla		

Fuente: Elaboración propia





#### 4.3.1.2 TOMA DE MUESTRA

Se tomó una muestra simple; aquella muestra individual tomada en un corto período de forma que el tiempo empleado en su extracción sea el transcurrido para obtener el volumen necesario. Esta muestra se colectó en botellas de vidrio de 250 y 500 ml de capacidad aproximadamente, la cual se trasladó con todas las medidas necesarias según norma. Este tipo de muestra se destinó para los análisis de caracterización de la descarga.

**Figura 12. TOMA DE MUESTRA SIMPLE PARA LA CARACTERIZACION**



Fuente: Elaboración propia

En cambio, la muestra compuesta obtenida a lo largo del periodo del cronograma y que resulta del mezclado de varias muestras simples, se destinó para la determinación de parámetros requeridos para el diseño del sedimentador prototipo.

Para esta muestra se utiliza galones de PVC, de 5 y 20 litros de capacidad, para su almacenaje posterior.

**Figura 13. TOMA DE MUESTRA COMPUESTA**



Fuente: Elaboración propia



### 4.3.2 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

Para iniciar el diseño de un sedimentador, se requiere tener pleno conocimiento de la velocidad de sedimentación del agua a tratar.

Tenemos la determinación teórica de la velocidad de sedimentación, considerando condiciones ideales y tomando en cuenta la interacción de las fuerzas de empuje, rozamiento y la fuerza externa, dada por la siguiente ecuación (6) Ley de Newton de la sedimentación:

$$v_s = \sqrt{\frac{2g*(\rho_p - \rho_w)*V_p}{C_D*\rho_p*A}} \quad \text{Ecu. [6]}$$

Existen otros métodos numéricos para determinar la velocidad de sedimentación de manera experimental.

Los métodos experimentales para determinar la velocidad de sedimentación con el flujo estacionario sin tomar en cuenta la velocidad horizontal de la partícula.

**Tabla 4.4. MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN**

METODO	PRINCIPIO DEL METODO
<b>Método de Coe y Clevenger</b>	Este método es el más tradicional ensayo experimental, que se basa en columnas de sedimentación en estado estacionario y sometido a la fuerza gravitacional y la variación de tiempo.
<b>Método Velocidad de sedimentación por zonas</b>	El método se basa en los ensayos en columnas de sedimentación se pueden emplear para determinar la superficie necesaria para la zona de sedimentación libre, sin embargo, la velocidad de sedimentación zonal suele ser menor que la anterior, de modo que en raras



	<p>ocasiones la velocidad de sedimentación libre controla el proceso.</p> <p>Para la realización de este método se tomarán tres factores:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) superficie necesaria para la clarificación</li> <li>2) superficie necesaria para el espesado</li> <li>3) tasa de extracción del fango</li> </ol> <p>Se llena una columna a una altura <math>H_0</math> con una suspensión de sólidos de concentración uniforme <math>C_0</math>. Con el paso del tiempo, al ir sedimentando la suspensión, la interface se va desplazando hacia abajo. La velocidad de descenso de la interface se corresponde con la pendiente de la curva en cada instante de tiempo.</p>
<p><b>Método Stokes</b></p>	<p>El método se basa en la formula clásica de Stokes para partículas discretas, se propone establecer ese efecto que las interacciones de diferentes factores sobre la velocidad de sedimentación y obtener factores de corrección a las fórmulas clásicas de cálculo de la velocidad de caída que permitan resultados más aproximados. Mediante a la ayuda de software que ayudan al conteo de las partículas.</p>
<p><b>Métodos Experimental Sedimentación Zonal</b></p>	<p>El método se basa en obtener los parámetros para diseñar sedimentadores para partículas que presentan un tipo de sedimentación zonal.</p> <p><a href="http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/1795">http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/1795</a></p>

Fuente: Elaboración propia



Se tiene el conocimiento de velocidades de sedimentación de grava, arena arcilla y otros, hallados experimentalmente, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 4.5. VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN EXPERIMENTAL**

D (mm)	Clasificación	Velocidad de Sedimentación (mm/s)	Tiempo para sedimentar 0,3 m.
10,0	Grava	1000,00	0,3 seg.
1,0	Grava	100,00	3,0 seg.
0,1	Arena Gruesa	8,00	38 seg.
0,01	Arena Fina	0,154	33 min.
0,001	Bacterias	0,00154	35 horas
0,001	Coloides	0,0000154	230 días
0,0001	Coloides	0,000000154	63 años

Fuente: TEORÍA DE LA SEDIMENTACIÓN Ing. Luis E. Pérez Farrás, agosto 2005

Los ensayos de laboratorio realizado se basaron en 3 métodos de los 4 mencionados en el anterior acápite. Los métodos elegidos contemplan un enfoque real del proceso de sedimentación.

El tiempo que se invirtió en la realización de estas pruebas en un lapso de 10 días, en los previos del Instituto de Investigación IIDEPROC de perteneciente a la facultad de Ingeniería de la carrera de Ingeniería Química, Petroquímica, Ambiental y Alimentos.

El análisis de los ensayos de laboratorio se denota como: variable independiente el tiempo y como variable dependiente la altura clarificada de la probeta.

En el caso del método Stokes, se requirió datos experimentales registrados bibliográficos y determinación experimental en laboratorio como: la viscosidad, densidad, tamaño de los sedimentos y otros.

En este proceso se utilizaron los siguientes equipos:

Figura 14. TOMA DE MUESTRA COMPUESTA



Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.2.1 MÉTODO DE COE Y CLEVENGER

El sedimento es la materia que, después de haber estado en suspensión en un líquido, termina en el fondo por su mayor gravedad, en el proceso denominado sedimentación.

Con la finalidad de la medición de la velocidad de sedimentación como primera etapa en laboratorio, utilizando los métodos ya mencionados; considerando una temperatura constante ambiente por el tiempo de una hora, para cada prueba desarrollada.

**Figura 15. MONTAJE DEL SISTEMA DE SEDIMENTACIÓN**



Fuente: Elaboración propia

**4.3.2.1.1 VARIABLES**

En el proceso de sedimentación se estudiarán la interacción entre la altura desplazada expresada en centímetros (cm) y el tiempo en minutos (min), la variable respuesta será la velocidad de sedimentación. Se utilizarán tres métodos para el cálculo experimental de la velocidad de sedimentación, con la finalidad de obtener una velocidad de sedimentación promedio para desarrollar el diseño del sedimentador.

**Tabla 4.6. VARIABLES PARA EL PRIMER MÉTODO**

VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN				
Variables de Entrada		Símbolo	Unidad	
1	Altura desplazada	h	cm	cm <sup>3</sup>
2	Tiempo	t	mn	mn
Variables de Salida				
1	Velocidad de sedimentación			

Fuente: Elaboración propia



#### 4.3.2.2 MÉTODO VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN POR ZONAS

Para determinar la velocidad de sedimentación por zonas se traza tres rectas tangentes a la curva de sedimentación las cuales se debe separar en distintas gráficas y aplicar una recta ajustada y la pendiente de cuya ecuación será la velocidad de la fase en cuestión.

Una vez determinadas las ecuaciones de Velocidad de sedimentación, velocidad de interface y compresión, se volverá a realizar pruebas en 5 probetas con las mismas concentraciones al inicio y calculará la velocidad según altura de cada fase.

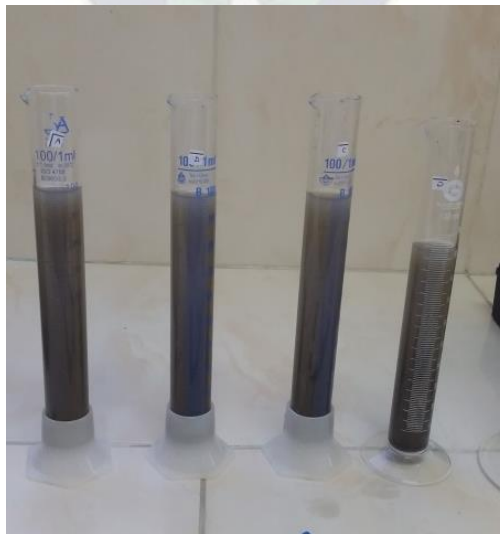
Ecuación de velocidad de sedimentación:

$$V_s = V_o * e^{-\pi C}$$

$$\ln V = \ln V_o - \pi C$$

$$V = 8,39e - 0,011C$$

Figura16. VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN POR ZONAS



Fuente: Elaboración propia



#### 4.3.2.2.1 VARIABLES

Los parámetros a examinar son la relación de altura de interface – Tiempo y cambios de concentración del agua, la variable respuesta será la relación de estos reproduciendo así la velocidad de sedimentación.

**Tabla 4.7. VARIABLES PARA EL SEGUNDO METODO**

PROCESO DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN			
Variables de Entrada		Símbolo	Unidad
1	Altura desplazada	h	cm
2	Tiempo	t	mn
Variables de Salida			
1	Velocidad de sedimentación		

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.2.3 MÉTODO STOKES

Este método es basado en la determinación de la velocidad de sedimentación teórica; nos basaremos en calcular la densidad, viscosidad y diámetro de las partículas de manera experimental y relacionar estos datos mediante la ecuación de Stokes.

La velocidad de sedimentación según Stokes está dada con la siguiente ecuación:

$$v_s = \sqrt{\frac{4g \times (\rho_p - \rho_{Agua}) \times D_p}{3C_D \times \rho_{Agua}}} \quad \text{Ecu. [6]}$$

Dónde:

$v_s$  : *velocidad de sedimentación*

$\rho_p$  : *Densidad de la partícula*

$D_p$ : *Diámetro de la partícula*

$C_D$ : *Coefficiente de arrastre*

$A_p$ : *Área de la partícula*

Experimentalmente se determinó los siguientes datos de la tabla 4.8:



Tabla 4.8. DATOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE Y CALCULADOS

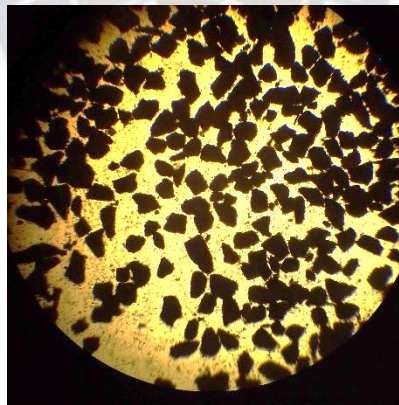
Concepto	Cantidad	Unidad
Densidad de la mezcla	1,3835	g/ml
Temperatura de la mezcla	15	°C
Ph de la Mezcla	6,88	
Viscosidad de la mezcla	2,333E-06	m <sup>2</sup> /s
Densidad del solido	1,36	g/cm <sup>3</sup>
Diámetro del solido	0,002	cm
Flujo de alimentación	27124,8131	cm <sup>3</sup> /s
Área	304,5	cm <sup>2</sup>
Velocidad del canal	89,079846	cm/s
Reynolds del caudal de alimentación	202214687	

Fuente: Elaboración propia

Considerando la forma de la partícula:

Se observó mediante el microscopio el tamaño y la forma de la partícula.

Figura 17. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LA PARTICULA



Fuente: Elaboración propia

El porcentaje de composición del lodo según el ensayo realizado de granulometría, se obtuvo un 77% de limo y arcilla. Se asumirá un diámetro de 0.002 cm de la partícula.

Según la guía para el diseño sedimentadores de la organización panamericana de la salud la velocidad de sedimentación está dada por la siguiente ecuación 23:



$$v_s = \frac{g \times (\rho_p - 1) \times D_s^2}{18 \times \eta} \quad \text{Ecu. [23]}$$

$$v_s = \frac{981 \times (1,36 - 1) \times 0,002}{18 \times 1,1457 \times 10^{-2}} = 6,85 \times 10^{-3}$$

$$Re = \frac{D_s \times v_s}{\eta} \quad \text{Ecu. [4]}$$

Reemplazando datos en la ecuación (2) el resultado del número de Reynolds “Re” = 0.00119, siendo un valor menor a 0.5 se encuentra en la zona de la Ley de Stokes.

El coeficiente de arrastre  $C_d$  está en función del número de Reynolds.

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad \text{Ecu. [24]}$$

$$C_D = \frac{24}{0,00119} = 20168,1$$

#### 4.3.2.3.1 VARIABLES

Las variables de estudio son: la velocidad de sedimentación expresada en centímetros por minuto.

**Tabla 4.9. VARIABLES PARA EL TERCER METODO**

PROCESO DE DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN			
Variables de Entrada			
		Unidad	
1	Densidad	[g/cm <sup>3</sup> ]	1.36
2	Viscosidad	[cm/s]	2,333E-06
Variables de Salida			
1	Velocidad de sedimentación [cm/s]		

Fuente: Elaboración propia



$$v_s = \sqrt{\frac{4g \times (\rho_p - \rho_{Agua}) \times D_p}{3C_D \times \rho_{Agua}}}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{4 \times 981(1,36-1) \times 0,002}{3 \times 20168,1 \times 1}} = 0,0068$$

De los cuatro métodos mencionados para determinar la velocidad de sedimentación, se realizaron tres métodos: método Coe y Clevenger, Método Velocidad de Sedimentación por Zonas y Método Stokes. El método Experimental Sedimentación Zonal, no se realizó por la falta del equipo.

Con la determinación de la velocidad de sedimentación se procederá con los cálculos correspondientes del dimensionamiento del sedimentador y la posterior construcción.

#### 4.3.3 CURVAS DE SEDIMENTACIÓN

Para el método Coe y Clevenger y el método por zonas se basa en la misma hermenéutica a desarrollar en el laboratorio. Proceso por el cual se obtuvieron las siguientes gráficas altura de la interface de la probeta versus tiempo transcurrido.

**Tabla 4.10. PRUEBAS DE SEDIMENTACION**

PROBETA GRADUADA						
Volumen [ml] = 500						
N°	Altura Recorrida [cm]	Tiempo [mn]	Volumen [ml]	Tiempo [mn]	Diametro [cm]	Altura [cm]
1	32	0	500	0	5	25,4647
2	31	1	490	1	5	24,9554
3	30,5	2	485	2	5	24,7008
4	30,2	3	480	3	5	24,4461
5	30	4	475	4	5	24,1915
6	29,5	5	460	5	5	23,4276
7	28,5	6	450	6	5	22,9183
8	28	7	440	7	5	22,4090

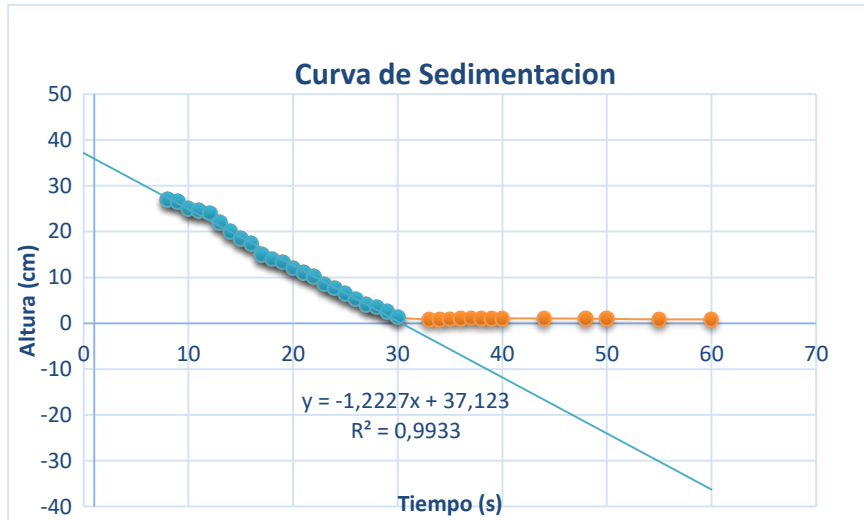


9	27	8	430	8	5	21,8997
10	26,5	9	420	9	5	21,3904
11	25	10	400	10	5	20,3718
12	24,5	11	390	11	5	19,8625
13	24	12	380	12	5	19,3532
14	22	13	360	13	5	18,3346
15	20	14	320	14	5	16,2974
16	18,5	15	290	15	5	14,7695
17	17,3	16	270	16	5	13,7510
18	15	17	240	17	5	12,2231
19	14	18	210	18	5	10,6952
20	13,3	19	200	19	5	10,1859
21	12	20	170	20	5	8,6580
22	11	21	165	21	5	8,4034
23	10,2	22	150	22	5	7,6394
24	8,5	23	130	23	5	6,6208
25	7,6	24	110	24	5	5,6022
26	6,5	25	90	25	5	4,5837
27	5,3	26	75	26	5	3,8197
28	4	27	60	27	5	3,0558
29	3,5	28	40	28	5	2,0372
30	2,5	29	20	29	5	1,0186
31	1,3	30	18	30	5	0,9167
32	0,8	31	17,5	31	5	0,8913
33	0,8	33	17	32	5	0,8658
34	0,9	34	16,6	33	5	0,8454
35	1	35	16,5	34	5	0,8403
36	1,1	36	16	35	5	0,8149
37	1,05	37	15,8	36	5	0,8047
38	1,03	38	15,5	37	5	0,7894
39	1,05	39	15,2	38	5	0,7741
40	1,05	40	15	39	5	0,7639
41	1	44	14,8	40	5	0,7538
42	0,95	50	14,5	41	5	0,7385
43	0,85	55	14,5	42	5	0,7385
44	0,85	60	14	43	5	0,7130

*Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio del Instituto de investigación IIDEPROC de la facultad de Ingeniería Química. Elaboración propia*



Gráfico 4. ALTURA (cm) vs. TIEMPO (mn)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.11. PRUEBAS DE SEDIMENTACION

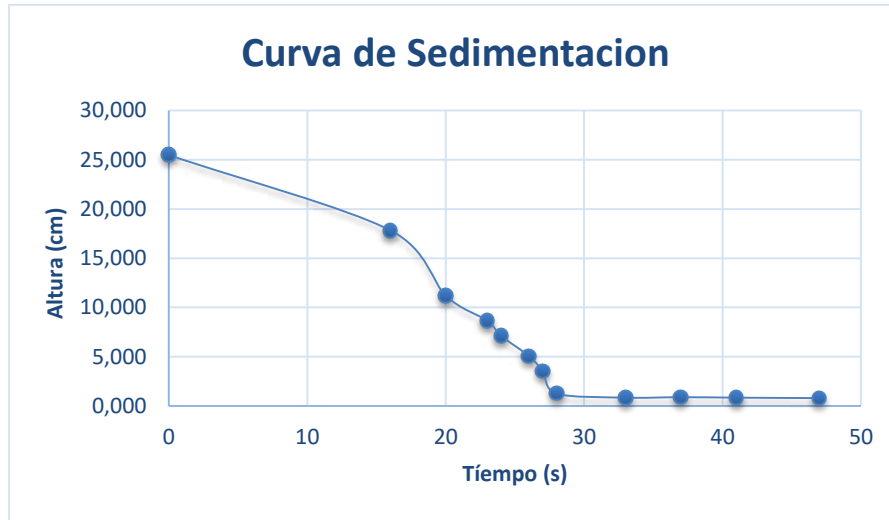
Probeta Graduada					
Volumen [ml]		500			
Nº	Tiempo [mn]	Volumen desplazado [ml]	Diámetro [cm]	Altura desplazada h [cm]	Tiempo [mn]
1	0	500	5	25,46	0
2	16	350	5	17,83	16
3	20	220	5	11,20	20
4	23	170	5	8,66	23
5	24	140	5	7,13	24
6	26	100	5	5,09	26
7	27	70	5	3,57	27
8	28	25	5	1,27	28
9	33	0,85	5	0,85	33
10	37	0,9	5	0,9	37
11	41	0,85	5	0,85	41
12	47	0,8	5	0,8	47
13	60	0,8	5	0,8	60
14	79	0,9	5	0,9	79

Fuente: Datos experimentales obtenidos en el laboratorio del Instituto de investigación IIDEPROC de la facultad de Ingeniería Química.

Elaboración propia



Gráfico 5. ALTURA (cm) vs. TIEMPO (mn)



Fuente: Elaboración propia

Las pruebas con el cono Imhoff se realizaron solo para observar el comportamiento de volumen sedimentado en el transcurso del tiempo.

Tabla 4.12. PRUEBAS DE SEDIMENTACION

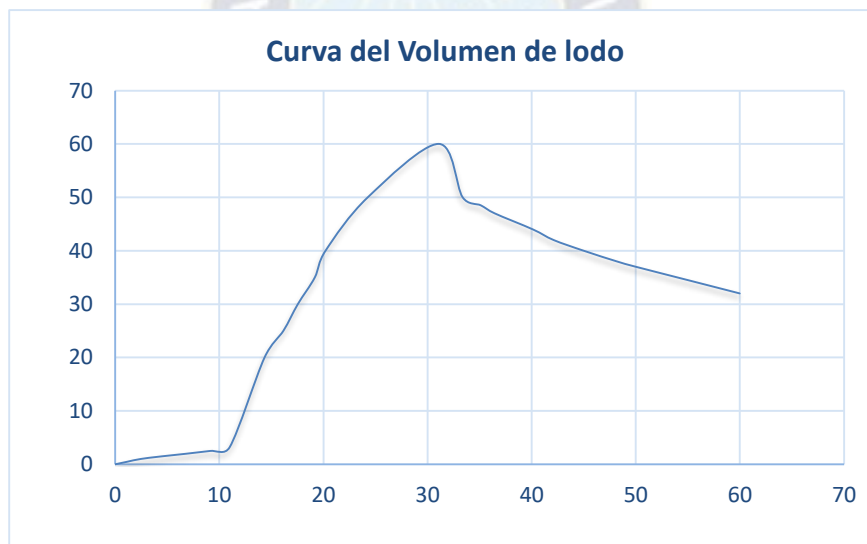
Tiempo Total [mn]=		60		
Volumen Total [ml] =		1000		
Nº	Tiempo [mn]	Volumen del Sedimentación [ml]	Diámetro [cm]	Altura desplazada h [cm]
1	0	0	5	0,00
2	1,2	0,5	5	0,03
3	2,45	1	5	0,05
4	4,5	1,5	5	0,08
5	9,12	2,5	5	0,13
6	11	3,2	5	0,16
7	14,35	20	5	1,02
8	16,16	25	5	1,27
9	17,55	30	5	1,53
10	19,18	35	5	1,78
11	20,21	40	5	2,04
12	24,27	50	5	2,55



13	31,07	60	5	3,06
14	33,38	50	5	2,55
15	35,12	48,5	5	2,47
16	36,45	47	5	2,39
17	40,11	44	5	2,24
18	42,12	42	5	2,14
19	45	40	5	2,04
20	48,18	38	5	1,94
21	50	37	5	1,88
22	55	34,5	5	1,76
23	60	32	5	1,63

*Fuente: Datos experimentales de sedimentación en cono Imhoff obtenidos en el laboratorio del Instituto de investigación IIDEPROC de la facultad de Ingeniería Química. Elaboración propia*

**Gráfico 6. VOLUMEN (cm<sup>3</sup>) vs. TIEMPO (mn)**



Fuente: Elaboración propia

#### 4.4 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL

El caudal en un tiempo dado puede medirse por varios métodos diferentes y la elección del método depende de las condiciones de cada sitio.

- Medición del caudal con molinete hidrométrico



- Medición del caudal por el método del flotador
- Medición del caudal por el método de dilución
- Medición del nivel correspondiente
- Medición del caudal en condiciones difíciles
- Métodos no tradicionales de medición del caudal

El método del flotador fue elegido por las características del punto de toma de muestra, esta área de toma de muestra está ubicada al borde del río, siendo un canal antropogénico con un tirante hídrico de 7 centímetros y un ancho de 40 centímetros aproximadamente. La topografía del área hace imposible utilizar otro tipo de método, debido a la poca profundidad del tirante hídrico.

#### ✓ Flotadores

Se pueden utilizar flotadores de superficie o de varilla. Los Botadores de superficie deben sumergirse a una profundidad inferior a la cuarta parte de la profundidad del agua. No se deberán emplear cuando se teme que la medición pueda ser afectada por el viento. Este método se utiliza cuando no se dispone de equipos de medición o cuando la sección de aforo no cumple con las condiciones necesarias para hacer uso del Molinete. Para medir la velocidad superficial del agua se usa un flotador, este flotador se desliza por una sección previamente medida, lo más homogénea posible.

Determinando el tiempo que tomará en recorrer una distancia determinada, aplicando la ecuación 3 y 4. Se puede utilizar como flotador, un pequeño pedazo de madera, corcho, una pequeña botella lastrada; en este caso se utilizó una pelota de caucho pequeña (Coello, 2016).

Ecuación 3: Caudal: método del flotador

$$Q = C.A. V$$

Ecuación 4: Velocidad: método volumétrico

$$V = \frac{e}{t}$$

Dónde:





*C*: Factor de corrección

*V*: Velocidad (m / s)

*e*: Espacio recorrido por el flotador (m)

*t*: Tiempo de recorrido del espacio «e» por el flotador (s)

*A*: Área de la sección transversal (m<sup>2</sup>)

*Q*: Caudal (lt/s)

**Tabla 0.13. FACTOR DE CORRECCIÓN DEL CAUDAL, DE ACUERDO AL TIPO DE ARROYO.**

Tipos de Arroyo	Factor de Corrección de Velocidad ( C )	Precisión
Canal rectangular con lados y lechos lisos	0.85	Buena
Río profundo y lento	0.75	Razonable
Arroyo pequeño de lecho parejo y liso	0.65	Mala
Arroyo rápido y turbulento	0.45	Muy Mala
Arroyo muy poco profundo De lecho rocoso	0.25	Muy Mala

*Fuente: Caracterización Hidrológica Del Macro Deslizamiento Guarumales (Cordero Mera & Peñafiel Martínez , 2017)*

El factor de corrección utilizado es el de arroyo de lecho parejo y liso de 0.65 que refleja una no adecuada precisión.

**Figura 18. PUNTO DE MUESTREO**



Fuente: Elaboración propia



Los datos obtenidos durante el muestreo son reflejados en las siguientes tablas:

**Tabla 4.14. PRUEBAS DE CAUDAL**

N°	Distancia Recorrida [cm]	Tiempo[s]	Área Canal [cm <sup>2</sup> ]	Caudal [cm <sup>3</sup> /s]	Caudal [m <sup>3</sup> /s]
1	250	3	304,5	16493,75	0,01649375
2	250	3,2	304,5	15462,89063	0,01546289
3	250	3	304,5	16493,75	0,01649375
4	250	2,8	304,5	17671,875	0,01767188
5	250	2,84	304,5	17422,97535	0,01742298
6	250	2,72	304,5	18191,63603	0,01819164
7	250	2,5	304,5	19792,5	0,0197925
8	250	2,64	304,5	18742,89773	0,0187429
9	250	2,8	304,5	17671,875	0,01767188
10	250	2,7	304,5	18326,38889	0,01832639
11	250	2,8	304,5	17671,875	0,01767188
Promedio	250	2,818181818		17631,12851	0,01763113

*Fuente: Datos experimentales de caudal mediante el método de flotación del día 1.  
Elaboración propia*

**Tabla 4.15. PRUEBAS DE CAUDAL**

N°	Distancia Recorrida [cm]	Tiempo[s]	Área Canal [cm <sup>2</sup> ]	Caudal [cm <sup>3</sup> /s]	Caudal [m <sup>3</sup> /s]
1	250	3,1	304,5	15961,693	0,01596169
2	250	3,5	304,5	14137,5	0,0141375
3	250	2,9	304,5	17062,5	0,0170625
4	250	3	304,5	16493,75	0,01649375
5	250	3,2	304,5	15462,890	0,01546289
6	250	3,5	304,5	14137,5	0,0141375
7	250	2,7	304,5	18326,388	0,01832639
8	250	2,9	304,5	17062,5	0,0170625
9	250	3,1	304,5	15961,693	0,01596169
10	250	2,7	304,5	18326,388	0,01832639
11	250	3,3	304,5	14994,318	0,01499432
Promedio	250	3,081818182		16175,193	0,01617519

*Fuente: Datos experimentales de caudal mediante el método de flotación del día 2 de muestreo. Elaboración propia*

## 4.5 CARACTERIZACIÓN DE LA DESCARGA

### 4.5.1 DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES

Prosiguiendo con las indicaciones de la norma mexicana NMX-AA-004-1977 Colocar la muestra bien mezclada en un cono Imhoff hasta la marca de 1 L. Dejar sedimentar 45 min, una vez transcurrido este tiempo agitar suavemente los lados del cono con un agitador o mediante rotación, mantener en reposo 15 min más y registrar el volumen de sólidos sedimentables del cono como mL/L. Si la materia sedimentable contiene bolsas de líquido y/o burbujas de aire entre partículas gruesas, evaluar el volumen de aquellas y restar del volumen de sólidos sedimentados.

En caso de producirse una separación de materiales sedimentables y flotables, no deben valorarse estos últimos como material sedimentable.

El resultado de esta prueba fue de 32 mililitros de sólido sedimentable en relación a 1 litro de la solución inicial antes de la sedimentación.

**Figura 19. VISTA DEL CANO IMHOFF CON EL SÓLIDO SEDIMENTABLE**



Fuente: Elaboración propia

La cantidad de sólido total se determinó mediante al uso de capsulas sometidas a la estufa de secado. Obteniendo la siguiente tabla 4.16.

Figura 20. VISTA DEL CANO IMHOFF CON EL SOLIDO SEDIMENTABLE



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.16. PRUEBAS DE SÓLIDOS TOTALES

Volumen [ml]	50		
Temperatura[ °C]	105		
Tiempo [mn]	120		
N° de muestra	Peso de Capsula vacía[g]	Peso Capsula con la muestra [g]	Peso de la muestra [g]
1	47,635	47,9928	0,3577
2	49,722	50,0637	0,3417
3	58,165	58,5168	0,3514
4	57,601	57,9019	0,3008
5	48,52	48,876	0,356

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5.2 DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES

Para la determinación de los sólidos volátiles se define como la materia que se obtiene como residuo después de someter al agua residual a un proceso de evaporación a una temperatura entre 500 °C en la mufla.

En el proceso de evaporación se pierden los sólidos que tengan una baja presión de vapor.

**Figura 21. DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES**

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.5.3 DETERMINACIÓN DE ACIDEZ “pH”

El potencial de hidrógeno o pH, es la medida de la cantidad de iones hidrogeno que se encuentran en una solución o sustancia.

Se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones H<sup>+</sup> en agua.

La determinación se logró mediante el papel ph y los equipos de lectura directa del potencial de hidrogeno.

**Figura 22. DETERMINACIÓN DEL pH**

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 4.17. PRUEBAS DE pH**

N°	Etiqueta	Cantidad [cm <sup>2</sup> ]	pH
1	M1	200	7,73
2	M2	200	7,84
3	M3	200	8,01
4	M4	200	8,04
5	M5	200	8,23

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.5.4 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

La determinación de la densidad de la solución se realizó mediante el método del picnómetro. Para determinar la densidad de un líquido con el del picnómetro, solamente se necesita la masa del mismo en tres situaciones diferentes. Todas las masas deben determinarse en balanza analítica y con la tapa.

**Figura 23. DETERMINACIÓN DE DENSIDAD**

*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 4.18. PRUEBAS DETERMINACION DE DENSIDAD

N°	Peso del Picnómetro vacío [g]	Peso de Picnómetro con la muestra [g]	Volumen del picnómetro[ml]	N° de Muestra	Masa [g]	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]
1	14,7378	21,6789	5	ML2	6,9411	1,38822
2	14,0557	21,0324	5	ML3	6,9767	1,39534
3	14,8347	21,6738	5	ML1	6,8391	1,36782
4	14,1186	21,0369	5	ML4	6,9183	1,38366
5	14.8298	21.6791	5	ML5	6,8493	1,36986
6	14,7474	21,6603	5	ML6	6,9129	1,38258

*Fuente: Datos experimentales de densidad de la muestra obtenidos en el laboratorio del Instituto de investigación IIDEPROC de la facultad de Ingeniería Química. Elaboración propia*

#### 4.5.5 DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD

La viscosidad de la muestra se determinó utilizando el viscosímetro de Ostwald, en los previos del laboratorio de Ingeniería Química.

El viscosímetro empleado se basa en la ley de Poiseuille para la determinación de la viscosidad de un fluido. Calculando los tiempos que tardan en recorrer una determinada distancia en el viscosímetro dos líquidos diferentes, el líquido problema y un líquido de referencia, y conociendo las densidades de dichos líquidos, así como la viscosidad del líquido de referencia es posible determinar la viscosidad del líquido problema.

Figura 24. DETERMINACIÓN DE VISCOSIDAD



*Fuente: Elaboración propia*



Tabla 4.19. DETERMINACION DE LA VISCOSIDAD

Muestra	N°	T [°C]	Tiempo de la muestra [s]	Tiempo de agua [s]	Viscosidad cinemática [m/s <sup>2</sup> ]	Viscosidad [Ns/m <sup>2</sup> ]	pH
M1	1	19	6,16	3,49	3,4462E-06	3,422E-06	6,81
	2	19	5,96	3,52	3,3059E-06	3,282E-06	
	3	19	6,02	3,44	3,4169E-06	3,393E-06	
	4	19	5,112	4,05	2,4645E-06	2,447E-06	
	5	19	4,82	4,03	2,3352E-06	2,319E-06	
M2	1	19	4,16	3,55	2,288E-06	2,272E-06	7,03
	2	19	4,25	4,06	2,0439E-06	2,029E-06	
	3	19	4,56	4,04	2,2038E-06	2,188E-06	
	4	19	3,63	4,01	1,7675E-06	1,755E-06	
	5	19	4,28	3,47	2,4083E-06	2,391E-06	
M3	1	19	4,16	3,49	2,3273E-06	2,311E-06	6,93
	2	19	4,25	3,52	2,3574E-06	2,341E-06	
	3	19	3,9	3,44	2,2136E-06	2,198E-06	
	4	19	4,04	4,05	1,9477E-06	1,934E-06	
	5	19	3,98	4,03	1,9283E-06	1,915E-06	
M4	1	19	4,27	3,55	2,3485E-06	2,332E-06	6,79
	2	19	5,54	4,06	2,6642E-06	2,645E-06	
	3	19	5,02	4,04	2,4261E-06	2,409E-06	
	4	19	3,49	4,01	1,6993E-06	1,687E-06	
	5	19	4,05	3,47	2,2788E-06	2,263E-06	
M5	1	19	4,03	3,49	2,2546E-06	2,239E-06	6,86
	2	19	4,09	3,52	2,2687E-06	2,253E-06	
	3	19	3,89	3,44	2,2079E-06	2,192E-06	
	4	19	3,59	4,05	1,7307E-06	1,718E-06	
	5	19	4,1	4,03	1,9864E-06	1,972E-06	

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5.6 DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DE LA MUESTRA

El análisis granulométrico se realiza mediante el tamizado de la muestra. Este permite conocer el tamaño de las diferentes partículas que componen el sedimento a analizar. El análisis por tamizado forma parte de los métodos mecánicos para conocer la granulometría. Se utilizó tamices ASTM.



**Figura 25. DETERMINACIÓN GRANULOMETRICA**

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 4.20. DETERMINACION DE LA COMPOSICION PORCENTUAL DEL SOLIDO**

Concepto	% De Composición
Arena gruesa	12,3366
Arena fina	10,7089
Limo y Arcilla	76,9545

*Fuente: Elaboración propia*

La composición mayoritaria del solido es limo y arcilla con el 77%, por tanto, se puede afirmar que el lodo está compuesto de un suelo limo arcilloso y se adoptara como promedio de diámetro del solido el intermedio del diámetro del limo y arcilla de 0.002 centímetros.

#### 4.6 DISEÑO DEL SEDIMENTADOR

Para el diseño, dimensionamiento y construcción del sedimentador prototipo, se efectuaron una serie de pasos para verificar si se cumplía con los criterios de diseño de la literatura empleada. A continuación, se presentan los pasos empleados, para el diseño y posterior construcción del sedimentador.

El proceso básicamente se trata de tres subprocesos los cuales consisten en el cálculo de las dimensiones del sedimentador, el escalamiento geométrico y cinético del sedimentador, y construcción del mismo.



Para el dimensionamiento del sedimentador de baso en dos métodos: Método de Talmage And Fitch y Método Fair, Geyer y Okum.

El escalamiento del sedimentador se basa en el caudal de alimentación del sedimentador, que corresponde al caudal del punto de muestreo.

La construcción del sedimentador se realizó con hierro galvanizado, material elegido por su maleabilidad adecuada para construir un sedimentador de pequeñas dimensiones.

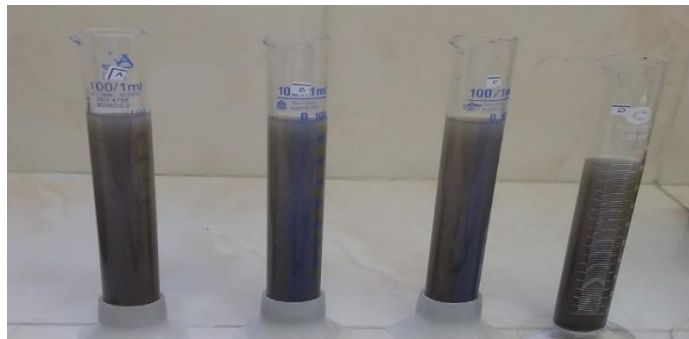
#### 4.6.1 MÉTODO DE TALMAGE Y FITCH

Según el método, por los extremos se deben trazar dos rectas, éstas forman un ángulo entre ellas al que se le debe trazar una bisectriz, cuya bisectriz a su vez corta la curva en un punto. En este punto se debe trazar una tangente que intercepte a una paralela al eje del tiempo, trazada a la altura que se desea esté la capa de sólido. Si la altura está por encima del punto de intersección de la bisectriz con la curva, el cálculo se realizaría encontrando la intersección de la paralela con la curva, de lo contrario se usa la intersección con la paralela. (Peña Abreu & Sam Palanco, 2007)

Este metodo relaciona las zonas de sedimentacion frenada , zona de sedimentacion y zona de compresion estudiadas. Una solucion comienza con una sedimentacion floclulenta y a medida que pasa el tiempo se torna en sedimentacion por compresion. El metodo Talmage And Fitch nos permite relacionar estos tipos de sediementacion y realizar un diseño mas acertado a nuestros requerimientos.

Las características que se necesitan conocer de la muestra de estudio se reflejan en la siguiente tabla 4.21.

**Figura 26. PRUEBAS DE SEDIMENTACION**



Fuente: Elaboración propia



Tabla 4.21. CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA

DATOS INICIALES	CANTIDAD	UNIDAD
Volumen de la mezcla	500	ml
Densidad de la mezcla	1,3835	g/ml
Temperatura de la mezcla	15	°C
pH de la Mezcla	6,88	-
Viscosidad de la mezcla	2,3E-06	Ns/m <sup>2</sup>
Masa del solido	3,38	g
Densidad del solido	1,36	g/cm <sup>3</sup>
Diámetro del solido	0,002	cm
Composición Porcentual	0,48	%
Flujo de alimentación	27124,8	cm <sup>3</sup> /s
Velocidad terminal exp.	0,813	cm/d

*Fuente: Elaboración propia*

Determinación del porcentaje de solido al inicio de la sedimentación:

$$m_M = V_M \times \rho_M \quad \text{Ecu. [25]}$$

A partir de la ecuación (25), se determinó la masa total de la muestra que existe en 500 ml:

$$m_M = 500 \text{ [ml]} \times 1,3835 \left[ \frac{\text{g}}{\text{ml}} \right] = 691,75 \text{ [g]}$$

Se calcula la cantidad en gramos de solido en la muestra:

$$m_{SS} = m_M - m_{\text{Agua}} = 3.3757 \text{ [g]}$$

$$V_{SS} = \frac{m_{SS}}{\rho_{SS}}$$

$$V_{SS} = 3,3757 \text{ [g]} \times \frac{1 \text{ [ml]}}{1,36 \text{ [g]}} = 2,48 \text{ [ml]}$$

$$V_{\text{Agua}} = V_{\text{Probeta}} - V_{\text{Sólido}}$$

$$V_{\text{Agua}} = 500 \text{ [ml]} - 2,48 \text{ [ml]} = 497,52 \text{ [ml]}$$



Porcentaje del solido en la solución:

$$m_{Total} = m_{SS} + m_{Agua}$$

$$m_{Total} = 3,376 [g] + 497,52[g] = 500,89[g]$$

$$\% = \frac{m_{SS}}{m_{Total}} \times 100\%$$

$$\%_{SS} = \frac{3,376}{500,89} \times 100\%$$

$$\% = \frac{3,376[g]}{500,89[g]} \times 100\% = 0,67$$

Calculo de la densidad del lodo:

---

**DATOS EXPERIMENTALES**

---

Volumen del cono Inhoff 1000 [ml]

Volumen del Lodo 32 [ml]

---

**Figura 27. PRUEBAS DE SEDIMENTACION EN EL COMO INHOFF**



Fuente: Elaboración propia



$$m_M = 1000 \text{ [ml]} \times \frac{1,3835 \text{ [g]}}{1 \text{ [ml]}} = 1383,5 \text{ [g]}$$

$$m_{SS} = m_M \times \%_{SS}$$

$$m_{SS} = 1383,5 \text{ [g]} \times 0,67\% = 9,26 \text{ [g]}$$

$$m_{Total} = m_{SS} + m_{Agua}$$

$$m_{Agua} = 1383,5 \text{ [g]} - 9,26 \text{ [g]} = 1374,24 \text{ [g]}$$

$$V_{Agua} = V_{Lodo} - V_{Solido}$$

$$V_{Agua} = 32 \text{ [ml]} - 5,10 \text{ [ml]} = 26,9 \text{ [ml]}$$

$$\rho_{Lodo} = \frac{m_{Lodo}}{V_{Lodo}}$$

$$\rho_{Lodo} = \frac{26,9 \text{ [g]} + 6,92 \text{ [g]}}{32 \text{ [ml]}} = 1,057 \left[ \frac{\text{g}}{\text{ml}} \right]$$

Calculo de la concentración de la solución inicial y concentración del lodo:

$$[C_o] = \frac{m_{SS}}{V_{Cono}} \quad \text{Ecu. [26]}$$

$$[C_o] = \frac{6,92 \text{ [g]}}{1000 \text{ [ml]}} = 0,00692 \left[ \frac{\text{g}}{\text{ml}} \right]$$

$$[C_{Lodo}] = \frac{m_{SS}}{V_{Lodo}}$$

$$[C_{Lodo}] = \frac{6,92 \text{ [g]}}{32 \text{ [ml]}} = 0,216 \left[ \frac{\text{g}}{\text{ml}} \right]$$



Determinación de la altura de lodo:

$$H_u = \frac{H_o \times C_o}{C_u} \quad \text{Ecu. [27]}$$

$$H_u = \frac{32[cm] \times 6,75 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]}{210 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]} = 0,99[cm]$$

La altura teórica resulto 0.99 centímetros y la altura experimental medido fue de 0.75 centímetros.

Determinación de concentraciones intermedias dentro del rango de concentración inicial y final. Variación de concentración para 100 g totales:

Si de asume masa del solido igual a:  $m_{SS} = 0,70[g]$

$$V_{SS} = 0,70 [g] \times \frac{1[ml]}{1,36[g]} = 0,514[ml]$$

$$V_{Total} = V_{Agua} - V_{Sólido}$$

$$[C_2] = \frac{m_{SS}}{V_{Agua} + V_{SS}}$$

$$[C_2] = \frac{0,70[g]}{99,814[ml]} = 7,013 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

Si de asume masa del solido igual a:  $m_{SS} = 0,75[g]$

$$V_{SS} = 0,75 [g] \times \frac{1[ml]}{1,36[g]} = 0,551[ml]$$



$$V_{Total} = V_{Agua} - V_{Solido}$$

$$[C_3] = \frac{m_{SS}}{V_{Agua} + V_{SS}}$$

$$[C_2] = \frac{0,75[g]}{99,80[ml]} = 7,51 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

Si se asume masa del solido igual a:  $m_{SS} = 0,80 [g]$

$$V_{SS} = 0,80 [g] \times \frac{1[ml]}{1,36[g]} = 0,59[ml]$$

$$V_{Total} = V_{Agua} - V_{Solido}$$

$$[C_3] = \frac{0,80[g]}{98,61 [ml]} = 8,11 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

Se realizó este proceso para una composición en masa de 5%, 10%, 15% y 20% el cual se registra en la tabla 4.22.

$$H_1 = \frac{H_o \times C_o}{C_1}$$

$$[H_1] = \frac{32[cm] \times 6,75 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]}{6,71 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]} = 32,18[cm]$$

Determinación de las alturas del lodo, para cada concentración C1, C2, C3, etc.

$$H_2 = \frac{H_o \times C_o}{C_2}$$

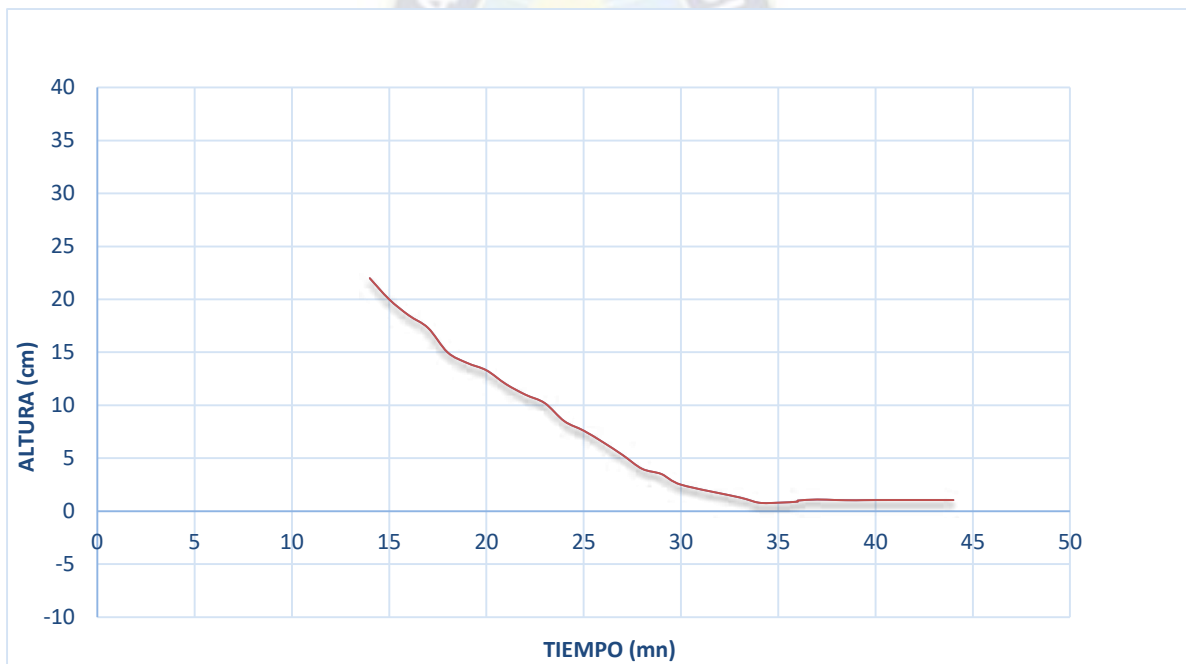


$$H_3 = \frac{H_o \times C_o}{C_3}$$

$$H_4 = \frac{H_o \times C_o}{C_4}$$

Trazado de la gráfica de la curva de velocidad de sedimentación y las rectas tangentes de Talmage y Fitch.

**Gráfico 7. CURVA DE SEDIMENTACIÓN**

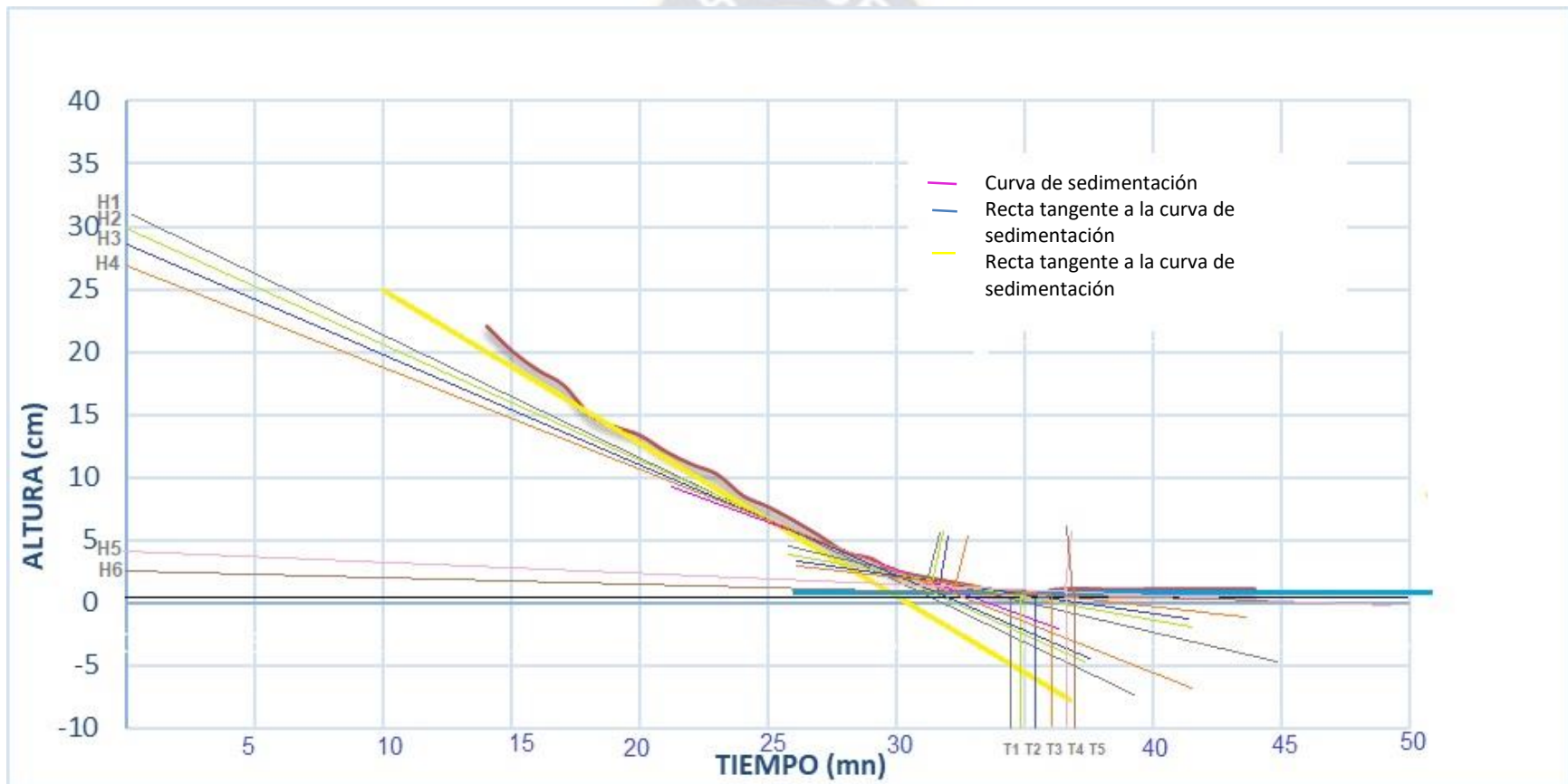


Fuente: Elaboración propia

Con los datos experimentales y teóricos obtenidos se realizará el grafico del método.



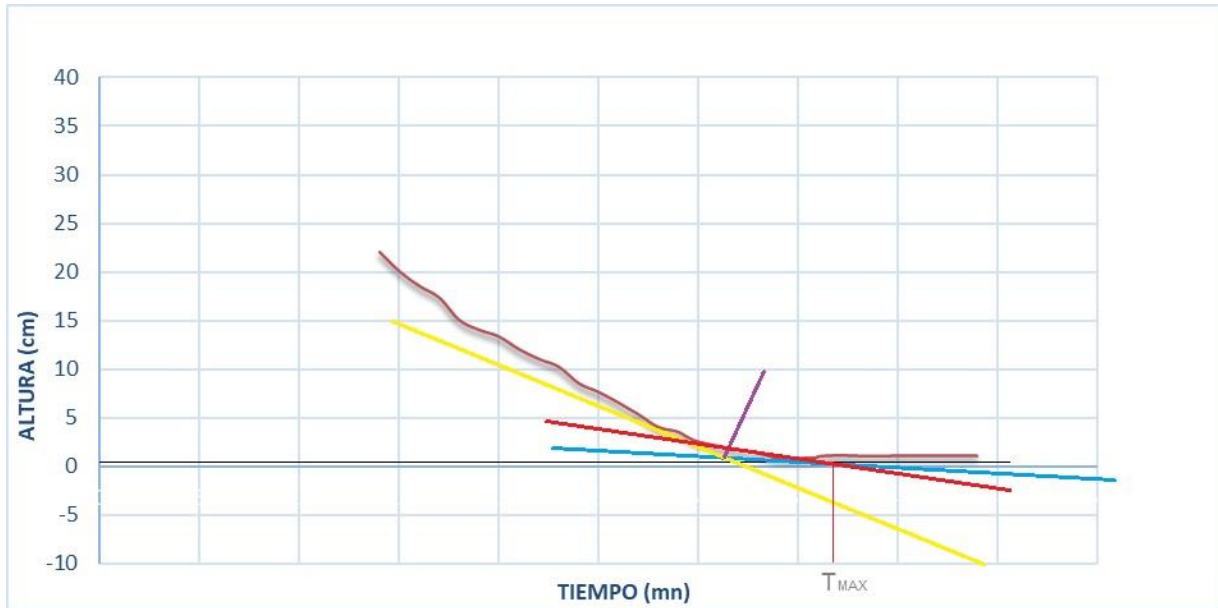
Gráfico 8. CURVA DE SEDIMENTACIÓN JUNTO A LAS RECTAS TANGENTES



Fuente: Elaboración propia



**Gráfico 9. CURVA DE SEDIMENTACIÓN Y LAS RECTAS TANGENTES PARA DETERMINAR  $T_{MAX}$**



Fuente: Elaboración propia

Al variar así la cantidad de masa de sólido asumiendo 100 g de la mezcla total másica generamos la siguiente tabla 4.22:

**Tabla 4.22. CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA**

Masa de Sólido %	Masa de agua	Volumen del sólido	Volumen total	Concentración	Altura H	Lectura de Tiempo de la grafica
0,67	99,33	0,4926471	99,8226	0,00671	6,7119	32,1816
0,7	99,3	0,5147059	99,8147	0,00701	7,01299	30,8
0,75	99,25	0,5514706	99,8015	0,00751	7,51492	28,7428
0,8	99,2	0,5882353	99,7882	0,00802	8,01698	26,9428
5	95	3,6764706	98,6765	0,05067	50,6706	4,26282
10	90	7,3529412	97,3529	0,10272	102,719	2,10282
15	85	11,029412	96,0294	0,1562	156,202	1,38282
20	80	14,705882	94,7059	0,21118	211,18	1,02282

Fuente: Datos generados de concentraciones intermedias dentro del rango de concentración inicial y final, junto a su tiempo leído mediante el trazo del gráfico. Elaboración propia



Determinación del área:

$$A_u = \frac{\tau_u}{C_o \times H_o} \quad \text{Ecu. [28]}$$

$$A_1 = \frac{\tau_1}{C_o \times H_o} = \frac{34,5[mn]}{6,75 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] \times 0,31[m]} \times \frac{1[h]}{60[mn]} \times \frac{1[dia]}{24[h]} \times \frac{1000[kg]}{1[Ton]} = 11,44 \left[ \frac{dia * m^2}{Ton} \right]$$

$$A_2 = \frac{\tau_2}{C_o \times H_o} = \frac{34,90[mn]}{6,75 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] \times 0,31[m]} \times \frac{1[h]}{60[mn]} \times \frac{1[dia]}{24[h]} \times \frac{1000[kg]}{1[Ton]} = 11,58 \left[ \frac{dia * m^2}{Ton} \right]$$

$$A_3 = \frac{\tau_3}{C_o \times H_o} = \frac{35,50[mn]}{6,75 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] \times 0,31[m]} \times \frac{1[h]}{60[mn]} \times \frac{1[dia]}{24[h]} \times \frac{1000[kg]}{1[Ton]} = 11,78 \left[ \frac{dia * m^2}{Ton} \right]$$

$$A_4 = \frac{\tau_3}{C_o \times H_o} = \frac{36,80[mn]}{6,75 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] \times 0,31[m]} \times \frac{1[h]}{60[mn]} \times \frac{1[dia]}{24[h]} \times \frac{1000[kg]}{1[Ton]} = 12,21 \left[ \frac{dia * m^2}{Ton} \right]$$

$$A_5 = \frac{\tau_3}{C_o \times H_o} = \frac{37[mn]}{6,75 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] \times 0,31[m]} \times \frac{1[h]}{60[mn]} \times \frac{1[dia]}{24[h]} \times \frac{1000[kg]}{1[Ton]} = 12,27 \left[ \frac{dia * m^2}{Ton} \right]$$

$$A_6 = \frac{\tau_3}{C_o \times H_o} = \frac{37,50[mn]}{6,75 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] \times 0,31[m]} \times \frac{1[h]}{60[mn]} \times \frac{1[dia]}{24[h]} \times \frac{1000[kg]}{1[Ton]} = 12,44 \left[ \frac{dia * m^2}{Ton} \right]$$

$$A_7 = \frac{\tau_3}{C_o \times H_o} = \frac{37,80[mn]}{6,75 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] \times 0,31[m]} \times \frac{1[h]}{60[mn]} \times \frac{1[dia]}{24[h]} \times \frac{1000[kg]}{1[Ton]} = 12,54 \left[ \frac{dia * m^2}{Ton} \right]$$

$$A_8 = \frac{\tau_3}{C_o \times H_o} = \frac{38[mn]}{6,75 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] \times 0,31[m]} \times \frac{1[h]}{60[mn]} \times \frac{1[dia]}{24[h]} \times \frac{1000[kg]}{1[Ton]} = 12,61 \left[ \frac{dia * m^2}{Ton} \right]$$

$$A_T = 12,61 \left[ \frac{dia * m^2}{Ton} \right]$$



Determinación del diámetro:

$$A_T = \frac{\pi D_T^2}{4} \quad \text{Ecu. [29]}$$

Despejando el diámetro de la ecuación 29:

$$D_T = \sqrt{\frac{4A_T}{\pi}}$$

Reemplazando datos:

$$D_T = \sqrt{\frac{4 * 12,61}{\pi}} = 4,0 [m]$$

Calculo de la altura del tanque

$$H_S = \frac{1,33t(\rho_o - 1)}{A_S \rho_o (\rho_{Lodo} - 1)} + h_i \quad \text{Ecu. [30]}$$

Dónde:

$H_S$  : Altura del sedimentacion

$\rho_o$  : Dencidad de la muestra

$\rho_{Lodo}$  : Dencidad del lodo

$\rho_o$  : Dencidad de la muestra

$h_i$ : Suma de alturas de diseño

t: tiempo

$A_S$ : Area del sedimentador

Reemplazando datos:

$$H_S = \frac{1,33 \times 1 \times (1,38 - 1)}{9,62 \times 1,38 \times (1,06 - 1)} + 2,133 = 2,76 [m]$$

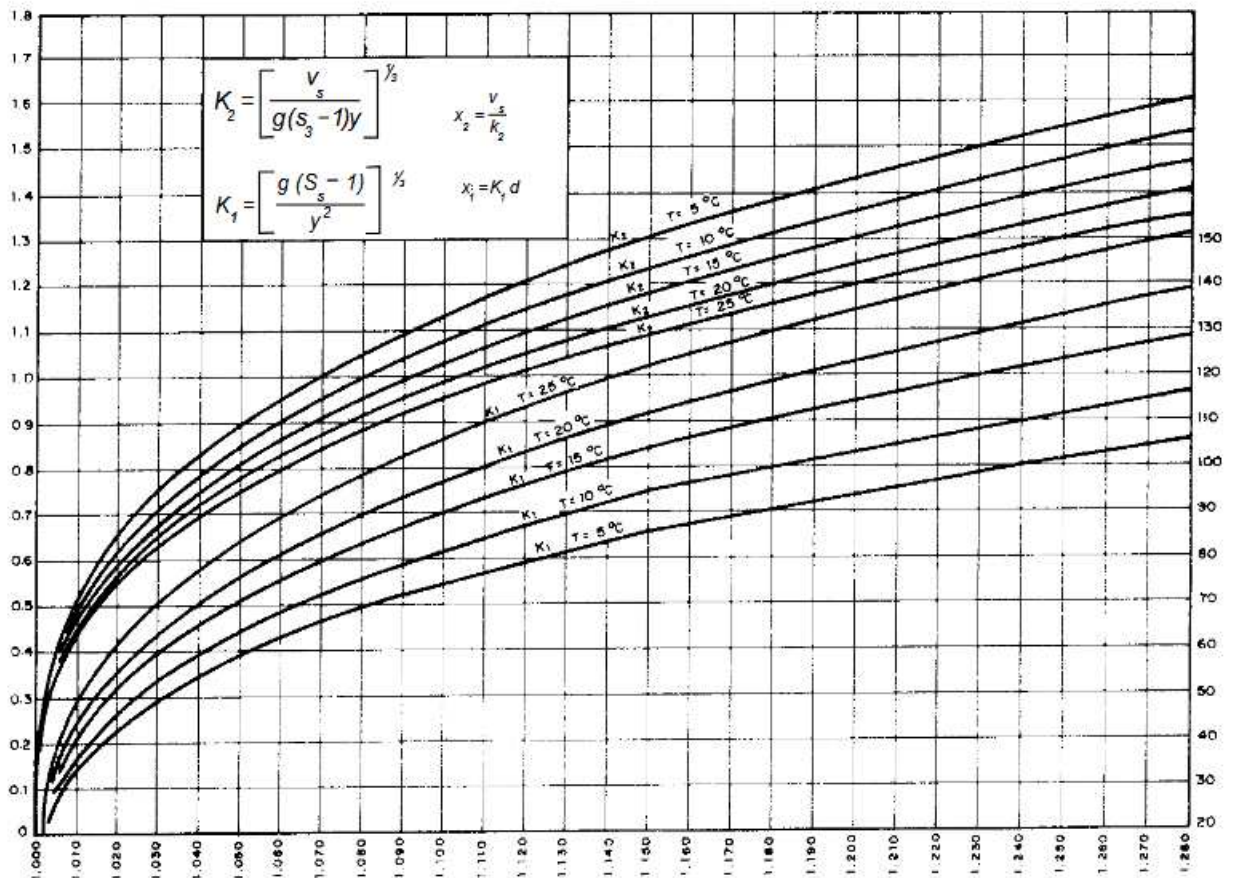
$$H_S = 2,76 [m]$$

**4.6.2 MÉTODO GRAFICO FAIR, GEYER Y OKUM**

Se utilizó este método por su facilidad de cálculo y rápida respuesta de diseño de un sedimentador y posteriormente para poder comparar los resultados con los resultados del método Talmage y Fitch.

Este método determina la velocidad de sedimentación utilizando los ábacos se basa en tanteos y el uso de gráficos de Velocidad de asentamiento y flotación de esferas discretas en un fluido estático  $V_s = K_2 X_2^2$  (2) y (1), las cuales observamos a continuación.

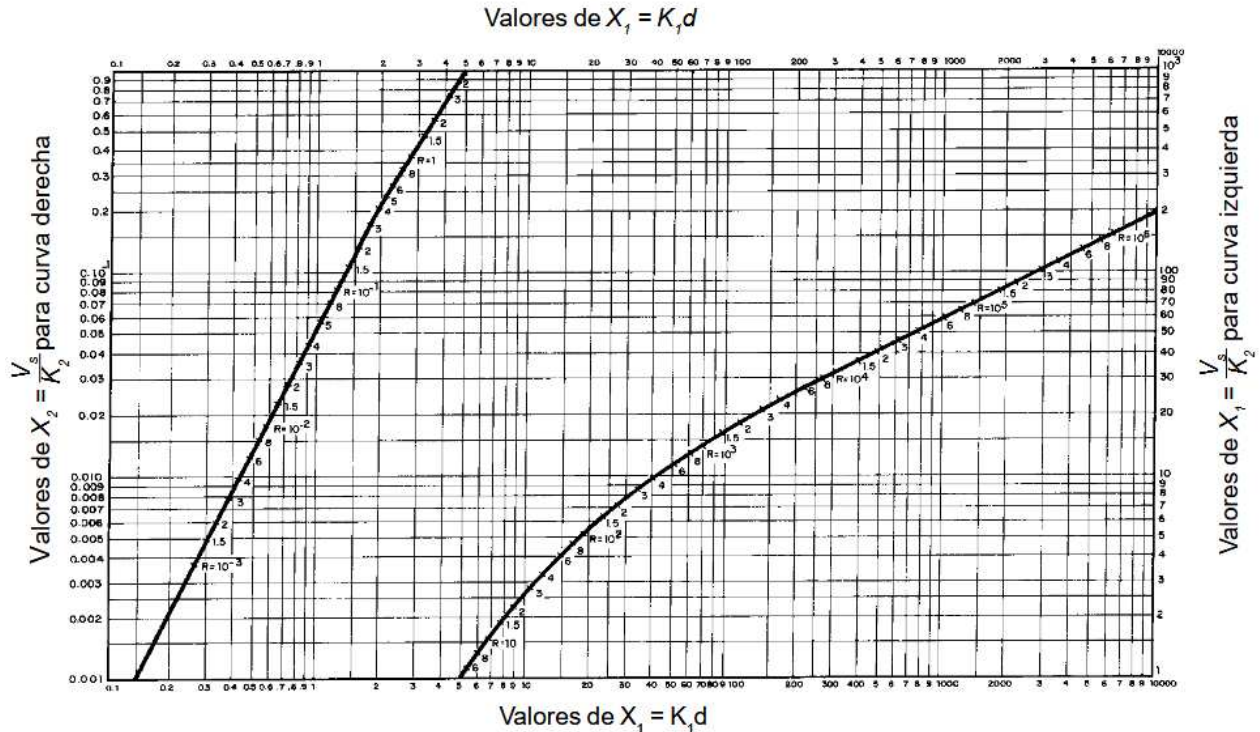
**Figura 28. ABACO VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO Y FLOTACIÓN DE ESFERAS DISCRETAS EN UN FLUIDO ESTÁTICO  $V_s = K_2 X_2^2$**



Fuente: Abaco grafico (Maldonado)



Figura 29. VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO Y FLOTACIÓN DE ESFERAS DISCRETAS EN UN FLUIDO ESTÁTICO  $V_s = K_2 X_2$



Fuente: Abaco Grafico (Maldonado)

El cálculo de la velocidad de sedimentación se realiza con los siguiente dos cálculos:

Cálculo 1: Conociendo las características de la densidad de la partícula y temperatura del agua, se obtiene  $K_1$  y  $K_2$  de la figura 26.

Cálculo 2: Con los datos de  $K_1$  y  $d$  se calcula  $X_1$  con la ecuación:  $X_1 = K_1 \cdot d$ ; seguidamente se leerá del ábaco de la figura 27 el valor de  $X_2$ , con lo cual se calcula la velocidad de sedimentación con la ecuación (32)  $V_s = K_2 X_2$ .

$$X_1 = K_1 \times d_s = \left[ \frac{g(S_s - 1)}{v^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecu. [31]}$$

$$\frac{V_s}{[g(S_s - 1)v]^{\frac{1}{3}}} = \frac{V_s}{K_2} = X_2 \quad \text{Ecu. [32]}$$

Para iniciar con el proceso de cálculo, se observa en la siguiente tabla 4.23 el dato necesario referente a la densidad del solido de la muestra.



**Tabla 4.23. DATOS REQUERIDOS**

Datos iniciales	Símbolo	Cantidad
Densidad del solido	$\rho_s$	1.36
Velocidad terminal	$v_s$	0.9046
Coefficiente adimensional	$K_1$	a determinar
Diámetro del solido	$D_s$	0.002
Coefficiente adimensional	$K_2$	a determinar
Flujo de alimentación	$Q_A$	97.65
Volúmenes de sólido y liquido en el ingreso	$V_{SS}$	
	$V_l$	

*Fuente: Elaboración propia*

Primeramente hallaremos el volumen del agua al inicio de la sedimentacion y seguidamente el volumen del agua contenido en los lodos.

$$V_l = V_P - V_{SS} = 500[ml] - 2.48[ml] = 497.52[ml]$$

$$V_D = V_{LODO} - V_{SS} = 14,81[ml] - 2.48[ml] = 12.33[ml]$$

Calcular la relacion volumen del agua y masa del solido :

$$L_F = \frac{V_l}{m_{SS}}$$

$$L_U = \frac{V_D}{m_{SS}}$$

La ecuacion (33) , se podra calcular el area del sedimentador.



$$A_s = \frac{(L_F - L_U) \times Q_A}{\rho \times v_T} \quad \text{Ecu. [33]}$$

Donde:

$L_F$  : Relación volumen del agua y masa del sólido

$L_U$  : Relación volumen del agua y masa del sólido

$\rho$  : Densidad del líquido

$Q_A$  : Caudal de Alimentación

$v_T$ : Velocidad Terminal

$A_s$ : Área del sedimentador

Datos necesarios:

**Tabla 4.24. DATOS DE LA PROBETA GRADUADA UTILIZADA**

Datos Adicionales	
Área de la probeta graduada	19,635
Volumen de la probeta graduada	500
<i>Fuente: Elaboración propia</i>	

$$X_1 = K_1 \times d_s \quad \text{Ecu. [31]}$$

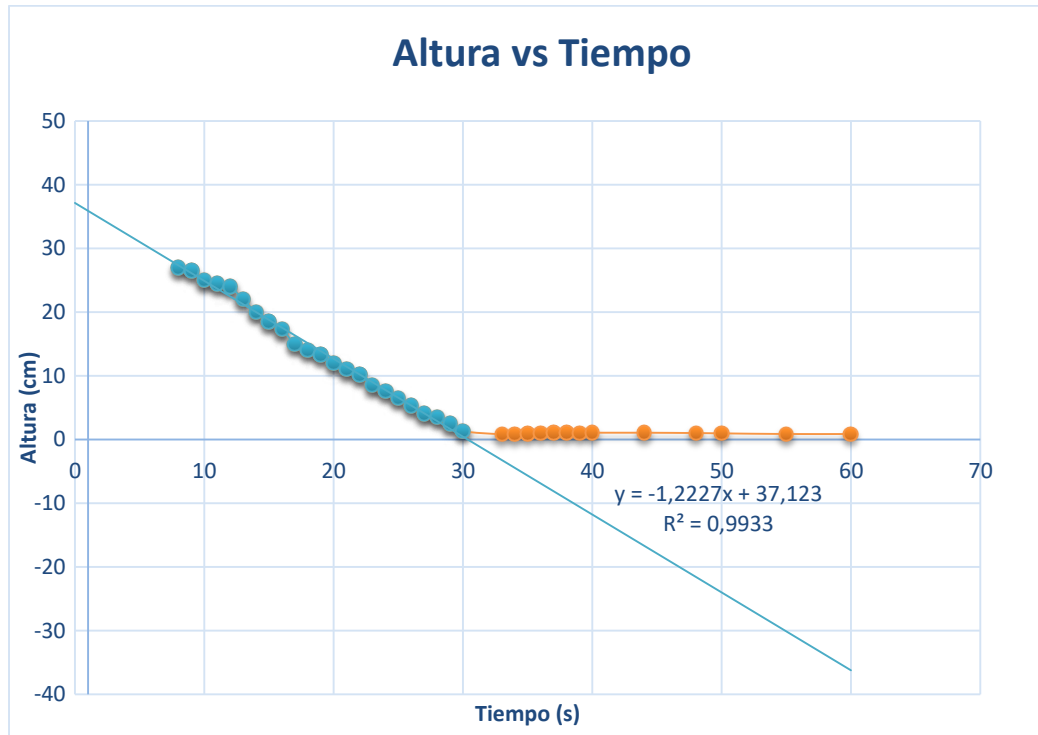
$$V_s = K_2 \times X_2 \quad \text{Ecu. [32]}$$

Se traza la recta tangente a la curva de sedimentación en la zona de decantación frenada, para determinar la velocidad terminal requerida para este método.





Gráfico 10. REGRESIÓN LINEAL A LA CURVA DE SEDIMENTACIÓN



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.25. VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN EXPERIMENTAL

N°		Velocidad de sedimentación experimental
1	Prueba	0,8305
2	Prueba	1,029
3	Prueba	0,9082
4	Prueba	0,9118
5	Prueba	1,2227
6	Prueba	0,76
7	Prueba	0,67
	Promedio	0,9046

Fuente: Elaboración propia

Primeramente, procederemos a leer de los ábacos el valor de K1 y K2 con el dato referencial de la densidad del sólido.



Si  $K_1 = 115$  y  $K_2 = 0.957$

$$X_1 = K_1 \times d_s$$

$$X_1 = 115 \times 0.002 = 0.23$$

Con el dato de  $X_1$ , leemos de la gráfica el valor de  $X_2 = 0.0024$

$$V_s = K_2 \times X_2$$

$$V_s = 0.957 \times 0.0024 = 0.0023 \left[ \frac{cm}{s} \right]$$

Calculo de  $L_U$  y  $L_F$ :

$$L_F = \frac{497.52}{3,3757} = 147,77 \left[ \frac{ml}{g} \right]$$

$$L_U = \frac{12.33}{3,3757} = 3.65 \left[ \frac{ml}{g} \right]$$

cálculo del área del sedimentador con la ecuación (33):

$$A_c = \frac{(L_F - L_U) \times Q_A}{\rho \times v_T}$$

$$A_c = \frac{(147.38 - 3.65) \left[ \frac{ml}{g} \right] \times \frac{1000[g]}{1[Kg]} \times 97.65 \left[ \frac{m^3}{h} \right] \times \frac{1.383[kg]}{1[m^3]}}{1 \left[ \frac{g}{ml} \right] \times 0.9046 \left[ \frac{cm}{mn} \right] \times \frac{60[mn]}{1[h]}} = 232381.43 [cm^2]$$

El área calculada del sedimentador resulta:

$$A_c = 23.23 [m^2]$$

Calculamos el diámetro con la ecuación (29):

$$D_T = \sqrt{\frac{4A_c}{\pi}}$$



$$D_T = \sqrt{\frac{4 \times 23.23[m^2]}{\pi}} =$$

$$D_T = 5.43[m]$$

Para el cálculo de la altura del sedimentador el método realiza cálculos solo con los datos de la zona de desaceleración y la zona de compresión. La siguiente tabla se refleja el cálculo de la altura del lodo por hora.

**Tabla 4.26. VARIACIÓN DE ALTURA DEL LODO**

Tiempo (mn)	Volumen (ml)	Altura (cm)	Volumen Inicial del solido	Liquido	Solido-Liquido	Variación de Densidad	Densidad Media	$\Delta$ Tiempo (h)	Altura h
0	500	25,465	1,16						
1	490	24,955	1,16						
2	485	24,701	1,16						
3	480	24,446	1,16						
4	475	24,191	1,16						
5	460	23,428	1,16						
6	450	22,918	1,16						
7	440	22,409	1,16						
8	430	21,9	1,16						
9	420	21,39	1,16						
19	200	10,186	1,16						
20	170	8,658	1,16						
21	165	8,4034	1,16						
22	150	7,6394	1,16						
23	130	6,6208	1,16						
24	110	5,6022	1,16						
25	90	4,5837	1,16						
26	75	3,8197	1,16	71,1803	74,5803	1,01221			
27	60	3,0558	1,16	56,9442	60,3442	1,01514	1,01368	0,017	0,00100963
28	40	2,0372	1,16	37,9628	41,3628	1,02224	1,01869	0,017	0,00068724
29	20	1,0186	1,16	18,9814	22,3814	1,0419	1,03207	0,017	0,00036485
30	18	0,9167	1,16	17,0833	20,4833	1,04596	1,04393	0,017	0,00033261
31	17,5	0,8913	1,16	16,6087	20,0087	1,2042	1,12508	0,017	7,4857E-05
33	17	0,8658	1,16	16,1342	19,5342	1,0483	1,12625	0,033	0,00063298



34	16,6	0,8454	1,16	15,7546	19,1546	1,0493	1,0488	0,017	0,00031004
35	16,5	0,8403	1,16	15,6597	19,0597	1,04956	1,04943	0,017	0,00030843
36	16	0,8149	1,16	15,1851	18,5851	1,05089	1,05023	0,017	0,00030037
37	15,8	0,8047	1,16	14,9953	18,3953	1,05144	1,05117	0,017	0,00029715
38	15,5	0,7894	1,16	14,7106	18,1106	1,05229	1,05187	0,017	0,00029231
39	15,2	0,7741	1,16	14,4259	17,8259	1,05317	1,05273	0,017	0,00028748
40	15	0,7639	1,16	14,2361	17,6361	1,05378	1,05347	0,017	0,00028425
44	14,8	0,7538	1,16	14,0462	17,4462	1,05439	1,05408	0,067	0,00112412
50	14,5	0,7385	1,16	13,7615	17,1615	1,05535	1,05487	0,1	0,00165716
55	14,5	0,7385	1,16	13,7615	17,1615	1,05535	1,05535	0,083	0,00138097
60	14	0,713	1,16	13,287	16,687	1,05701	1,05618	0,083	0,00134067

Fuente: Datos generados según la ecuación dada. Elaboración propia

Tabla 4.27. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS UTILIZADOS

MÉTODO GRAFICO FAIR, GEYER Y OKUM	MÉTODO DE TALMAGE AND FITCH
Si se desconoce cómo se comporta la sedimentación de una determinada partícula (zona laminar, turbulenta o en transición), el cálculo de la velocidad de sedimentación debe hacerse por tanteos.	Éste consiste en un procedimiento básicamente gráfico, mediante el cual se determinan un grupo de factores que luego serán utilizados para el cálculo del área unitaria, necesaria para sedimentar la pulpa que ha sido objeto de estudio.
Área calculada	Área calculada
$A_C = 23.23 [m^2]$	$A_T = 12.61 \left[ \frac{dia * m^2}{Ton} \right]$
Diámetro	Diámetro
$D_T = 5.43 [m]$	$D_T = 4.0 [m]$
Altura	Altura
$h = 0,022 [m]$	$H_S = 2,76 [m]$

Fuente: Comparación de datos resultado de los dos métodos utilizados. Elaboración propia

$$\sum h = 0,022 [m]$$



**CAPÍTULO 5:  
DISEÑO,  
DIMENSIONAMIENTO  
Y CONSTRUCCIÓN  
DEL SEDIMENTADOR**



## CAPÍTULO 5

### DISEÑO, DIMENSIONAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL SEDIMENTADOR

#### 5.1 INTRODUCCION

La práctica industrial de la concentración de sólidos por decantación y la producción de un rebose clarificado en el mismo equipo denominado “espesador o sedimentador”, data de 1907, en el que un recipiente circular cilíndrico incorporaba un sistema de rasquetas que acercaba el lodo decantado hacia el centro para su evacuación en forma de lodo, en tanto que el agua desbordaba por un canal periférico. Son los tanques “Dorr”, cómo se conoce a los primeros espesadores convencionales utilizados en la industria minera. (Rodríguez Avello, Butragueño Muñoz, & Grima Olmedo)

En el desarrollo de estos equipos, primero se consideró la eficiencia y el costo económico de los floculantes, de traslado, mantenimiento etc. En segundo lugar, con tiempos de retención cortos, la claridad del rebose podía sufrir una merma en su calidad y claridad, resultando en grandes pérdidas de material por el rebose. En tercer lugar, a la vista de que los flujos de alimentación son menos uniformes, y con cambios bruscos, era primordial diseñar un sistema de alimentación que regulara estas variaciones. Finalmente sería necesario un equilibrio razonable entre la capacidad del equipo y la densidad del hundido requerida.

##### 5.1.1 DESCRIPCION DEL PROCESO

Luego de caracterizar la muestra, de construir las curvas de velocidad de sedimentación para cada uno de los ensayos, se procedió a calcular el área mínima industrial de clarificado utilizando el caudal de alimentación y el dato obtenido de la velocidad de sedimentación correspondiente a la concentración inicial de 6.92 g/l. Posteriormente, se trazó la curva de sedimentación (altura deslizada versus tiempo), Seguidamente se determinó el área, volumen del sedimentador por el métodos Talmage y Fitch y Método Grafico Fair, Geyer y Okum. Con los valores hallados de área, diámetro, altura del sedimentador se procederá a realizar el cálculo del tiempo de retención, entrada y salida del sedimentador.

Al concluir todas las dimensiones necesarias del sedimentador halladas para el caudal de alimentación real, se procederá a escalar todas las dimensiones reales del sedimentador con



el concepto de semejanza geométrica y cinética. Así se obtendrá dimensiones de altura, diámetro altura, etc. Para ejecutar la construcción del sedimentador a escala laboratorio.

Se comparó el área de clarificado con la de espesado, se eligió la mayor de estas dos áreas como área de diseño. Se procedió a calcular el diámetro y la profundidad del sedimentador.

### 5.1.2 NECESIDADES QUE CUBRE EL PRODUCTO

Es reconocido que un proceso sostenible en la explotación de oro, es la reutilización del agua y es esencial para un buen cumplimiento de las normativas locales y gubernamentales. También para la sostenibilidad económica y social de la operación. Los usos de los sedimentadores contribuyen al desarrollo sostenible con el medio ambiente.

En cuanto a tecnologías industriales, en el mercado nacional no se han incursionado en la fabricación de sedimentadores de este tipo, se depende de las importaciones de equipos de este tipo.

Las cooperativas mineras auríferas en el departamento de La Paz, realizan explotaciones de oro de manera muy precaria, lo que causa una pérdida del rendimiento de explotación de oro y este tipo de sedimentador cubre este tipo de pérdida.

## 5.2 DISEÑO DEL SEDIMENTADOR

A continuación, se describe el procedimiento para dimensionar el sedimentador circular a escala laboratorio. Consta de las siguientes fases: cálculo del área, diámetro y altura, diseño final; materiales de construcción; construcción y costo del equipo

### 5.2.1 CRITERIOS DE DISEÑO

- El período de diseño, teniendo en cuenta criterios económicos y técnicos, es de 8 a 16 años.
- El número de unidades mínimas en paralelo es de dos para efectos de mantenimiento.
- El período de operación es de 24 horas por día.
- El tiempo de retención será entre 1-6 horas.
- El fondo de la unidad debe tener una pendiente entre 5 a 10% para facilitar el deslizamiento del sedimento.
- La ubicación de la pantalla difusora debe ser entre 0,7 a 1,00 m de distancia de la pared de entrada.



- Los orificios más altos de la pared difusora deben estar a 1/5 o 1/6 de la altura (H) a partir de la superficie del agua y los más bajos entre 1/4 o 1/5 de la altura (H) a partir de la superficie del fondo (OPS, 2005).

### 5.2.2 CÁLCULO DEL ÁREA SUPERFICIAL

El cálculo del área superficial del sedimentador se logró gracias a dos métodos utilizados de Talmage y Fitch y Grafico de Fair, Geyer y Okum.

- Método gráfico:

$$A_C = 23.23 [m^2]$$

- Método Talmage y Fitch:

$$A_T = 12.61 \left[ \frac{dia * m^2}{Ton} \right]$$

Existe una diferencia de un 54% en el tamaño del área superficial calculado y por tanto se decidió trabajar con el promedio de las superficies halladas. La superficie del sedimentador resulta igual a 17.94 m<sup>2</sup>.

### 5.2.3 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DEL SEDIMENTADOR

El diámetro del sedimentador circular está dado por la siguiente ecuación:

$$D_{Sedimentador} = \sqrt{\frac{4A_C}{\pi}} \quad \text{Ecu. [29]}$$

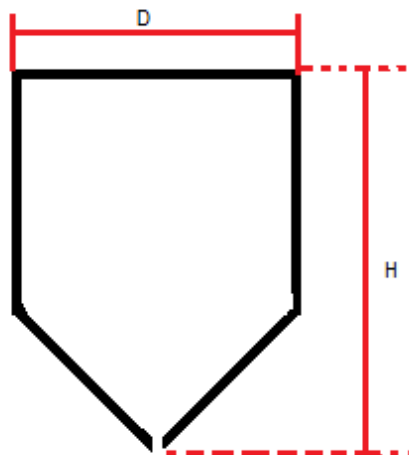
$$D_T = \sqrt{\frac{4 * 17.94 [m^2]}{\pi}} = 4.70 [m]$$



### 5.2.4 CÁLCULO DEL VOLUMEN

El volumen del sedimentador corresponde al cálculo del volumen de un cilindro con base cónico. La altura según el método Talmage y Fitch resulta 2.76 m, por recomendaciones de diseño se trabajará con una altura de  $H= 3$  m.

**Figura 30. SEDIMENTADOR CIRCULAR**



Fuente: Elaboración propia

Volumen del cilindro:

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} r^2 H \quad \text{Ecu. [34]}$$

$$V_{cilindro} = \frac{\pi}{4} 2.35^2 * 2.15 = 9.32[m^3]$$

Volumen del cono:

$$V_{cono} = \frac{\pi}{3} r^2 h \quad \text{Ecu. [35]}$$

$$V_{cono} = \frac{\pi}{3} 2.35^2 * 0.85 = 4.19[m^3]$$

$$V_{Sedimentador} = 9.32 [m^3] + 4.19[m^3] = 13.51[m^3]$$



### 5.2.5 CÁLCULO DEL FONDO DEL SEDIMENTADOR

El fondo del sedimentador se refiere a la pendiente de la tolva, para facilitar el desalojo de los lodos.

$$\Delta y = i \times \Delta x \quad \text{Ecu. [36]}$$

$$i = \text{tg}\alpha \quad \text{Ecu. [37]}$$

Los valores de variación de Y= 85 y X=175

$$\alpha = \text{arctg}\left(\frac{85}{175}\right) = 28^\circ$$

### 5.2.6 CÁLCULO DE LA CANALETA DE ENTRADA

En esta zona se debe pensar en el diseño de estructura hidráulica de transición que permite una distribución uniforme del flujo dentro del sedimentador. Se optó por una tubería de variación de diámetro, desde un diámetro inicial de 0.435 m a 0.80 m y 2m de largo.



En la zona de entrada el análisis hidráulico:

Radio hidráulico

$$Rh = T_h \times B \quad \text{Ecu. [38]}$$

Donde:

Th: tirante hidráulico (cm)

B: base de la canaleta (cm)



$$Rh = 7[cm] \times 43.5[cm] = 304.5[cm^2]$$

Con la ecuación de continuidad analizamos:

$$A_d \times v_d = A_D \times v_D \quad \text{Ecu. [39]}$$

Asumimos una velocidad de 0.1 (m/s) en el orificio de la pared difusora:

$$Q_{Alimentacion} = A_{orificio} \times v_{orificio} \quad \text{Ecu. [40]}$$

$$A_{orificio} = \frac{Q_{Alimentacion}}{v_{orificio}}$$

$$A_{orificio} = \frac{88.70 \left[ \frac{cm}{s} \right] \times 304.5[cm^2]}{10 \left[ \frac{cm}{s} \right]} = 2700.915[cm^2]$$

Calculo del número de orificios de la pared difusora, si el diámetro del orificio es 7 cm.

$$N^{\circ} \text{ de orificios} = \frac{A_{orificio}}{A_o} \quad \text{Ecu. [41]}$$

$$N^{\circ} \text{ de orificios} = \frac{2700.915}{3.38 \times 10^{-3}} = 46.$$

### 5.2.7 CALCULO DE LA VELOCIDAD DE SALIDA DEL LODO DEL SEDIMENTADOR

Para el transporte de los lodos se pueden emplear distintos tipos de bombas (centrífugas, de desplazamiento positivo...). El cálculo de la potencia de la bomba requiere conocer las pérdidas de carga a lo largo de la tubería, que dependen del comportamiento geológico del lodo. (META)

En la zona de lodos se debe tener presente para el diseño la velocidad de salida del agua, ya que las partículas pueden ser re suspendidas en el flujo y acarreadas en el efluente. Se recomienda por diseño que la velocidad de arrastre se encuentre en el intervalo de 0.5 y 3 cm/s.



Esta velocidad de arrastre de partículas (lodo) se puede calcular con la siguiente ecuación de Camp:

$$v_a = 125 \times \cos\theta \sqrt{(S_s - 1) * d_p} \quad \text{Ecu. [42]}$$

Despejamos diámetro de la ecuación (41):

$$v_a = 125 \times \cos 28 \sqrt{(1.36 - 1) * 0.002}$$

$$v_a = 2.96 \left[ \frac{cm}{s} \right]$$

Se asume un valor de velocidad de arrastre de 3 cm/s

$$d_o = 5 [cm]$$

Existe otra ecuación de velocidad de arrastre, con la cual también se corroborará el resultado.

$$v_a = \sqrt{\frac{8 * K}{f} g (S_s - 1) * d_o} \quad \text{Ecu. [43]}$$

Donde:

$v_a$  : Velocidad de arrastre

$K$  : Coeficiente (0.04 – 0.06)

$S_s$  : Peso específico del solido

$f$  : Coeficiente de pérdida de carga

$d_o$  : Diametro de salida

Se calcula con el coeficiente de pérdida de carga, mediante el número de Reynolds. Si es un flujo laminar

$$f = \frac{60}{Re} \quad \text{Ecu. [44]}$$

$$v_a = \sqrt{\frac{8 * 0.06}{f} 9.81 (1.36 - 1) * d} = \left[ \frac{m}{s} \right]$$



Para la utilización de este método se realizará iteraciones de  $Re$ ,  $d$  y  $f$ .

**Tabla 0.1. TABLA DE ITERACION**

Velocidad de Arrastre	Asumo Coeficiente de fricción	Calculo de D	Calculo de $Re$	Calculo de $f$
0,03	0,3	9,55657E-06	172,455	0,371112
0,03	0,15	4,77829E-06	86,2273	0,742224
0,03	0,2	6,37105E-06	114,97	0,556668

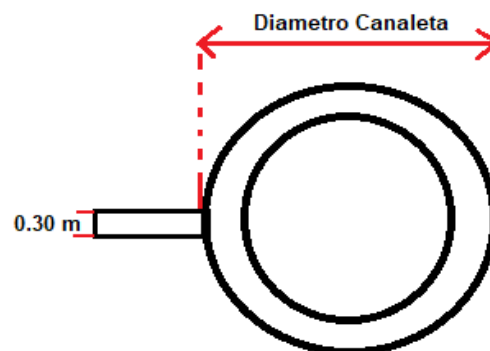
*Fuente: Elaboración propia*

Se observa en la tabla el resultado de la iteración no satisface una dimensión aceptable del diámetro de la tubería de salida. Con este análisis matemático se comprueba a que el fluido de salida ya no es fluido newtoniano.

### 5.2.8 CALCULO DE LA CANALETA DE SALIDA DEL SEDIMENTADOR

En esta zona el análisis no es tan fundamental para el diseño del sedimentador. Pero existe consideraciones que la canaleta receptora del agua clarificada debe poseer una inclinación de 5 a 10 grados.

Se realizó el diseño de un canal receptor de base igual a 0.40 m por una altura de 0.50 m, se incorporó una tubería de salida de diámetro de 0.30 m.





### 5.2.9 CARGA SUPERFICIAL

$$C_s = \frac{Q_{Diseño}}{A_{sedimentador}} \quad \text{Ecu. [45]}$$

Dónde:

$C_s$ = Carga superficial ( $m^3/m^2 \cdot d$ )

$A$ = Área Superficial del sedimentador ( $m^2$ )

$Q$ = Caudal de diseño ( $m^3/s$ )

$$C_s = \frac{0.0176 \left[ \frac{m^3}{s} \right]}{17.94 [m^2]} = 9.81 \times 10^{-4} \left[ \frac{m^3}{m^2 \cdot s} \right]$$

### 5.2.10 CALCULO DEL TIEMPO DE RETENCIÓN

El tiempo que permanece el agua residual en el tanque o sistema denominado tiempo de retención hidráulica, se calcula a partir de la siguiente ecuación que se describe a continuación:

$$V = T_{RH} \times Q_{DISEÑO} \quad \text{Ecu. [46]}$$

Dónde:

$T_{RH}$ = Tiempo de retención hidráulica (h)

$V$ = Volumen del sedimentador ( $m^3$ )

$Q$ = Caudal de diseño ( $m^3/h$ )

$$T_{RH} = \frac{13.51 [m^3]}{0.0176 \left[ \frac{m^3}{s} \right]} = 767.61 [s] \equiv 0.22 [h]$$



### 5.2.11 CALCULO DEL ESPESOR DE LA PARED DEL SEDIMENTADOR

El espesor de la pared por condición de diseño, se calcula con base al nivel del líquido, tomando la densidad relativa del fluido y concentrado. Se determinará con la norma estándar API-650, que establece los requerimientos mínimos para el diseño, fabricación de tanques cilíndricos verticales en base a la soldadura.

Según recomendaciones de la norma API 650 para tanques, el espesor de la pared del cuerpo requerido para resistir la carga hidrostática será mayor que el calculado por condiciones de diseño o por condiciones de prueba hidrostática, pero en ningún caso será menor a lo que se muestra en la tabla ANEXO G. (Choque, 2016)

Donde el método de 1 pie, nos proporciona una formula propicia para el caso:

$$t_d = \frac{4.9D*(H-0.3)G}{s_d} + CA \quad \text{Ecu. [47]}$$

$$t_t = \frac{4.9D*(H-0.3)}{s_t} \quad \text{Ecu. [48]}$$

Donde:

$t_d$ : *Espesor de Diseño*

$t_t$ : *Espesor de prueba hidráulica en mm*

$D$ : *Diámetro nominal de diseño en m*

$H$ : *Nivel liquido en m*

$G$ : *Gravedad específica del líquido contenido*

$s_d$ : *Esfuerzo de diseño permitido en KPa*

$s_t$ : *Esfuerzo de prueba hidrostática en KPa*

$CA$ : *Tolerancia a la corrosión en mm*

La fuerza de fluencia (Yield Strength), es la indicación del esfuerzo máximo que se puede desarrollar en un material sin deformarse.

El esfuerzo de diseño  $s_d$ , podría ser 2/3 del esfuerzo de fluencia o 2/5 del esfuerzo de tensión; el que resulte menor.



El esfuerzo de prueba hidrostática  $S_t$ , se muestra en tablas del API 650 o también se puede calcular con  $\frac{3}{4}$  del esfuerzo de fluencia o  $\frac{9}{7}$  del esfuerzo de tensión.

Para el proyecto se eligió láminas de Acero de construcción ASTM131 con la especificación del límite de fluencia mínimo de 235 MPa, reflejada en el ANEXO F.

$$S_d = \frac{2}{3} \text{Esfuerzo de fluencia} \quad \text{Ecu. [49]}$$

$$S_t = \frac{3}{4} \text{Esfuerzo de fluencia} \quad \text{Ecu. [50]}$$

$$S_d = \frac{2}{3} * 235 \text{ [MPa]} = 156.7 \text{ [MPa]}$$

$$S_t = \frac{3}{4} * 235 \text{ [MPa]} = 176.25 \text{ [MPa]}$$

Finalmente se calculará el espesor de la pared del tanque, sin tomar en cuenta la tolerancia a la corrosión CA, porque las descargas de estudio no son corrosivas.

$$t_d = \frac{4.9D * (H - 0.3)G}{S_d}$$

$$t_d = \frac{4.9 * 4.70 * (2.80 - 0.3)1.38}{156700} = 0.5070$$

$$t_t = \frac{4.9D * (H - 0.3)}{S_t}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 4.70 * (2.80 - 0.3)}{1762500} = 0.3266$$

Se denota que el espesor de la lámina debe ser 3 a 4 milímetros de espesor mediante a tablas del anexo G, que el valor recomendado según tablas API es 5 mm.





### 5.3 ESCALAMIENTO DEL SEDIMENTADOR

El término “escala laboratorio” se refiere a todo experimento o proceso que puede trabajarse y/o manipularse dentro de un laboratorio mientras que una planta piloto es una planta de proceso a escala reducida.

La teoría de similitud establecida por Kline y dice “Si dos sistemas obedecen al mismo grupo de ecuaciones y condiciones gobernantes, y si los valores de todos los parámetros y las condiciones se hacen idénticas, los dos sistemas deben exhibir comportamientos similares con tal de que exista una solución única para el grupo de ecuaciones y condiciones”.

Se desea transferir datos reales de un sistema modelo a un prototipo, es necesario que los dos sistemas de flujo sean hidráulicamente similares debe cumplir la semejanza geométrica, semejanza cinética y dinámica.

#### 5.3.1 SEMEJANZA GEOMÉTRICA

La semejanza geométrica implica de modo estricto que se cumpla que la relación entre dimensiones homólogos de modelo y prototipo sean iguales. Un modelo y un prototipo son geoméricamente similares si todas las dimensiones del cuerpo en cada una de las direcciones de los ejes coordenados se relacionan mediante la misma escala de longitud.

$$L_p = \alpha \cdot L_m \quad \text{Ecu. [51]}$$

Dónde:

$L_p$ : longitud del prototipo

$L_m$ : longitud del modelo

$\alpha$ : escala de longitudes según al requerimiento de lo que se necesite escalar variara la escala de longitud, si es una sola longitud, un área o un volumen.

$$L_e = \frac{L_m}{L_p}; \quad L_e^2 = \frac{A_m}{A_p}; \quad L_e^3 = \frac{U_m}{U_p}$$



Dónde:  $L_e$ , es factor de escala;  $L_m$ , longitud homóloga del modelo;  $L_p$ , longitud homóloga del prototipo;  $A_m$ , área homóloga del modelo;  $A_p$ , área homóloga del prototipo;  $U_m$ , volumen del modelo;  $U_p$ , volumen del prototipo.

En el caso de construir el sedimentador a escala laboratorio, se tiene que construir un canal físico con la semejanza geométrica del canal de alimentación real por donde pasa el caudal, caudal que se determinó por la experimentación. En el canal la medida de referencia de escala será el tirante del fluido.

### 5.3.2 SEMEJANZA CINÉTICA

En hidráulica de modelos, la condición de semejanza cinemática se cumple cuando, en los campos de flujo del modelo y prototipo, la relación de velocidades en puntos homólogos es una constante. Esto equivale a sostener que la geometría del patrón de flujo en ambos sistemas es idéntico (Víctor L. Streeter, 1999; G. Sotelo Ávila, 1997; Pijush K. Kandu & Ira, M. Cohen, 2008; Rodríguez Díaz, H. A., 2001; Pooter, M. C. & Wiggert, D. C., 2002; Franzini, J. B. & Finnemore, E. J., 1999; Fernández Larrañaga, B. 1998; Miguel A. Vergara, 1993).

La relación de movimiento entre el modelo y prototipo son cinemáticamente semejante cuando la velocidad del modelo es equivalente a la velocidad del prototipo y además se tienen tiempos equivalentes. Los números adimensionales que se emplean para esta semejanza son el número de Reynolds y Froude.

Condiciones de semejanza:

- ❖ Cuando el flujo presenta una superficie libre la fuerza predominante es la de gravedad: semejanza de Froude,

$$Fr_p = Fr_m$$

- ❖ Cuando el cuerpo está sumergido en un flujo subsónico la fuerza predominante es la de viscosidad: semejanza de Reynolds,

$$Re_p = Re_m$$

- ❖ Cuando el cuerpo está sumergido en un flujo supersónico la fuerza predominante es la compresibilidad: semejanza de Mach,

$$Ma_p = Ma_m$$

- ❖ En láminas de líquido muy delgadas prima la tensión superficial: semejanza de Weber,



$$We_p = We_m$$

### 5.3.3 SEMEJANZA DINÁMICA

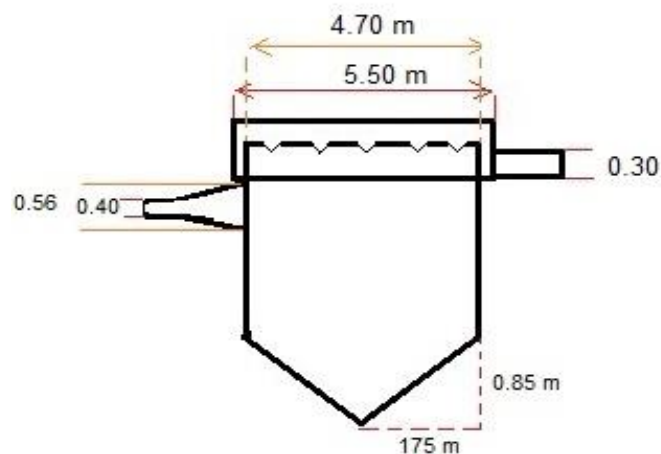
En la hidráulica de modelos, la semejanza dinámica entre modelo y prototipo se consigue cuando la relación de fuerzas homólogas en puntos homólogos es una constante, lo cual se expresa mediante relación (Víctor L. Streeter, 1999; G. Sotelo Ávila, 1997; Pijush K. Kandu & Ira, M. Cohen, 2008; Rodríguez Díaz, H. A., 2001; Pooter, M. C. & Wiggert, D. C., 2002; Franzini, J. B. & Finnemore, E. J., 1999; Fernández Larrañaga, B. 1998; Miguel A. Vergara, 1993).

La semejanza dinámica se alcanza cuando se consigue la semejanza geométrica, la semejanza cinemática y además existe una relación de las fuerzas entre el prototipo y modelo. Las fuerzas deben cumplir con las proporciones y deben tener la misma dirección entre el prototipo y modelo. El modelo debe cumplir con un factor de escala de velocidad, de tiempo, de fuerzas, de densidad, de viscosidad, de tensión superficial entre otros.

### 5.4 CONSTRUCCIÓN DEL SEDIMENTADOR A ESCALA

A partir de los datos obtenidos en el proceso de este diseño de: diámetro, se determinó la altura del cono y la altura de la capacidad de almacenamiento del sedimentador. Estos datos conforman el diseño final del sedimentador, medidas que se escalaran para obtener las dimensiones del sedimentador a escala laboratorio.

**Figura 31. DIMENSIONES DEL SEDIMENTADOR**



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 0.2. DIMENSIONAMIENTO DEL SEDIMENTADOR**

Parámetro	Resultado
Área superficial (m <sup>2</sup> )	17.94
Volumen (m <sup>3</sup> )	13.51 m <sup>3</sup>
Tiempo de retención (h)	0.22 h
Carga superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	84.76
Altura (m)	3
Inclinación de la base	28°

*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.4.1 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

La materia prima para la construcción de sedimentadores circulares se puede revestir de acero al carbono. Un recubrimiento común especificado en los Estados Unidos de América es de alquitrán de hulla epóxico.

También se utiliza acero galvanizado. Este material tiene mayor aplicación en Europa. Una desventaja de este revestimiento es que puede ser rayado o dañado en el transporte y en la instalación. Sin embargo, si es instalado adecuadamente y protegido, ofrece una buena resistencia a la corrosión. El uso de acero inoxidable ha aumentado en los últimos años para proporcionar un mecanismo de protección contra la corrosión adicional para sedimentadores circulares.

La fibra de vidrio y los plásticos también han aumentado en popularidad como materiales de construcción para tanques circulares. La fibra de vidrio se utiliza comúnmente para placas de presa y deflectores de espuma, también se utiliza ampliamente ahora para la construcción de deflectores de floculación. Las plataformas y pasarelas centrales de sedimentadores son a veces de fibra de vidrio. El aluminio también se utiliza en esta área.

#### 5.4.2 ELECCION DEL MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

Se utilizó hierro galvanizado para construir el cuerpo del sedimentador circular de cono profundo porque es un material flexible, moldeable, barato y cuenta con la ventaja de no contaminar la suspensión por trabajar. Tubos de hierro galvanizado de ½ pulgada para drenar la parte clarificada. En cuanto a la entrada del sedimentador se utilizó una tubería de hierro galvanizado de diámetro variante con pared difusora por orificios.



### 5.4.3 DIMENSIONES DEL SEDIMENTADOR A ESCALA

#### 5.4.3.1 ESCALA GEOMÉTRICA

Para poder diseñar un sedimentador una de las variables de diseño fundamental es el caudal de diseño; por tanto, la semejanza geométrica se basó en las dimensiones de la canaleta del caudal de descarga del lavado del material explotado.

Recordando algunos conceptos hidráulica:

La dimensión predominante y variable en la canaleta es el área hidráulica, que está compuesta la base de la canaleta y el tirante hidráulico.

$$L_{Real} = \varphi L_{Laboratorio} \quad \text{Ecu. [52]}$$

Dónde:

$\varphi$ : factor de escala geométrica

$$\varphi = \frac{L_{Real}}{L_{Laboratorio}} \quad \text{Ecu. [53]}$$

Se asume una altura de tirante de 0.5 cm

$$\varphi = \frac{0.5 [cm]}{7 [cm]} = 0.071$$

#### 5.4.3.2 ESCALA CINÉTICA

La semejanza cinética se basó en el comportamiento del fluido y la fuerza que ejerce sobre las superficies. Recordando que cuando el flujo presenta una superficie libre la fuerza predominante es la de gravedad, por tanto, nos basaremos en la semejanza de Froude.

$$Fr_{Real} = Fr_{Laboratorio} \quad \text{Ecu. [54]}$$

$$Fr_{Real} = \frac{v_{Real}}{\sqrt{g\gamma_{Real}}} \quad \text{Ecu. [55]}$$

$$Fr_{Laboratorio} = \frac{v_{Laboratorio}}{\sqrt{g\gamma_{Laboratorio}}} \quad \text{Ecu. [56]}$$

Igualando y despejando:



$$\frac{v_{Laboratorio}}{v_{Real}} = \sqrt{\frac{\gamma_{Laboratorio}}{\gamma_{Real}}}$$

$$\frac{v_{Laboratorio}}{v_{Real}} = \sqrt{\varphi} \quad \text{Ecu. [57]}$$

### 5.4.3.3 ESCALA DINÁMICA

Cundo se cumple con la semejanza geométrica y cinética el cumplimiento de la semejanza dinámica es el resultado de estas.

### 5.4.3.4 DIMENSIONES DEL SEDIMENTADOR A ESCALA LABORATORIO

Esta etapa se realizó el escalamiento geométrico del sedimentador de tamaño real a convertirlo a un tamaño laboratorio de escala 1:14.

Las dimensiones del sedimentador a escala laboratorio según a la escala geométrica se puede observar en la siguiente tabla 5.3.

**Tabla 0.3. DIEMCIONAMIENTO DEL SEDIMENTADOR**

Dimensiones Reales	Unidad [m]	Dimensiones laboratorio Esc. 1:14	Unidad [cm]
<b>Sedimentador</b>		<b>Sedimentador</b>	
Diámetro interno	4,7	Diámetro interno	33
Diámetro externo	5,5	Diámetro externo	39,05
Altura total	3	Altura total	21,3
Altura del cono	0,85	Altura del cono	6,035
<b>Zona de Entrada</b>		<b>Zona de Entrada</b>	
Diámetro inicial	0,435	Diámetro inicial	3
Diámetro final	0,55	Diámetro final	3,9
Diámetro de Orificio	0,07	Diámetro de Orificio	0,497
<b>Zona de salida</b>		<b>Zona de salida</b>	
Altura de la canaleta	0,5	Altura de la canaleta	3,55
Base de la canaleta	0,4	Base de la canaleta	2,85
Diámetro de tubería de salida	0,3	Diámetro de Tubería de salida	2,13
<b>Zona de lodos</b>		<b>Zona de lodos</b>	
Diámetro de salida	0,05	Diámetro de salida	0,35



Angulo de inclinación de la tolva	28°	Angulo de Inclinación de la tolva	28
-----------------------------------	-----	-----------------------------------	----

*Fuente: Tabla comparativa de las dimensiones del sedimentador real con las dimensiones del sedimentador a escala laboratorio. Elaboración propia*

#### 5.4.3.5 CONSTRUCCIÓN DEL SEDIMENTADOR A ESCALA LABORATORIO

El material utilizado para la construcción del sedimentador a escala laboratorio fue hierro galvanizado de 3 mm de espesor, el material habitual de construcción de canaletas receptoras del agua de los techos de viviendas.

No se tuvo otra opción de material por la dificultad de maleabilidad de otros materiales y soldadura.

**Figura 32. SEDIMENTADOR CONSTRUIDO A ESCALA LABORATORIO**



Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.4 RENDIMIENTO DEL SEDIMENTADOR A ESCALA LABORATORIO

Las pruebas de rendimiento del sedimentador a escala laboratorio se desarrolló gracias a la semejanza cinética, donde se trabajó con el factor de escala geométrico y velocidad.

$$\frac{v_{Laboratorio}}{v_{Real}} = \sqrt{\varphi} \quad \text{Ecu. [58]}$$

Donde la velocidad de flujo para el laboratorio resulta:

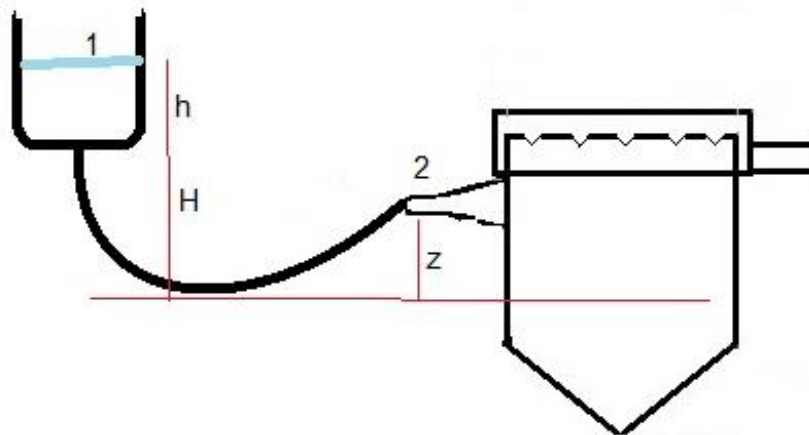
$$v_{Laboratorio} = \sqrt{\varphi} \times v_{Real}$$



$$v_{Laboratorio} = \sqrt{0.071} \times 88.71 \left[ \frac{cm}{s} \right] = 23.63 \left[ \frac{cm}{s} \right]$$

A partir de este dato de velocidad se realizarán cálculos de altura piezométrica para asegurar que el caudal de entrada al sedimentador escala laboratorio sea 23.63 cm/s.

**Figura 33. ESQUEMA DEL SISTEMA DEL SEDIMENTADOR CONSTRUIDO A ESCALA LABORATORIO**



Fuente: Elaboración propia

Dado el sistema armado se debe conocer la altura  $H$  donde se debe colocar el captador de agua en 1, para asegurar la llegada de velocidad del fluido de 23.63 cm/s.

Aplicando Bernoulli a 1 y 2

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad \text{Ecu. [59]}$$

$$z_1 - h_L = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad \text{Ecu. [60]}$$

Despejando  $z_1$  y reemplazando  $h_L$ , con lo siguientes datos:



**Tabla 0.4. DATOS RECOPIRADOS**

DATOS	
h2 (cm)	15
h1(cm)	12,85
v2(cm/s)	23,63
L(cm)	108
Tubería de goma $\epsilon$ (mm)	0,0015
Diámetro de la tubería de goma (cm)	0,015
Coefficiente de Frucción F	0,017
Peso especifica	1360

*Fuente: Elaboración propia*

$$h_L = f \frac{Lv_2^2}{D_{tubo} \times 2g} \quad \text{Ecu. [61]}$$

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{1360.0 * 0.2363 * 0.015}{2.3 \times 10^{-6}} = 2096032.37$$

Utilizando El diagrama de Moody, f es 0.017 y realizando operaciones con las ecuaciones 1 y 2 resulta la altura H= 0.14 m o 14 cm

Armado el sistema se procesó a realizar las pruebas de sedimentación en el sedimentador a escala laboratorio. El rendimiento se determinó con una serie de toma de muestras a diferentes tiempos, seguidamente se determinó la densidad del flujo de agua clarificada.

Determinando el rendimiento del sedimentador a escala por la relación porcentual de densidades del flujo de entrada y el flujo del agua clarificada.



**Tabla 0.5. DATOS EXPERIMENTALES DEL SEDIMENTADOR**

N°	Tiempo (mn)	Volumen (ml)	Masa Papel Filtro Seco (g)	Masa Papel Filtro con Muestra (g)	Masa de la Muestra	Masa del agua	Densidad	% Removido
1	0	20	0,4554	0,5615	0,1061	20	1,005305	72,6639
2	9	20	0,7638	0,8042	0,0404	20	1,00202	72,4265
3	18	20	0,5005	0,5148	0,0143	20	1,000715	72,3321
4	25	20	0,4551	0,4637	0,0086	20	1,00043	72,3115
5	30	20	0,452	0,4586	0,0066	20	1,00033	72,3043
6	35	20	0,4755	0,4848	0,0093	20	1,000465	72,3141

*Fuente: Datos experimentales del agua clarificada del sedimentador a escala laboratorio*

*Elaboración propia*

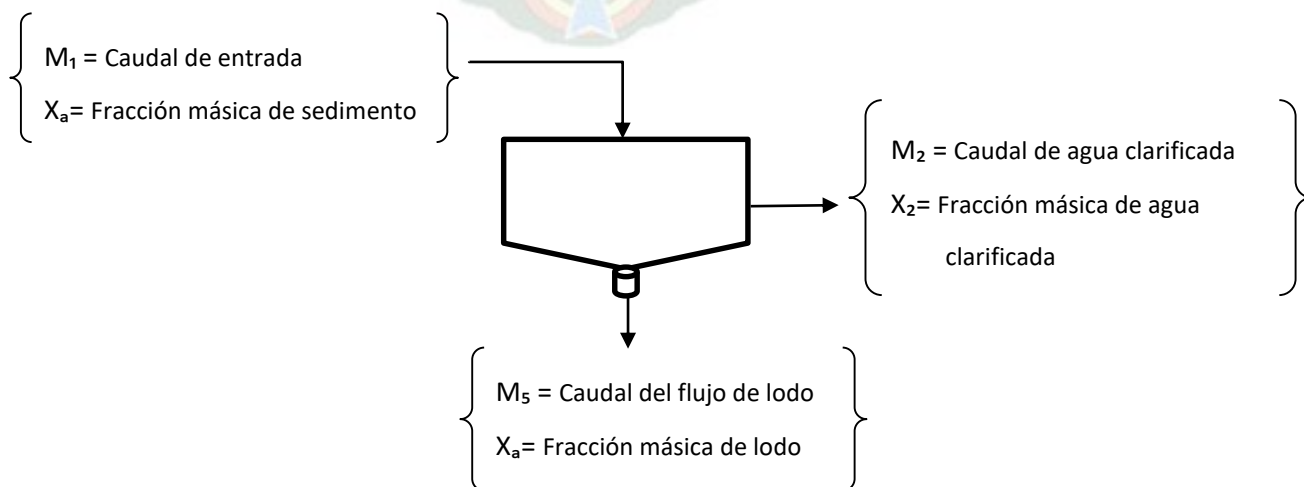
$$\% = \frac{\rho_{Final}}{\rho_{Inicial}} \times 100\%$$

Se puede concluir que el rendimiento del sedimentador a escala laboratorio es del 72 % de remoción de sólidos sedimentables.

#### 5.4.5 BALANCE DE MASA DEL SEDIMENTADOR

Mediante la teoría de balance de masa se analizará la validación del rendimiento del sedimentador.

**Figura 34. ESQUEMA DEL SISTEMA SEDIMENTACION PARA EL BALANCE DE MASA**





Balance de materia global del sistema de sedimentación:

$$\dot{E} + \dot{G} = \dot{S} + \dot{C} + \dot{A}$$

$$[\dot{E}] + [\dot{G}] = [\dot{S}] + [\dot{C}] + [\dot{A}]$$

$\dot{E}$ : Flujo de entrada  $\left[\frac{Kg}{s}\right]$

$\dot{G}$ : Generacion  $\left[\frac{Kg}{s}\right]$

$\dot{S}$ : Flujo de salida  $\left[\frac{Kg}{s}\right]$

$\dot{C}$ : Consumo  $\left[\frac{Kg}{s}\right]$

$\dot{A}$ : Acumulacion  $\left[\frac{Kg}{s}\right]$

El balance general realizado toma los siguientes criterios: no existe acumulación, no existe reacción química y no existe acumulación. Por tanto, flujo de entrada es igual a los flujos de salida, reflejada en la ecuación:

$$[\dot{E}] = [\dot{S}]$$

$$M_1 = M_2 + M_3 \quad \text{Ecu. [62]}$$

$M_1$ : Caudal de entrada  $\left[\frac{cm^3}{s}\right]$

$M_2$ : Caudal del agua clarificada  $\left[\frac{cm^3}{s}\right]$

$M_3$ : Caudal de lodos  $\left[\frac{cm^3}{s}\right]$

Despejamos de la ecuación 62 flujo másico del lodo.

$$M_1 - M_2 = M_3$$

Balance de materia parcial del sistema de sedimentación:

Balance parcial por componente:

$$M_1 * x_1 = M_2 * x_2 + M_3 * x_3 \quad \text{Ecu. [63]}$$



Donde:

$x_1$ : Concentración inicial  $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$

$x_2$ : Concentración del flujo clarificado  $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$

$x_3$ : Concentración del flujo de lodo  $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$

Combinando la ecuación [63] con la ecuación [62] y luego realizar el despeje del caudal de salida del lodo.

$$M_2 = \frac{M_1(x_1 - x_3)}{x_2 - x_3}$$

Con esta ecuación se comprobará el caudal de salida del sedimentador.

$$M_2 = \frac{27124,8 \left[\frac{cm}{s}\right] (0,28 - 0,72)}{0,0557 - 0,72} = 26489,76056 \left[\frac{cm}{s}\right]$$

$$M_3 = 37527,16 \left[\frac{cm}{s}\right] - 26489,76056 \left[\frac{g}{s}\right]$$

$$M_3 = 635,04 \left[\frac{cm}{s}\right]$$

El área de la salida del lodo es 78,54 cm<sup>2</sup>, con la cual calculamos la velocidad de salida del lodo que es igual a 8 cm/s. Podemos concluir que el diámetro asumido para el flujo de salida del lodo fue de 5 cm/s y el calculado por balance de masa fue 8 cm/s; observando un error de 3 cm y se considera un error no significativo.



# CAPITULO 6: ESTIMACIÓN ECONÓMICA





## CAPÍTULO 6

## ESTIMACIÓN ECONÓMICA

## 6.1 ANÁLISIS DE COSTOS DEL SEDIMENTADOR

Para que el proyecto sea viable se considera el factor económico, para esto se realizó un presupuesto económico para la construcción del sedimentador. En los siguientes acápite se realiza una estimación económica con la valoración de 2 tipos de material: hormigón armado y acero de construcción.

## 6.1.1 PRESUPUESTO DE COSTO DE CONSTRUCCIÓN

Formular un presupuesto de inversión económica para la construcción, instalación y puesta en marcha del espesador diseñado. Donde se consideran los siguientes elementos:

- Costo de construcción del sedimentador e instalación
- Costo de accesorios tuberías, bombas y conexiones
- Costo de operación

## 6.1.1.1 COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL SEDIMENTADOR E INSTALACIÓN

Los tanques de los espesadores se construyen de acero, hormigón o una combinación de ambos. En tanques menores de 21.4 m de diámetro es más económico fabricarlos completamente de acero, tanto las paredes del tanque como el fondo del mismo. Por tanto, se realizará la estimación económica del tanque de sedimentación con material de hormigón armado y acero.

Para el costo de construcción se realizó en función al diseño del sedimentador, el cual se refleja en la siguiente tabla 6.1. dimensionales

**Tabla 6.1. DATOS DIMENSIONALES DEL SEDIMENTADOR**

Dimensiones Reales	Unidad [m]
Sedimentador	
Diámetro interno	4,7
Diámetro externo	5,5
Altura total	3
Área total	50.195



<b>Zona de Entrada</b>	
Diámetro inicial	16"
Diámetro final	22"
Diámetro de Orificio	3"
<b>Zona de salida</b>	
Altura de la canaleta	0,5
Base de la canaleta	0,4
Diámetro de tubería de salida	10"
<b>Zona de lodos</b>	
Diámetro de salida	2"
Angulo de inclinación de la tolva	30°

*Fuente: Dimensiones del sedimentador real del sedimentador. Elaboración propia*

Cabe mencionar que la estimación de costo de construcción del sedimentador es en la elección de dos materiales: acero de construcción y hormigón armado.

- **Estimación de costos de inversión de movimiento de tierras**

Para el cálculo de la inversión el movimiento de tierras se basa en los costos propuestos en la revista de presupuestos y construcción pública N° 28, página 13. el costo implica mano de obra, herramientas y equipo.

**Tabla 6.2 COSTO DE INVERSIÓN DE MOVIMIENTO DE TIERRAS**

CONCEPTO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDADES	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL PARCIAL (Bs)
Limpieza y retiro de escombros	m <sup>3</sup>	300*0.40	111.65	10048.5
Compactado de tierras en el área de la ubicación del sedimentador	m <sup>2</sup>	100	31.90	3190
Excavaciones Mecánica en Material Común	m <sup>3</sup>	8	60	480
TOTAL =				13718.5

*Fuente: Elaboración propia, agosto 2022*



- **Estimación de costos de inversión de construcción con hormigón armado e instalación**

Para la estimación de costos de obra civil el cálculo basado en la revista de presupuestos y construcción pública N° 28 de la gestión 2021, del acápite “Losa tapas de hormigón armado para tanque de agua”, para la inversión en la construcción de la cámara de sedimentación. El área total del sedimentador es equivalente a 50.195[m<sup>3</sup>], al cual se construirá de muro de hormigón armado.

En el caso del costo de instalación, nos referimos a las conexiones

**Tabla 6.3. COSTO DE COMSTRUION DEL SEDIMENTADOR DE MURO DE HORMIGON ARMADO**

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	m <sup>3</sup>	PRECIO UNITARIO (m <sup>3</sup> /Bs.)	COSTO TOTAL PARCIAL (Bs)
Obras hidráulicas	Muro de hormigón armado de 25 cm de espesor	50.195*0.25	4576.61	57430.735
<b>TOTAL</b>				<b>57430.735</b>

*Fuente: Elaboración propia en base a la revista, año 2021*

- **Estimación de costos de inversión de construcción con acero e instalación**

Se realiza una estimación de precio para el material acero de construcción ASTM131 para el tanque sedimentador, este material cuenta con las certificaciones internacionales correspondiente para este tipo de equipos.

**Tabla 6.4. COSTO DE COMSTRUION DEL SEDIMENTADOR DE ACERO DE CONSTRUCCIÓN**

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	m <sup>2</sup>	PRECIO UNITARIO (m <sup>2</sup> /Bs.)	COSTO TOTAL PARCIAL (Bs)
Obras hidráulicas	Acero de construcción ASTM131	50.195	819.68	21311.68
Obras metal mecánica	Costo de mano de obra soldadura	-	8580	8580
Otros	Costo instalación equipo	-	900	950
<b>TOTAL</b>				<b>30791.68</b>

*Fuente: Elaboración propia en base a la revista, año 2021*





### 6.1.1.2 COSTO DE ACCESORIOS TUBERÍAS, BOMBAS Y CONEXIONES

- ✓ Válvulas mariposa

Una válvula de mariposa es un dispositivo para interrumpir o regular el flujo de un fluido en un conducto, aumentando o reduciendo la sección de paso mediante una placa, denominada "mariposa", que gira sobre un eje. Las válvulas de mariposa al disminuir el área de paso, aumentan la pérdida de carga local en la válvula, reduciendo el flujo. Este accesorio se necesitará incorporar en la tubería del flujo de salida del lodo y salida del agua clarificada.

- ✓ Uniones Acero Galvanizado

Las uniones con tubería de acero galvanizado normalmente deben realizarse mediante el roscado al accesorio correspondiente, aunque también se admite la utilización de las denominadas «uniones rápidas», consistentes en el acople del tubo a un accesorio de apriete por compresión. Por la incorporación de las válvulas a nuestro sistema sin la necesidad de soldar. Se necesitará unión entre la tubería del flujo clarificado y la incorporación de la manguera para evacuar el agua hasta un cuerpo de agua natural.

De manera similar se utilizará un accesorio de variación de sección.

- ✓ Tubos de acero galvanizado

Solo se requiere tubería en la salida del flujo clarificado, de las 0.5 m de longitud y con un diámetro nominal de 12".

- ✓ Manguera

La manguera de flexible de 6" de diámetro nominal, para descargas industriales.

- ✓ Bomba centrífuga

Se utilizarán dos bombas centrífugas, una para suministrar agua desde el efluente natural para lavar el material extraído y la otra bomba se usará para la extracción del lodo del espesador. Las bombas tendrán de 2 [Hp] de potencia con un precio comercial de 5500 [Bs].

- ✓ Ingeniería e imprevistos

La puesta en marcha del equipo y el montaje propiamente se incurren en gastos de transporte, almacenes, insumos, personal de apoyo y otros; significa un 10% del costo del equipo.



**Tabla 6.5. COSTO DE ACCESORIOS TUBERÍAS, BOMBAS Y CONEXIONES**

N°	Unid.	Descripción	Precio en [Bs]			Precio en [\$]
			Unit.	Cant.	Total	
1	Pza.	Válvulas mariposa 3"	729	2	1458,00	209,48
2	Pza.	Uniones Acero Galvanizado 3"	395	1	395,00	56,75
3	Pza.	Uniones Acero Galvanizado 6"	250,00	1	250,00	35,92
4	Pza.	Uniones Acero Galvanizado 12"	960,00	1	960,00	80,46
5	Mts.	Tubos de acero galvanizado 12"	1360,00	1	1360,00	195,40
6		Reducción Concéntrica 12" -16"	1550,00	1	1550,00	222,70
7	Mts.	Manguera 6"	200,00	6	1.200,00	172,41
8		Costo de instalación de las tuberías y accesorios	950,00	1	950,00	136,49
9		Costo de mano de obra por soldadura en las uniones	35,00	7	245,00	35,20
10	Pza.	Bomba centrífuga	6.000,00	1	6.000,00	862,07
11		Ingeniería de imprevistos	8.579,146	1	8.579,146	1232,64
Total [Bs]					22947,146	2555,19

*Fuente: Dimensiones del sedimentador real del sedimentador. Elaboración propia agosto 2022*

### 6.1.1.3 COSTO DE OPERACIÓN

En este acápite se realiza una estimación económica del costo de mantenimiento, costo de mano de obra, que se engloban en costo de operación.

El costo de mano de obra del equipo, se basa en la manipulación u operación del equipo. Esta actividad es de poca dificultad y repetitiva, se le puede atribuir un 20% del salario nacional de 2200 [Bs]; dando como resultado de costo de mano de obra de 440 [Bs].

El costo de mantenimiento del equipo mensual requiere muchos puntos de análisis del funcionamiento del equipo, personal, repuestos y otros, pero podemos realizar un cálculo



aproximado del costo del mantenimiento que representa 3% del costo total de reposición del equipo más su instalación.

La disposición final de los lodos en este proceso en particular, no produce riesgos para la salud y el ambiente, por tal motivo, el costo de la disposición final de lodos en superficie suele generar costos de transporte y compactación. La disposición final se realizará en sitios llamados buzones; que son áreas no cultivables provistas de un drenaje fluvial adecuado, alejados de áreas urbanas y con señalización distintiva.

El costo de disposición de los lodos se resume en el costo de acarreo de escombros, costo estimando en el módulo de movimiento de tierras ítem MT -009 Retiro de escombros con volqueta de la revista de precios unitarios 2021, el costo de 68.60 Bs. por metro cubico trasladado. El costo del traslado del lodo será el 5% del traslado de todo el material explotado mensualmente es 130 m<sup>3</sup> por mes, resultando 8918 Bs. por el acarreo mensual. El 5% de esta cantidad resulta 445.9 Bs.

$$\text{Costo de Operacion} = \text{Costo}_{\text{Mano de obra}} + \text{Costo}_{\text{disposicion final del lodo}} + \text{Costo}_{\text{Mantenimiento}}$$

$$\text{Costo de Operacion} = 20\% * 8580[\text{Bs}] + 5\% * 8918 [\text{Bs}] + 3\% * (30791.68 + 950,00)[\text{Bs}]$$

$$\text{Costo de Operacion} = 2282.79[\text{Bs}]$$

En resumen, este acápite se refleja en la siguiente tabla 6.6 la estimación económica de la construcción del sedimentador fijo circular de fondo cónico. El material de construcción es de hormigón armado, por ser un material recomendable para este tipo de operación además de ser económico y comercial.



**Tabla 6.6. ESTIMACION ECONOMICA DE COMSTRUCCION DEL SEDIMENTADOR DE HORMIGÓN ARMADO**

CONCEPTO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDADES	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL PARCIAL (Bs)
<b>CONSTRUCCION DEL SEDIMENTADOR</b>				
<b>COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL SEDIMENTADOR E INSTALACIÓN</b>				
Costo de inversión de movimiento de tierras	m <sup>2</sup>	300	111.65	13718.5
Costo de construcción del sedimentador de muro de hormigón armado	m <sup>2</sup>	50.195	4576.61	57430.735
				71149.23
<b>COSTO DE ACCESORIOS TUBERÍAS, BOMBAS Y CONEXIONES</b>				
Accesorios tuberías, bombas y conexiones	-	1	22947,146	22947,146
<b>COSTO DE OPERACIÓN</b>				
Costo de operación	-	1	2282.79	2282.79
<b>TOTAL EN BOLIVIANOS =</b>				<b>96379.16</b>

*Fuente: Elaboración propia, agosto 2022*

En la tabla 6.6 refleja una estimación de costos de instalación, construcción con hormigón armado y operación del sedimentador es de Bs. 96379.16 a este costo hay que sumarle el costo de diseño, otros costos menores, etc.



**Tabla 6.7. ESTIMACIÓN ECONÓMICA DE CONSTRUCCION DEL SEDIMENTADOR CON ACERO ASTM**

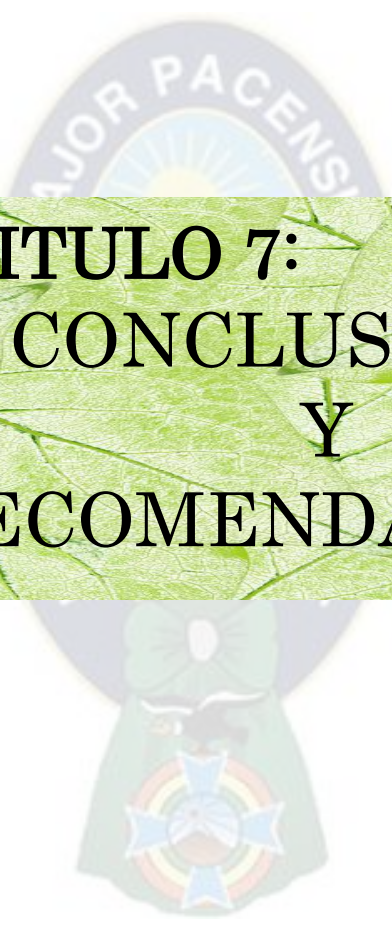
CONCEPTO	UNIDAD DE MEDIDA	CANTIDADES	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL PARCIAL (Bs)
<b>CONSTRUCCION DEL SEDIMENTADOR</b>				
<b>COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL SEDIMENTADOR E INSTALACIÓN</b>				
Costo de inversión de movimiento de tierras	m <sup>2</sup>	300	111.65	13718.5
Costo de construcción del sedimentador de acero de construcción ASTM131	m <sup>2</sup>	50.195	819.68	30791.68
				44510,18
<b>COSTO DE ACCESORIOS TUBERÍAS, BOMBAS Y CONEXIONES</b>				
Accesorios tuberías, bombas y conexiones	-	1	22947,146	22947,146
<b>COSTO DE OPERACIÓN</b>				
Costo de operación	-	1	2282.79	2282.79
<b>TOTAL EN BOLIVIANOS=</b>				<b>69740,116</b>

*Fuente: Elaboración propia, agosto 2022*

En la tabla 6.7 refleja una estimación de costos de instalación, construcción con acero de construcción y operación del sedimentador que es de Bs. 69740,116 a este costo hay que sumarle el costo de diseño, otros costos menores, etc.



**CAPITULO 7:  
CONCLUSIONES  
Y  
RECOMENDACIONES**







## CAPÍTULO 7

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 7.1 CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados del presente trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. La determinación del caudal que alimentara al sedimentador es la base de todos los cálculos que se realizaron en este proyecto. Por tanto, el caudal medido experimentalmente concretará las dimensiones del sedimentador. El método empleado para medir el caudal experimental fue el método del flotador, por ser el único método aplicable a la característica física del canal de 0.435 m por 0.07 m de altura de tirante hídrico, dando como resultado un caudal de 16.90 (l/s).
2. La caracterización del caudal, se tomó muestras compuestas y simples; se determinó viscosidad, potencial de hidrogeno, densidad, densidad del sólido, conductividad, turbiedad y DQO.
3. Se determinó la velocidad de sedimentación de manera analítica y experimental. Analíticamente se determinó la velocidad de sedimentación con la Ley de Stokes en base a referencias bibliográficas y datos obtenidos en laboratorio y se obtuvo el resultado 0.00685 cm/s. En el caso de la determinación de la velocidad experimental por el método de Coe y Clevenger resulto 0.9045 cm/mn.
4. Para el dimensionamiento del sedimentador se utilizó el dato de la velocidad de sedimentación experimental y la velocidad terminal. Las dimensiones se calcularon mediante dos métodos: Método Talmage y Fitch y Método Grafico Fair, Geyer y Okum, con los cuales se determinó el área y altura del sedimentador.

Método	Área	Altura
Talmage y Fitch	$A_T = 12.61 \left[ \frac{\text{dia} * m^2}{\text{Ton}} \right]$	2.76 m
Fair, Geyer y Okum,	$A_C = 23.23 [m^2]$	0.0022 m





El método Talmage y Fitch es un método que realiza los cálculos previendo factores de seguridad consideradas para el diseño, es un método que analiza todos los escenarios de sedimentación, pero se basa en experimentos estacionarios. En cambio, el método gráfico Fair, Geyer y Okum, es un método mediante ábacos gráficos que predice la velocidad de sedimentación cuando desconocemos si la sedimentación será turbulenta, de transición o laminar, se puede concluir que es método que se aproxima a un cálculo en sistema continuo.

5. El sedimentador circular de cono profundo permite optimizar la auto dilución, permite una alta compresión del lodo, se alarga el tiempo de retención. Ocupando una menor área unitaria.
6. Para el escalamiento del sedimentador, se basó en la teoría de semejanza geométrica, semejanza cinética y semejanza dinámica. Se trabajó con una escala 1:14, de un área de 52.045 m<sup>2</sup> a un área de 0.01821 m<sup>2</sup>.
7. Por último, se realizó un análisis de costo de construcción, implementación y operación del sedimentador. El costo de construcción del sedimentador con acero de construcción que es un de Bs. 69740,116 y el costo de construcción con hormigón armado es de Bs. 96379.16 Podemos concluir que este coste cambiara según la oferta y demanda de: precios de material, precios de mano de obra, costos de transporte, costo de imprevistos, costo material hidráulico y otros.
8. En cuanto a la determinación de oro en los lodos. La determinación de oro se realizó en el instituto de la carrera de ingeniería de metalurgia y materiales, a partir de los lodos obtenidos durante la experimentación. Se obtuvo una respuesta de dos pruebas de la muestra de 300 g se obtuvo 0.0014 g y la muestra de lodo de 100 g se obtuvo 1 g/ton de oro.



9. Adoptar tecnologías en cada etapa del proceso de explotación del oro son soluciones tecnológicas integradas en los ciclos naturales para combatir el impacto ambiental producido por la explotación de oro de manera artesanal. La implementación de este tipo de sedimentadores plantea la sostenibilidad local que se interrelaciona entre los distintos contextos y niveles del desarrollo sostenible. Es decir, la sostenibilidad lograda en un ámbito concreto no sólo contribuye al grado de sostenibilidad de los niveles superiores, sino que también influye en la sostenibilidad de los demás contextos con los que se relaciona (flora y fauna).

## 7.2 RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio más exhaustivo en cuanto a la determinación de caudal para el diseño de los sedimentadores, es de importancia tener datos de caudal durante las 4 estaciones del año
2. Se recomienda trabajar con una escala mayor para construir el sedimentador a escala laboratorio, ya que la altura del tirante hidráulico es pequeña en el equipo que se construyó y se hizo dificultoso mantener una medida de tirante hidráulico constante.
3. Se recomienda prever una ligera inclinación a la canaleta receptora de  $10^\circ$  del sedimentador.
4. La construcción de un sedimentador por gravedad incluye muchos conceptos que no se tomaron en cuenta de manera esencial, por tanto se recomienda realizar un análisis de cálculo por presión interna, cálculo por presión externa, cálculo por peso propio, cálculo por presión del viento, cálculo por sismo, cálculo por vibraciones, cálculo de la deflexión máxima, cálculo de los soportes, cálculo de patas de apoyo, cálculo de mensuras de apoyo y otros que son especialidad de los ingeniería mecánica. También cabe mencionar que el tipo de soldadura que se aplicara es otro acápite interesante que no se realizó ningún calculo, solo se realizó la valoración de tablas de diseño.



# BIBLIOGRAFIA



## BIBLIOGRAFÍA

- (s.f.). En H. E. Babbitt, & E. Baumann, *Alcantarillado y Tratamiento de Aguas Negras* (pág. 498). Mexico : CONTINETAL S. A.
- BABBITT, H., & BAUMANN, E. (s.f.). Sedimentacion. En H. E. BABBITT, & E. R. BAUMANN, *Alcantarillado y Tratamiento de Agua Negras* (pág. 489). Mexico: Continental S. A.
- Wotruba, H., Hruschka, F., Hentsche, T., & Priester, M. (1998). *Manejo Ambiental en la pequeña Minería*. La Paz Bolivia: MEDMIN.
- AMBIENTAL, C. D. (2010). *RELEVAMIENTOS DE MEDICIÓN DE PARAMETROS FISICO-QUIMICOS DEL AGUA DEL RIO MATANZA RIACHUELO PARA ESTIMAR LA INCIDENCIA DE LOS EVENTOS CLIMATICOS DE SUDESTADAS*. Argentina: ACUMAR.
- ÁVILA, P. P. (2014). *Formas de producción de las cooperativas mineras en Bolivia*. La Paz - Bolivia: CEDLA.
- Choque, S. E. (2016). Diseño y Fabricacion de Espesador de Relaves de cobre de 15 metros de diametro . *Escuela Profesional de Ingenieria Mecanica , Mecanica Electrica y Mechatronica* , 46.
- Cordero Mera , A., & Peñafiel Martínez , N. (Marzo de 2017). *CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DEL MACRO DESLIZAMIENTO*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/288584692.pdf>
- Córdova, H. (23 de Octubre de 2018). Informe de Cooperativas Mineras Auríferas en el departamento de La Paz. *La Razon*, pág. 6.
- DRES. ANTONIO PASCALE, O. B. (2003). Exposición accidental a polvo de oro. *Archivos de Pediatría del Uruguay*, 1-4.
- Eddy, M. &. (1995). Operaciones Fisicas Unitarias . En M. &. Eddy, *Ingenieria de Aguas Residuales* (pág. 252). España: Impresa S. A. .

FLEMING, B. (2021). *EQUIPMENT AND FIXTURES INDEX, PERCENT GOOD AND VALUATION FACTORS*. Obtenido de <https://www.boe.ca.gov/proptaxes/pdf/ah58121.pdf>



Fuente, C. G. (2013). *Parámetros fisicoquímicos del agua*. PV ALBEITAR.

GARAY, E. I. (2013). *“Explotación Y Exportación De Concentrados De Mineral De Oro A Estados Unidos De América”*. LA PAZ.

GDLP. (2019). *Informe Anual*. La Paz.

Giraldo, A. V. (2013). EL ORO: DE LA ALQUIMIA A LA RELATIVIDAD. *Revista Colombiana de Materiales*, 1-24.

INDUSTRY. (12 de Marzo de 2012). *Minería en Bolivia*. Recuperado el Enero de 2020, de <https://boliviaminera.blogspot.com/2012/03/la-paz-posee-gran-riqueza-minera.html>

Informes de producción COMIBOL, M. M. (2020). *Unidad de Análisis y Política Minera*. La Paz: Ministerio de Minería y Metalurgia.

Luisa Fernanda Muñoz-Vallejo, L. F.-A.-G. (2012). Percepción sobre daños a la salud y utilidad de medidas de protección de personas expuestas ocupacionalmente al mercurio en la minería del oro. *Rev. Lasallista Investigacion*, 6.

Maldonado, I. V. (s.f.). *Ingeniería Ambiental*. Obtenido de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/siete.pdf>

META, P. (s.f.). *PRODUCCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LODOS*. Obtenido de <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/50969/Laca18%20META%20Produccion%20y%20caracteristicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>  
<https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/50969/Laca18%20META%20Produccion%20y%20caracteristicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

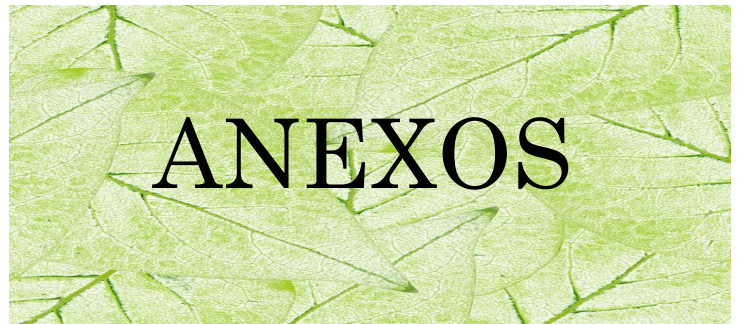
METALURGIA, M. D. (2019). *SITUACIÓN DE LA MINERÍA Y BOLETÍN ESTADÍSTICO TERCER TRIMESTRE 2019*. La Paz: Editora Presencia S.R.L.

MEXICANA, N. (2015). *ANÁLISIS DE AGUA - MEDICIÓN DE SÓLIDOS Y SALES*. MEXICO.

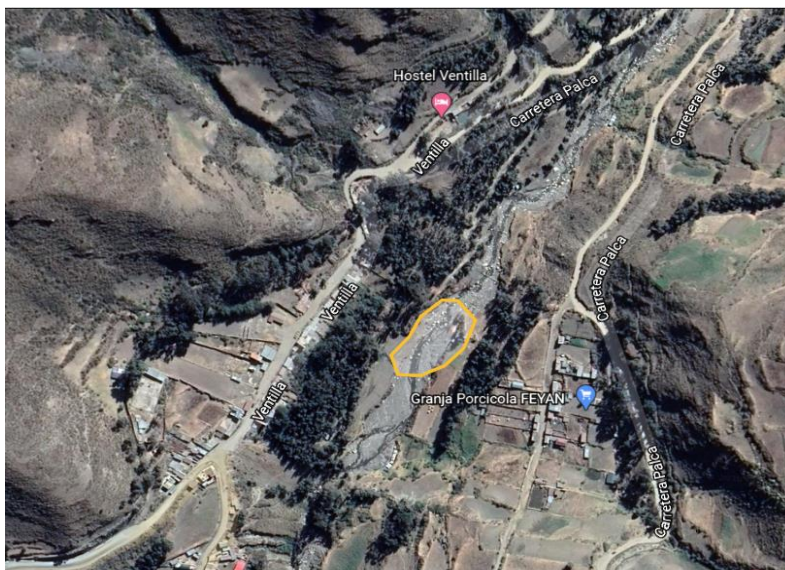
Nerlis Pájaro Castro, J. O. (2013). Nanotecnología aplicada a la medicina. *Revista Científica Guillermo de Ockham*, 1-10.



- OMS, O. M. (2017). *La minería aurífera artesanal*. Estados Unidos.
- PALCA, G. (2011). *Plan de Desarrollo Municipal Palca 2007-2011*. Recuperado el 2020, de [https://www.portalces.org/sites/default/files/migrated/docs/C.C\\_Una\\_mirada\\_local\\_a\\_un\\_fenomeno\\_global\\_\(AguaAmbiente\).pdf#page=11](https://www.portalces.org/sites/default/files/migrated/docs/C.C_Una_mirada_local_a_un_fenomeno_global_(AguaAmbiente).pdf#page=11)
- Peña Abreu, R., & Sam Palanco, C. (2007). SOLUCIÓN AUTOMÁTICA DEL METODO DE TALMAGE Y FITCH PARA PRUEBAS. *Tecnología Química*, vol. XXVII, 10.
- PERU, M. D. (2011). *MINERÍA AURÍFERA EN MADRE DE DIOS Y CONTAMINACION CON MERCURIO*. Lima Peru: Súper Gráfica E.I.R.L.
- Poveda Avila, P., Niogales Vera , N., & Calla Ortega , R. (2015). El Oro en Bolivia. En P. Poveda Avila, N. Niogales Vera, & R. Calla Ortega. La Paz Bolivia : CEDLA .
- Rodríguez Avello, S., Butragueño Muñoz, J., & Grima Olmedo, C. (s.f.). *Evolución de los equipos de decantación para estériles de mina*. Obtenido de Ingenieros de Minas de Madrid: [https://oa.upm.es/29987/1/INVE\\_MEM\\_2013\\_165763.pdf](https://oa.upm.es/29987/1/INVE_MEM_2013_165763.pdf)
- Sawyer, C., & McCarty. (1978). *Chemistry for Environmental Engineering*. New York: McGrawHill Book Company.
- Sedimentacion. (2006). En J. A. Rojas, *Purificacion del Agua* (pág. 141). Colombia: E. Colombiana de Ingenieria.
- Teoria de la Sedimentacion del Agua. (2000). En A. V. Jorge, *Teoria y Práctica de la purificacion del agua* (pág. 199). España: EDITORIAL VARIOS.



ANEXO A: IMÁGENES DE GOOGLE EARTH DE LA ZONA DE EXPLOTACIÓN



Fuente: <https://www.google.com/maps/place/La+Paz/@-16.5207124,-68.1240775,23900m/data=!3m2!1>



Fuente: <https://www.google.com/maps/place/La+Paz/@-16.5207124,-68.1240775,23900m/data=!3m2!1>





**ANEXO B: SISTEMA DE SEDIMENTACIÓN A ESCALA LABORATORIO**



Fuente: Vista Frontal del sedimentador prototipo. Elaboración propia



Fuente: Vista desde arriba del sedimentador prototipo. Elaboración propia

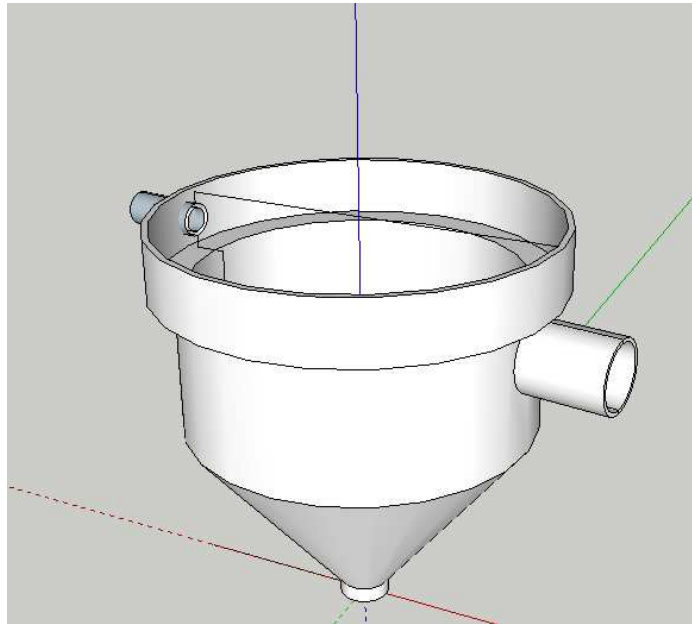


Fuente: Vista con la muestra del sedimentador prototipo. Elaboración propia

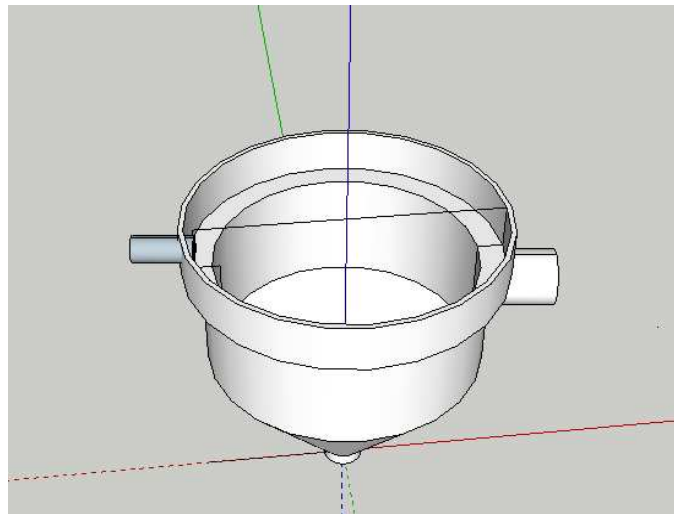


**ANEXO B: PLANOS 3D DEL SISTEMA DE SEDIMENTACIÓN**

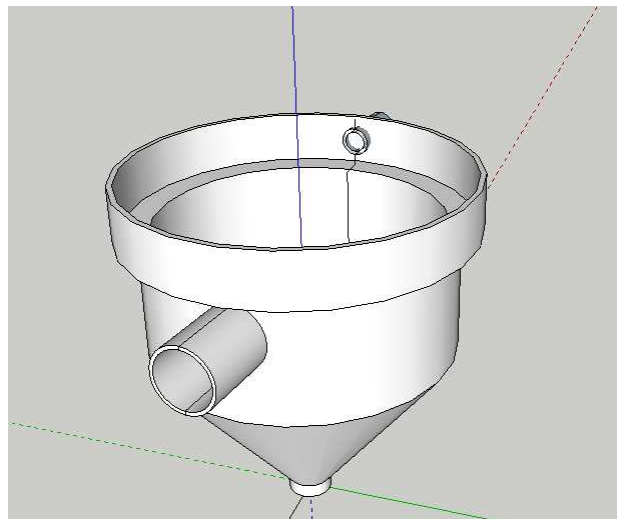
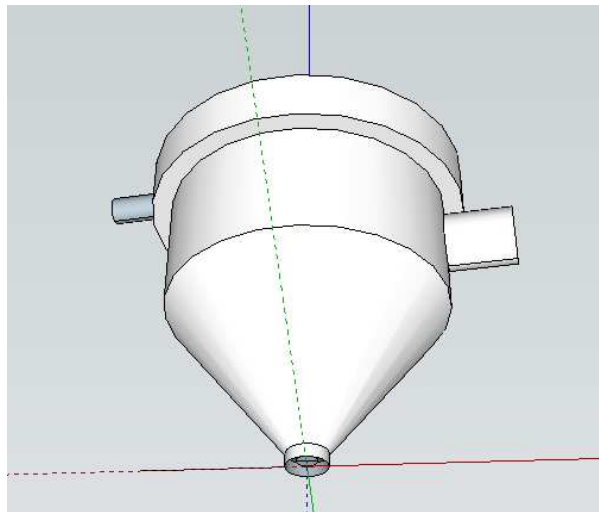
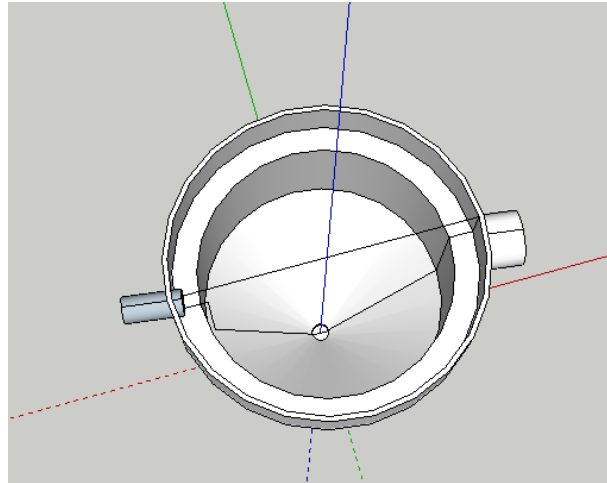
Vista del sedimentador desde diferentes perspectivas



Fuente: Elaboración Propia con el programa SketchUp Pro 2022

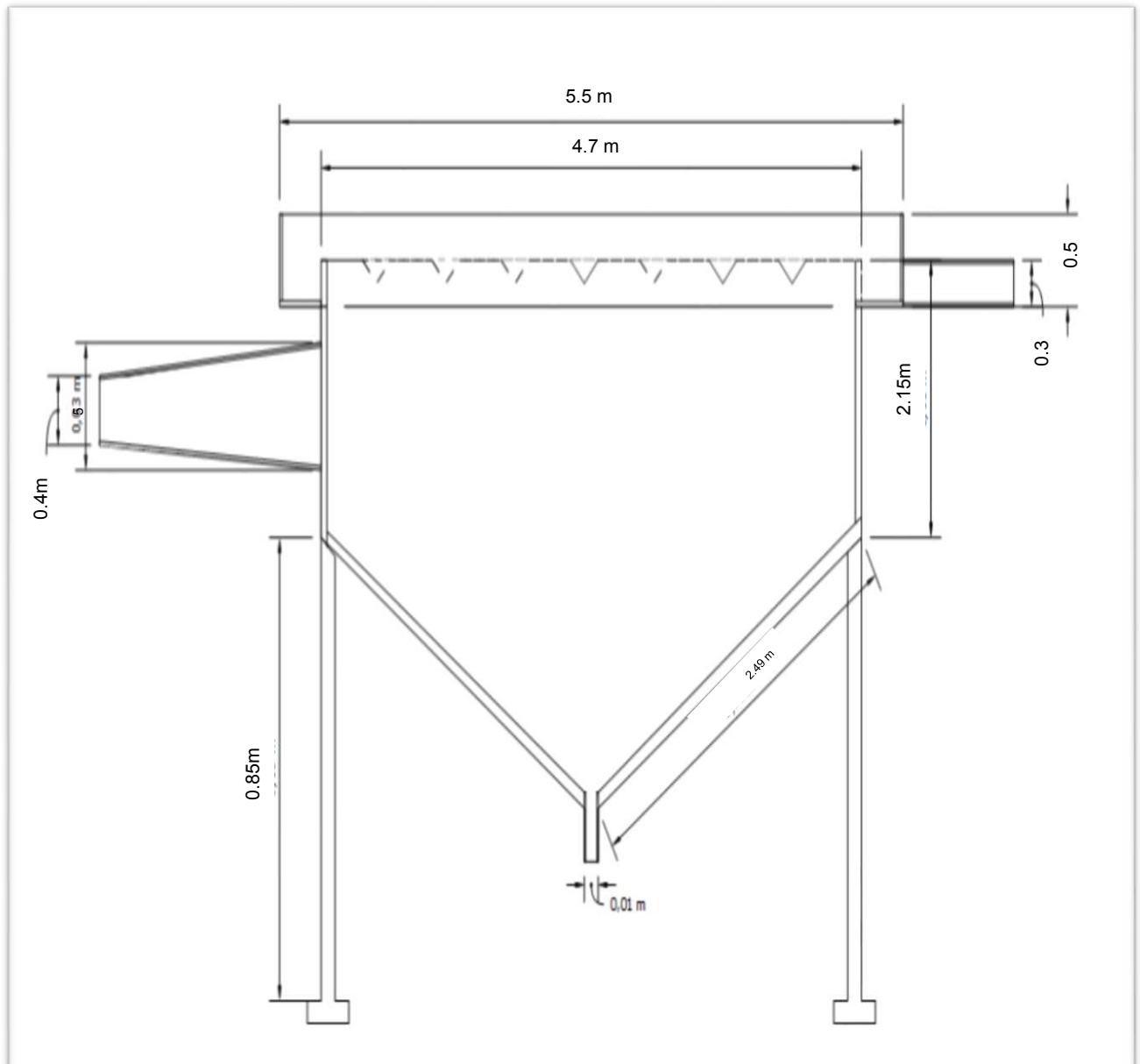


Fuente: Elaboración Propia con el programa SketchUp Pro 2022



Fuente: Elaboración propia en el programa SketchUp Pro 2022

## ANEXO B: DIMENCIONES DEL SEDIMENTADOR



<b>PROYECTO:</b> DISEÑO DE UN SEDIMENTADOR PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO CONTENIDO EN LOS LODOS DE LA COOPERATIVA MINERA AURÍFERA	<b>NOMBRE DEL RESPONSABLE</b> Univ. Delia Ríos García	<b>ESCALA :</b> <b>PIEZA:</b>	<b>DIMENCION: m</b> TANQUE SEDIMENTADOR
	<b>DESCRIPCIÓN:</b> DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA DEL SEDIMENTADOR CIRCULAR CÓNICO	<b>ING. QUÍMICA</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b> <b>UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS</b>	<b>N° PLANO:</b> 01 <b>HOJA N°:</b> 1 <b>ARCHIVO:</b>

## ANEXO B: HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL ESPESADOR PROTOTIPO



EQUIPO ESPESADOR	
Función:	Separación de sólido – líquido
Operación:	Continua
Tipo de material:	Acero inoxidable
Diámetro del cilindro:	5.5
Altura del cilindro:	2.15
Altura del cono:	0.85
Angulo del cono:	30°
Flujo de alimentación:	27124.8
Flujo de salida de lodos :	635.04
Flujo de salida de agua clarificada :	26489.7606
Concentración de lodos:	0.72
Concentración del agua clarificada:	0.28

Fuente: Elaboración propia

**Tabla -** Criterios de diseño para el espesado de lodos por gravedad ELG

Parámetro	Símbolo	Valor		Unidad
		Rango	Típico	
Carga de sólidos del ELG	$C_{SS_1}$	90 - 150	140	Kg/m <sup>2</sup> d
Tiempo de residencia hidráulico del ELG	$tr_{h_1}$	1,5 - 2,5	2	h
Pendiente del cono	$\alpha$	10 – 45	20	°
Altura de seguridad del ELG	Hs	0,5 - 1,5	1	m
Número de rasquetas	Nr	2 – 4	2	u
Relación altura fosa de lodos/espesador	$R_{FE}$	10 – 30	20	%
Relación base de rasquetas/cono	$R_{R/C}$	5 - 15	10	%

Fuente: (Metcalf, y otros, 1996 pág. 669) Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización Realizado por: Diana C. Macera V. 2017

ANEXO C: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CONTENIDO DE ORO EN LOS LODOS  
LABORATORIO DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES DE  
INGENIERÍA DE METALURGIA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN METALURGIA Y MATERIALES



No. Certif. : 012-A/2021

Fecha: 19/02/2021

**CERTIFICADO DE ANÁLISIS QUÍMICO**

CLIENTE: Delia Ríos García

EMPRESA: Particular

MUESTRAS: 1(Muestra)

ANÁLISIS POR: Au

RESULTADOS:

Nº	Código	Elemento	Unidades	Contenido
1	S/C	Au	g/Ton	1.00

  
Lic. Oscar Calle Calderón.  
LABORATORIO QUÍMICO

Vo. Bo.

  
Dr. Ing. Bonifacio Alejo Ticona  
DIRECTOR  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES  
EN METALURGIA Y MATERIALES  
I.I.M.S.A.

C.c.: Archivo IIMETMAT





**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN METALURGIA Y MATERIALES



No. Certif.: 032/2021

Fecha: 27/04/2021

### CERTIFICADO DE ANÁLISIS QUÍMICO

CLIENTE: Delia Ríos García

EMPRESA: Particular

MUESTRA: 1 (Muestra)

ANÁLISIS POR: Au.

#### RESULTADOS:

Nº	Código	Elemento	Unidades	Contenido
1	ML I-II	Au	g	0.0014
2				

  
 Lic. Oscar Calle Calderón.  
**LABORATORIO QUÍMICO**

VoBo.

  
 Dr. Ing. Bonifacio Alejo Ticona  
 DIRECTOR  
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES  
 EN METALURGIA Y MATERIALES  
 U.M.S.A.

C.c.: Archivo IIMAT



## ANEXO D: RMCH ANEXO A2 LIMITES PERMISIBLES PARA DESCARGAS LIQUIDAS



NORMA PARÁMETROS	PROPUESTA	
	DIARIO	MES
Cobre	1.0	0.5
Zinc	3.0	1.5
Plomo	0.6	0.3
Cadmio	0.3	0.15
Arsénico	1.0	0.5
Cromo + 3	1.0	0.5
Cromo + 6	0.1	0.05
Mercurio	0.002	0.001
Antimonio(&)	1.0	
Estaño	2.0	1.0
Cianuro libre (a)	0.2	0.10
Cianuro libre (b)	0.5	3.0
PH	6.9	6.9
Temperatura(*)	+5°c	+5°c
Compuestos fenólicos	1.0	0.5
Sólidos Susp. Totales	60	
Colifecales (NMP/100 ml)	1000	
Aceite y Grasas ( c )	10.0	
Aceite y Grasas (d)	20.0	
DB05	80.0	
DQ0( e )	250.0	
DQ0(f)	300.0	
Amonio como N	4.0	2.0
Sulfuros	2.0	1.0

Fuente: Reglamento en materia de contaminación hídrica





## ANEXOS E: IMPACTOS AMBIENTALES

CARACTERÍSTICAS DE IMPACTO														
PROCESO FASE O ACTIVIDAD	ASPECTO AMBIENTAL	FACTOR AMBIENTAL	ATRIBUTO AMBIENTAL	IDENTIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y PONDERACIÓN DE IMPACTOS (*)									EVALUACIÓN DE IMPACTOS	NORMAS DE REFERENCIA
Extracción del material	Emisión de ruido	ATMOSFE RA	Ruido en el momento de la voladura	D	T	L	P	R	R	N	N	-1	Incremento del nivel local de ruido	RMCA
Trituración y molienda	Emisión de ruido	ATMOSFE RA	Ruido de equipos	D	T	L	P	R	R	N	N	-1	Incremento del nivel local de ruido	
Concentra ción gravimétric a	Vertidos de agua	AGUA	Vertido de agua del proceso al rio	D	T	L	P	R	R	N	N	-1	Vertido de gua del proceso de concentración gravimétrica al rio	RMCH
Amalgama ción	Emisión de ruido	ATMOSFE RA	Nivel local de ruido ambiental	D	T	L	P	R	R	N	N	-1	Incremento del nivel local de ruido	RMCA
Amalgama ción	Uso de sustancias peligrosas	SP	Cantidad de SP en el agua	D	P	L	P	R	R	N	N	-2	Incremento de sp en el ambiente	RMSP



Amalgamación	Vertidos de agua	AGUA	Vertido de agua del proceso al río	D	P	L	P	R	R	N	N	-2	Vertido de agua del proceso de amalgamación al río	RMCH
Amalgamación	Generación de residuos	SUELO	Acumulación de residuos	D	T	L	P	R	R	N	N	-2	Generación de colas	
Quema de la malgama	Gases de mercurio	ATMOSFERA	Calidad del aire	D	T	L	P	R	R	N	N	-2	Incremento de emisiones	RMCA
Colocación del concentrado amalgamado al elutriador	Vertidos de agua	AGUA	Vertido de agua del proceso al río	D	T	L	P	R	R	N	N	-2	Vertido de agua del proceso de elutriación al río	RMCH

Fuente: Elaboración Propia



## IDENTIFICACION DE IMPACTOS AMBIENTALES

ASPECTOS GENÉRICOS ACTIVIDADES	EMISIÓN DEL AIRE	EMISIÓN DEL RUIDO O VIBRACIÓN	VERTIDOS AL AGUA	DESCARGA AL SUELO	USO DE MATERIA PRIMAS Y RECURSOS NATURALES	USO DE ENERGÍA O COMBUSTIBLE	USO DE SUSTANCIAS PELIGROSAS	EMISIÓN DE ENERGÍA	GENERACIÓN DE RESIDUOS	CAMBIO DE PROPIEDADES FÍSICAS
Extracción del material		01								
Trituración y molienda		01								
Concentración Gravimétrica			01							
Amalgamación		01	02				03		04	
Elutriación y quema de la amalgama	01		02							

Fuente: Elaboración Propia



### MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN

DESCRIPCIÓN DE LAS MEDIDAS ACCIONES ,ACTIVIDADES Y OBRAS DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN	RESULTADOS O PRODUCTOS OBJETIVAMENTE VERIFICABLES
Monitoreo de ruido ambiental ANUAL	Ruido ambiental que regrese en los límites del anexo 6 del reglamento en materia de contaminación atmosférica
Monitoreo de ruido ambiental ANUAL	Ruido ambiental que ingrese en los límites del anexo 6 del reglamento en materia de contaminación atmosférica
Monitoreo de agua ANUAL	Efluentes industriales que ingresen dentro del cuadro n° a1 del reglamento en materia de contaminación hídrica
Monitoreo de ruido ambiental ANUAL	Ruido ambiental que ingrese en los límites del anexo 6 del reglamento en materia de contaminación atmosférica

Fuente: Elaboración Propia



## ANEXO F: COTIZACIÓN DE ACERO DE CONSTRUCCIÓN POR ÁREA

### Planchas Navales LAC



#### USOS

Construcción de embarcaciones pesqueras, chatas, pangas, boyas, tanques, tolvas, reparación y mantenimiento, etc.



#### NORMAS TÉCNICAS

ASTM A131 con certificación equivalente LRS, BV o ABS.

#### DIMENSIONES ESTÁNDAR

milímetros	
4.50	12.00
4.75	12.50
6.00	12.70
6.35	15.80
6.40	16.00
7.90	19.00
8.00	20.00
9.50	25.00
10.00	25.40



#### PROPIEDADES MECÁNICAS

##### ASTM A 131 / A 131M

Grado : A  
 Límite de Fluencia mínimo  $\geq 235$  MPa  
 Carga de rotura  $\approx 400 - 520$  MPa  
 Elongación  $\geq 24\%$  (2")  
 $21\%$  (8")

##### LRS, BV, ABS

Grado : A  
 Límite de Fluencia mínimo  $\geq 235$  MPa  
 Carga de rotura  $\approx 400 - 520$  MPa  
 Elongación  $\geq 22\%$  (8")

( ) Tamaño de probeta.

NORMAS EQUIVALENTES o APROXIMADAS: LLOYDS REGISTER OF SHIPPING Grado A (LRS A), BUREAU VERITAS Grado A (BV A) AMERICAN BUREAU OF SHIPPING (ABS).



#### PRESENTACIÓN

Pueden suministrarse sueltas como enzunchadas. Las bobinas se suministran completas.

#### TOLERANCIAS:

\*De acuerdo al JIS G 3193, las demás al ASTM A 6/A 6M



Casa / Todas las industrias / Mineraleo y metalurgia / Acero al carbón / Láminas de acero



**Super** ASTM A131-placa Naval de acero para construcción de barcos, con revestimiento de zinc

1 - 99 Toneladas	100 - 499 Toneladas	$\geq 500$ Toneladas
<b>6.930,20 BOB</b>	<b>6.237,18 BOB</b>	<b>5.544,16 BOB</b>

Beneficios: Reembolsos rápidos en pedidos de menos de 1000 USD [Reclamar ahora](#)

Grosor: **6MM - 100MM**

Muestras:

Fuente: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/ASTM-A131-Ship-Building-Steel-Naval-60372717109.html>



## ANEXO F: COTIZACIÓN DE ESPERADORES CIRCULARES

También puede interesarte



¡De alta calidad!  
Espesador/espesador d...

**Bs 148.573,60 - Bs 152...**

1.0 Set (Cantidad mínima de compra)



Tanque de equipo  
espesante concentrado...

**Bs 190.036,00 - Bs 193...**

1 Set (Cantidad mínima de compra)



Máquina espesadora de  
lodos para minería de...

**Bs 286.774,69 - Bs 290...**

1.0 Set (Cantidad mínima de compra)



Espesador de minería de  
cola de Mineral de alta...

**Bs 150.487,79 - Bs 152...**

1 Set (Cantidad mínima de compra)



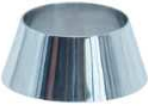
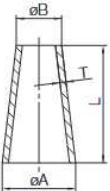
Espesador de lodos  
dorados, mejor y eficiente

**Bs 150.487,79 - Bs 152...**

1 Set (Cantidad mínima de compra)

Fuente: [https://spanish.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product\\_en&CatId=&tab=all&SearchText=bomba+centrifuga+2hp&viewtype=](https://spanish.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&tab=all&SearchText=bomba+centrifuga+2hp&viewtype=)

REDUCCIÓN CONC. SOLDAR DIN	Código A-316L	DN	A mm	B mm	L mm	T mm	Peso kg
	854RC018012	15x10	18	12	11	1,5	0,006
	854RC022012	20x10	22	12	18	1,5	0,008
	854RC022018	20x15	22	18	7	1,5	0,010
	854RC028012	25x10	28	12	28	1,5	0,020
	854RC028018	25x15	28	18	18	1,5	0,024
	854RC028022	25x20	28	22	23	1,5	0,025
	854RC034018	32x15	34	18	30	1,5	0,030
	854RC034022	32x20	34	22	22	1,5	0,035
	854RC034028	32x25	34	28	11	1,5	0,037
	854RC040022	40x20	40	22	33	1,5	0,045
	854RC040028	40x25	40	28	22	1,5	0,040
	854RC040034	40x32	40	34	11	1,5	0,045
	854RC052028	50x25	52	28	44	1,5	0,074
	854RC052034	50x32	52	34	33	1,5	0,078
	854RC052040	50x40	52	40	22	1,5	0,040
	854RC070034	65x32	70	34	62	2,0	0,200
	854RC070040	65x40	70	40	51	2,0	0,125
	854RC070052	65x50	70	52	29	2,0	0,080
	854RC085040	80x40	85	40	78	2,0	0,225
	854RC085052	80x50	85	52	56	2,0	-

Fuente: [https://spanish.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product\\_en&CatId=&tab=all&SearchText=tanques+sedimentador&viewtype=](https://spanish.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&tab=all&SearchText=tanques+sedimentador&viewtype=)



## ANEXO G: ESPESOR MÍNIMO PARA PLANCHAS DE TANQUES

DIÁMETRO NOMINAL DEL TANQUE		ESPESOR NOMINAL DE PLACA	
metros	pies	milímetros	pulgadas
< 15	< 50	5	3/16
15 < 36	50 < 120	6	1/4
36 < 60	120 < 200	8	5/16
> 60	> 200	10	3/8

Fuente: Estándar Básico API 650

**Tabla – Esfuerzos permitidos para los materiales en acuerdo con API 650, para tanques de almacenamiento atmosféricos.**

Especificación de Placa	Grado	Espesor de Placa Nominal "t", pulg	Esfuerzo de Cedencia, lbf/pulg <sup>2</sup>	Esfuerzo a Tensión mínimo, lbf/pulg <sup>2</sup>	Esfuerzo de Diseño por Producto, "Sd", lbf/pulg <sup>2</sup>	Esfuerzo por Prueba Hidrostática, "St", lbf/pulg <sup>2</sup>
Especificaciones ASTM						
A-283	C		30000	55000	20000	22500
A-285	C		30000	55000	20000	22500
A-131	A, B		34000	58000	22700	24900
A-36			36000	58000	23200	24900
A-131	EH-36		51000	71000	28400	30400
A-573	58		32000	58000	21300	24000
A-573	65		35000	65000	23300	26300
A-573	70		42000	70000	28000	30000
A-516	55		30000	55000	20000	22500
A-516	60		32000	60000	21300	24000
A-516	65		35000	65000	23300	26300
A-516	70		38000	70000	25300	28500
A-662	B		40000	65000	26000	27900



A-662	C		43000	70000	28000	30000
A-537 (1)	1		50000	70000	28000	30000
A-537 (2)	2		60000	80000	32000	34300
A-633 (C,D)	C, D		50000	70000	28000	30000
A-678 (A)	A		50000	70000	28000	30000
A-678 (B)	B		60000	80000	32000	34300
A-737 (B)	B		50000	70000	28000	30000
A-841	Clase 1		50000	70000	28000	30000
A-841	Clase 2		60000	80000	32000	34300
<b>Especificaciones CSA</b>						
G40.21	38W		38000	60000	24000	25700
G40.21	38WT		38000	60000	24000	25700
G40.21	44W		44000	64000	25600	27400
G40.21	44WT		44000	64000	25600	27400
G40.21	50W		50000	65000	26000	27900
G40.21	50WT	$t \leq 2-1/2$	50000	65000 (Nota a)	26000	27900
		$2-1/2 < t \leq 4$	46000	65000 (Nota a)	26000	27900

Fuente: Estándar Básico API 650





## ANEXO H: VALORES DE RUGOSIDAD EQUIVALENTE K

TIPO DE TUBERÍA	k (mm)
Vidrio, plomo, cobre, latón	0,0015 a 0,01
PVC y mangueras plásticas	0,06 a 0,07
Mangueras de caucho	0,03
Tubos industriales de latón	0,025
Hierro fundido nuevo	0,02 a 0,1
Hierro fundido con protección interior de asfalto	0,014 a 0,018
Hierro fundido medio oxidado	0,3 a 0,7
Hierro galvanizado	0,15 a 0,3
Acero laminado nuevo	0,04 a 0,1
Acero soldado nuevo	0,05 a 0,1
Asbesto-cemento nuevo	0,16
Concreto centrifugado nuevo	0,15 a 0,3
Concreto en galerías, encofrado madera normal	1,0 a 2,0
Concreto armado con acabado liso	0,2 a 0,3

Fuente: (FLEMING, 2021)