

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**

**FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL**



**USO DE LAS AGUAS TERMALES COMO  
COAGULANTE EN LA CLARIFICACION DEL AGUA**

**TESIS**

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:  
**INGENIERO SANITARIO**

PRESENTADO POR:

**PARTIDA LEYVA SOLEDAD M.  
VALLADARES FERNANDEZ KARINA M.**

**LIMA – PERU  
2,002**

# USO DE LAS AGUAS TERMALES COMO COAGULANTE EN LA CLARIFICACION DEL AGUA

## INDICE

	Pag.
<b>RESUMEN</b> .....	<b>9</b>
<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>11</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>I. AGUAS TERMALES – GENERALIDADES</b> .....	<b>14</b>
1.1 PANORAMA HIDROTHERMAL DEL PERU .....	14
1.2 BREVE RESEÑA HISTORICA DE LA BALNEOLOGIA EN EL PERU .....	14
1.3 ORIGEN DE NUESTRAS FUENTES.....	16
1.4 AGUA TERMO-MINERO-MEDICINAL .....	22
1.5 ORIGEN DE LAS AGUAS TERMOMINERALES.....	22
1.6 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS AGUAS TERMO MINERO MEDICINALES.....	25
1.7 CLASIFICACION QUIMICA DE LAS AGUAS MINERO MEDICINALES .....	30
1.8 LOCALIZACION DE LOS RECURSOS TERMALES, ATERMALES Y LAGUNAS .....	33
1.9 PRINCIPALES BALNEARIOS DEL PERU .....	38
1.10 AGUAS TERMALES.....	43
1.11 POSIBLE ORIGEN DE LAS FUENTES TERMALES .....	43
1.12 USO DE LAS AGUAS TERMALES Y MINERALES SEGÚN SU TEMPERATURA.....	45
1.13 APLICACIÓN DE LAS AGUAS TERMALES EN LA SALUD .....	47
1.14 INFLUENCIA DE LAS FUENTES TERMALES AL MEDIO AMBIENTE .....	48
1.15 CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO .....	49
<b>II. ASPECTOS GENERALES DEL AREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>50</b>
2.1 UBICACION.....	50
2.2 ACCESIBILIDAD .....	50
2.3 CLIMA .....	52
2.4 FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE.....	52
2.5 MARCO GEOLÓGICO .....	52
2.6 HIDROGEOLOGÍA .....	53
2.7 CARACTERISTICAS DEL AGUA Y SUS PRECIPITACIONES .....	53
2.8 PARAMETROS QUIMICOS QUE INFLUYEN SOBRE EL USO DE LA FUENTE.....	54

2.9	ORIGEN DE LAS AGUAS EN EL SECTOR DE ESTUDIO.....	55
2.10	USO DEL AGUA TERMAL EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	55
<b>III.</b>	<b>TEORIA DE COAGULACION Y FLOCULACION .....</b>	<b>57</b>
3.1	INTRODUCCION.....	57
3.2	PARTICULAS EN SUSPENSION .....	58
3.3	COAGULACION.....	62
3.4	FLOCULACION.....	77
<b>IV.</b>	<b>CONSIDERACIONES GENERALES EN LA EJECUCION DEL ESTUDIO .....</b>	<b>81</b>
4.1	EVALUACION BIBLIOGRAFICA DE LAS CARACTERISTICAS DEL AGUA TERMAL .....	81
4.2	COMPOSICION QUIMICA Y CARACTERISTICAS DEL AGUA TERMAL.....	81
4.3	QUIMICA DE LA COAGULACION CON LAS SUSTANCIAS PRESENTES EN EL AGUA TERMAL....	84
4.4	MODO DE ACCION DE LAS AGUAS TERMALES COMO COAGULANTE .....	88
4.5	PRODUCCION DE LA FUENTE DE AGUA TERMAL .....	88
4.6	EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA A TRATAR.....	91
4.7	SIMULACION ARTIFICIAL DE LA CALIDAD DEL AGUA A TRATAR.....	91
<b>V.</b>	<b>ENSAYOS DE LABORATORIO.....</b>	<b>93</b>
5.1	PARAMETROS ESTUDIADOS .....	93
5.2	EQUIPOS Y REACTIVOS EMPLEADOS.....	94
5.3	DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA .....	96
<b>VI.</b>	<b>PROCEDIMIENTOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO .....</b>	<b>101</b>
6.1	DOSIS OPTIMA DEL AGUA TERMAL .....	101
6.2	PH OPTIMO DEL AGUA TERMAL .....	102
6.3	TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA DEL AGUA TERMAL (TMR).....	103
6.4	CONCENTRACION OPTIMA DEL AGUA TERMAL .....	103
6.5	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION.....	104
6.6	PROCEDIMIENTO DE DECANTACION .....	106
<b>VII.</b>	<b>RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.....</b>	<b>110</b>
7.1	TRATAMIENTO CON EL AGUA TERMAL.....	110
7.1.1.	VARIACION DE TURBIEDADES.....	110
7.1.2.	CORRELACION DE LA CALIDAD DE AGUA CRUDA CON LAS DOSIS OPTIMAS DEL AGUA TERMAL .....	112
7.1.3.	DETERMINACION DE LA DOSIS OPTIMA DEL AGUA TERMAL.....	120
7.1.4.	PH OPTIMO DEL AGUA TERMAL.....	121
7.1.5.	CONCENTRACION OPTMA DEL AGUA TERMAL.....	122
7.1.6.	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA .....	124
7.1.7.	GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION DEL AGUA TERMAL.....	125
7.1.8.	DECANTACION DEL AGUA TERMAL.....	129
7.2	TRATAMIENTO CON CLORURO FERRICO.....	143
7.2.1.	CORRELACION DE LA CALIDAD DE AGUA CRUDA CON LAS DOSIS OPTIMAS DEL CLORURO FERRICO .....	143

7.2.2.	DOSIS OPTIMA DEL CLORURO FERRICO.....	149
7.2.3.	EFFECTO DEL PH.....	150
7.2.4.	CONCENTRACIÓN OPTIMA DEL CLORURO FERRICO.....	152
7.2.5.	TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA DEL CLORURO FERRICO.....	154
7.2.6.	TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION DEL CLORURO FERRICO.....	156
7.2.7.	DECANTACION DEL CLORURO FERRICO.....	161
7.3	TRATAMIENTO CON CLORURO FERRICO Y AGUA TERMAL.....	169
7.3.1.	NUEVA DOSIS OPTIMA DEL CLORURO FERRICO-AGUA TERMAL.....	169
7.3.2.	PARAMETRO DE FLOCULACION DEL AGUA TERMAL COMO AYUDANTE DE COAGULACION.....	176
7.3.3.	DECANTACIÓN DEL CLORURO FERRICO-AGUA TERMAL.....	181
<b>VIII.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO.....</b>	<b>189</b>
8.1	PROCESO DE TRATAMIENTO CON EL AGUA TERMAL.....	189
8.2	PROCESO DE TRATAMIENTO CON CLORURO FERRICO.....	191
8.3	PROCESO DE TRATAMIENTO CON EL AGUA TERMAL COMO AYUDANTE DE COAGULACION.....	193
<b>IX.</b>	<b>EVALUACION TECNICA – ECONOMICA:.....</b>	<b>195</b>
9.1.	EVALUACION TECNICA:.....	195
9.2.	EVALUACION ECONOMICA.....	196
<b>X.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>200</b>
<b>XI.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>202</b>
<b>XII</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>203</b>
	<b>GLOSARIO DE TERMINOS</b>	
	<b>ANEXOS</b>	

## INDICE DE CUADROS

		Pág.	
Cuadro	Nº 1.1	Concentración de los Recursos Mineros-Medicinales.	37
Cuadro	Nº 1.2	Principales Balnearios del Perú.	40
Cuadro	Nº 1.3	Clasificación de las aguas de acuerdo a sus usos.	48
Cuadro	Nº 2.1	Acuíferos potenciales para la alimentación de fuentes en el sector de estudio.	51
Cuadro	Nº 3.1	Efectos al disminuir el tamaño de las esferas.	59
Cuadro	Nº 3.2	Principales sustancias naturales como ayudantes de coagulación-floculación.	67
Cuadro	Nº 6.1	Formato de ensayos de jarras para definir parámetros de floculación.	105
Cuadro	Nº 6.2	Formato de ensayos de jarras para definir los parámetros de decantación.	108
Cuadro	Nº 6.3	Formato para selección de la tasa de sedimentación.	109
Cuadro	Nº 7.1	Dosis óptima del Agua Termal requerido para cada tipo de agua de turbiedad.	110
Cuadro	Nº 7.2	Turbiedad remanente del Agua Termal.	113
Cuadro	Nº 7.3	Dosis Optima del Agua Termal – 15 UNT.	114
Cuadro	Nº 7.4	Dosis Optima del Agua Termal – 20 UNT.	115
Cuadro	Nº 7.5	Dosis Optima del Agua Termal – 30 UNT.	116
Cuadro	Nº 7.6	Dosis Optima del Agua Termal – 50 UNT.	117
Cuadro	Nº 7.7	Dosis Optima del Agua Termal – 55 UNT.	118
Cuadro	Nº 7.8	Dosis Optima del Agua Termal – 120 UNT.	119
Cuadro	Nº 7.9	Determinación de la Dosis Optima del Agua Termal	120
Cuadro	Nº 7.10	pH Optimo del Agua Termal.	121
Cuadro	Nº 7.11	Concentración Optima del Agua Termal.	123
Cuadro	Nº 7.12	Gradiente y Tiempo Optimo de Mezcla Rápida del Agua Termal.	124
Cuadro	Nº 7.13	Ensayos de jarras para definir parámetros de floculación para el Agua Termal.	127
Cuadro	Nº 7.14	Pruebas de decantación para Agua Termal-C: 100%, G de f : 57, 39 y 30 s <sup>-1</sup> .	131
Cuadro	Nº 7.14.1	Selección de la tasa de sedimentación-C: 100%, G de f : 57, 39 y 30 s <sup>-1</sup> .	132
Cuadro	Nº 7.15	Prueba de decantación para Agua Termal-C:100.%, G de f : 68, 45, 36 y 20 s <sup>-1</sup> .	134
Cuadro	Nº 7.15.1	Selección de la tasa de sedimentación.-C: 100 %., G de f : 68, 45, 36 y 20 s <sup>-1</sup> .	135
Cuadro	Nº 7.16	Prueba de decantación para el Agua Termal-C: 20% , G de f : 57, 39 y 30 s <sup>-1</sup> .	137
Cuadro	Nº 7.16.1	Selección de la tasa de sedimentación-C: 20 %, G de f : 57, 39 y 30 s <sup>-1</sup> .	138
Cuadro	Nº 7.17	Prueba de decantación para el Agua Termal- C: 20%, G de f : 68, 45, 36 y 20 s <sup>-1</sup> .	140
Cuadro	Nº 7.17.1	Selección de la tasa de sedimentación-C: 20 %, G de f : 68, 45, 36 y 20 s <sup>-1</sup> .	141
Cuadro	Nº 7.18	Turbiedad Remanente con el Cloruro Férrico.	144
Cuadro	Nº 7.19	Dosis Optima del Cloruro Férrico-50 UNT.	146
Cuadro	Nº 7.20	Dosis Optima del Cloruro Férrico-100 UNT.	147
Cuadro	Nº 7.21	Dosis Optima del Cloruro Férrico-200 UNT.	148

## INDICE DE CUADROS

			Pág.
Cuadro	Nº 7.22	Dosis Optima del Cloruro Férrico-50 UNT.	149
Cuadro	Nº 7.23	PH Optimo del Cloruro Férrico.	151
Cuadro	Nº 7.24	Concentración Optima del Cloruro Férrico.	153
Cuadro	Nº 7.25	Tiempo Optimo de la Mezcla Rápida del Cloruro Férrico.	155
Cuadro	Nº 7.26	Ensayos de jarras para definir parámetros de floculación para el Cloruro Férrico.	159
Cuadro	Nº 7.27	Pruebas de decantación para Cloruro Férrico-C:1%, y G de f: 92.52.37 s <sup>-1</sup> .	163
Cuadro	Nº 7.27-1	Selección de la tasa de sedimentación-C.:1 % y G de f: 92, 52 y 37 s <sup>-1</sup> .	164
Cuadro	Nº 7.28	Pruebas de decantación para Cloruro Férrico-C: 1% y G de f: 121, 68,49 y 20 s <sup>-1</sup> .	166
Cuadro	Nº 7.28.1	Selección de la tasa de sedimentación-C: 1% y G de f: 121, 68,49 y 20 s <sup>-1</sup> .	167
Cuadro	Nº 7.29	Nueva dosis del Cloruro Férrico y Agua Termal (22.5 mg/l).	169
Cuadro	Nº 7.30	Nueva dosis del Cloruro Férrico y Agua Termal (15 mg/l).	170
Cuadro	Nº 7.31	Nueva dosis del Cloruro Férrico y Agua Termal (17.5 mg/l).	171
Cuadro	Nº 7.32	Nueva dosis del Cloruro Férrico y Agua Termal (20 mg/l.).	172
Cuadro	Nº 3.33	Nueva dosis del Cloruro Férrico y Agua Termal (25 mg/l).	173
Cuadro	Nº 7.34	Ensayos de jarras con aplicación de coagulante Cloruro Férrico.	174
Cuadro	Nº 7.35	Ensayos de jarras para definir los parámetros de floculación para el Cloruro Férrico y Agua Termal.	179
Cuadro	Nº 7.36	Pruebas de decantación para Cloruro Férrico y Agua Termal-G de f: 60, 39, 30 s <sup>-1</sup> .	183
Cuadro	Nº 7.36.1	Selección de la tasa de sedimentación-G de f: 60, 39, 30 s <sup>-1</sup> .	184
Cuadro	Nº 7.37	Pruebas de decantación para Cloruro Férrico y Agua Termal-G de f: 71, 47, 36 y 20 s <sup>-1</sup> .	186
Cuadro	Nº 7.37.1	Selección de la tasa de sedimentación-G de f: 71, 47, 36 y 20 s <sup>-1</sup> .	187
Cuadro	Nº 9.1	Costo para el Tratamiento con el Agua Termal.	197
Cuadro	Nº 9.2	Costo para el Tratamiento con el Cloruro Férrico.	197
Cuadro	Nº 9.3	Costo para el Tratamiento con el Cloruro Férrico y el Agua Termal.	198
Cuadro	Nº 9.4	Costo Comparativo de los Tratamientos	199

## INDICE DE ESQUEMAS

			Pág.
Esquema	Nº 1.1	Origen Meteórico de las Aguas Termominerales.	22
Esquema	Nº 1.2	Origen Magmático de las Aguas Termominerales.	23
Esquema	Nº 1.3	Origen Mixtos de las Aguas Termominerales.	24
Esquema	Nº 1.4	Utilización del Fluido Geotermal Según su Temperatura.	46
Esquema	Nº 5.1	Proceso de la Alternativa con el Agua Termal.	98
Esquema	Nº 5.2	Proceso de la Alternativa con el Cloruro Férrico.	99

## INDICE DE ESQUEMAS

Esquema	Nº 5.3	Proceso de la Alternativa Cloruro Férrico-Agua Termal.	100
Esquema	Nº 8.1	Diagrama de Flujo del Proceso con Agua Termal.	190
Esquema	Nº 8.2	Diagrama de Flujo del Proceso con Cloruro Férrico.	192
Esquema	Nº 8.3	Diagrama de Flujo del Proceso con Cloruro Férrico-Agua Termal.	194

## INDICE DE FIGURAS

			Pág.
Figura	Nº 3.1	Doble capa de una partícula coloidal.	60
Figura	Nº 3.2	Fuerza de atracción y repulsión.	61
Figura	Nº 3.3	Coagulación.	62
Figura	Nº 3.4	Reestabilización de partículas.	64
Figura	Nº 3.5	Atrapamiento de una partícula en un floc.	65
Figura	Nº 3.6	Efecto de puente en las partículas en suspensión.	66
Figura	Nº 3.7	Coagulación de sales de hierro III a pH constante	69
Figura	Nº 3.8	Condición de Mezcla.	73
Figura	Nº 3.9	Fases de la Coagulación.	74
Figura	Nº 3.10	Coagulación por Adsorción.	75
Figura	Nº 3.11	Coagulación por Barrido.	75
Figura	Nº 3.12	Zonas de Coagulación.	77
Figura	Nº 5.1	Pruebas de Jarras.	94
Figura	Nº 5.2	Aparatos de análisis-Turbidímetro	95
Figura	Nº 5.3	Aparatos de análisis-Medidor de pH	96

## INDICE DE GRAFICAS

			Pág.
Gráfica	Nº 7.1	Dosis Optima del Agua Termal versus Turbiedad.	111
Gráfica	Nº 7.2	Correlación de Turbiedad versus Dosis Optima del Agua Termal.	113
Gráfica	Nº 7.3	Dosis Optima del Agua Termal – 15 UNT.	114
Gráfica	Nº 7.4	Dosis Optima del Agua Termal – 20 UNT.	115
Gráfica	Nº 7.5	Dosis Optima del Agua Termal – 30 UNT.	116
Gráfica	Nº 7.6	Dosis Optima del Agua Termal – 50 UNT.	117
Gráfica	Nº 7.7	Dosis Optima del Agua Termal – 55 UNT.	118
Gráfica	Nº 7.8	Dosis Optima del Agua Termal – 120 UNT.	119
Gráfica	Nº 7.9	Determinación de la Dosis Optima del Agua Termal	120

## INDICE DE GRAFICAS

			Pág.
Gráfica	Nº 7.10	pH Optimo del Agua Termal.	121
Gráfica	Nº 7.11	Concentración Optima del Agua Termal.	123
Gráfica	Nº 7.12	Gradiente y Tiempo Optimo del Mezcla Rápida del Agua Termal.	124
Gráfica	Nº 7.13.1	Turbiedad Residual versus Tiempo de Retención para el Agua Termal.	127
Gráfica	Nº 7.13.2	Turbiedad Residual versus Gradiente de Velocidad para Agua Termal.	127
Gráfica	Nº 7.13.3	Gradiente de Velocidad versus Tiempo Optimo de Retención-Agua Termal.	128
Gráfica	Nº 7.14	Velocidad de Sedimentación versus Turbiedad Residual C : 100 %. G de f : 57, 39 y 30 s <sup>-1</sup> .	133
Gráfica	Nº 7.15	Velocidad de Sedimentación versus Turbiedad Residual C : 100%. G de f : 68, 45, 36 y 20 s <sup>-1</sup> .	136
Gráfica	Nº 7.16	Velocidad de Sedimentación versus Turbiedad Residual C : 20 %. G de f : 57, 39 y 30 s <sup>-1</sup> .	139
Gráfica	Nº 7.17	Velocidad de Sedimentación versus Turbiedad Residual C : 20 %. G de f : 68, 45, 36 y 20 s <sup>-1</sup> .	142
Gráfica	Nº 7.18	Correlación Turbiedad versus Dosis Optima del Cloruro Férrico.	145
Gráfica	Nº 7.19	Dosis Optima del Cloruro Férrico – 50 UNT.	146
Gráfica	Nº 7.20	Dosis Optima del Cloruro Férrico – 100 UNT.	147
Gráfica	Nº 7.21	Dosis Optima del Cloruro Férrico – 200 UNT.	148
Gráfica	Nº 7.22	Dosis Optima del Cloruro Férrico – 50 UNT.	149
Gráfica	Nº 7.23	pH Optimo del Cloruro Férrico.	151
Gráfica	Nº 7.24.1	Concentración Optima del Cloruro Férrico.	153
Gráfica	Nº 7.24.2	pH de la solución del Cloruro Férrico.	153
Gráfica	Nº 7.25	Tiempo Optimo de la Mezcla Rápida del Cloruro Férrico.	155
Gráfica	Nº 7.2.6.1	Turbiedad Residual versus Tiempo de Retención del Cloruro Férrico.	159
Gráfica	Nº 7.2.6.2	Turbiedad Residual versus Gradiente de Velocidad del Cloruro Férrico.	159
Gráfica	Nº 7.2.6.3	Gradiente de Velocidad versus Tiempo Optimo de Retención-Cloruro Férrico.	160
Gráfica	Nº 7.27	Velocidad de Sedimentación versus Turbiedad Residual C : 1 % , G de f: 92, 52 y 37 s <sup>-1</sup>	165
Gráfica	Nº 7.28	Velocidad de Sedimentación versus Turbiedad Residual C : 1 % , G de F 121, 68 , 49 y 20 s <sup>-1</sup> .	168
Gráfica	Nº 7.2.9	Nueva Dosis Optima del Cloruro Férrico y Agua Termal - Dosis 22.5 mg/lit Cl <sub>3</sub> Fe.	169
Gráfica	Nº 7.30	Nueva Dosis Optima del Cloruro Férrico y Agua Termal - Dosis 15 mg/lit Cl <sub>3</sub> Fe.	170
Gráfica	Nº 7.31	Nueva Dosis Optima del Cloruro Férrico y Agua Termal - Dosis 17.5 mg/lit Cl <sub>3</sub> Fe.	171
Gráfica	Nº 7.32	Nueva Dosis Optima del Cloruro Férrico y Agua Termal - Dosis 20 mg/lit Cl <sub>3</sub> Fe.	172
Gráfica	Nº 7.33	Nueva Dosis Optima del Cloruro Férrico y Agua Termal - Dosis 25 mg/lit Cl <sub>3</sub> Fe.	173
Gráfica	Nº 7.34	Diagrama de Remoción de Turbiedad-Coagulante Cl <sub>3</sub> Fe.	175

## INDICE DE GRAFICAS

			Pág.
Gráfica	Nº 7.35.1	Turbiedad Residual versus Tiempo de Retención - Cloruro Férrico y Agua Termal.	179
Gráfica	Nº 7.35.2	Turbiedad Residual versus Gradiente de Velocidad-Cloruro Férrico y Agua Termal.	179
Gráfica	Nº 7.35.3	Gradiente de Velocidad versus Tiempo Optimo de Retención – Cloruro Férrico y Agua Termal.	180
Gráfica	Nº 7.36	Velocidad de Sedimentación versus Turbiedad Residual C: 1%, G de f: 60, 39 y 30 s <sup>-1</sup>	183
Gráfica	Nº 7.37	Velocidad de Sedimentación versus Turbiedad Residual C: 1%, G de f: 71, 47, 36 y 20 s <sup>-1</sup> .	188

## INDICE DE MAPAS

			Pág.
Mapa	Nº 1.1	Zonas Termales, Atermalcs y Lagunas del Perú.	35
Mapa	Nº 1.2	Concentración de las Fuentes de Aguas Mineros Medicinales del Perú por Departamentos.	36
Mapa	Nº 1.3	Principales Balnearios del Perú.	39
Mapa	Nº 2.1	Ubicación y Accesibilidad de la Fuente Termal de Churín.	51

## **RESUMEN**

El agua termal es un recurso natural proveniente del subsuelo de nuestra corteza terrestre, contiene minerales y sales disueltas, características que las hacen diferentes a las demás aguas y con efectos fisiológicos definidos.

Considerando el contenido de sales y cationes presentes en las aguas termales se ha efectuado ensayos de laboratorio con la finalidad de determinar su eficiencia como coagulante en la clarificación del agua, presentándose en este trabajo los resultados y conclusiones de la investigación realizada con este tipo de agua.

Para determinar la eficiencia del agua termal como coagulante, se efectuó ensayos de laboratorio, variando para ello la turbiedad y considerando siempre una alcalinidad alta para el agua a tratar, esto con la finalidad de evaluar el rango de turbiedad en el cual se obtiene las mejores eficiencias de remoción de partículas coloidales, planteándose para ello tres alternativas de tratamiento:

La primera alternativa consistió en utilizar el agua termal como único coagulante a dosificar para la remoción de la turbidez.

La segunda alternativa plantea el uso del coagulante metálico cloruro férrico, para el rango de turbiedad en estudio, con el propósito de determinar los parámetros en cada uno de los procesos de tratamiento y el posterior uso en la siguiente alternativa. Se seleccionó el cloruro férrico por que es económico, el rango de pH es más amplio que el sulfato de aluminio, además por contener en su composición química iones de Hierro que tendrán afinidad.

La tercera alternativa de tratamiento propuesta consiste en emplear el cloruro férrico y el agua termal, este último como ayudante de coagulación, para la remoción de partículas coloidales.

Los ensayos de pruebas de jarras, ayudaron no solamente, a determinar la factibilidad para utilizar las aguas termales como coagulante en el tratamiento del agua, sino que también permitieron la determinación de los valores de los diferentes parámetros que influyen en cada uno de los procesos estudiados, entre los cuales se tiene dosis óptima de coagulante, pH óptimo, concentración óptima, gradiente y tiempo óptimo de mezcla rápida y floculación y tasa de decantación.

Las muestras empleadas fueron caracterizadas antes y después de cada proceso, el criterio de calidad de agua seguido fue considerando fundamentalmente la turbiedad, pH y alcalinidad.

Del análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio para cada alternativa de tratamiento propuesta, se concluye que el uso de las aguas termales como coagulante primario no ofrece resultados satisfactorios, pero su aplicabilidad como ayudante de coagulación es más eficiente en los procesos de tratamiento de agua.

## **INTRODUCCION**

La presente tesis tiene como finalidad determinar la eficiencia de las aguas termales como coagulante en la clarificación del agua con fines de potabilización.

Habiéndose presentado en el Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (Lima-Perú) un estudio técnico realizado por representantes de la Universidad Central de Venezuela, en el cual luego del análisis de los ensayos de laboratorio efectuados, proponen el uso de las aguas termales como coagulante en la clarificación del agua, considerando este antecedente se ha efectuado el estudio de la composición físico-químico, propiedades, origen, ubicación y usos de las fuentes termales con el objetivo de evaluar sus posibilidades de uso como coagulante, ya que en nuestro país existen numerosas fuentes termales, las mismas que tienen gran importancia para la salud, el turismo y la economía.

Efectuado los análisis de la composición físico-químico, se ha seleccionado la fuente ubicada en la ciudad de Churín - Departamento de Lima.

Los resultados de los análisis practicados a las muestras de agua termal de dicha fuente, indicaron que contenía una cantidad significativa de sales y cationes que intervienen en el proceso de coagulación.

Además, mediante los resultados de los ensayos de laboratorio se demostró que utilizando el agua termal como factor externo para la desestabilización de las partículas coloidales, no se obtiene las mejores eficiencias de remoción de las mismas.

Ante estos resultados se efectúan nuevas ensayos con la finalidad de incrementar el porcentaje de remoción de turbidez, en los cuales se utilizan el cloruro férrico como coagulante primario y el agua termal como ayudante de coagulación.

De los resultados obtenidos se concluye que el uso del agua termal como ayudante de la coagulación brinda resultados satisfactorios, lo que nos permite recomendar como alternativa de tratamiento para aquellas poblaciones que cuentan con fuentes termales con características físicos químicos similares a nuestra fuente termal en estudio.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVOS GENERALES:**

- Utilizar las aguas termales como coagulante para la clarificación del agua cruda.
- Determinar la eficiencia, que produce la aplicación de las aguas termales como sustancia coagulante en el tratamiento del agua.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Remover la turbidez presente en las aguas y por ende la cantidad de microorganismos presentes.
- Determinar los parámetros físicos y químicos que influyen en los procesos de tratamiento.
- Analizar la composición físico-química de las aguas termales y evaluar las posibilidades de su utilización como coagulante para el tratamiento del agua.
- Determinar el costo de tratamiento con el nuevo coagulante natural vs. tratamiento con el cloruro férrico.

## **CAPITULO I :**

### **AGUAS TERMALES GENERALIDADES**

## **I. AGUAS TERMALES – GENERALIDADES**

### **1.1 PANORAMA HIDROTHERMAL DEL PERU**

Mediante este capítulo se dará a conocer la riqueza ilimitada de los recursos termo-minero-medicinales que cuenta el Perú y a través de ellos se tratará:

Incentivar e invitar a los especialistas, para que efectúen estudios de esta riqueza natural, de tal forma que los resultados obtenidos sean transmitidos para su conocimiento y utilidad pública.

Incentivar a los inversionistas, para que con los conocimientos que se tenga sobre la calidad de las aguas termo-minero-medicinales, inviertan en la construcción de infraestructuras necesarias para el uso racional de estos recursos.

Dar a conocer al pueblo peruano, nuestras riquezas escondidas, que son las aguas termo-minerales-medicinales y sepan de bondades y su utilización.

### **1.2 BREVE RESEÑA HISTORICA DE LA BALNEOLOGIA EN EL PERU**

La historia del Perú es una de las más ricas y profundas, no sólo por la grandeza del Imperio Incaico, sino por la magnitud de todas sus culturas y de sus grandes obras que en la actualidad quedan como evidencia de la magnificencia de nuestro antiguo Perú. Dentro de estas grandes obras contamos con balnearios termales de esas épocas, en las tres regiones de nuestro país, lo cual demuestra el conocimiento que tenían nuestros antepasados sobre la utilización y cualidades de las aguas termo-minero-medicinales.

A continuación nombraremos algunos de los testimonios de la época preincaica, en el Departamento del Cuzco, los “Baños Termales de Uyurnire”, y el Baño del Inca en el templo del Dios Wiracocha; en el Departamento de La Libertad, se cuenta con los “Baños de Cachicadan” que aún en la actualidad se utilizan; en Lima sabemos que utilizaron los baños de “Pachacamac”, cuyos restos reconstruidos podemos observar en dicha ciudadela, aunque ya no se use como

balneario; además se sabe que los famosos “Baños de Churín” eran frecuentados por los antiguos pobladores, quienes ya conocían de sus bondades; por último, tenemos las lagunas de “Chilca” y “Huacachina” de cuyos hechos y lugares existen hermosas leyendas y crónicas a través de las cuales se deja testimonio del uso que hacían de estas lagunas con fines medicinales.

Se sabe que en la época incaica, los incas tenían como norma la construcción de los famosos tambos, en lugares próximos a los balnearios termales, de esta manera se aprovechaba el tiempo de abastecimiento de las tropas para también someterlos al tratamiento termal, con fines medicinales.

Los famosos “ Baños del Inca”, en Cajamarca, cuyas instalaciones aún se utilizan, el baño de “Tambo Machay”; el baño del inca en la ciudadela de Macchupicchu, “Machacancha” y otros en el Departamento de Cuzco, son testigos de la utilización de estos recursos naturales con fines medicinales.

En el período comprendido entre 1596 y 1653, el padre Bernabé Cobo, efectuó estudios sobre el Perú Colonial, publicando su obra “Historia del Nuevo Mundo” en Sevilla, en el cual explica como los antiguos peruanos hacían aflorar el agua en la Costa, con fines de regadío y fines medicinales, refiriéndose a las fuentes de aguas termo-minero-medicinales.

Entre 1796 y 1827 se realizan los primeros estudios científicos sobre las “Termales de Yura”, “Jesús” y “Socosani”, ubicados en el Departamento de Arequipa. Estos estudios fueron efectuados por el alemán Teodoro Haenke y Rivero Ustariz.

En 1822, Antonio Raymondi, publicó sus estudios sobre las aguas minerales del Perú, efectuando en cada fuente análisis físico-químico, cuyos resultados y conclusiones tienen vigencia actualmente.

Entre 1900 y 1935, el doctor Edmundo Escomel, realizó el estudio de las aguas minero-medicinales publicando su libro titulado “Algunos Balnearios Medicinales del Perú”. En 1937 el Dr. Ramón Cárcamo, efectuó estudios y análisis físico-químico de 30 fuentes de Aguas Termales.

El estudio más completo y científico de las lagunas de la Costa del Perú, fue efectuado por el Dr. Luis Maldonado (1943), publicando sus resúmenes en la obra titulada “Las Lagunas y Gramadales de la Costa del Perú”.

En 1970, el Ing. Rómulo Zapata Valle publicó la obra titulada “Estudio de las Aguas Minerales del Perú”, en el cual se describe las características de las aguas termales considerando los análisis físico-químico.

En 1978 INGEMMET desarrolló un Inventario Nacional de las Manifestaciones Termales, quienes presentaron 6 grupos de regiones de interés geotermal.

En el año de 1989, ELECTRO-PERU, realiza estudios de las Aguas Termales con fines energéticos en el Norte y Centro del Perú.

A partir de 1997 INGEMMET desarrolló estudios del Hidrotermalismo en el Sur del Perú.

## **1.3 ORIGEN DE NUESTRAS FUENTES**

### **1.3.1. AGUAS SUPERFICIALES**

Está perfectamente comprobado que dentro de la tierra, existen como en la superficie, corrientes de agua, cuyo origen puede admitirse como aguas superficiales filtradas, aguas propias de origen volcánico y aguas de sumideros profundos o provenientes de infiltraciones por debajo de los fondos lacustres y marinos.

Puede iniciarse el ciclo con el agua que por condensación cae sobre la superficie, la que según sea la configuración del terreno u otras circunstancias de carácter físico, se separa en tres porciones de apariencia general:

Una porción que regresa a la atmósfera;

Una porción que aparentemente queda retenida,

Una porción que se infiltra

***La evaporación de las aguas.***- Todo líquido esparcido en superficies libres está en condiciones de evaporarse por contacto con el aire y la acción directa de los rayos solares, esta evaporación será desde luego más acentuada cuanto mayor sea la superficie libre que permanezca en contacto con los agentes que provocan dicho fenómeno. El viento, la vegetación, la humedad, etc. influyen grandemente en la evaporación y los vapores de agua al abandonar la corteza terrestre y constituir los constantes desplazamientos de nubes, actúan ya como masas de agua, que vuelven sobre la tierra o mar, para continuar con la normalidad de su ciclo.

***La retención de las aguas.***- Las nieves que se forman por condensación a grandes alturas, son las que dan origen a nuestras aguas superficiales, y que su caudal va incrementándose a medida que reciben, durante su trayectoria, aguas de lluvias, que llegan finalmente al mar.

El Perú es un país geológicamente accidentado y por el hecho mismo de estar atravesado por la Cordillera de los Andes, ofrece a nuestro país características propias de zonas típicamente definidas y geográficamente diferenciadas. Es en las cumbres donde comienzan los deshielos de los glaciares formando las altas lagunas, las que debido a sus continuas cargas rompen sus diques naturales ocasionando salidas que dan origen a nuestros ríos.

El territorio peruano es escarpado y accidentado y las distancias recorridas por un río desde su origen hacia el mar están aparejadas con la diversidad de terre-

nos propios de cada zona. Durante su recorrido, un río se comporta como un transportador sin fin, tomando en unos puntos sustancias o elementos que luego son abandonados o parcialmente disueltos. La presencia de las sustancias o elementos depende mayormente del tiempo de contacto en determinada calidad de material.

Los ríos al originarse lo hacen casi siempre con agua atmosférica, químicamente pura, pero cuando inician su viaje hacia la costa, están expuestas a una serie interminable de cambios propios de nuestra geología, que altera su composición original. Los análisis de las aguas de los ríos, indican la mayor de las veces la calidad de los terrenos de traspaso, deduciéndose aproximadamente la composición química de acuerdo a su contenido iónico. Hay sales que el agua disuelve sin dificultad y las conduce fácilmente, pero existen otras que al tratar de disolverlas las altera a consecuencia de ciertos elementos que llevan consigo, sobre todo cuando lleva disueltas apreciables cantidades de anhídrido carbónico u otros gases que actúan como reactivos.

Si los ríos desde su origen se desplazaran a través de terrenos impermeables superiores, y no mediaran los factores lluvia, viento, garúas, etc., lógico es suponer que un análisis químico sea idéntico en cualquier punto de su recorrido, pero como esta agua atraviesan precisamente terrenos permeables, impermeables y semipermeables y están expuestas a un sinnúmero de factores geológicos, necesariamente se producen cambios rápidos según sea la intensidad del fenómeno que provoque su inestabilidad.

El agua superficial o subterránea se comporta como agente geológico que a su paso y bajo distintos aspectos provoca alteraciones a lo largo de su recorrido, desequilibrando la composición misma de las rocas e inestabilizando su composición, lo que sucede con el origen de las arcillas que no son otra cosa que la hidratación de un feldespato.

***Aguas de infiltración.***- Desde el momento que el agua puede ser absorbida, queda como materia, afectan a dos leyes físicas: la capilaridad y la gravedad, fenómeno que se cumplen de acuerdo a lo disímil de nuestra corteza. Se considera a la corteza terrestre como un conjunto de diversas zonas constituida esencialmente, por capas de materiales permeables, semipermeables e impermeables.

Las aguas al filtrarse pueden ser retenidas por un manto de material impermeable localizado en una zona no muy distantes de la corteza terrestre, constituyendo una zona de aguas freáticas o someras. Otras, pueden ser estancadas a distancias más profundas a donde han llegado por fisuras o grietas constituyendo la zona de aguas artesianas y otras que aparentemente no se ha filtrado y que se localiza cerca de la superficie terrestre, constituyendo una zona de aguas subálbeas, o aguas de infiltración.

Son las aguas freáticas las que alimentan la mayor parte de los pozos artesianos, que cuando impregnan rocas porosas constituyen una masa continua a la que se denomina capa o nivel de agua. Estas aguas son las que están localizadas encima de la primera capa impermeable, mientras que las artesianas están ubicadas entre dos zonas impermeables, generalmente, estas últimas son las que por principios físicos emergen a la superficie constituyendo un manantial o fuente de agua.

#### **1.3.1.1. MANANTIALES**

Se define un manantial como un lugar donde se produce un afloramiento natural de agua subterránea. El agua del manantial fluye por lo general a través de una formación de estratos con grava, arena o roca fisurada. En los lugares donde existen estratos impermeables, estos bloquean el flujo subterráneo del agua y permiten que afloren a la superficie.

### 1.3.1.2. CLASIFICACIÓN DE MANANTIALES

*Manantiales de Filón o Grieta.-* Son aquellos que brotan a la superficie por grietas ascendentes y cuyas aguas que a veces son artesianas, proceden de una gran profundidad, saliendo algo caliente y bastante mineralizada. Casi siempre son de este tipo los manantiales de Aguas Termales.

*Manantiales de Afloramiento o Vertedero.-* Son los que aparecen en el afloramiento de una capa impermeable en las laderas de un valle.

*Manantiales de Emergencia.-* Son aquellos en que la salida del agua se produce como consecuencia de haber alcanzado el nivel del manto acuífero una altura que le permite llegar a la superficie sin que, como ocurre con las del grupo anterior, sea preciso el afloramiento de la capa impermeable.

El origen mismo de las fuentes termales y la presencia de sus aguas sobre la superficie ha inquietado bastante y son diversas las opiniones que al respecto se conocen— por ejemplo, Jenks<sup>1</sup> opina de una manera genérica diciendo que las “aguas meteóricas o superficiales infiltradas constituyen la descarga total de las fuentes termales”. No obstante, dice el autor, esta agua superficial ha penetrado profundamente en la roca infrayente pasando a través de los estratos a una profundidad de mas o menos 1600 metros, “conforme el agua penetra por los estratos puede ir gradualmente aumentando el calor debido al aumento normal de la temperatura de la roca con la profundidad,” y luego de algunas consideraciones sobre gradiente de temperatura en función de la profundidad, señala, “se cree que las aguas superficiales se infiltran lentamente hasta la profundidad de las rocas calizas, luego al encontrar una fisura que le proporcione un retorno fácil hacia la superficie surgen formando las fuentes termales”.

---

<sup>1</sup> Jenks, Williams. “Geología y Aguas Subterráneas del Valle de las Termas de Yura”. Arequipa-Perú-1947. Pág. 31.

### **1.3.2. AGUAS SUBTERRANEAS**

En el interior de la corteza, no solamente se encuentra agua que provenga de un origen superficial, sino que muchos fenómenos parecen indicar la presencia de otro tipo de agua propia del interior, llamada agua juvenil y otra cuya presencia se atribuye como consecuencia indirecta del ciclo normal de las aguas meteóricas y conocidas con el nombre de aguas vadosas.

Las juveniles son probablemente de origen volcánico o de zonas cercanas a ellas y que al alumbrar serían aguas que recién inician y luego se confunden en el comportamiento físico de las aguas atmosféricas.

Las aguas juveniles, son desde el punto de vista físico-químico diferentes a las aguas de infiltración y deberían suponerse que por el hecho mismo de estar influenciadas por una atmósfera volcánica, arrastrarían al emerger mayor cantidad de sales en solución, sin embargo, las determinaciones químicas han demostrado que son las aguas freáticas las que causan más concentración.

Este caso justifica que la concentración salina de las aguas es directamente proporcional a la calidad de los terrenos de traspaso e indirectamente proporcional a la profundidad de su origen. Los materiales más solubles se localizan en zonas más cercanas a la superficie y las aguas en su eterno contacto disuelven con más facilidad, que las aguas profundas cuyo desarrollo se verifica, por leyes de densidad en zonas de materiales menos solubles, a pesar de que estas llegan casi siempre a la superficie acompañadas de gases y con elevadas temperaturas.

Cuando un agua ha logrado filtrarse, corre interiormente de acuerdo al desnivel del terreno y percola hasta que encuentre una zona impermeable, donde se retiene o continúa su recorrido hasta que se produzca algún rebalse o algún fenómeno que provoque su salida al exterior, bajo distintas formas.

#### 1.4 AGUA TERMO-MINERO-MEDICINAL

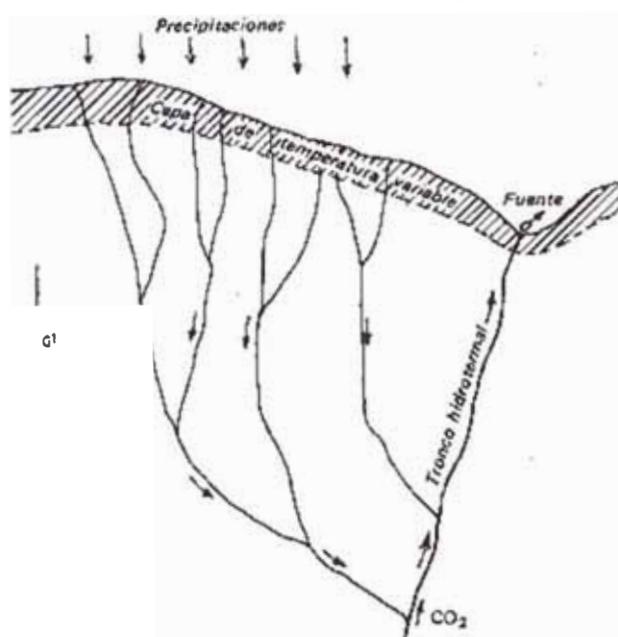
Es un recurso natural contenido en estratos acuíferos subterráneos, que se diferencian claramente del agua de consumo normal por sus componentes minerales, su grado de mineralización, la presencia de determinados oligoelementos, la estabilidad de su composición físico-química y su temperatura, así como por su pureza bacteriológica original. Estas aguas están dotadas de propiedades terapéuticas particulares.

#### 1.5 ORIGEN DE LAS AGUAS TERMOMINERALES

La formación de las aguas termominerales siempre ha sido motivo de numerosas controversias entre los hidrogeólogos. Algunas de las hipótesis emitidas se relacionan con las del ciclo del agua. En el curso de los últimos años, numerosos autores admiten un doble origen: meteórico y juvenil.

##### 1.5.1. AGUAS TERMOMINERALES DE ORIGEN METEORICO

Explica, que las aguas superficiales se infiltran en el suelo y subsuelo y desciende por la gravedad hacia las capas profundas y durante su recorrido disuelven sales minerales y su temperatura se eleva a causa del gradiente geotérmico. Después, asciende rápidamente por fisuras y fracturas llegando a la superficie.



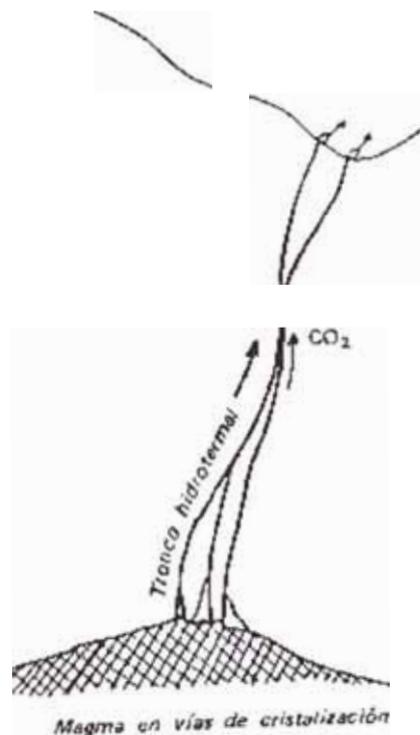
ESQUEMA N° 1: ORIGEN METEORICO DE LAS AGUAS TERMOMINERALES

### 1.5.2. AGUAS TERMOMINERALES DE ORIGEN JUVENIL

En algunos casos, la circulación de las aguas de origen meteórico no permite explicar las temperaturas elevadas y, sobre todo, las características físico-químicas de las aguas termominerales. Se hace imprescindible apelar a fuentes profundas: se trata de las aguas juveniles o endógenas. Como se mencionó anteriormente, las aguas juveniles pueden tener tres orígenes principales: magmática, volcánico y aguas de reacciones químicas.

- **Origen magmática de las aguas termominerales.**- La cristalización de los magmas libera constituyentes volátiles que a menudo escapan hacia la superficie formando fumarolas. Se componen esencialmente de hidrógeno y de vapor de agua, acompañados de fluor, cloro, azufre, carbono, fósforo y boro.

Estas aguas tienen una composición química independiente de la roca de donde ha salido. Presenta sustancias minerales propias, debidas a su procedencia magmática. Su contenido en sales, su temperatura y sus características hidrológicas son relativamente constante. Frecuentemente son de tipo hipertemal.



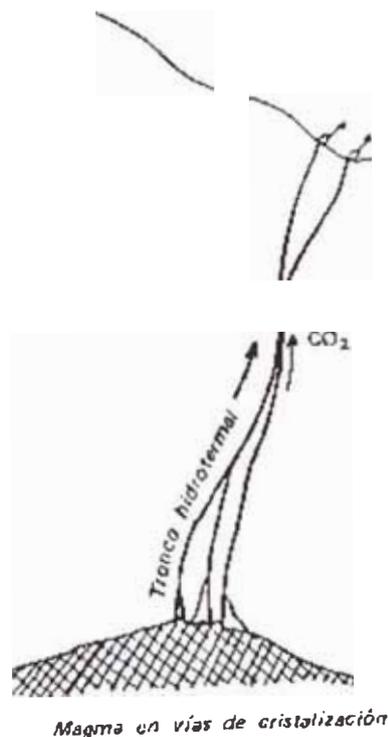
ESQUEMA N° 2: ORIGEN MAGMATICO DE LAS AGUAS TERMOMINERALES

### 1.5.2. AGUAS TERMOMINERALES DE ORIGEN JUVENIL

En algunos casos, la circulación de las aguas de origen meteórico no permite explicar las temperaturas elevadas y, sobre todo, las características físico-químicas de las aguas termominerales. Se hace imprescindible apelar a fuentes profundas: se trata de las aguas juveniles o endógenas. Como se mencionó anteriormente, las aguas juveniles pueden tener tres orígenes principales: magmática, volcánico y aguas de reacciones químicas.

- **Origen magmática de las aguas termominerales.**- La cristalización de los magmas libera constituyentes volátiles que a menudo escapan hacia la superficie formando fumarolas. Se componen esencialmente de hidrógeno y de vapor de agua, acompañados de fluor, cloro, azufre, carbono, fósforo y boro.

Estas aguas tienen una composición química independiente de la roca de donde ha salido. Presenta sustancias minerales propias, debidas a su procedencia magmática. Su contenido en sales, su temperatura y sus características hidrológicas son relativamente constante. Frecuentemente son de tipo hipertemal.



ESQUEMA N° 2: ORIGEN MAGMATICO DE LAS AGUAS TERMOMINERALES

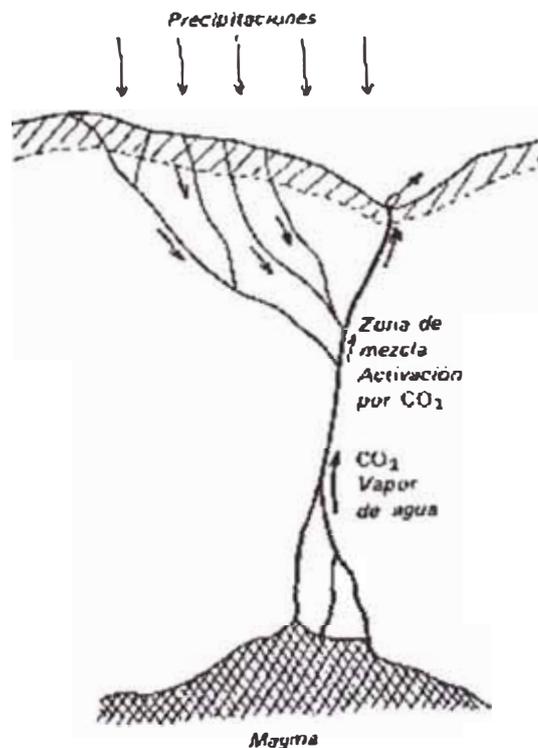
- **Origen volcánico de las termominerales.** Las aguas juveniles pueden proceder de la consolidación de lavas y del vapor de agua de origen volcánico: destilación de la humedad de las rocas, expulsión del vapor de agua de las capas profundas.

**Aguas de las reacciones químicas.-** Señala, que las reacciones químicas, intensas en el seno de la corteza, liberan agua.

- **Aguas fósiles.-** Los sedimentos, al depositarse en los fondos marinos, están empapados en aguas que pueden quedar en parte aprisionada en las rocas así formadas. Tal es el origen de las aguas fósiles. El lavado de las capas sedimentarias por las aguas de infiltración o por las aguas endógenas puede arrastrar las aguas fósiles, las cuales modifican su composición química.

### 1.5.3. ORIGEN MIXTO DE LAS AGUAS TERMOMINERALES

Las aguas termominerales tienen a menudo un origen mixto, por mezcla de aguas juveniles, fósiles y meteóricas



ESQUEMA N° 3: ORIGEN MIXTO DE LAS AGUAS TERMOMINERALES

## 1.6 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS AGUAS TERMO MINERO MEDICINALES

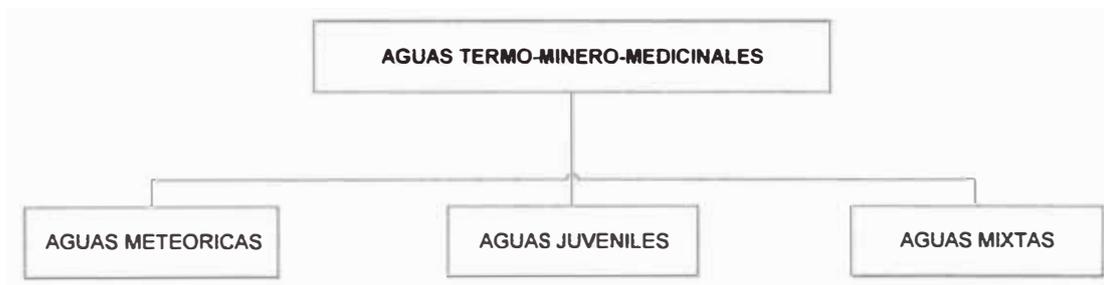
En este capítulo se ha comprendido a todas las aguas, así como a los peloides, pero por razones de técnicas dividiremos en tres partes el capítulo para mejor orientación; los mismos que son:

- Aguas termo - minero - medicinales
- Lagunas
- Peloides

### 1.6.1. AGUAS TERMO-MINERO MEDICINALES

Según el Dr. Ladislao Prazac las aguas termo-minero –medicinales se dividen en tres tipos, que se detalla en el esquema siguiente.

#### CLASIFICACION DE LAS AGUAS TERMOMINEROMEDICINALES



También existe otra forma de clasificar a las aguas termo-minero-medicinales, por su temperatura, contenido mineral, por sus emanaciones, etc. Este tipo de aguas puede clasificarse de acuerdo a los siguientes factores:

#### a. Por su Temperatura

- Aguas Frías: cuando su temperatura es menor de 20 °C.
- Agua Hipotermal: cuando su temperatura está entre 20 °C y 30 °C.
- Termal: cuando su temperatura está entre 30 °C y 40 °C.
- Hipertermal: con temperatura mayor de 40 °C.

**b. Por su Contenido Mineral (Residuo Seco a 180 °C)**

- Oligo-Métalicas: menos de 0.10 g/l.
- Mineralizada Muy Débil: de 0.10 a 0.25 g/l.
- Mineralizada Débil: de 0.25 a 0.50 g/l
- Mineralizada Media: de 0.50 a 1.50 g/l.
- Mineralizada Fuerte: más de 1.50 g/l.

**c. Por sus Emanaciones**

- Carbónicas, cuando tienen (CO<sub>2</sub>) igual a 600 mg/l.
- Sulfurosas (H<sub>2</sub>S), cuando tienen más de 1 mg/l.
- Radioactivas, cuando tiene radio emanación mayor de 50 µCi.

**d. Por sus Propiedades Terapéuticas**

- Diuréticas
- Purgativas Depurativos
- Disolventes
- Reconstituyentes
- Sedantes

**e. Por sus Usos**

- De bebida
- Baño
- Irrigación
- Inhalación
- Otras formas mixtas

**f. De acuerdo a su ion calificante**

- Ferruginosas, cuando tiene Fe<sup>+++</sup> 2.00 mg/lt.
- Ioduradas, cuando tiene I<sup>o</sup> 0.01 mg/lt.
- Bromuradas, cuando tienen Br. 0.05 mg/lt
- Litinadas, cuando tiene Li<sup>+</sup> 0.75 mg/lt.

**b. Por su Contenido Mineral (Residuo Seco a 180 °C)**

- Oligo-Métalicas: menos de 0.10 g/l.
- Mineralizada Muy Débil: de 0.10 a 0.25 g/l.
- Mineralizada Débil: de 0.25 a 0.50 g/l
- Mineralizada Media: de 0.50 a 1.50 g/l.
- Mineralizada Fuerte: más de 1.50 g/l.

**c. Por sus Emanaciones**

- Carbónicas, cuando tienen (CO<sub>2</sub>) igual a 600 mg/l.
- Sulfurosas (H<sub>2</sub>S), cuando tienen más de 1 mg/l.
- Radioactivas, cuando tiene radio emanación mayor de 50 µCi.

**d. Por sus Propiedades Terapéuticas**

- Diuréticas
- Purgativas Depurativos
- Disolventes
- Reconstituyentes
- Sedantes

**e. Por sus Usos**

- De bebida
- Baño
- Irrigación
- Inhalación
- Otras formas mixtas

**f. De acuerdo a su ion calificante**

- Ferruginosas, cuando tiene Fe<sup>+++</sup> 2.00 mg/l.
- Ioduradas, cuando tiene I<sup>o</sup> 0.01 mg/l.
- Bromuradas, cuando tienen Br. 0.05 mg/l
- Litinadas, cuando tiene Li<sup>+</sup> 0.75 mglt.

**b. Por su Contenido Mineral (Residuo Seco a 180 °C)**

- Oligo-Métalicas: menos de 0.10 g/l.
- Mineralizada Muy Débil: de 0.10 a 0.25 g/l.
- Mineralizada Débil: de 0.25 a 0.50 g/l
- Mineralizada Media: de 0.50 a 1.50 g/l.
- Mineralizada Fuerte: más de 1.50 g/l.

**c. Por sus Emanaciones**

- Carbónicas, cuando tienen (CO<sub>2</sub>) igual a 600 mg/l.
- Sulfurosas (H<sub>2</sub>S), cuando tienen más de 1 mg/l.
- Radioactivas, cuando tiene radio emanación mayor de 50 µCi.

**d. Por sus Propiedades Terapéuticas**

- Diuréticas
- Purgativas Depurativos
- Disolventes
- Reconstituyentes
- Sedantes

**e. Por sus Usos**

- De bebida
- Baño
- Irrigación
- Inhalación
- Otras formas mixtas

**f. De acuerdo a su ion calificante**

- Ferruginosas, cuando tiene Fe<sup>+++</sup> 2.00 mg/lt.
- Ioduradas, cuando tiene I<sup>o</sup> 0.01 mg/lt.
- Bromuradas, cuando tienen Br. 0.05 mg/lt
- Litinadas, cuando tiene Li<sup>+</sup> 0.75 mg/lt.

- Potasicas, cuando tiene  $K^+$  1.00 mg/lt.
- Floruradas, cuando tiene  $Fl^-$  0.25 mg/lt.
- Arsenicales, cuando tienen As. 0.05 mg/lt.
- Sulfatadas, cuando tiene ( $SO_4^{--}$ ) 1.00 mg/lt.

### **1.6.2. LAGUNAS**

Estas lagunas son propias de la costa del Perú, existiendo su gran mayoría en los departamentos de Lima e Ica, tales como las siguientes: “Boza”, “Chilca”, “Huacachina” y muchas otras más. De acuerdo a estudios realizados, estas lagunas se clasifican en:

#### **a. Lagunas de tipo circulante**

Caracterizadas por su gran alimentación y circulación acuífera, tiene flora y fauna propia (algas, totora, peces, etc.).

#### **b. Lagunas estancadas sin algas del Género Arthrospira**

Caracterizadas por ser aguas freáticas remineralizadas, no tienen flora del género arthrospira, ni fauna, su mayor característica es su color verdoso. Algunas de estas lagunas son temporales y otras permanentes.

#### **c. Lagunas estancadas con algas del Género Arthrospira**

Caracterizadas por la ausencia de peces, moluscos y por su riqueza en carbonatos y bicarbonatos de sodio y por ser permanente, tienen color verdoso por las algas, hacen espuma por que tienen en disolución albúmina y carbohidratos procedentes de las algas. Especialmente, se caracterizan por la presencia de barros naturales de gran aplicación conocidos como los Peloides Naturales.



LAGUNAS ESTANCADAS CON ALGAS DEL GENERO ARTHOSPIRA

#### **d. Lagunas Termales**

Caracterizadas por ser aguas de origen plutónico, de poca mineralización pero con una temperatura mayor de los 20 °C, que son las características más saltantes con respecto a las otras lagunas. La fauna es prácticamente nula con excepciones, la flora es abundante, sus barros también tienen aplicaciones terapéuticas, pero no son de la calidad de los producidos por otros tipos de laguna.

#### **1.6.3. PELOIDES**

La denominación científica de los llamados lodos, fangos, barros, etc., es la de peloides. El peloide es la mezcla de un agua mineromedicinal con un producto sólido natural, que precisa de un proceso preparatorio, y es utilizado en balnearios.

Existen diferentes tipos de peloides termales (Fangos o Lodos, Turbas, Biogleas y Sapropelis) pero, habitualmente, los más utilizados son los fangos o lodos.

Los fangos o lodos termales son la mezcla de un sólido mineral y un agua mineromedicinal clorurada o sulfurada. El componente sólido suele estar formado por cuarzos, calizas y arcillas, pudiendo considerarse como factores destacables los compuestos de silicio, aluminio, calcio, sulfatos, carbonatos y fosfatos. También tienen un cierto contenido orgánico formado por humus.



**PELOIDES**

**1.6.3.1. CARACTERISTICAS PRINCIPALES**

Los peloides representan en sí un sistema físico-químico complejo compuesto básicamente por tres partes íntimamente relacionadas entre sí.

FASE LIQUIDA	FASE SÓLIDA	COMPLEJO COLOI-DAL
<p>(Solución acuosa) compuesta por:</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p>En esta fase, la composición iónica depende de la composición iónica del agua que cubra los fangos</p>	<p>(Partículas gruesas) Incluye: Silicatos( <math>\varnothing &gt; 0.001</math> mm) Yeso Carbonato Fosfato cálcico Carbonato de magnesio Otras sales Restos orgánicos</p>	<p>(Partículas muy finas) Incluye: Silicatos ( <math>\varnothing &lt; 0.001</math> mm) Materia orgánica Compuestos inorgánicos Aluminosilicatos Compuestos órgano minerales, tales como el FeS, ácido silícico, hidratos, etc.</p>

## 1.7 CLASIFICACION QUIMICA DE LAS AGUAS MINERO MEDICINALES

La clasificación química de las aguas es importante porque nos permite determinar el tipo de agua, inferir la temperatura en el sub-suelo, etc.

En el Perú, existen diferentes tipos de aguas minerales, siendo las principales:

GRUPO	TIPO PRINCIPAL	TIPOS MIXTOS
Bicarbonatadas	Sódicas Cálcicas	Mixtas Cloruradas Magnesianas
Cloruradas Sódicas		
Sulfatadas	Sódicas Cálcicas	Mixtas Cloruradas Mixtas carbonatadas
Sulfuradas	Sódicas Cálcicas Clorosulfuradas	
Radiactivas		
Mineralización	Ferruginosas Cuprosas Arsenicales Selenitosas Oligomagnésicas Yodadas	
Débil Mineralización		

### 1.7.1. AGUAS BICARBONATADAS

Las aguas bicarbonatadas son ricas en anhídrido carbónico libre y generalmente pobres en  $SO_4$ . Presentan una fuerte proporción de bicarbonatos. Según las proporciones relativas de  $Na + K$  y de  $Ca + Mg$ , pueden distinguirse:

## 1.7 CLASIFICACION QUIMICA DE LAS AGUAS MINERO MEDICINALES

La clasificación química de las aguas es importante porque nos permite determinar el tipo de agua, inferir la temperatura en el sub-suelo, etc.

En el Perú, existen diferentes tipos de aguas minerales, siendo las principales:

GRUPO	TIPO PRINCIPAL	TIPOS MIXTOS
Bicarbonatadas	Sódicas Cálcicas	Mixtas Cloruradas Magnesianas
Cloruradas Sódicas		
Sulfatadas	Sódicas Cálcicas	Mixtas Cloruradas Mixtas carbonatadas
Sulfuradas	Sódicas Cálcicas Clorosulfuradas	
Radiactivas		
Mineralización	Ferruginosas Cuprosas Arsenicales Selenitosas Oligomagnésicas Yodadas	
Débil Mineralización		

### 1.7.1. AGUAS BICARBONATADAS

Las aguas bicarbonatadas son ricas en anhídrido carbónico libre y generalmente pobres en  $SO_4$ . Presentan una fuerte proporción de bicarbonatos. Según las proporciones relativas de  $Na + K$  y de  $Ca + Mg$ , pueden distinguirse:

- ❖ *Aguas bicarbonatadas sódicas.*- Presentan una fuerte proporción de Na + K en comparación a la de Ca.
- ❖ *Aguas bicarbonatadas cálcicas.*- Muestran una disminución del contenido en Na + K que iguala al de los iones de Ca o Mg. A veces estos últimos llega a predominar.
- ❖ *Las aguas bicarbonatadas mixtas cloruradas.*- Son ricas en cloruros.

### 1.7.2. AGUAS CLORURADAS SODICAS

Son por lo general, aguas con una fuerte concentración de sales disueltas. Predominan los cloruros. Son ricas en Cl y en Na. El contenido en carbonatos, en cambio, es normal y hay ausencia de carbonatos alcalinos. De hecho se trata a menudo de simples disoluciones de sales sódicas.

### 1.7.3. AGUAS SULFATADAS

Las aguas sulfatadas se caracterizan por un elevado contenido de iones  $\text{SO}_4$ . Son ricas, generalmente en cationes Na y K. Según la proporción relativa de Na + K y de Ca + Mg, se dividen en:

- ❖ *Aguas sulfatadas cálcicas.*- Tienen un contenido en Ca + Mg superior al de Na + K. Por lo general son muy ricas en sulfatos.
- ❖ *Aguas sulfatadas sódicas.*- Tienen un elevado contenido de Na + K, a menudo son termales.
- ❖ *Aguas mixtas sulfatadas cloruradas.*- Son aguas termales que se caracterizan por que contienen concentraciones semejantes de sulfatos y cloruros, esta agua es usualmente ácida ( $\text{pH} = 2-5$ ) y su origen se debe a varias causas:
  - Mezcla de aguas cloruradas sódicas y sulfatadas ácidas.

- Este tipo de agua se forma cuando las aguas cloruradas supercalientes entran en contacto con rocas que contienen sulfuros. La hidrólisis del azufre e hidrógeno sulfurado y ácido sulfúrico produce una solución ácida.

En áreas volcánicas hay emanación de vapor con altas temperaturas que se originan en lavas poco profundas, estas contienen altas concentraciones de fluoruro, cloro y sulfatos derivados del vapor volcánico.

Las aguas sulfatadas de los terrenos sedimentarios deben su composición química al lavado de los depósitos salinos o a la oxidación de las piritas. En las regiones volcánicas, proceden a menudo de la oxidación en superficie de las aguas profundas cargadas de  $\text{SH}_2$ . Presentan entonces bromo,  $\text{CO}_2$  y  $\text{NH}_4$ .

#### 1.7.4. AGUAS SULFURADAS

Las aguas sulfuradas se caracterizan esencialmente por la presencia de compuestos sulfurados y de  $\text{SH}_2$  libre o combinado. Por su composición química total difieren pocos de los demás tipos. Su temperatura es elevada. La concentración en sales disueltas es mediana e incluso débil.

Según el contenido en  $\text{Na} + \text{K}$  pueden distinguirse:

- ❖ *Aguas sulfuradas sódicas.*- Las aguas sulfuradas sódicas presentan sulfuro de sodio. Dada la predominancia de los cationes de  $\text{Na} + \text{K}$  sobre los cationes de  $\text{Ca} + \text{Mg}$ , puede suponerse que tal vez deriven en algunas ocasiones de las aguas sulfatadas sódicas. Estos tipos de aguas, presentan trazas de boro, arsénico y cobre.
- ❖ *Aguas sulfuradas cálcicas.*- Las aguas sulfuradas cálcicas presentan descensos del contenido de  $\text{Na} + \text{K}$ , lo que implica una proporción mayor de  $\text{Ca} + \text{Mg}$ .

- ❖ **Aguas clorosulfuradas.-** Proceden de las aguas cloruradas sódicas. Son ricas en ClNa y en Cl<sub>2</sub>Mg. Su concentración es sales disueltas es, por regla general, elevada.
  
- ❖ **Aguas Ferruginosas.-** Son las que poseen mas de 10 mg de hierro por litro.

## 1.8 LOCALIZACION DE LOS RECURSOS TERMALES, ATERMALES Y LAGUNAS

De acuerdo a la tabulación de las primeras informaciones concerniente a la ubicación y cantidad de fuentes de aguas minero-medicinales, se han llegado a las siguientes conclusiones:

Se tiene registradas 301 fuentes de las cuales existe información completa y estudios sobre 65; 135 con información y estudios incompletos y 100 con información deficiente. Se puede afirmar que en el país tenemos aproximadamente 800 fuentes de aguas termo-minero-medicinales, que deberán ser registradas y estudiadas.

Los factores fundamentales que incide a no incrementar la información y estudio de los recursos minero-medicinales son los siguientes:

En nuestro país, exclusivamente se utilizan los recursos termales y no los atermales, ya que por su termalidad es más fácil de detectar una fuente y sin mayor conocimiento y estudio utilizarlo, razón por la cual la gran mayoría de las fuentes registradas son termales.

Existen recursos de fuentes minero-medicinales no termales, tanto en número como en calidad medicinal extraordinarios, pero por desconocimiento no se utilizan, lo que trae consigo su pérdida, con pocas excepciones.

No contar con laboratorios adecuados y sobre todo su centralización en Lima, dificultan los estudios de los recursos minero-medicinales no termales, por lo

que no permite tener conocimiento de sus cualidades para promover su utilización.

Lo abrupto de nuestra geografía así como lo extenso de nuestro territorio y sobre todo las fuentes de aguas minero-medicinales generalmente hacen su afloramiento en lugares alejados e inaccesibles, determina en que no haya aliciente para explotarlos.

La falta de información y estudios sobre los recursos mencionados, y fundamentalmente la falta de orientación al público ha determinado que la mayoría desconozca la cantidad y la calidad de este recurso que tiene nuestro país, por lo tanto no es cliente activo para esta industria, lo que es un desaliento para los inversionistas.

En el mapa N° 1.1 se puede observar las zonas termales, atermales y de lagunas en el Perú. Cabe resaltar que la mayor extensión de nuestro territorio presenta zonas con recursos termales, una menor extensión corresponde a zonas con recursos atermales.

En el mapa N° 1.2 se puede apreciar que en el Perú se ha dividido en cinco zonas completamente definidas, las mismas que representan el grado de concentración de los recursos mineros-medicinales por departamento (CUADRO N° 1.1) en el siguiente orden:

Departamentos que cuentan con 35 a 60 fuentes: Ancash, Lima y Puno.

Departamentos que cuentan con 17 a 35 fuentes: Cajamarca, Cuzco, Junín y Ayacucho.

Departamentos que cuentan con 6 a 16 fuentes: Arequipa, Apurímac, Amazonas, Huánuco, Huancavelica, Ica, Junín, La Libertad, San Martín y Tacna.

Departamentos que cuentan con una o dos fuentes, tales como Lambayeque, Moquegua, Pasco y Tumbes.

Departamentos que no tienen información sobre la existencia de recursos minero-medicinales.

**MAPA 1.1**

**ZONAS TERMALES, ATERMALES Y LAGUNAS DEL PERU**



**MAPA 1.1**

**ZONAS TERMALES, ATERMALES Y LAGUNAS DEL PERU**

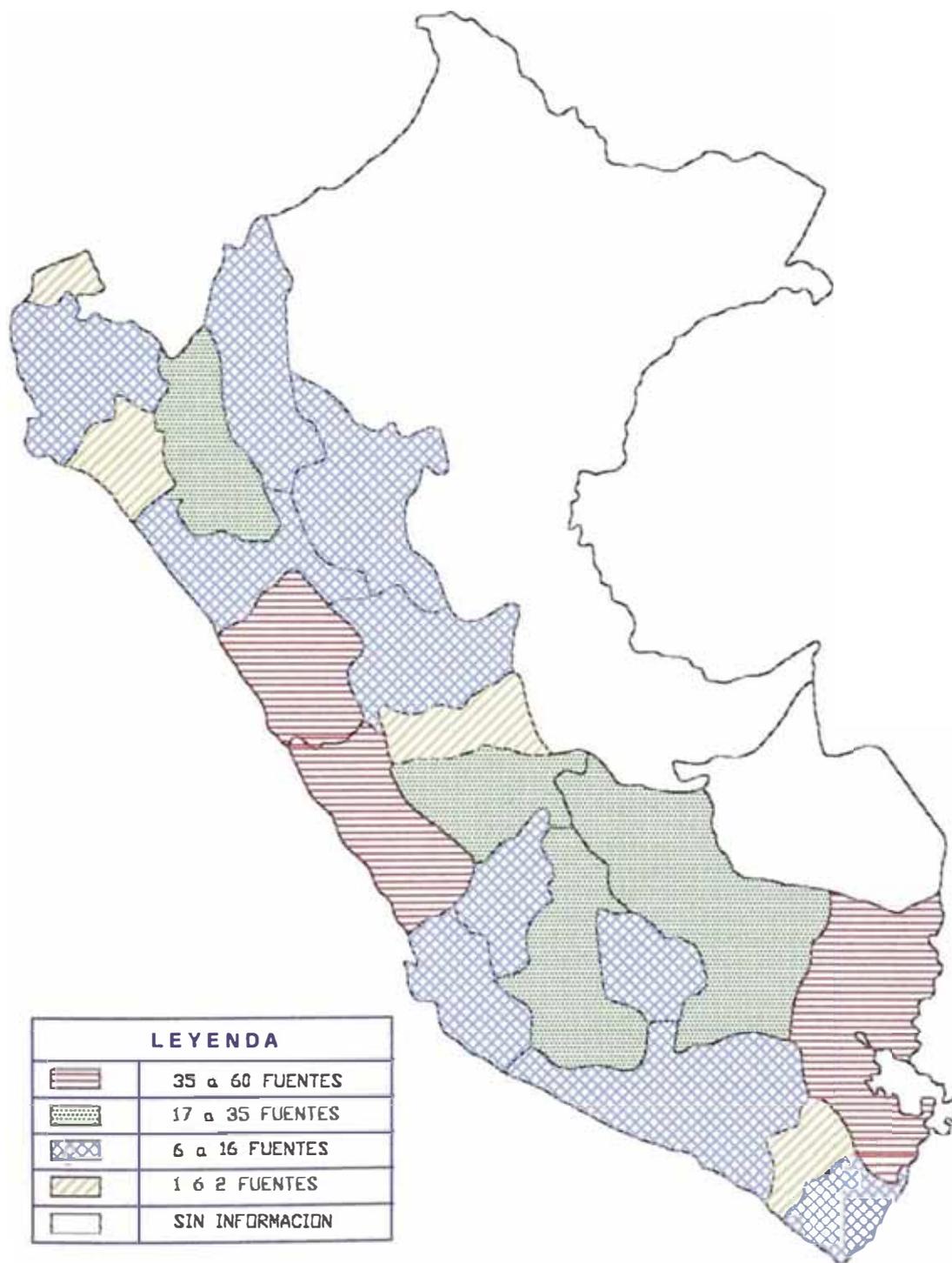


---

---

MAPA 1.2

**CONCENTRACION DE LAS FUENTES DE AGUAS MINERO MEDICINALES DEL PERU POR DEPARTAMENTOS**



**CUADRO N° 1.1**

**CONCENTRACION DE LAS FUENTES DE AGUAS MINERO - MEDICINALES**

**POR DEPARTAMENTOS**

<b>DEPARTAMENTO</b>	<b>N° FUENTES</b>	<b>TERMAL</b>	<b>TERMALIDAD <u>ATERMAL</u></b>	<b>Sin Inf.</b>
Amazonas	07	05		02
Ancash	50	20	04	26
Arequipa	12	06	05	01
Apurímac	07	04	02	01
Ayacucho	24	11		13
Cajamarca	18	10	01	07
Cuzco	17	13	04	
Huancavellica	08	06		02
Huánuco	09	05	01	03
Ica	08	01	07	
Junín	19	10	04	05
Lambayeque	01		01	
La Libertad	11	10		01
Lima	47	14	13	20
Moquegua	04	01	01	02
Pasco	02	02		
Piura	06	01	02	03
Puno	36	11	<u>03</u>	22
San Martín	06	04	01	01
Tacna	07	04	01	02
Tumbes	02	01	01	
<b>TOTALES</b>	<b>301</b>	<b>139</b>	<b>51</b>	<b>111</b>

## **1.9 PRINCIPALES BALNEARIOS DEL PERU**

Si consideramos que se tiene 301 fuentes de agua termo-minero-medicinales registradas, también se explica que solamente 65 tienen estudios completos, de las cuales se ha seleccionado 33 que corresponden a balnearios que cuentan con instalaciones que permiten una utilización racional de sus aguas. A continuación se detalla los principales balnearios de nuestro País.

La denominación y su ubicación de los principales balnearios se indica en el mapa y CUADRO N° 1.3 .

### **1.9.1. DEPARTAMENTO DE ANCASH**

En este departamento, se tiene un mayor número de fuentes termales, estos son utilizados como balnearios. Entre los balnearios más conocidos se tiene “Los Baños de Monterrey” (Huaraz), considerado como el segundo balneario mejor organizado en el País, con una infraestructura pequeña pero completa que puede brindar las facilidades que requiera de sus servicios y “Baños de Chancos” en la provincia de Carhuaz.

### **1.9.2. DEPARTAMENTO DE LIMA**

Lima, se caracteriza por tener un gran número de balnearios en funcionamiento. Entre ellos tenemos: “Churín”, es el balneario más grande y mejor dotado del país: Entre los balnearios más frecuentados podemos citar a: “Baños de Fierro”, “Chuichín”, “Santa Catalina”, “Mamahuarimi” y otros.

El balneario de “Churín”, es el más grande y completo con que cuenta el Perú, grandeza que está en relación directa con la cantidad, calidad y variedad de sus recursos hidrotermales.

MAPA 1.3

PRINCIPALES BALNEARIOS DEL PERU



CUADRO N° 1.2

PRINCIPALES BALNEARIOS DEL PERU

DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO	NOMBRE DEL BALNEARIO
Ancash	Huaraz	Independencia	Baños de Monterrey
Ancash	Huaylas	Huaylas	El Pato
Ancash	Corongo	Yanac	Aquilina o Pacakqui
Ancash	Carhuaz	Marcará	Baños de Chancos
Apurímac	Andahuaylas	Talavera	Baños de Hualalache
Apurímac	Abancay	Curahuasi	Baños de Cconoc
Arequipa	Arequipa	Yura	Baños de Yura
Arequipa	Arequipa	Yura	Socosani
Arequipa	Arequipa	Arequipa	Baños de Jesús
Ayacucho	Cora-Cora	Pararca	Huacuya
Cajamarca	Cajamarca	Baños del Inca	Baños del Inca
Cajamarca	Cajamarca	Baños del Inca	Tragadero o Hervidero
Cajamarca	Cajamarca	San Juan	Baños de Yumagual
Cajamarca	Cajamarca	Ichocán	Baños de Ichocán
Cajamarca	Chota	Chancay Baños	Baños de Chancay
Cuzco	Canchis	San Pedro	Marani
Cuzco	Canchis	Sicuani	Uyurmire
Cuzco	Calca	calca	Machacancha
Huancavelica	Huancavelica	Huancavelica	Baños de San Cristóbal
Huancavelica	Tayacaja	Ckoris	Baños de Ckoris
Ica	Ica	Ica	Huacachina
Junín	Jauja	Llocllapampa	Llocllapampa
Junín	Jauja	Llocllapampa	Baños de Acaya
Junín	Yauli	Yauli	Baños de Yauli
Lima	Cajatambo	Pachangará	Baños de Churín
Lima	Cajatambo	Pachangará	Chiuchín o Huancachín
Lima	Chancay	Chancay	Baños de Boza
Lima	Canta	Pacaraos	Santa Catalina
La Libertad	Stgo. de Chuco	Cachicadan	Baños de Cachicadan
La Libertad	Otuzco	Lucma	Baños del Gran Chimú
Pasco	Daniel Carrión	Yanahuanca	Baños de VilloPascopPasco
Pasco	Cerro de Pasco	Huayllay	Baños de Calera
Tacna	Tacna	Pachía	Calientes

### **1.9.3. DEPARTAMENTO DE AREQUIPA**

En el departamento de Arequipa se encuentran ubicados los tres balnearios más conocidos en el país y los más antiguos: “Baños de Jesús”, “Yura” y “Socosani”, cuyas aguas también se envasan para su expendio como agua minero-medicinal. Cabe indicar que “Socosani” y “Yura” poseen gas carbónico natural con el cual se envasa, siendo únicas en el país.

Los balnearios de “Baños de Jesús” y “Yura” están constituidos por el balneario propiamente dicho, con sus instalaciones de baños y hotel así como su planta de envase. “Socosani” estuvo constituido por el balneario, con sus instalaciones de baños y hotel, así como su planta de envase, pero en la actualidad solamente se explota como planta de envase.

### **1.9.4. DEPARTAMENTO DE CUZCO**

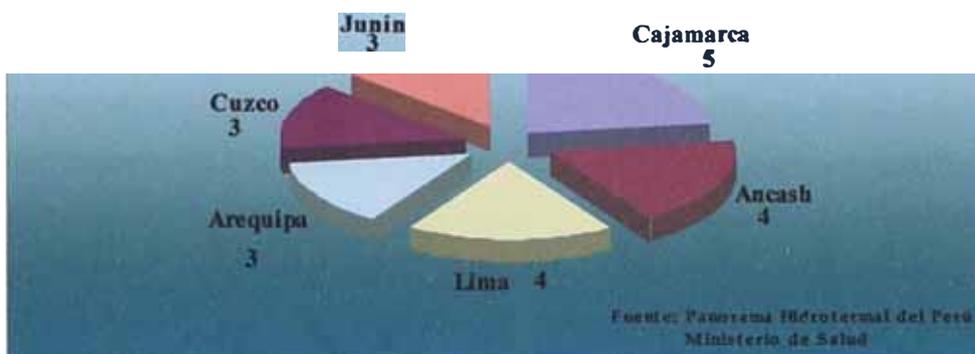
Casi todos los balnearios de Aguas Termales están asentados en el “Valle Sagrado de los Incas”, es decir, a orillas del río Vilcanota, como es el caso de “Uyurmire”, “Calientes”, “San Pedro”, y otros, para luego encontrar las otras fuentes en su tramo intermedio como “Machacancha”, “Machupicchu” y otros.

### **1.9.5. DEPARTAMENTO DE JUNIN**

El departamento de Junín cuenta con 19 fuentes termales de aguas termominero-medicinales.

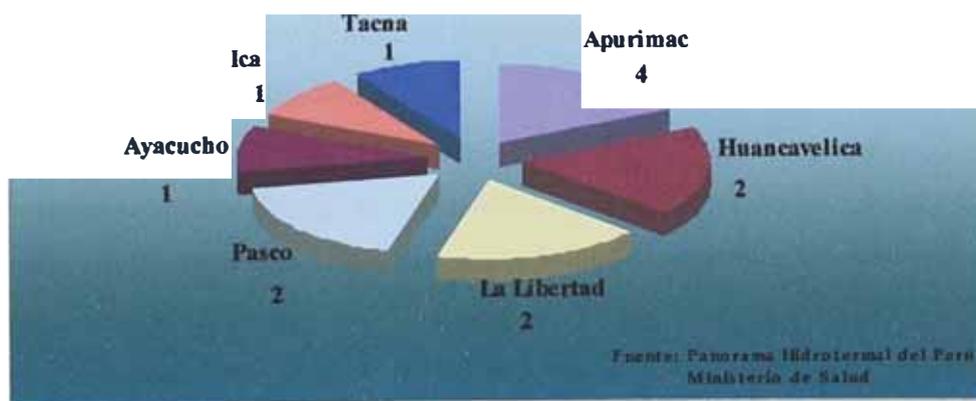
Sus principales fuentes hacen su afloramiento en la hoya del río Mantaro, tales como “Casapalca”, “Yauli”, “Lllochlapampa”. En este departamento contamos con “Los Baños de Yauli”, que corresponde a un pequeño balneario construido con materiales de la región y cuyas facilidades e instalaciones son las mínimas exigibles.

### PRINCIPALES BALNEARIOS EN EL PERU



De acuerdo a la gráfica se tiene que los Departamentos de Cajamarca, Ancash y Lima tiene el mayor número de balnearios, los cuales cuentan con las instalaciones adecuadas que permiten la utilización racional de sus aguas. Los balnearios más frecuentados son: Baños del Inca (Cajamarca), Baños de Monterrey (Ancash), Baños de Chancos (Ancash), Baños de Churín (Lima) entre otros.

### PRINCIPALES BALNEARIOS DEL PERU



En esta gráfica se observa a los departamentos que tienen menor cantidad de balnearios registrados. Entre ellos tenemos al Departamento de Apurimac, Huancavelica, La Libertad y otros. A continuación se menciona algunos de los

balnearios más frecuentados: Baños de Yura (Arequipa), Baños de San Cristobal (Huancavelica), Baños de Cachicadan (La Libertad) y Huacuya (Ayacucho).

## 1.10 AGUAS TERMALES

Las aguas termales forman parte del gran grupo llamado aguas minero-medicinales, pues generalmente son aguas que provienen del subsuelo de la corteza terrestre, contienen minerales y sales disueltas que han recogido durante su recorrido, la proporción varía entre 2 y 1,000 mg/lt., características que la hacen diferentes a las demás aguas y con efectos fisiológicos definidos.

Estas aguas se caracterizan por su elevada temperatura, afloran en forma natural por grietas o manantiales, poseen olor, color, sabor característico, según sus componentes químicos minerales y las sales solubles libres. Su temperatura es consecuencia de la profundidad en que se encuentran, determinando la variación progresiva de los grados, la mayor distancia desde la superficie.

## 1.11 POSIBLE ORIGEN DE LAS FUENTES TERMALES

Según las observaciones geológicas, el origen de estas aguas proviene del subsuelo de la corteza terrestre y que su afloramiento y circulación se efectúa gracias a la fracturación y planos de disyunción de las rocas. Las aguas termales tienen dos posibles orígenes:

**Origen Volcánico.-** Surge de una directa relación con focos volcánicos o eruptivos. Sus temperaturas son elevadas, siempre superiores a 50 °C. Tiene su caudal periódico, rítmico y constante, siendo asimismo constantes, su temperatura y composición.

En este tipo de aguas, son comunes los elementos característicos de emanaciones metálicas, como boro, fósforo, arsénico, bromo, cobre y nitrógeno.

**Por calentamiento Geotérmico.-** El gradiente geotérmico indica que cada 33 metros de profundidad, la temperatura aumenta un grado centígrado. Como se mencionó inicialmente, parte del agua caída se escurren formando los numerosos ríos, otra parte se infiltra, empapando estratos de rocas permeables.

El agua infiltrada va tomando temperatura a medida que llega a mayores profundidades. Como muchos de los estratos permeables que permiten su infiltración son inclinados, se van escurriendo, recibiendo mayor temperatura y por lo tanto el agua que va circulando puede alcanzar una profundidad que permite obtener una temperatura de 100 °C.

Los estratos que contiene el agua calentada al chocar con una falla geológica, provoca una especie de barrera, que comienza a subir a la superficie por vías de conducción derivada de la falla misma y sus fallas menores asociadas.

De esta manera el agua calentada, sube a la superficie ocupando areniscas que mantienen la temperatura pero ya con menores valores entre los 40 y 35 °C.

La salinidad del Agua termal, la va adquiriendo a medida que viaja por los estratos portadores que le van dando la salinidad típica del agua.

A continuación se van a enumerar los elementos componentes de estas aguas tratando de explicar la procedencia de los mismos, que derivarán a su vez en la interpretación del origen de las aguas ellos son:

La abundancia de CO<sub>2</sub> y sus componentes, pudiéndose considerar como procedentes de zonas profundas.

La abundancia de Carbonatos y Sulfatos se explica debido a que esta agua en su recorrido atraviesan rocas calizas y yesosas.

El Na, Ca, y Mg igualmente provienen de rocas sedimentarias.

El Cl es un ión de origen magmático, pero también pueden encontrarse en los sedimentos.

El Li es un ión de origen magmático, y se halla asociado a rocas graníticas y sus afines.

La presencia de radioactividad en las Aguas Termales ha sido registrada con mayor intensidad en los lugares donde afloran las fuentes en rocas de colores negruzcos y de consistencia algo descompuesta.

Teniendo en cuenta el carácter químico y radiactividad que presentan las aguas de las fuentes termales se pueden suponer que en parte son de origen magmático y probablemente se mezclan con aguas meteóricas. En consecuencia puede clasificarse como “Fuentes de origen profundo magmático meteórica”.

## **1.12 USO DE LAS AGUAS TERMALES Y MINERALES SEGÚN SU TEMPERATURA**

Actualmente se está haciendo uso extensivo de los fluidos geotermales desde los 30 a 250 °C para ser empleados en la industria, minería, aire acondicionado, calefacción distrital, baños terapéuticos, en la agricultura y en la acuicultura (pisigranjas).

En el Esquema N° 1.4, se indica la utilización del fluido geotérmico de acuerdo a la temperatura que presenta.

A continuación se detalla el uso del fluido geotermal considerado la temperatura de la fuente:

**De 0 a 30 °C.-** El uso de los fluidos geotermales es apropiado para acuicultura: cultivo de peces, crustáceos y algas, descongelamiento, recuperación de sales geotérmicas (KCl, NaCl, CaCl, LiCl).

---

El Cl es un ión de origen magmático, pero también pueden encontrarse en los sedimentos.

El Li es un ión de origen magmático, y se halla asociado a rocas graníticas y sus afines.

La presencia de radioactividad en las Aguas Termales ha sido registrada con mayor intensidad en los lugares donde afloran las fuentes en rocas de colores negruzcos y de consistencia algo descompuesta.

Teniendo en cuenta el carácter químico y radiactividad que presentan las aguas de las fuentes termales se pueden suponer que en parte son de origen magmático y probablemente se mezclan con aguas meteóricas. En consecuencia puede clasificarse como “Fuentes de origen profundo magmático meteórica”.

## **1.12 USO DE LAS AGUAS TERMALES Y MINERALES SEGÚN SU TEMPERATURA**

Actualmente se está haciendo uso extensivo de los fluidos geotermales desde los 30 a 250 °C para ser empleados en la industria, minería, aire acondicionado, calefacción distrital, baños terapéuticos, en la agricultura y en la acuicultura (pisigranjas).

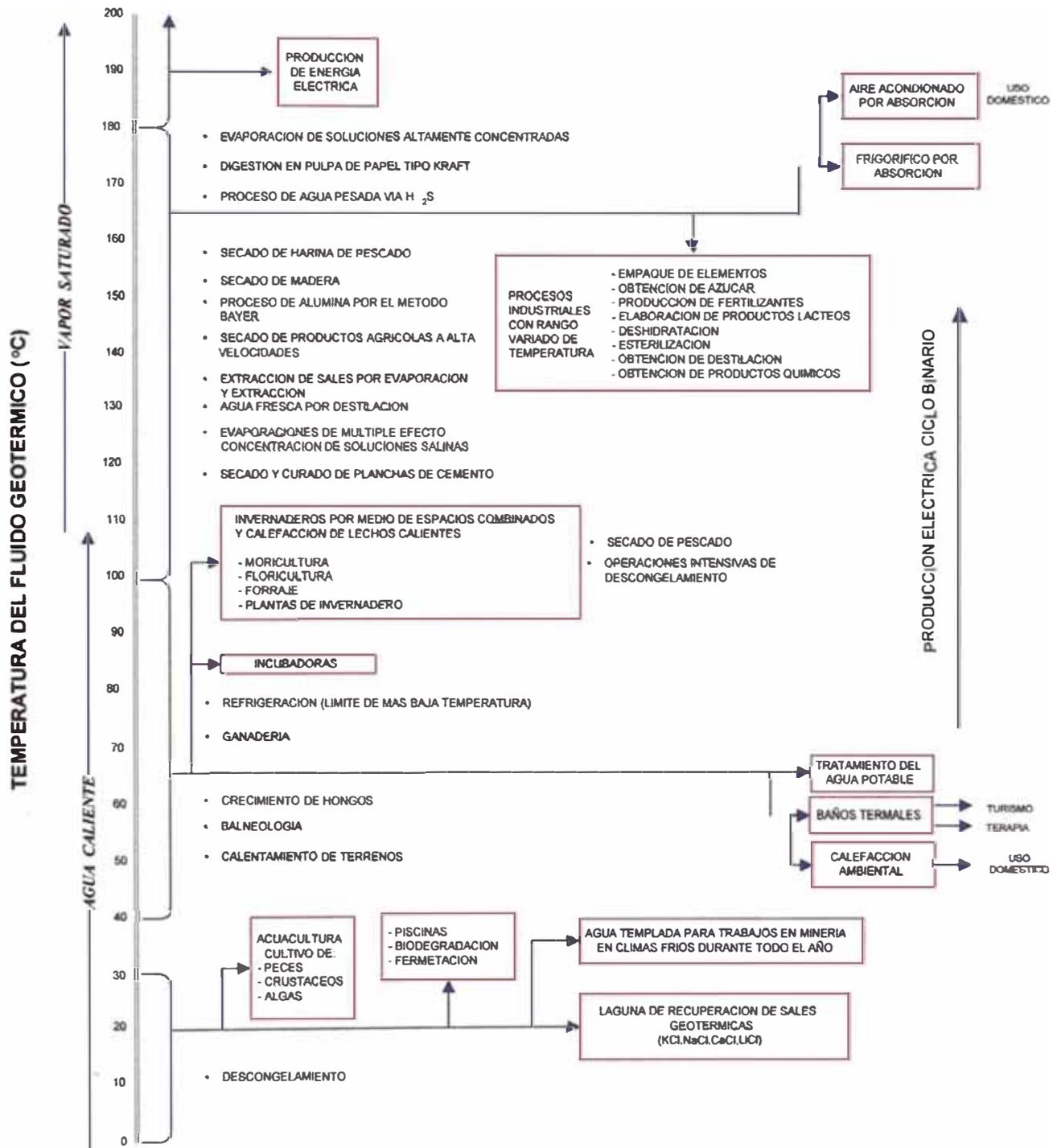
En el Esquema N° 1.4, se indica la utilización del fluido geotérmico de acuerdo a la temperatura que presenta.

A continuación se detalla el uso del fluido geotermal considerado la temperatura de la fuente:

**De 0 a 30 °C.-** El uso de los fluidos geotermales es apropiado para acuicultura: cultivo de peces, crustáceos y algas, descongelamiento, recuperación de sales geotérmicas (KCl, NaCl, CaCl, LiCl).

ESQUEMA Nº 1.4

UTILIZACION DEL FLUIDO GEOTERMICO SEGUN SU TEMPERATURA



**De 40 a 100 °C.-** A esta temperatura los fluidos geotermales se utilizan para el crecimiento de hongos, calefacción ambiental, ganadería, incubadoras y secado de maderas. Además, las fuentes termales suelen utilizarse como balneario (baños termales) o para producir gaseosa.

**De 100 a 180 °C.-** Los fluidos geotermales son empleados para: evaporación de múltiple efecto, extracción de agua fresca por destilación, extracción de sales por evaporación, secados de productos agrícolas y en el proceso de alúmina por el Método de Bayer.

**De 180 a 200 °C.-** Los fluidos geotermales son aprovechados para la producción de la energía eléctrica.

### **1.13 APLICACIÓN DE LAS AGUAS TERMALES EN LA SALUD**

En la actualidad la cura TERMAL es uno de los sistemas terapéuticos que ha adquirido mayor trascendencia.

El contenido en el Agua Termal de pequeñas cantidades de hierro, sodio, fósforo, yodo, arsénico, flúor y cromo facilitan las complejas funciones fisiológicas de la piel.

La acción de esta agua sobre el organismo es múltiple y compleja. El uso de las Aguas Termales es recomendable por las siguientes razones:

- Estimulan las defensas del organismo.
- Depuran la sangre, eliminándose las toxinas y productos de desechos por la sudoración y diuresis que provocan.
- Reactivan el metabolismo y disminuye la presión arterial.
- Tienen poder desensibilizante, sumamente útil considerando la participación alérgica en el orden de las afecciones de tipo reumática.

- Poder analgésico y calmante de los dolores.
- Sedante del sistema nervioso.
- Reconstituyente y tónico general.

#### **1.14 INFLUENCIA DE LAS FUENTES TERMALES AL MEDIO AMBIENTE**

Se ha demostrado que los ríos cercanos a las zonas con hidrotermalismo pueden ser afectados negativamente por elementos tóxicos y perjudiciales, haciendo sus aguas no aptas para el abastecimiento doméstico, para el riego y uso pecuario.

La calidad de las aguas en el Perú está determinada por la Norma Técnica Peruana (ITINTEC, 1987) y el DL 17752 - Ley General de las Aguas, que establece la clasificación de los cursos de agua de acuerdo a sus usos. Para efectos de protección de las aguas, correspondiente a los diferentes usos, establece los valores límites deseables de sustancias presentes en el agua para las diversas clases de uso. La clasificación de las aguas de acuerdo a sus usos se presenta en el cuadro N° 1.3

**CUADRO N° 1.3: CLASIFICACION DE LAS AGUAS DE ACUERDO A SUS USOS**

<b>CLASE</b>	<b>USO</b>
I.	Aguas de abastecimiento doméstico con desinfección simple.
II.	Aguas de abastecimiento doméstico con tratamiento equivalente a procesos combinados de mezcla y coagulación, sedimentación, filtración y cloración.
III.	Agua para riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales.
IV.	Aguas de zonas recreativas de contacto primario (baños y similares).
V.	Aguas de zonas de pesca de mariscos bivalvos.
VI.	Aguas de zonas de preservación de fauna acuática y pesca recreativa o comercial

La clase III de la Ley General de Aguas que determina la calidad de aguas usadas para riego no proporciona valores límites para Boro y Litio que pueden también deteriorar la capacidad productiva del suelo.

Estudios efectuados por INGEMMET en el Sur del Perú, indican que algunos de sus ríos contienen elevados valores de Sodio, Calcio y cloruro y altas concentraciones de Arsénico, Boro y Litio. Esto se explica por las mayores concentraciones de estos elementos en las fuentes termales ubicadas en las áreas, la descarga a los ríos que se encuentran en el área de estudio.

En cuanto a concentraciones de parámetros como Arsénico o Mercurio en sedimentos, se afirma que se trata de un fenómeno local. Quiere decir, que las acumulaciones altas de estos elementos en sedimentos se observa sólo en las cercanías de fuentes termales, en las de sus aguas receptoras no se detecta concentraciones elevadas.

Es necesario efectuar monitoreo detallado de los elementos indicados a lo largo de los ríos afectados por fuentes termales, recomendándose que se realice dos veces al año, uno en periodo de estiaje y otro en periodo de lluvia.

### **1.15 CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO**

La calidad del agua para consumo humano normalmente está reglamentada por leyes y decretos gubernamentales.

Cuando esto no ocurre, los patrones de calidad establecidos por la OMS y otras entidades pueden ser utilizados como parámetros que fijan las condiciones deseables de calidad. En el Perú, la Resolución Suprema del 17 de Diciembre de 1,946 establece los patrones de calidad del agua potable. Sin embargo, existe un proyecto de ley en vías de aprobación que actualizará y complementará estos patrones.

## **CAPITULO II**

### **ASPECTOS GENERALES DEL AREA DE ESTUDIO**

## **II. ASPECTOS GENERALES DEL AREA DE ESTUDIO**

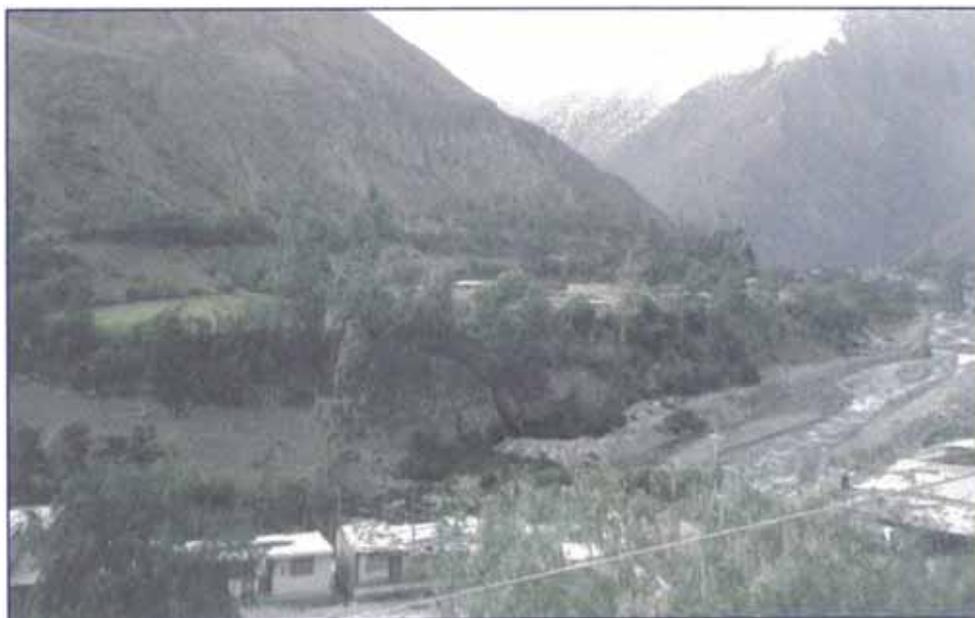
### **2.1 UBICACIÓN**

El área de estudio se ubica a orillas del río Oyón, a una altura de 2,250 m.s.n.m., en el paraje denominado “Baños de Fierro”, “Colorado”, “Andajes”, o “Cabracancha”, en la jurisdicción del distrito de Andajes, provincia de Cajatambo, departamento de Lima. Esta comprendido entre las coordenadas geográficas 76° 53’ 10” de longitud Oeste y 10° 49’ 37” latitud Sur.

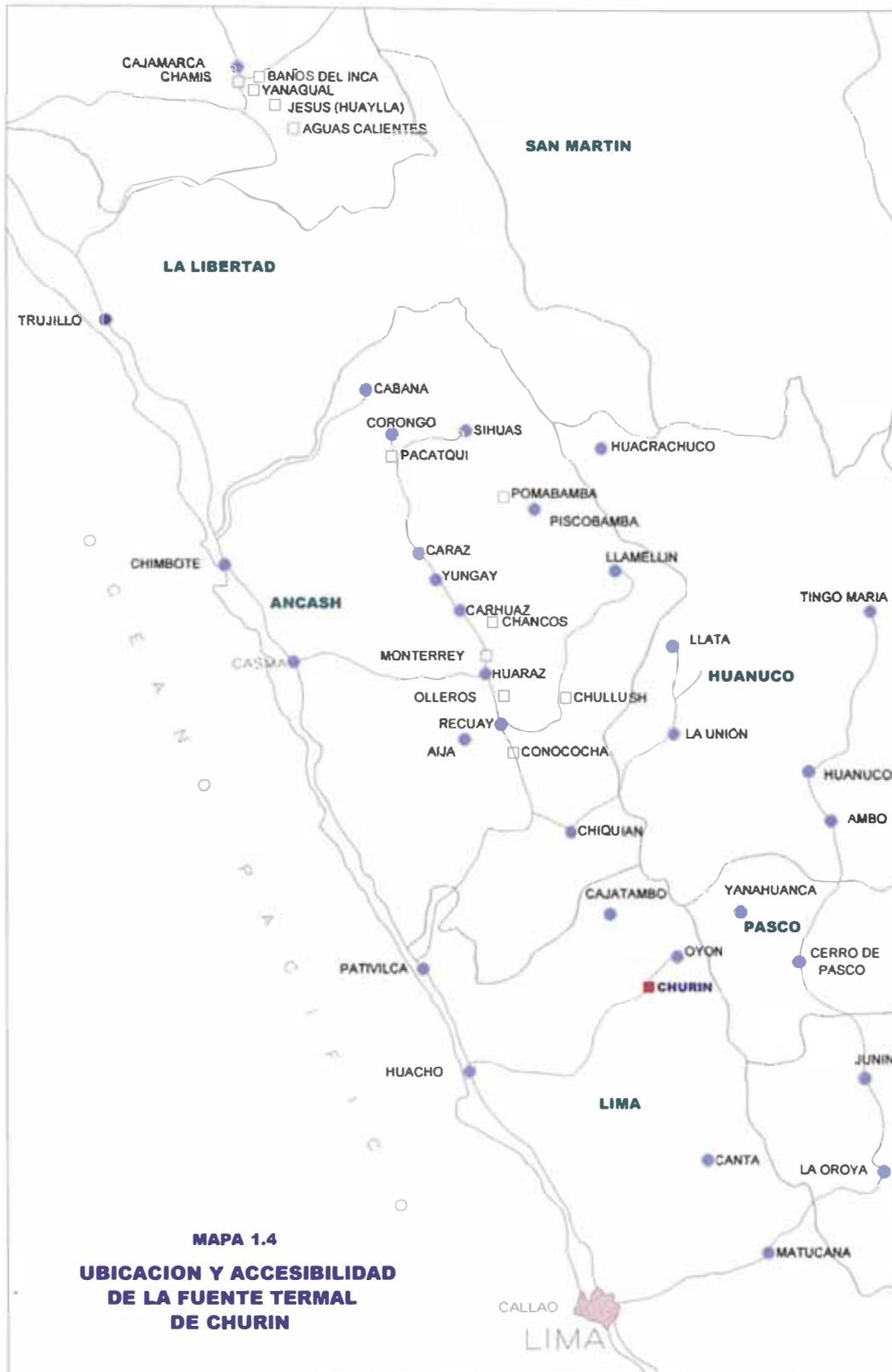
### **2.2 ACCESIBILIDAD**

El área es accesible únicamente por vía terrestre, se halla ubicado a 4 Km. de la localidad de Churín, 64 Km. de Sayán y 209 Km. desde Lima. Existe una carretera en regulares condiciones de mantenimiento que une estas poblaciones.

Es de advertir que los “Baños de Fierro” prácticamente constituyen parte del balneario de Churín, por cuanto necesariamente deben alojarse en este balneario y complementar su tratamiento con las aguas de esta zona.



**VISTA PANORAMICA DE LA LOCALIDAD DE CHURIN**



### **2.3 CLIMA**

El clima es templado y primaveral, con precipitación pluvial durante los meses de Enero a Marzo y sol radiante entre los meses de Abril a Diciembre.

La temperatura media anual es de 24 °C, la máxima en los meses veraniegos llega hasta los 28 °C, y la mínima a los 16 °C en la época invernal. La humedad atmosférica es mínima.

### **2.4 FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE**

La población de Churín se abastece de agua potable proveniente de manantiales localizadas en la parte alta de la ciudad, el agua captada se desinfecta con cloro para su posterior distribución a la población.



**FUENTE DE ABASTECIMIENTO-CIUDAD DE CHURIN**

### **2.5 MARCO GEOLÓGICO**

En la zona de estudio, se desarrolló una actividad magmática que generó las rocas plutónicas y volcánicas así como elevados flujos térmicos en la corteza terrestre formando los denominados sistemas geotermales, que se caracterizan por la presencia de alto calor y circulación de aguas subterráneas, convirtiéndose en fluidos hidrotermales que dieron origen a depósitos metálicos, alteraciones hidrotermales y brechas explosivas.

Las únicas manifestaciones de la actividad magmática actual en la zona de estudio son surgencias de aguas calientes con precipitaciones de sínter.

## 2.6 HIDROGEOLOGÍA

De acuerdo a las observaciones de campo realizado por INGEMMET, las siguientes unidades geológicas pueden albergar aguas subterráneas para alimentar fuentes termales y estas unidades estarían conformados por rocas calcáreas, areniscas y rocas volcánicas fracturadas.

En estas rocas el flujo de agua subterránea depende principalmente del grado de permeabilidad, fracturación y meteorización. En areniscas por permeabilidad y rocas volcánicas por fracturación. Las aguas subterráneas migran principalmente a través de juntas, fracturas y fallas. En rocas calcáreas existen además cavernas de disolución. En el sector de estudio, las siguientes unidades geológicas pueden ser acuíferos potenciales: las rocas calcáreas de la formación Jumasha y principalmente las areniscas del grupo Goyllarisquizga.

CUADRO N° 2.1: ACUIFEROS POTENCIALES PARA LA ALIMENTACIÓN DE FUENTES EN EL SECTOR DE ESTUDIO

Unidad Estratigráfica	Potencia (m)	Reservorios para aguas subterráneas	Permeabilidad estimada K (m/s)
Fam. Jumasha	800	Rocas Calcáreas	$10^{-1} - 10^{-6}$
Gpo. Goyllarisquizga	2700	Areniscas	$10^{-1} - 10^{-6}$

## 2.7 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA Y SUS PRECIPITACIONES

La fuente de los Baños de Fierro se halla en el mismo cauce del río Huaura y cerca del distrito de Churín, la cual es utilizada como baño termal. Sus aguas surgen en forma de manantial en el Grupo Goyllarisquizga y pertenecen a la familia de las aguas sulfatadas-cloruradas, con 49 °C de temperatura, pH casi neutro (6.5) y altos valores de Hierro y Manganeseo.

## 2.8 PARAMETROS QUIMICOS QUE INFLUYEN SOBRE EL USO DE LA FUENTE

La composición físico- químico del Agua termal de los Baños de Fierro es la siguiente:

### COMPOSICION FISICO-QUIMICO DEL AGUA TERMAL DE LOS BAÑOS DE FIERRO

<i>Características Físicas y Químicas del Agua termal</i>	
Temperatura del agua	49°C
PH	6.0
Turbidez	15 U.N.T
Conductividad	2590 u.s.
Sólidos Totales	2,360 mg/lt
Sólidos Disueltos	2,356 mg/lt
Sólidos Suspendidos	4 mg/lt
Dióxido de carbono	135 mg/lt
Hidrógeno Sulfurado	No hay
Precipitados	Ferrosos en abundancia
Vegetación	Muy escasa
Color	3.5 u.c.
Olor	Inodoro
Sabor	Metálico
Aspecto	Efervescente rojizo
Aforo	8.53 lts/seg
Utilización	Balneación y bebida
Calificación	Sódica-Clorurada- Sulfatada Ferruginosa- Cálcica-Bicarbonatada

La temperatura del agua que originalmente era de 56 °C, a disminuido como consecuencia de los movimientos sísmicos que asolaron esta zona, hasta llegar a la temperatura actual de 49 °C.

## **2.9 ORIGEN DE LAS AGUAS EN EL SECTOR DE ESTUDIO**

Por pertenecer a la clase sulfatada y bicarbonatada, la totalidad de las aguas en el área de estudio se interpretan como aguas subterráneas superficiales que han sido calentadas. Para la zona de estudio la geotermometría indica temperaturas entre 80 y 100 °C para sus aguas en profundidad.

## **2.10 USO DEL AGUA TERMAL EN LA ZONA DE ESTUDIO**

La fuente termal de Hierro, es utilizada como baños termales y cuenta con infraestructura nueva. Sus aguas poseen altas temperaturas y se sugiere encauzar el río y construir muros de contención para proteger la fuente de avenidas fuertes.

Considerando factores como buena accesibilidad, alta temperatura y caudal suficiente, el agua de esta fuente es apta para ser desarrollada como baños termales turísticos.

Para evaluar las posibilidades del desarrollo de las fuentes, se recomienda efectuar estudios hidroquímicos más amplios y frecuentes para confirmar contenidos de elementos como Arsénico y Bario. Aunque las consecuencias de estos elementos no son inmediatas, a largo plazo son dañinos para la salud, sobre todo son peligrosos, puesto que mucha gente toma las aguas constantemente, suponiendo propiedades curativas y/o medicinales y los ingiere por un largo tiempo.

Debido al predominio de fuentes con temperaturas inferiores entre 20 y 50 °C y en profundidades entre 80 y 130 metros, se indica que el sector de estudio no ofrece suficiente potencial geotermal para generar electricidad ni para suminis-

tro de agua caliente, pero es posible aprovechar a las fuentes termales, como zona turística o local, como baños termales.

## **CAPITULO III :**

# **TEORIA DE COAGULACION Y FLOCULACION**

### **III. TEORIA DE COAGULACION Y FLOCULACION**

#### **3.1 INTRODUCCION**

La turbiedad y el color son principalmente causados por partículas muy pequeñas, llamadas partículas coloidales. Estas partículas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado y pueden atravesar un medio filtrante muy fino. Por otro lado aunque su concentración es muy estable, no presentan la tendencia de aproximarse unas a otras.

Para eliminar estas partículas se recurre a los procesos de coagulación y floculación, la coagulación tiene por objeto desestabilizar las partículas en suspensión es decir facilitar su aglomeración. En la práctica este procedimiento es caracterizado por la inyección y dispersión rápida de productos químicos. La floculación tiene por objetivo favorecer con la ayuda de la mezcla lenta el contacto entre las partículas desestabilizadas. Estas partículas se aglutinan para formar un floc que puede ser fácilmente eliminado por los procedimientos de decantación y filtración.

Es muy importante que los procedimientos de coagulación y floculación sean utilizados correctamente, ya que la producción de un floc muy pequeño o muy ligero produce decantación insuficiente; mientras que el agua que llega a los filtros contiene una gran cantidad de partículas de floc que rápidamente ensucian los filtros y necesitan lavados frecuentes. Por otro lado cuando el floc es frágil, este se rompe en pequeñas partículas que pueden atravesar el filtro y alterar la calidad del agua producida.

Las aguas superficiales pueden contener una gran variedad de materias, el tamaño de las partículas de estas materias y su naturaleza determinan los tipos de tratamiento dentro de las plantas de agua. Las partículas de tamaño muy grande como los detritus orgánicos, algas, protozoarios, grava, arena, limo, etc., los microorganismos en la materia en suspensión del tamaño de 10 micrómetros a

mm, pueden ser eliminados por los tratamientos de separación física que conlleva aproximadamente los siguientes:

10 a 100 mm. son separados por medio de los sistemas de rejillas.

0.2 a 10 mm. pueden ser separados por desarenación, sedimentación, decantación y flotación.

A 0.1 mm. son separados por filtración (macro y microtamizado).

Las partículas muy finas son una parte de las materias solubles y de las materias coloidales como: proteínas, virus; moléculas y los iones pueden ser separados por adsorción o intercambio de iones.

## **3.2 PARTICULAS EN SUSPENSION**

Las partículas en suspensión de una fuente de agua superficial provienen de la erosión de suelos, de la disolución de sustancias minerales y de la descomposición de sustancias orgánicas. A este aporte natural se debe adicionar las descargas de desagües domésticos, industriales y agrícolas. En general la turbiedad del agua es causada por las partículas de materias inorgánicas (arcillas, partículas de lodo), en tanto que el color está formado por las partículas de materias orgánicas e hidróxidos de metales (hierro por ejemplo).

### **3.2.1 TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN**

Las partículas se clasifican de acuerdo a su tamaño; así las partículas con diámetro inferior a 1 micrómetro ( $\mu\text{m}$ ) que corresponden a partículas de materias orgánicas o inorgánicas, se depositan muy lentamente.

El cuadro N° 3.1 muestra el efecto de la disminución del tamaño de las esferas sobre el área total superficial y el tiempo de sedimentación requerida.

CUADRO N° 3.1: EFECTO AL DISMINUIR EL TAMAÑO DE LAS ESFERAS

Tipo de Partículas	Diámetro (mm)	Area Superficial Total ( * )	Tiempo Requerido para Sedimentar (**)
Grava	10	3.15 cm <sup>2</sup>	0.3 s
Arena gruesa	1.0	31.50 cm <sup>2</sup>	3.0 s
Arena Fina	0.1	315.00 cm <sup>2</sup>	38.0 s
Lodo Fino	0.01	3150.00 cm <sup>2</sup>	33.0 min.
Bacteria	0.001	3.15 m <sup>2</sup>	55.0 horas
Coloides	0.0001	31.50 m <sup>2</sup>	230.0 días

( \* ): Area de partículas del tamaño indicado, producida a partir de una partícula de 100 mm de diámetro y gravedad específica de 2.65.

( \*\* ): Cálculos basados en la esferas con gravedad específicas de 2.65 que sedimentan 30 cm.

Se puede apreciar que es impracticable sedimentar las impurezas coloidales sin tratamiento químico previo. La gran superficie específica da a los coloides una gran capacidad de adsorción.

Los coloides son suspensiones estables, por lo que es imposible su sedimentación natural, son sustancias responsables de la turbiedad y del color del agua.

### 3.2.2 AFINIDAD DE LAS PARTÍCULAS COLOIDALES POR EL AGUA.

Las partículas coloidales se caracterizan por ser hidrofílicos (tienen afinidad por el agua) e hidrófobos (es decir que rechazan al agua), los primeros se dispersan espontáneamente dentro del agua y son rodeados de moléculas de agua que previenen todo contacto posterior entre estas partículas; las partículas hidrofóbicas no son rodeadas de moléculas de agua, su dispersión dentro del agua no es espontáneo por lo que requiere de la ayuda de medios químicos y físicos.

Las partículas hidrófobas son en general partículas de materias inorgánicas mientras que las hidrofílicas son materias orgánicas; en realidad pocas son las

partículas que son exclusivamente hidrofílicas o hidrofóbicas; se obtienen mas bien partículas hidratadas a los diferentes grados.

### 3.2.3 CARGA ELÉCTRICA Y DOBLE CAPA

Dentro del agua superficial, las partículas coloidales son las causantes de la turbiedad y del color por lo que el tratamiento del agua está orientado a la remoción de estas partículas; estas poseen normalmente una carga eléctrica negativa situada sobre su superficie. Estas cargas llamadas cargas primarias, atraen los iones positivos del agua, los cuales se adhieren fuertemente a las partículas y atraen a su alrededor iones negativos acompañados de una débil cantidad de iones positivos ( ver fig. N° 3.1).

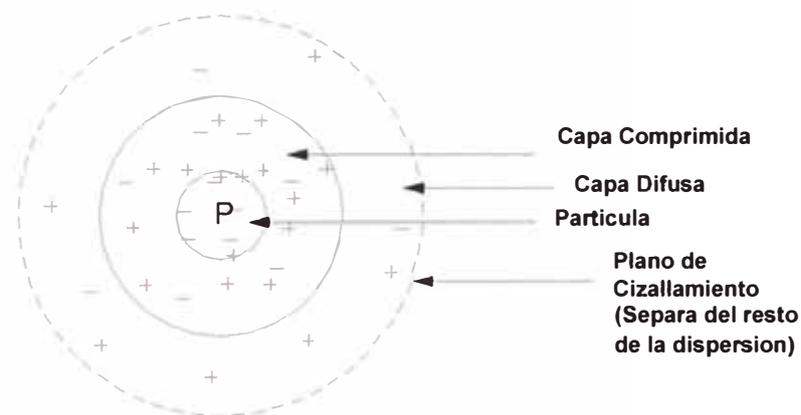


FIGURA N° 3.1 : DOBLE CAPA DE UNA PARTÍCULA COLOIDAL.

Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula y se desplazan con ella, forman la capa adherida o comprimida, mientras que los iones que se adhieren débilmente constituyen la capa difusa, por lo tanto hay un gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado Potencial Zeta.

### 3.2.4 FACTORES DE ESTABILIDAD E INESTABILIDAD

Las partículas coloidales están sometidas a dos grandes fuerzas:

**Fuerzas de atracción de Van Der Waals:**  $E_a$  (Factor de Inestabilidad); son fuerzas de atracción producidas por el movimiento continuo de las partículas.

**Fuerzas de repulsión electrostáticas:**  $E_b$  (Colúmbicas – Factor de Estabilidad); son fuerzas que impiden la aglomeración de las partículas cuando estas se acercan unas a otras; por ejemplo 2 partículas de igual signo no se pueden aproximar, estas se rechazan.

El equilibrio de una suspensión coloidal depende de la fuerza resultante entre la fuerza de atracción y la fuerza de repulsión:  $E_r$ , (ver fig.Nº 3.2).

$$E_r = E_a + E_b$$

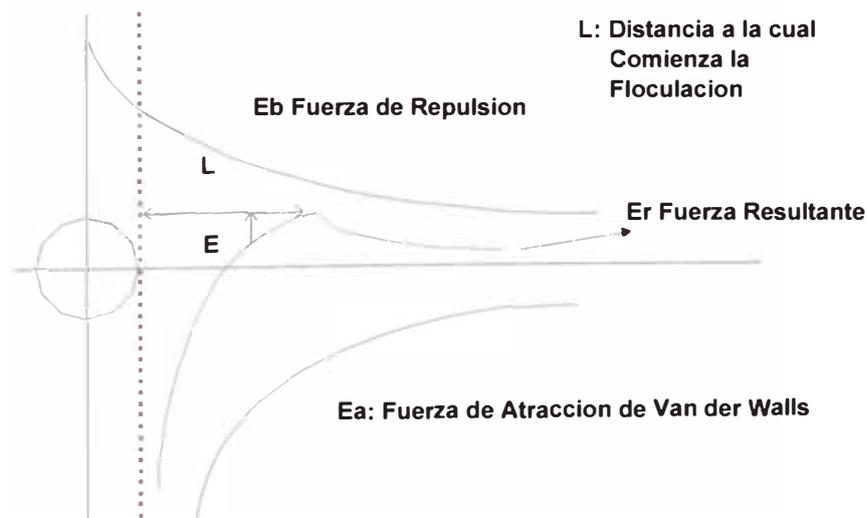


FIGURA Nº 3.2: FUERZA DE ATRACCIÓN Y REPULSIÓN.

### 3.3 COAGULACION

#### 3.3.1 OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de la coagulación es desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en suspensión, para favorecer su aglomeración; en consecuencia se eliminan las materias en suspensión estables; la coagulación no solo elimina la turbiedad sino también la concentración de las materias orgánicas y los microorganismos.

#### 3.3.2 DEFINICIÓN

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado.

En la figura N° 3.3 se muestra como las sustancias químicas anulan las cargas de la superficie del coloide permitiendo que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos.

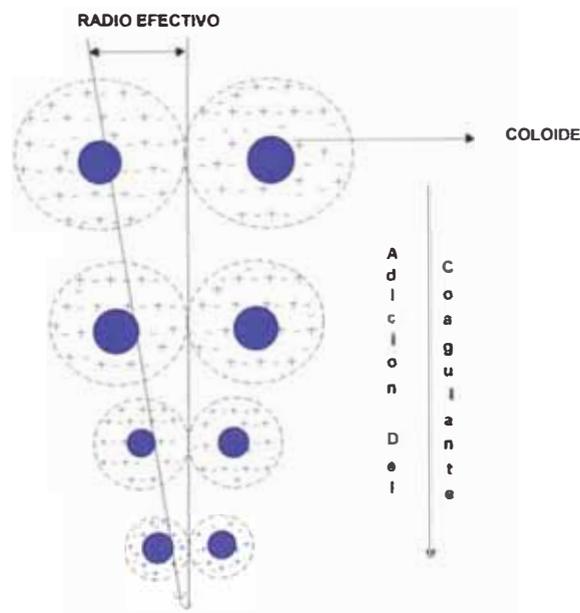


FIGURA N° 3.3: COAGULACIÓN.

La coagulación es el tratamiento más eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Es igualmente el método universal porque elimina una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas que son eliminados al menor costo, en comparación con otros métodos.

El proceso de coagulación mal realizado también puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua y representa gastos de operación no justificadas, por lo que se considera que la dosis del coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de decantación y que es imposible de realizar una clarificación, si la cantidad de coagulante esta mal ajustada.

### **3.3.3 MECANISMO DE LA COAGULACIÓN**

La desestabilización se puede obtener por los mecanismos físico-químicos siguientes:

Compresión de la doble capa.

Adsorción y neutralización de cargas.

Atrapamiento de partículas en un precipitado.

Adsorción y puente.

#### **3.3.3.1 COMPRESIÓN DE LA DOBLE CAPA.**

Cuando se aproximan dos partículas semejantes, sus capas difusas interactúan y generan una fuerza de repulsión, cuyo potencial de repulsión está en función de la distancia que los separa y cae rápidamente con el incremento de iones de carga opuesta a la de las partículas, esto se consigue solo con los iones del coagulante.

Existe por otro lado un potencial de atracción o fuerzas de atracción  $E_a$ , entre las partículas llamadas fuerzas de Van de Waals, que dependen de los átomos que constituyen las partículas y de la densidad de estos últimos. Contrariamente a las fuerzas de repulsión, las fuerzas de Van der Waals no son afectados por las características de la solución. Ver fig N° 3.2.

Si la distancia que separa a las partículas es superior a “L”, entonces las partículas, no se atraen. E es la energía que los mantiene separados.

### 3.3.3.2 ADSORCIÓN Y NEUTRALIZACIÓN DE LAS CARGAS.

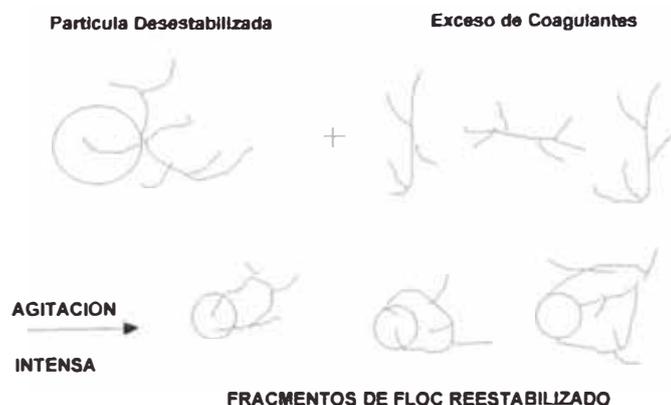
Las partículas coloidales poseen carga negativa en su superficie, estas cargas llamadas primarias atraen los iones positivos que se encuentran en solución dentro del agua y forman la primera capa adherida al coloide.

El potencial en la superficie del plano de cizallamiento es el potencial electrocinético – potencial ZETA, este potencial rige el desplazamiento de coloides y su interacción mutua.

Después de la teoría de la doble capa la coagulación es considerada como la anulación del potencial obtenido por la adición de productos de coagulación-floculación, en la que la fuerza natural de mezcla debido al movimiento browniano no es suficiente requiriéndose una energía complementaria necesaria, por ejemplo realizar la agitación mecánica o hidráulica.

Cuando se adiciona un exceso de coagulante al agua a tratar, se produce la reestabilización de la carga de la partícula; esto se puede explicar debido a que el exceso de coagulante son absorbidos en la superficie de la partícula, produciendo una carga invertida a la carga original. Ver fig. N° 3.4

FIGURAN° 3.4: REESTABILIZACIÓN DE PARTÍCULAS



### 3.3.3.3 ATRAPAMIENTO DE PARTÍCULAS DENTRO DE UN PRECIPITADO.

Las partículas coloidales desestabilizadas, se pueden atrapar dentro de un floc, cuando se adicionan una cantidad suficiente de coagulantes, habitualmente sales de metales trivalente como el sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$ , o cloruro férrico  $FeCl_3$ , el floc está formado de moléculas de  $Al(OH)_3$  o de  $Fe(OH)_3$ . La presencia de ciertos aniones y de las partículas coloidales acelera la formación del precipitado. Las partículas coloidales juegan el rol de anillo durante la formación del floc; este fenómeno puede tener una relación inversa entre la turbiedad y la cantidad de coagulante requerida. En otras palabras, una concentración importante de partículas en suspensión puede requerir menor cantidad de coagulante (ver fig N° 3.5).

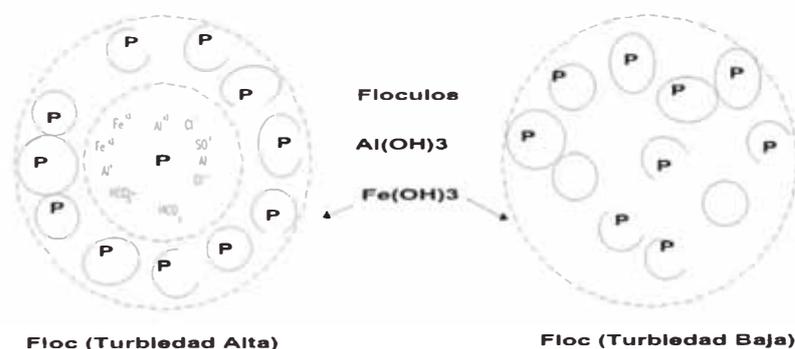


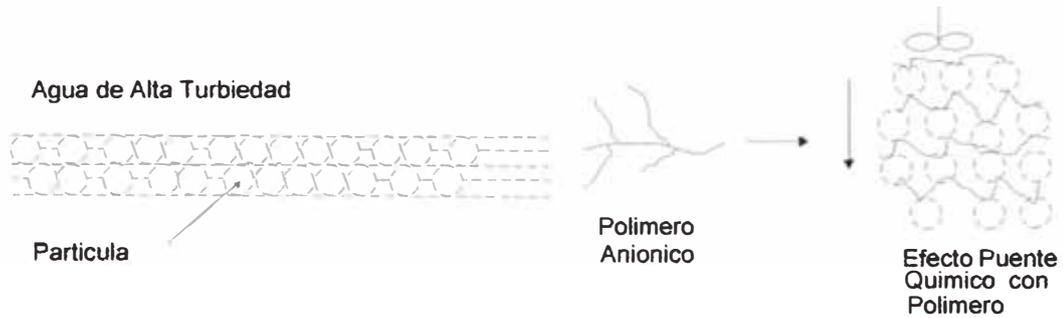
FIGURA N° 3.5: TRAPAMIENTO DE LAS PARTÍCULAS EN UN FLOC.

### 3.3.3.4 ADSORCIÓN Y PUENTE

En cualquier caso, se obtiene el tratamiento más económico utilizando un polímero aniónico, cuando las partículas están cargadas negativamente. Este fenómeno es explicado por la teoría del “puente químico”, que supone la molécula del polímero adherida a la superficie del coloide en uno o más sitios de adsorción, dejando libre, extendida en el agua el resto de la cadena, la cual puede pegarse de nuevo a otros coloides en sitios de adsorción vacantes, se

forma así un puente químico entre las partículas, que permite el incremento del tamaño de estas y promueve su eventual precipitación (Ver Fig. N° 3.6).

FIGURA N° 3.6: EFECTO DE PUENTE DE LAS PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN.



### 3.3.4 COAGULANTES UTILIZADOS USUALMENTE

Los coagulantes son productos químicos que al adicionar al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad del agua para formar un precipitado voluminoso, muy absorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando.

Los principales coagulantes utilizados para desestabilizar las partículas y producir el floc son:

Sulfato de Aluminio  $Al_2(SO_4)_3$

Cloruro Férrico  $FeCl_3$

Sulfato Ferroso  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$

Sulfato Férrico  $Fe_2(SO_4)_3$

Existen algunas sustancias naturales que usualmente se utiliza como ayudantes de coagulación o floculación, consideradas como las más efectivas y populares.

En el siguiente cuadro se muestran las más importantes.

**CUADRO N° 3.2 : PRINCIPALES SUSTANCIAS NATURALES  
COMO AYUDANTES DE COAGULACION Y FLOCULACION**

NOMBRE COMUN	PARTE DE DONDE SE EXTRAE	PARTE DE DONDE SE OBTIENE
Alginato de sodio	Algas pardas marinas (Phaeophyceae)	Todo la planta
Goma de tuna	Tuna o nopal (Opuntia ficus indica)	Hojas o pencas
Almidones solubles en agua fría (pregelatinizados)	Maíz, papa, yuca o mandioca, trigo	Grano o tuberculo
Goma de semillas de nirmali	Nirmali (Strychnos potatorum linn)	Semillas
Pulpa de algarrobo	Algarrobo (Ceratonia silicua)	Corteza del árbol
Gelatina común	Animales	Huesos y residuos de animales
Carboximetil celulosa	Arboles	Corteza del árbol
Goma de Guar	Arbusto de Guar (Cyanopsis psoraloides)	Semillas
Goma de "red sorrela"	"Red sorrela" (Hibiscus sabdariffa)	Semilla
Silice activada	Silicato de sodio	Activación con un ácido
Floccotan	Quebracho (Schinopsis lorentzii)	Corteza del árbol
Lentejas	Lens esculenta Egjanus indicus Phaseolus roxborghii	Semillas
Tamarindo	Arbol de fruto tropical	Semillas

### 3.3.5 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COAGULACIÓN.

Es necesario tener en cuenta los siguientes factores con la finalidad de optimizar el proceso de coagulación:

PH.

Sales disueltas.

Temperatura del agua.

Dosis de coagulante.

Mezcla.

Turbiedad.

Sistema de aplicación del coagulante.

La interrelación entre cada uno de ellos permiten predecir cuáles son las cantidades de los coagulantes a adicionar al agua.

#### 3.3.5.1 INFLUENCIA DEL PH

El pH es una medida de la concentración del ión hidrógeno en una solución, y es igual a:

$$\text{pH} = -\log [ \text{H}^+ ]$$

El pH es la variable más importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo para la cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua.

El rango de pH es función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar; si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante; por lo tanto la dosis requerida es alta.

Para las sales de aluminio generalmente el rango de pH para la coagulación es de 6.5 a 8.0 y para las sales de hierro, el rango de pH óptimo es de 5.5 a 8.5 unidades.

En el tratamiento del agua para modificar el pH se puede utilizar sustancias alcalinizantes o ácidos como por ejemplo:

- Hidróxido de Sodio, Na (OH)
- Hidróxido de Calcio, Ca(OH)<sub>2</sub>
- Acido Sulfúrico, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- Acido Clorhídrico, HCl

### **3.3.5.2 INFLUENCIA DE LAS SALES DISUELTAS.**

Las sales contenidas dentro del agua ejercen las influencias siguientes sobre la coagulación y floculación:

- Modificación del rango de pH óptimo.
- Modificación del tiempo requerido para la floculación.
- Modificación de la cantidad de coagulantes requeridos.
- Modificación de la cantidad residual del coagulante dentro del efluente.

### 3.3.5.3 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AGUA.

La temperatura influye en los distintos procesos de tratamiento, como en el caso de la coagulación química, filtración, desinfección, etc.

Con el descenso de la temperatura, la viscosidad del agua aumenta y con ello disminuye la sedimentabilidad de los flocs y la velocidad de reacción química.

Para evitar estos problemas, se acostumbra aumentar la dosis de coagulante para aumentar la probabilidad de choques, coagular lo más próximo al pH de floculación y adicionar auxiliares de floculación tales como arcillas y polielectrolitos.

### 3.3.5.4 INFLUENCIA DE LA DOSIS DEL COAGULANTE.

En general la dosis química requerida depende del mecanismo de desestabilización. En los casos de baja turbiedad, cuando se necesita un floc de hidróxido voluminoso, la dosis requerida tiende a disminuir a medida que la concentración de coloide aumenta. Cuando la desestabilización se realiza por medio de la adsorción la dosis requerida es generalmente mas baja y aumenta con la concentración de coloides (ver figura N° 3.7).

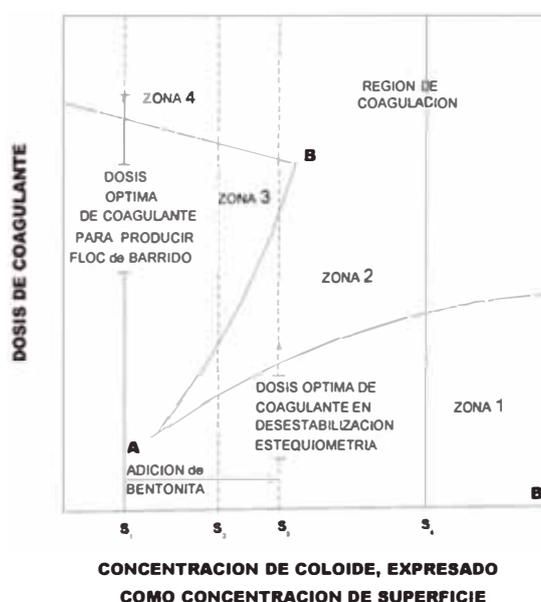


FIGURA N° 3.7: COAGULACION DE SALES DE FIERRO (III) A pH CONSTANTE

### **3.3.5.5 INFLUENCIA DE MEZCLA**

El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulante y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido bien hecho y que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente.

En el transcurso de la coagulación y floculación, se procede a la mezcla de productos químicos en dos etapas. En la primera etapa, la mezcla es enérgica y de corta duración llamado mezcla rápida; esta mezcla tiene por objeto dispersar la totalidad del coagulante dentro del volumen del agua a tratar, y en la segunda etapa la mezcla es lenta y tiene por objeto desarrollar los microflóculos.

Investigaciones realizadas han demostrado<sup>2</sup> que los parámetros de mezcla: gradiente de velocidad (G) y tiempo de retención (T), son importantes para optimizar el proceso cuando el mecanismo de coagulación predominante es el de adsorción; si el mecanismo de coagulación es el de barrido, los parámetros son indiferentes. Para la coagulación por barrido, es más importante las condiciones químicas para la rápida precipitación de los hidróxidos amorfos.

#### **Tipos de Mezcla.**

Las unidades para producir la mezcla pueden ser:

- |                          |   |
|--------------------------|---|
| Mezcladores Mecánicos:   | -Retromezcladores (agitadores)                                  |
| Mezcladores Hidráulicos: | -Resalto Hidráulico: Canaleta Parshall y Vertedero Rectangular. |
|                          | -En línea: Difusores (tuberías y canales) Inyectores, etc.      |

<sup>2</sup> Edwardas, G.A; Amirtharajah , A.

### **3.3.5.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MEZCLADORES HIDRÁULICOS Y MECÁNICOS.**

El gradiente de velocidad en un mezclador mecánico no varia con el caudal, tiene la ventaja adicional de controlar el grado de agitación, haciendo variar la velocidad de rotación del impulsor; sin embargo tiene la limitante de depender de la energía externa que una falla hace que el proceso de mezcla se perjudique.

Los mezcladores hidráulicos se caracterizan por presentar poca flexibilidad a las variaciones de caudal, no depende de una energía externa. Por lo general se utilizan como mezcladores rápidos las canaletas Parshall y vertederos.

### **3.3.5.7 INFLUENCIA DE LA TURBIEDAD.**

La turbiedad es una forma indirecta de medir la concentración de las partículas suspendidas en un liquido; mide el efecto de la dispersión que estas partículas presentan al paso de la luz; y es función del número, tamaño y forma de partículas.

La turbiedad del agua superficial es en gran parte debido a partículas de lodos de sílice de diámetros que varían entre 0.2 a 5 um. La coagulación de estas partículas es muy fácil de realizar cuando el pH se mantiene dentro del rango óptimo. La variación de la concentración de las partículas permiten hacer las siguientes predicciones:

Para cada turbiedad existe una cantidad de coagulante, con el que se obtiene la turbiedad residual más baja, que corresponde a la dosis óptima.

Cuando la turbiedad aumenta se debe adicionar la cantidad del coagulante, esta variación no es lineal, pero hay un incremento.

Cuando la turbiedad es elevada la cantidad de coagulante no es mucho debido a que la probabilidad de colisión entre las partículas es muy elevada; por lo que la coagulación se realiza con facilidad; por el contrario cuando la turbiedad es baja la coagulación se realiza muy difícilmente, y la cantidad del coagulante es igual o mayor que si la turbiedad fuese alta.

Cuando la turbiedad es muy alta, conviene realizar una presedimentación natural o forzada, en este caso se puede usar un polímero aniónico.

Es siempre más difícil coagular las aguas de baja turbiedad y aquellas contaminadas por desagües domésticos industriales, por que requieren mayor cantidad de coagulante que los no contaminados.

#### **3.3.5.8 SISTEMA DE APLICACIÓN DEL COAGULANTE**

Se considera que una reacción adecuada del coagulante con el agua se produce cuando:

La dosis del coagulante que se adicione al agua es en forma constante y uniforme en la unidad de mezcla rápida, tal que el coagulante sea completamente dispersado y mezclado con el agua.

El sistema de dosificación debe proporcionar un caudal constante y fácilmente regulable; en la fig. N° 3.8 se observa las condiciones de mezcla del coagulante con el agua; además la mejor mezcla es cuando el coagulante adicionado cae en su totalidad a la masa de agua. Esta condición se obtiene por medio de los equipos de dosificación tanto para los coagulantes al estado sólido y al estado líquido, que deben encontrarse calibrados y comprobados en la práctica por medio de las pruebas de aforamiento.

**FIGURA N° 3.8: CONDICIONES DE MEZCLA**



### **3.3.6 COAGULACIÓN DEL COLOR.**

En general el color de un agua es debido a la descomposición de la materia orgánica que contienen los humos de los suelos; esto depende de una gran variedad de compuestos orgánicos como las sustancias húmicas que son de masa molecular variada de 800 a 50,000 gr/mol.

### **3.3.7 ETAPAS O FASES DE LA COAGULACIÓN.**

El proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo muy corto (casi instantáneo), en el que se presentan las siguientes etapas, figura N° 3.9

**1era Fase:** Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas existentes en la suspensión.

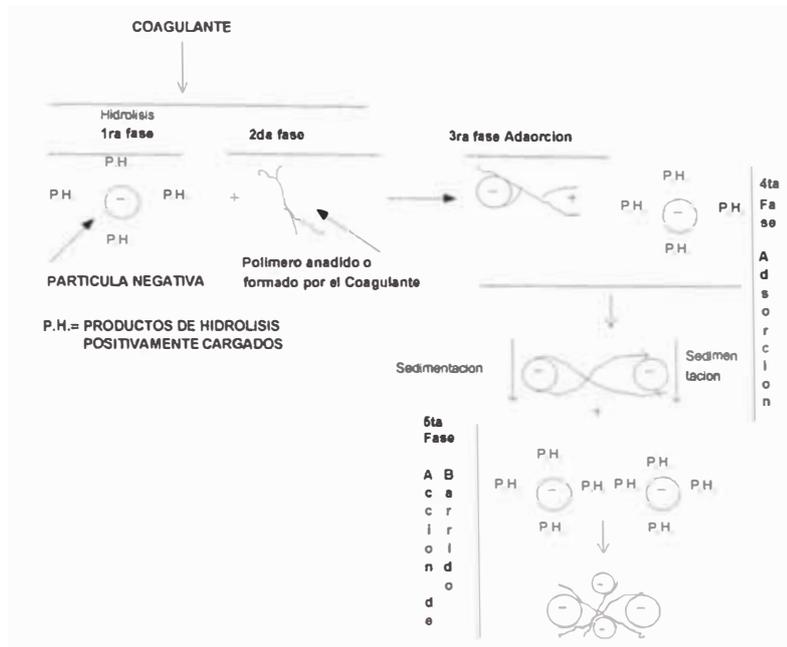
**2do Fase :** Precipitación y formación de compuestos químicos poliméricos.

**3era Fase:** Adsorción de cadenas poliméricas en la superficie de los coloides.

**4ta Fase :** Adsorción mutua entre coloides.

**5ta Fase :** Acción de barrido.

FIGURA N° 3.9: FASES DE LA COAGULACIÓN.



### 3.3.8 TIPOS DE COAGULACIÓN.

Se presentan dos tipos básicos de coagulación: por Adsorción y por Barrido.

- Coagulación por Adsorción.-** Se presenta cuando el agua tiene una alta concentración de partículas en estado coloidal; cuando el coagulante es adicionado al agua turbia en condiciones especiales de dosis de coagulante y pH, se forman una serie de especies hidrolizadas. (en caso del Sulfato de Aluminio  $Al^{+3}$ ,  $Al(OH)^{+2}$ ,  $Al(OH)_6$ )

Estas especies hidrolizadas se adhieren o forman complejos superficiales con los grupos SILANOL ( $\equiv SOH$ ) y el coloide y lo desestabilizan, permitiendo la formación de flóculos. Ver fig. N° 3.10.

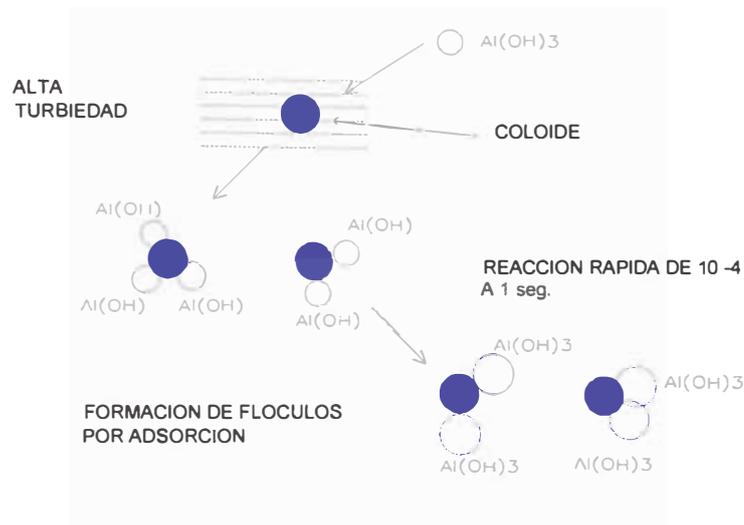


FIGURA N° 3.10: COAGULACIÓN POR ADSORCIÓN.

- b. **Coagulación por Barrido.**- Este tipo de coagulación se presenta cuando el agua es clara (baja turbiedad) y la cantidad de partículas coloidales es pequeña; en este caso las partículas son atrapadas al producirse una sobresaturación de precipitación de Hidróxido de Aluminio o Hidróxido Férrico. Ver fig. N° 3.11.

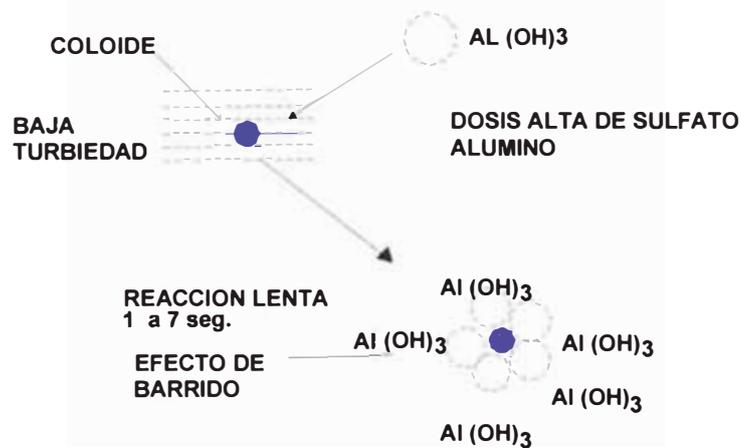


FIGURA N° 3.11: COAGULACIÓN POR BARRIDO.

### 3.3.9 CLASIFICACIÓN DEL AGUA SEGÚN SU COMPORTAMIENTO EN LA COAGULACIÓN

TIPO DE AGUA	TIPO DE COAGULACIÓN.	REQUERIMIENTO.
1 Baja Concentración de Coloides, Baja Alcalinidad	Formación de precipitado. Floc de barrido	Alta dosis de coagulantes. Adición de alcalinidad y/o partículas.
2 Baja Concentración de Coloides, Alta Alcalinidad	Formación de precipitado Floc de Barrido	Alta dosis de coagulantes Adición de partículas
3 Alta Concentración de Coloides, Baja Alcalinidad	Adsorción de polimeros metálicos positivos, en la superficie de los coloides.	Dosis de coagulante incrementa con concentración de partículas, adición de alcalinidad.
4 Alta Concentración de Coloide, Alta Alcalinidad	Adsorción de polimeros, metálicos positivos y precipitación de hidróxidos	Dosis de coagulante incrementa con concentración de partículas.

### 3.3.10 REMOCIÓN DE TURBIEDAD

La aplicación de una dosis creciente del coagulante al agua presenta diferentes zonas de coagulación, como se puede observar en la figura N° 3.12:

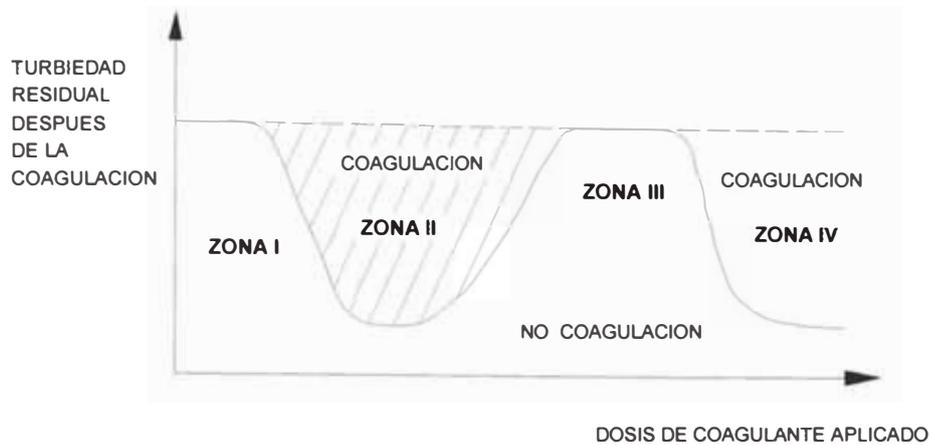
**Zona 1.** - La dosis de coagulante no es suficiente para desestabilizar las partículas y por lo tanto no se produce coagulación.

**Zona 2.** - Al incrementar la dosis de coagulantes, se produce una rápida aglutinación de los coloides.

**Zona 3.** - Si se continua incrementando la dosis, llega un momento en que no se produce una buena coagulación, ya que los coloides se reestabilizan.

**Zona 4.** - Al aumentar aun más la dosis, hasta producir una supersaturación se produce de nuevo una rápida precipitación de los coagulantes que hace un efecto de barrido, arrastrando en su descenso las partículas que conforman la turbiedad.

FIG. N° 3.12: ZONAS DE COAGULACIÓN



### 3.4 FLOCULACION

#### 3.4.1 OBJETIVO DE LA FLOCULACIÓN

En la segunda etapa de la coagulación que corresponde a una mezcla lenta tiene por objeto permitir los contactos entre los flóculos, la mezcla debe ser lo suficiente para crear diferencias de velocidad del agua dentro de la unidad pero no muy grande, ya que los flóculos corren riesgo de romperse; aún si el tiempo es no mas del tiempo óptimo de floculación.

#### 3.4.2 DEFINICIÓN

La floculación es el proceso que sigue a la mezcla rápida (Ira. etapa de la coagulación), que consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad.

Estos flóculos inicialmente pequeños, crean al juntarse aglomerados mayores que son capaces de sedimentar.

Puede que el flóculo formado por la aglomeración de varios coloides no sea lo suficientemente grande como para sedimentar con la rapidez deseada, entonces es necesario el empleo de un floculante, que reúne a partículas floculadas en una red, formando puentes de una superficie a otra y enlazando las partículas individuales en aglomerados.

La floculación es favorecida por el mezclado lento que permite juntar poco a poco los flóculos; un mezclado demasiado intenso los rompe y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptima. La floculación no solo incrementa el tamaño de las partículas, sino que también aumenta su peso.

La floculación puede ser mejorada con la adición de un reactivo de floculación o ayudante de floculación.

### **3.4.3 TIPOS DE FLOCULACIÓN.**

Hay dos tipos de floculación:

#### **3.4.3.1 FLOCULACIÓN PERICINETICA**

Esta producida por el movimiento natural de las moléculas del agua y esta inducida por la energía térmica, este movimiento es conocido como el movimiento browniano.

#### **3.4.3.2 FLOCULACIÓN ORTOCINETICA**

Se basa en las colisiones de las partículas debidas al movimiento del agua, el que es inducido por una energía exterior a la masa de agua y que puede ser de origen mecánico o hidráulico.

Después que el agua es coagulada es necesario que se produzca la aglomeración de los microflóculos; para que esto suceda se produce primero la floculación pericinetica luego se produce la floculación ortocinética.

#### **3.4.4 PARÁMETROS DE LA FLOCULACIÓN**

Los parámetros que caracterizan la floculación son los siguientes:

Floculación Ortocinética (Se da por el grado de agitación proporcionada: Mecánica o Hidráulica).

Gradiente de Velocidad (Energía necesaria para producir la mezcla).

Número de colisiones (Choques entre microfloculos).

Tiempo de retención (Tiempo que permanece el agua en la unidad de floculación).

Densidad y tamaño de floc.

Volumen de lodos (Los floculos formados no deben sedimentar en las unidades de floculación).

#### **3.4.5 FLOCULANTES**

Los floculantes son polímeros o polielectrolitos con pesos moleculares muy elevados moléculas orgánica solubles en agua formadas por bloques denominados monómeros, repetidos en cadenas larga.

Estos floculantes pueden ser de naturaleza: mineral, orgánico natural y orgánico de síntesis.

a. **Floculantes Minerales.**- Se encuentra la sílice activada, que es el primer floculante empleado, que debe ser preparado antes de emplear, su preparación es tan delicada y presenta el riesgo de la gelatinización; produce la neutralización parcial de la alcalinidad de silicato de sodio en solución.

b. **Floculantes Orgánicos Naturales.**- Son polímeros naturales extraídos de sustancias animales o vegetales:

Los alginatos, cuya estructura polimerica son:

- Los ácidos manuránico y.

Los ácidos glucónico

#### **3.4.4 PARÁMETROS DE LA FLOCULACIÓN**

Los parámetros que caracterizan la floculación son los siguientes:

Floculación Ortocinética (Se da por el grado de agitación proporcionada: Mecánica o Hidráulica).

Gradiente de Velocidad (Energía necesaria para producir la mezcla).

Número de colisiones (Choques entre microfloculos).

Tiempo de retención (Tiempo que permanece el agua en la unidad de floculación).

Densidad y tamaño de floc.

Volumen de lodos (Los floculos formados no deben sedimentar en las unidades de floculación).

#### **3.4.5 FLOCULANTES**

Los floculantes son polímeros o polielectrolitos con pesos moleculares muy elevados moléculas orgánica solubles en agua formadas por bloques denominados monómeros, repetidos en cadenas larga.

Estos floculantes pueden ser de naturaleza: mineral, orgánico natural y orgánico de síntesis.

a. **Floculantes Minerales.**- Se encuentra la sílice activada, que es el primer floculante empleado, que debe ser preparado antes de emplear, su preparación es tan delicada y presenta el riesgo de la gelatinización; produce la neutralización parcial de la alcalinidad de silicato de sodio en solución.

b. **Floculantes Orgánicos Naturales.**- Son polímeros naturales extraídos de sustancias animales o vegetales:

Los alginatos, cuya estructura polimerica son:

Los ácidos manuránico y.

Los ácidos glucónico

- c. **Floculantes Orgánicos de Síntesis.**- Son los mas utilizados y son macromoléculas de una gran cadena, obtenidos por asociación de monómeros sintéticos con masa molecular elevada de  $10^6$  a  $10^7$  gr./mol, estos se clasifican de acuerdo a la ionicidad de los polímeros:

Aniónicos (Generalmente copolímeros de la acrilamida y del ácido acrílico).

Neutros o no iónicos (Policrilamidas).

Catiónicos (Copolímero de acrilamidas más un monómero catiónico).

## **CAPITULO IV**

### **CONSIDERACIONES GENERALES EN LA EJECUCION DEL ESTUDIO**

## **IV. CONSIDERACIONES GENERALES EN LA EJECUCION DEL ESTUDIO**

Para la elaboración del presente proyecto de investigación se ha considerado los siguientes criterios:

### **4.1 EVALUACION BIBLIOGRAFICA DE LAS CARACTERISTICAS DEL AGUA TERMAL**

Se realizó una búsqueda bibliográfica de las características físico-química de las Aguas Termales del Perú, luego de la correspondiente evaluación se determinó que la más favorable para ser utilizado en el tratamiento del agua es la fuente de Agua Termal ubicado en la localidad de Churín por presentar en su composición química iones y sales que favorecen al proceso de coagulación del agua.

### **4.2 COMPOSICION QUIMICA Y CARACTERISTICAS DEL AGUA TERMAL**

Conociendo la composición físico- química del Agua Termal de la zona de estudio, se realizó nuevamente los análisis y se determinó el contenido de cationes y aniones permitiendo establecer la composición salina probable.

#### **4.2.1. CONTENIDO DE IONES EN SOLUCIÓN:**

##### **CATIONES :**

Na <sup>+</sup> .....	280.00	mg/litro
Ca <sup>++</sup> .....	170.00	mg/litro
Mg <sup>++</sup> .....	55.00	mg/litro
K <sup>+</sup> .....	40.00	mg/litro
Fe <sup>+++</sup> .....	10.00	mg/litro
Li <sup>+</sup> .....	3.40	mg/litro
Mn <sup>++</sup> .....	1.30	mg/litro
Al <sup>+++</sup> .....	1.77	mg/litro
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> .....	0.00	mg/litro

**ANIONES :**

SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> .....	1137.88	mg/litro
Cl <sup>-</sup> .....	354.00	mg/litro
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	320.25	mg/litro
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	12.80	mg/litro
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> .....	0.33	mg/litro
PO <sub>4</sub> <sup>+3</sup> .....	0.00	mg/litro
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> .....	0.00	mg/litro

**4.2.2. COMPOSICION SALINA PROBABLE**

Esta composición salina se determinó por medio de relaciones estequiométricas, tomando como base el contenido de cationes y aniones presentes en la solución.

El Agua Termal en estudio presenta alto contenido de sulfato de sodio, clasificándolo como Agua Termal sulfatada sódica. El contenido de este compuesto es consecuencia principalmente del lavado de depósitos salinos y a la oxidación de la pirita; cuya concentración se incrementa durante el recorrido por terrenos sedimentarios.

SO <sub>4</sub> Na <sub>2</sub> .....	1638.110	mg/litro
ClNa.....	583.476	mg/litro
(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> Ca .....	425.250	mg/litro
SO <sub>4</sub> Ca .....	288.698	mg/litro
SO <sub>4</sub> Mg .....	269.387	mg/litro
ClK.....	76.265	mg/litro
SO <sub>4</sub> Fe.....	18.730	mg/litro
NO <sub>3</sub> Na.....	17.540	mg/litro
<sup>-</sup> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> .....	11.240	mg/litro
NO <sub>2</sub> Na.....	0.496	mg/litro

#### 4.2.3. CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICA DEL AGUA TERMAL:

Los resultados del análisis del Agua Termal muestran lo siguiente:

Temperatura del agua 49 °C.

El pH = 6.0 muestra un agua ligeramente ácida.

Estas aguas no presentan olor, pero si tienen sabor metálico y generalmente presentan depósitos ferrosos alrededor de la fuente. Además, la vegetación (algas) es muy escasa en el punto de afloramiento.

En cuanto a su conductividad es un agua altamente mineralizada. La conductividad da una idea aproximada del contenido mineral en el agua.

El Agua Termal presenta una acidez total de 112 mg/lit de CaCO<sub>3</sub> esta puede deberse a la presencia de CO<sub>2</sub> no combinados principalmente, sales de Aluminio y Hierro que pertenecen al grupo de sales de ácidos fuertes y bases débiles.

En cuanto a la dureza total, el Agua Termal clasifica como muy dura debido a que el contenido de dureza total es mayor de 300 mg/lit como CaCO<sub>3</sub>.

El Agua Termal tiene una alcalinidad de 321 mg/lit de CaCO<sub>3</sub>, esta alcalinidad es debido solamente a los bicarbonatos

pH .....	6.0
Turbidez .....	12.5 UNT
Temperatura .....	49 °C
Color .....	< 5 U.C.
Olor .....	Inodoro
Sabor .....	Metálico
Aspecto .....	Efervescente Rojizo
Depósitos .....	Ferrosos en abundancia
Gases .....	Contiene
Vegetación .....	Muy escasa
Dióxido de carbono.....	51.2 mg/lit
Conductividad .....	2,590 μs

Sólidos Totales .....	2,360 mg/lt
Sólidos Disueltos .....	2,356 mg/lt
Sólidos Suspendidos .....	4.00 mg/lt
Dureza Total .....	720.00 mg/lt
Dureza Cálcica .....	320.00 mg/lt
Dureza Magnésica .....	400.00 mg/lt
Dureza Carbonática .....	321.00 mg/lt
Dureza no Carbonática .....	235.69 mg/lt
Acidez Total.....	112.00 mg/lt
Alcalinidad.....	321.00 mg/lt

### 4.3 QUIMICA DE LA COAGULACION CON LAS SUSTANCIAS PRESENTES EN EL AGUA TERMAL

Las principales sustancias con propiedades coagulantes presentes en el Agua Termal utilizadas para la clarificación de las aguas son: Sulfato de Aluminio, Sulfato Ferroso, cationes trivalentes de Aluminio ( $Al^{+++}$ ) y Hierro ( $Fe^{+++}$ ), catión bivalente de Calcio ( $Ca^{++}$ ) y catión monovalente de Sodio ( $Na^{+}$ ).

Para realizar la coagulación es necesario que se forme hidróxidos de metales trivalentes de Aluminio o de Hierro:  $Al(OH)_3$ ,  $Fe(OH)_3$  a partir de las sales, los mismos que permitirán la desestabilización de las partículas coloidales presentes.

Las reacciones que harán posible la formación de hidróxidos son:

#### **Reacción del Sulfato de Aluminio**

El Sulfato de Aluminio presente en el Agua Termal actuará como coagulante en el tratamiento del agua, reaccionando con la alcalinidad natural para formar una precipitación gelatinosa.

La reacción se llevará a cabo de la siguiente forma:



### Reacción del Sulfato Ferroso

El Sulfato Ferroso presente en el Agua Termal reaccionará con la alcalinidad alta presente en el agua cruda y el rango de pH óptimo para que la coagulación se lleve a cabo rápidamente y eficazmente deberá ser igual a 8.

La reacción se llevará a cabo de la siguiente forma:



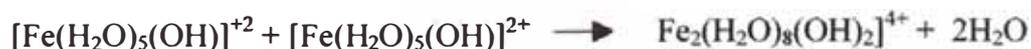
### Reacción de los Iones de $\text{Fe}^{+++}$

El Hierro (III) presente en el Agua Termal en solución acuosa está hidrolizado  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+++}$  y al ser agregado al agua reacciona, primero con la alcalinidad ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) y luego con la molécula del agua.

Reacción con la alcalinidad:



El  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^{++}$ , se hidroliza formando sucesivamente  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2]^+$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3$ . La reacción de estos productos monoméricos entre si, crea productos poliméricos:



Esta reacción continua con el tiempo, hasta llegar como producto final, a un hidróxido de hierro neutro  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  o negativo  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ .

*Reacciones con el agua:*

Al igual que en la reacción con la alcalinidad el  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^{++}$  se hidroliza hasta formar hidróxidos neutros o negativos y se polimeriza.

El descenso del pH cuando no hay alcalinidad, es también más pronunciado debido a formación de ácidos fuertes ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) que cuando esta se halla presente (formación de ácidos débiles).



### Reacción de los Iones de $\text{Al}^{+++}$

Los cationes metálicos de aluminio presentes en el Agua Termal no pueden permanecer puros porque están rodeados de moléculas de agua. Por lo tanto, el ión de  $\text{Al}^{+++}$  no existe en solución acuosa.

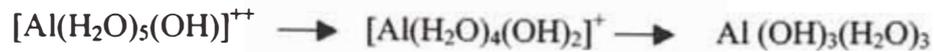
Los iones de aluminio hidratados  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+++}$  actúan como un ácido y reaccionan, por tanto con las bases que se encuentran en el agua así:

### *Reacción con la alcalinidad*

Las reacciones de los iones de aluminio hidratado con la alcalinidad presente en el agua cruda, desde el punto de vista de la teoría de ácidos y bases, ocurren con más facilidad que las reacciones con el  $\text{H}_2\text{O}$ .

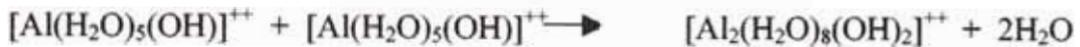


El  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})]^{++}$  es un compuesto inestable y transitorio que se hidroliza rápidamente, reemplazando un  $\text{H}_2\text{O}$  por un  $(\text{OH})^-$  Así:



El producto final es un hidróxido de aluminio insoluble que precipita a ciertos pH y que puede no tener carga o tenerla negativa  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ .

Las especies monoméricas, esto es, que contienen un solo ión de aluminio se polimerizan reaccionando entre si:



Estas reacciones de polimerización continúan con el tiempo, formando compuestos tales como:  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}$ ,  $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}$  y, finalmente  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})$  ó  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$  según el pH.

Tanto los iones de aluminio hidratados como los compuestos poliméricos pueden ser adsorbidos rápidamente por las partículas del agua, produciendo su desestabilización. Los hidróxidos de aluminio son, en cambio, menos efectivos como coagulante.

#### *Reacción con el Agua*

Cuando la alcalinidad se consume (si se consume), el ión de aluminio hidratado reacciona con el agua, que es una base débil:



Como en el caso anterior el  $[\text{Al}(\text{OH})_5(\text{OH})]^{++}$  es considerado como un compuesto transitorio, que se hidroliza para producir hidróxido de aluminio, y que se combina para producir compuestos poliméricos hasta llegar al  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3$  neutro o  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$  negativo.

***Reacción de los iones de  $Ca^{++}$  y  $Na^+$ :***

Considerando la ley de Schulze – Hardy, que dice: “La desestabilización de un coloide es efectuada por aquel ión del electrolito añadido, que tenga una carga opuesta en signo a la de las partículas coloidales y el efecto de dicho ión se incrementa tanto más cuanto mayor sea el número de cargas que posea”

De acuerdo con esta ley se ha comprobado por experiencias anteriores que el ión bivalente de  $Ca^{++}$  es de 30 a 60 veces más efectivo que el ión monovalente de  $Na^+$ .

Por lo tanto los cationes de  $Ca^{++}$  y  $Na^+$  presentes en el Agua Termal contribuirán en la coagulación del agua.

#### **4.4 MODO DE ACCION DE LAS AGUAS TERMALES COMO COAGULANTE**

Los iones de hierro y aluminio presentes en el Agua Termal actúan como coagulantes metálicos trivalentes en el proceso de clarificación del agua.

Los iones de calcio y sodio, bivalente y monovalente respectivamente, permiten la desestabilización de los coloides pero en menor grado.

Asimismo, las pequeñas cantidades de sales de aluminio y hierro también favorecen el proceso de coagulación.

El Agua Termal usado como coagulante será eficiente para determinadas condiciones del agua cruda, en general para aguas de baja turbiedad, es decir menores e iguales a 50 UNT, alcalinidad alta y pH 8.

#### **4.5 PRODUCCION DE LA FUENTE DE AGUA TERMAL**

La carencia de registros hidrogeológicos nos obliga a realizar una investigación sobre la producción de la fuente, lo ideal sería que el aforo se realizará en temporada crítica de rendimiento que corresponde a los meses de estiaje y lluvias, con la finalidad de conocer los caudales mínimos y máximos.

Para determinar el caudal de producción de la fuente de Agua Termal de los Baños de Fierro de Churín, se realizó el aforo en el canal que abastece a los baños termales y en la tubería de rebose de la captación, este aforo se realizó en los meses de Abril y Junio. Para establecer el caudal de producción de la fuente se ha empleado el método volumétrico y de velocidad - área.

Aforo en el canal

Para realizar el aforo se empleó el método velocidad - área, en el cual se mide la velocidad superficial del agua que discurre del manantial, tomando el tiempo que demora un objeto flotante de trasladarse de un punto a otro en una sección uniforme, habiéndose previamente definido la distancia entre ambos puntos.

$$Q = A * V \quad (\text{m}^3/\text{seg}) \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

A: Area mojada (m<sup>2</sup>)

V: Velocidad promedio (m/sg)

Determinación del área mojada ( A )

$$A = \text{Base} * \text{Altura} \dots\dots\dots (2)$$

Reemplazando los siguientes datos en (2) se tiene como área mojada 0.048 m<sup>2</sup>

Base = 0.28 mts.

Altura = 0.17 mts

Determinación de la Velocidad Promedio (V)

$$V = 0.85 V_s \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

Vs: Velocidad Superficial

Cálculo de la Velocidad Superficial:

$$V_s = e(m)/t(\text{sg}) \dots\dots\dots (4)$$

Al recorrer una distancia de 1.95 mts, el tiempo promedio considerado es de 13.72 segundos, obteniéndose una velocidad superficial de 0.1421 m/s. Al reemplazar este valor en (3), se obtiene como velocidad promedio 0.121 m/s.

Por lo tanto, el caudal determinado en el canal es de 5.76 lt/seg .

**Aforo en la tubería de rebose**

El aforo en la tubería de rebose de la captación de la fuente, se determinó mediante el método volumétrico. Este método consiste en tomar el tiempo que demora en llenarse un recipiente de volumen conocido. Posteriormente se divide el volumen en litros entre el tiempo promedio en segundos, obteniéndose de esta forma un caudal de 2.77 lt/sg.

**AFORO: METODO VOLUMETRICO**

Datos

Centro Poblado : Churín – Lima

Nombre de la fuente : Baño de Fierro

<i>N° de Pruebas</i>	<i>Volumen (litros)</i>	<i>Tiempo (sg)</i>
1	20	6
2	20	7
3	20	7
4	20	7
5	20	8
6	20	8
<b>Total</b>	<b>---</b>	<b>43</b>

El tiempo promedio (t) = 43/6 = 7.2 seg., obteniéndose un caudal de (Q)=2.77 lt/sg.

Por lo tanto el caudal de producción de la fuente termal de Churín es de 8.53 l/sg.

#### 4.6 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA A TRATAR.

La realización de las corridas experimentales se efectuó con aguas simuladas del Río Churín, el cual presentó turbiedad que varia de 40 a 150 UNT en diferentes estaciones del año, presenta una alcalinidad de 91.02 mg/lt CaCO<sub>3</sub>, pH 8.00 y conductividad de 300 a 500 µs/cm.

#### 4.7 SIMULACION ARTIFICIAL DE LA CALIDAD DEL AGUA A TRATAR

En el laboratorio se preparó muestra de agua con turbiedad variable, el cual fue generado mediante la suspensión de caolín en agua potable ajustando su pH y alcalinidad con soluciones de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1M y NaOH 1M respectivamente. Se seleccionó el caolín debido a que pertenece al género de las arcillas de mayor pureza.

Black y Walters (1964) demostraron que las suspensiones de tres arcillas diferentes en agua desmineralizada elaborada con concentraciones casi iguales podían producir grados de turbiedad cinco veces más altos:

	Conc. (mg/lt)	Turbiedad
Monmorillonita	62.0	58
Tierra de Fuller	64.8	79
Caolinita*	74.0	294

La montmorillonita y la tierra de fuller son arcillas de bentonita y, por tanto se parecen la una a la otra. Además de producir grados más altos de turbiedad por unidad de peso, las suspensiones de caolinita también tuvieron una floculación menor que las suspensiones de arcilla de bentonita. Según Neis (1977), la estabilidad de las arcillas y de otros minerales en suspensión disminuye en la siguiente forma:

Cuarzo > Oxido de aluminio > Illita > Caolinita > Montmorillonita

\* la coalinita es una de las especies minerales que forman parte del grupo de los caolines, perteneciente al género de las arcillas.

A continuación se detalla las propiedades físico y químicas del Caolín.

**PROPIEDADES FISICAS DEL CAOLIN**

<i>CARACTERISTICAS FISICAS</i>	<i>UND</i>	<i>VALOR</i>
Gravedad específica		2.54
Humedad	%	0.26
Superficie específica (BLAINE) (ASTM C – 204)	cm <sup>2</sup> /g	15.20
Fineza HEGMAN N.S. ( AST D – 1210)		6.00
Granulometria: Menos Malla 400 ( 38um )	%	100.00
Densidad aparente ( MET: INGLES)	g/l	535.00
Absorción de aceite ( AST D – 281 )	%	30.00
Partida (SEDIGRAPH)	Um	18.00
Tamaño medio de partícula (SEDIGRAPH)	Um	3.90
Partículas submicrónicas (SEDIGRAPH)	%	18.00
Abrasividad Valley	Mg	35.00
Blancura- Photovolt	%	87.50

**PROPIEDADES QUIMICAS DEL CAOLIN**

<i>ANALISIS QUIMICO</i>	<i>( % )</i>
SiO <sub>2</sub>	43.90%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40.56%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06%
TiO <sub>2</sub>	0.60%
CaO	0.26%
MoO	0.00%
Perd. Calcin.	14.97%
No Analizado	0.26%
Total	100%
PH	6.5

## **CAPITULO V :**

### **ENSAYOS DE LABORATORIO**

## **V. ENSAYOS DE LABORATORIO**

Con el equipo de prueba de jarras (Fig. N° 5.1) se trata de reproducir las condiciones del proceso de coagulación-floculación y decantación que se produce en la planta de tratamiento de agua potable, aunque esto no es totalmente cierto por tratarse de un pequeño volumen con flujos discontinuos y de fácil control en cuanto a la dosificación y condiciones de agitación. No obstante, a estas diferencias, la prueba de jarras sigue siendo el mejor método que hasta ahora disponemos para la determinación de las diferentes variables.

### **5.1 PARAMETROS ESTUDIADOS**

Mediante los ensayos de prueba de jarras se determinó la efectividad de cada alternativa propuesta, para lo cual se estudió para una muestra de agua con turbiedad menor o igual a 50 UNT y alcalinidad alta la dosis óptima del coagulante, pH óptimo, concentración de los coagulantes, influencia de los parámetros de gradiente y tiempo de contacto de la mezcla rápida, mezcla lenta y tasa de decantación.

Se usó la turbiedad residual como parámetro básico para determinar la eficiencia de los procesos.

Para que los ensayos de prueba de jarras sea adecuadamente ejecutado y produzca resultados confiables, se consideró el control de las siguientes variables:

Dosificación de los coagulantes.

Acondicionamiento del pH del agua cruda

Alcalinidad del agua cruda.

- Duración e intensidad de la mezcla rápida.
- Duración e intensidad de la mezcla lenta.
- Tasa de decantación.

Equipo usado para los ensayos.

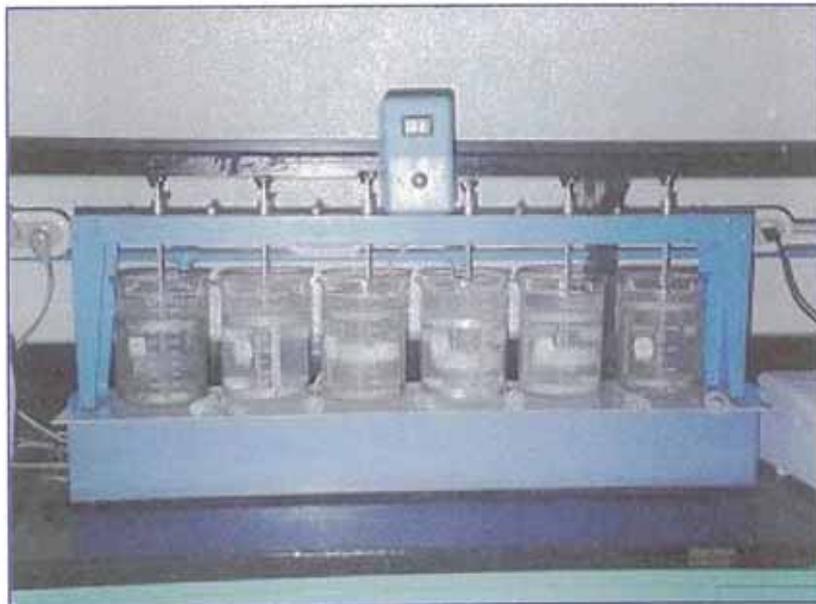
Análisis de laboratorio requeridos.

## **5.2 EQUIPOS Y REACTIVOS EMPLEADOS**

Los equipos y reactivos utilizados para la determinación de los parámetros óptimos de coagulación, floculación y decantación son los siguientes:

### **5.2.1. MATERIAL GENERAL**

- Agitador múltiple con seis paletas de velocidad variable de 0 a 300 RPM.
- Sistema de iluminación de flóculos localizado en la base del agitador.
- Deflectores metálicos fijos de tipo discontinuo.
- Vasos de precipitado de 2000 ml.
- Dosificador de soluciones (por medio de jeringas hipodérmicas).
- Sifones con tubo de vidrio y manguera de 4 mm de diámetro sostenidos por flotadores de tecknoport.
- Cronómetro para controlar el tiempo que demoran las diferentes operaciones que comprenden las pruebas.
- Vidriería: Pipetas de Mhor de 5 y 10 ml., seis frascos de vidrio de 120 ml., dos buretas con sus respectivos soportes, 10 vasitos de 50 ml y un termómetro adecuado



**FIG. N° 5.1: PRUEBA DE JARRAS**

### 5.2.2. APARATOS DE ANALISIS

**Turbidímetro HACH.-** La medición de la turbiedad del agua después de floculada y sedimentada durante un cierto tiempo (turbiedad residual) suele considerarse como el parámetro más importante para caracterizar el proceso. Puede realizarse con un turbidímetro de transmisión como el Hellige o con uno de diseminación como el Hach o el Fisher. Cuando se trata de evaluar pequeños valores de turbiedad es preferible el uso de turbidímetro de diseminación, por ser el más preciso y no depender del criterio del observador.

Para la medición de la turbiedad se utilizó el turbidímetro HACH 2100 A, que ofrece amplio rango, facilidad de calibración y flexibilidad de aplicación que requiere el trabajo de laboratorio, con estabilidad notable a niveles muy bajos de turbidez.



FIGURA N° 5.2 : APARATOS DE ANALISIS - TURBIDIMETRO

**Medidor de pH.-** La medición de pH antes y después de haberse efectuado los ensayos de laboratorio tienen importancia básica. Por tanto, debe disponer siempre de un sistema de medida de pH, ya sea por colorimetría o con electrodos. Este último es preferible porque es el único método que puede medir pequeñas variaciones.

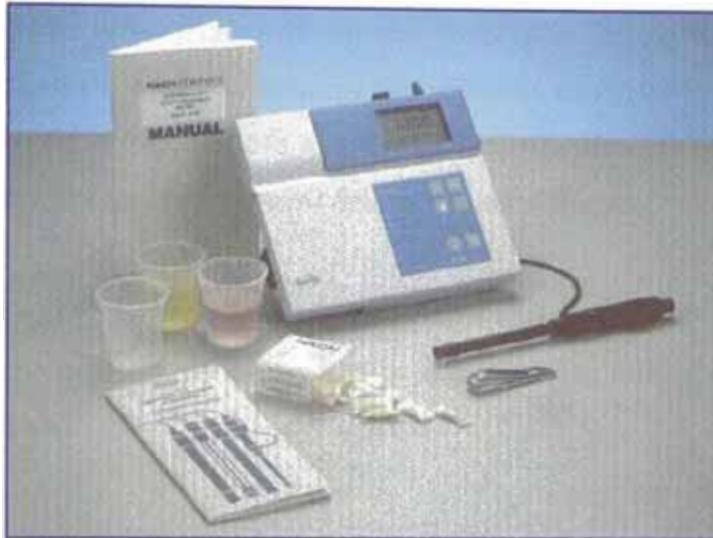


FIGURA N° 5.3: APARATO DE ANALISIS – MEDIDOR DE pH

### 5.2.3. REACTIVOS UTILIZADOS EN LOS ENSAYOS

- Los reactivos utilizados como coagulantes para el tratamiento del agua fueron:
  - ❖ Cloruro Férrico
  - ❖ Agua Termal
- Reactivos para medir Alcalinidad y Dureza total.
- Ácido Sulfúrico e Hidróxido de Sodio para acondicionar el pH del agua cruda.

### 5.3 DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA

Mediante una serie de ensayos de pruebas de jarras, se pretende encontrar la eficiencia del Agua Termal como coagulante para el tratamiento del agua, para lo cual fue necesario realizar el estudio para diferentes turbiedades, determinando

do así el rango de turbiedad para la cual se logra la mayor eficiencia con este nuevo coagulante.

Para el desarrollo del proceso de esta nueva técnica de tratamiento se ha considerado tres alternativas:

La primera alternativa se realizó empleando el Agua Termal como único coagulante, para lo cual se efectuó ensayos con muestras de agua con turbiedad menor e igual a 50 UNT y alcalinidad alta. Para esta alternativa se determinó los parámetros óptimos para cada proceso del tratamiento de agua.

La segunda alternativa de tratamiento plantea el uso del Cloruro Férrico (tratamiento convencional), para muestras de agua con una turbiedad de 50 UNT y alcalinidad alta.

La tercera alternativa consistió en realizar los ensayos utilizando simultáneamente el Cloruro Férrico y el Agua Termal, este último como ayudante de coagulación, para muestras de agua con características similares mencionada anteriormente.

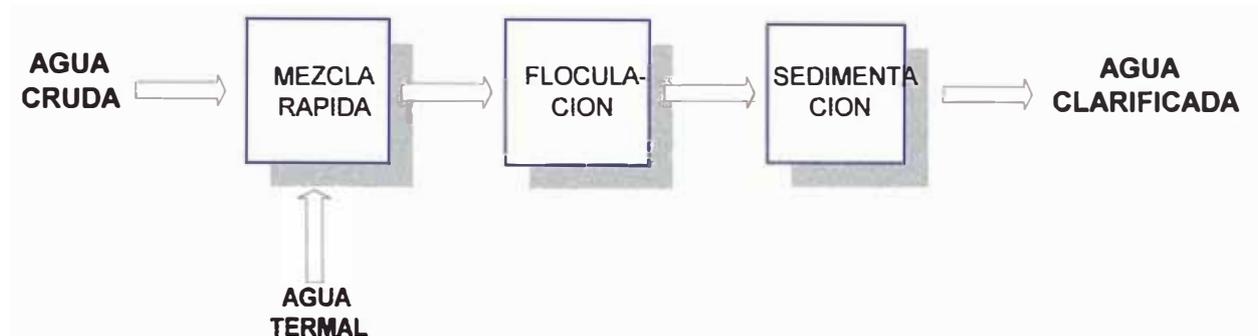
### **5.3.1. PRIMERA ALTERNATIVA**

En esta alternativa de tratamiento, el Agua Termal es el único material que se dosifica al agua para reducir la turbiedad presente en la muestra en estudio, para lo cual se considerará las características de la muestra de agua indicada líneas arriba.

Tal como se presenta en el esquema N° 5.1, el Agua Termal pasará por los procesos de mezcla rápida, mezcla lenta y decantación. Se realizaron los ensayos con el fin de caracterizar las siguientes variables:

- Dosis Optima.
- pH Optimo.

- Concentración Optima.
- Gradiente y Tiempo Optimo de Mezcla Rápida.
- Gradiente y Tiempo Optimo de Floculación.
- Tasa de Decantación.



ESQUEMA N° 5.1: PROCESO DE LA ALTERNATIVA CON EL AGUA TERMAL

### 5.3.2. SEGUNDA ALTERNATIVA

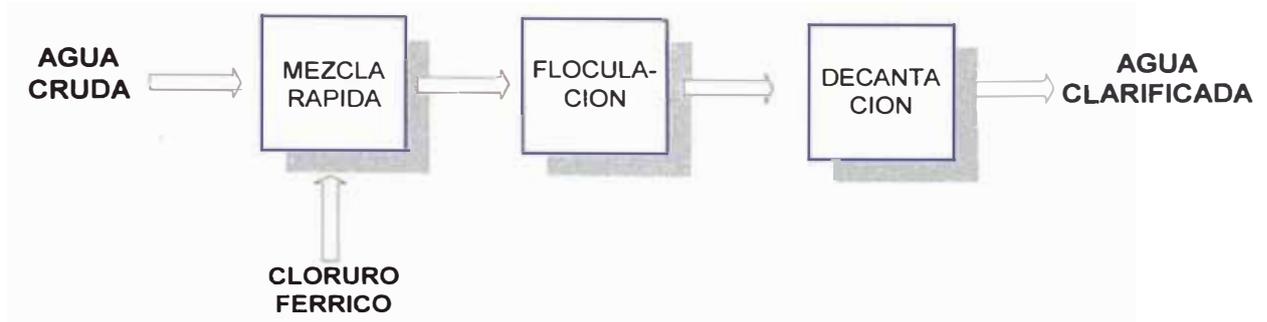
En esta alternativa se realiza los ensayos utilizando el coagulante Cloruro Férrico, para muestras de agua con turbiedad igual a 50 UNT y con alcalinidad alta.

Por medio de los ensayos se determina las variables siguientes:

- Dosis Optima.
- pH Optimo.
- Concentración Optima
- Gradiente y Tiempo Optimo de Mezcla Rápida.
- Gradiente y Tiempo Optimo de Floculación.
- Tasa de Decantación

El esquema siguiente muestra los pasos a seguir para la realización de ensayos de esta alternativa.





ESQUEMA N° 5.2: PROCESO DE LA ALTERNATIVA CON EL CLORURO FERRICO

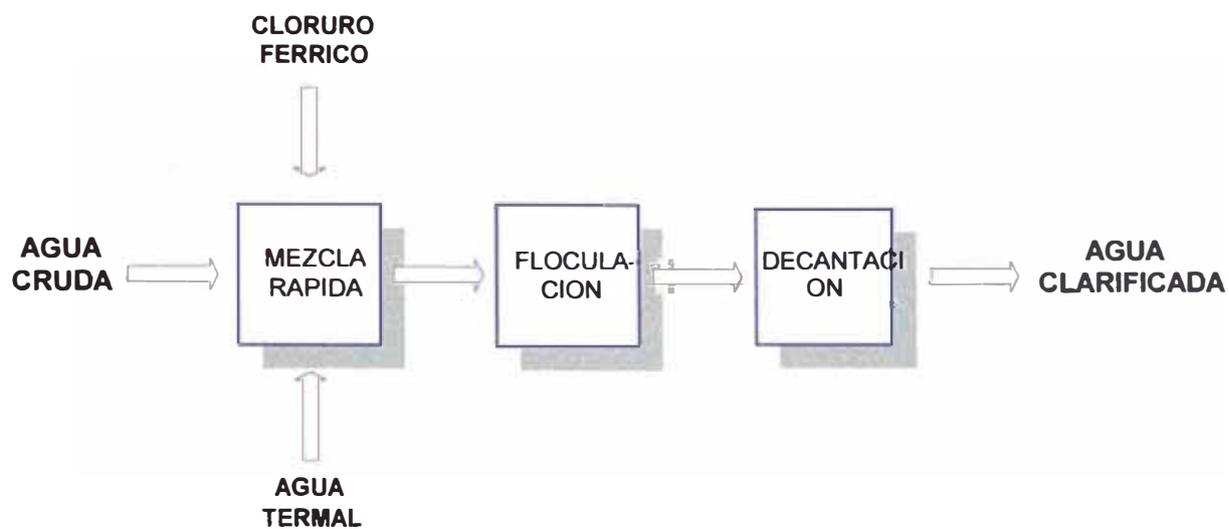
### 5.3.3. TERCERA ALTERNATIVA

Para esta alternativa de tratamiento se aplica el Cloruro Férrico y el Agua Termal en forma sucesiva a muestras de agua con características descrita anteriormente.

Al igual que las alternativas anteriores se realizaron los ensayos con la finalidad caracterizar las siguientes variables:

- Nueva Dosis Optima del Cloruro Férrico.
- Nueva Dosis Optima del Agua Termal.
- Gradiente y Tiempo Optimo de Floculación.
- Tasa de Decantación

El esquema siguiente muestra los pasos a seguir para la realización de ensayos de esta alternativa



**ESQUEMA N° 5.3: PROCESO DE LA ALTERNATIVA CLORURO FERRICO AYUDANTE DE COAGULACION**

## **CAPITULO VI**

# **PROCEDIMIENTOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO**

## **VI. PROCEDIMIENTOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO**

A continuación se detalla el procedimiento a seguir para efectuar los ensayos de laboratorio, utilizando para ello el Agua Termal como coagulante.

Los ensayos efectuados nos permite determinar los siguientes parámetros: dosis óptima, pH óptimo, concentración óptima, gradiente y tiempo óptimo de mezcla rápida, gradiente y tiempo óptimo de floculación y tasa de decantación

Inicialmente, como no se disponía de los parámetros óptimos de coagulación, floculación y decantación para el Agua Termal, fue necesario tomar valores referenciales para la determinación de estos parámetros.

Los ensayos se han realizado con muestras de agua cruda con turbiedad igual a 50 UNT y alcalinidad alta.

Los pasos realizados durante el procedimiento de ensayo de laboratorio, utilizando el Agua Termal deberán ser efectuados tanto para la alternativa de tratamiento con Cloruro Férrico y la alternativa que plantea al Agua Termal como ayudante de coagulación.

### **6.1 DOSIS OPTIMA DEL AGUA TERMAL**

- a. Determinar la turbiedad, pH, alcalinidad y dureza total del agua cruda.
- b. Por medio de una pipeta, colocar cantidades de Agua Termal que se van agregar en seis vasos de 50 ml. Succionar el contenido de cada vaso con una jeringa médica, provista de su aguja hipodérmica. Retire dicha aguja de la jeringa y esta última con su dosis completa, se coloca junto a la jarra correspondiente
- c. Hacer girar las paletas del equipo de prueba de jarras a 300 rpm ( $800s^{-1}$ ) e inyectar el contenido de cada jeringa en la jarra que le corresponde, cuidando que la solución penetre profundamente para que la dispersión sea más

rápida. De esta forma, se consigue simular la forma de aplicación correcta del coagulante.

- d. Realizada la mezcla rápida durante 5 segundos, disminuir la velocidad de rotación a 40 rpm ( $50 \text{ s}^{-1}$ ).
- e. Luego del período de floculación de 20 minutos, suspender la agitación y retirar las jarras. Colocar los sifones para la toma de muestra y dejar sedimentar por un período de 15 minutos.
- f. Después de descartar los primeros 10 ml, tome las muestras colectando un volumen de aproximadamente 30 ml. Proceda a efectuar la medición de la turbiedad de cada muestra. Si requiere mayor cantidad de muestra para análisis adicionales, tómelas posteriormente.
- g. Los resultados se gráfica en papel aritmético, seleccionándose como dosis óptima aquella que produce la menor turbiedad.
- h. Los diversos datos de dosis óptima para cada turbiedad de agua cruda se analizan, aplicando la teoría de los mínimos cuadrados.

## **6.2 PH OPTIMO DEL AGUA TERMAL**

- a. Determinar la turbiedad, pH, alcalinidad y dureza total del agua cruda.
- b. Determinar la cantidad de ácido y álcali, necesario para subir y bajar aproximadamente en una unidad el pH del agua cruda. Llenar una jarra de 2 litros con la muestra de agua a estudiar, determinar el pH y titular con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  o  $\text{NaOH}$ .
- c. Acondicionar el agua cruda a diferentes valores de pH (de 6 a 9), utilizar el ácido sulfúrico o hidróxido de sodio según el requerimiento.
- d. Colocar la muestra para las seis jarras en un solo recipiente y ajustar el pH en conjunto, agregando gota a gota el modificador y agitar con una varilla para homogeneizar. Debe esperarse un tiempo prudencial hasta que el pH se establezca y luego se determina el valor con el medidor de pH.
- e. Una vez ajustado el pH, se efectúa una prueba de dosis óptima según, lo indicado en el procedimiento anterior, determinándose la dosis que produce el efluente de mejor calidad, para el pH de trabajo.

- f. Se continúa en igual forma con los demás pH's del rango seleccionado, de tal modo que al final se tendrán las curvas de dosis óptima para cada valor de pH. La curva que presente el punto de mínima más bajo, es decir el mejor efluente, estará indicando el pH óptimo y la correspondiente dosis óptima.
- g. Se recomienda efectuar el estudio económico considerando el consumo de coagulante en caso de efectuar el tratamiento con el pH natural del agua vs. tratamiento con modificadores de pH, y dosis óptimas, generalmente menor, evaluando también si la reducción de turbiedad es significativa.

### **6.3 TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA DEL AGUA TERMAL (TMR)**

Para determinar el parámetro de tiempo óptimo de mezcla rápida, se ha trabajado a una de velocidad de mezcla rápida de 300 rpm ( $800s^{-1}$ ) variando el tiempo de mezcla rápida en el sistema (1, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 segundos).

- a. Acondicionar el agua cruda a pH óptimo determinado en el ensayo anterior.
- b. Hacer girar las paletas a 300 rpm ( $800s^{-1}$ ) e inyectar la dosis óptima del Agua Termal a cada uno de los vasos.
- c. Luego de transcurrir el primer segundo disminuir la velocidad a 40 rpm ( $50s^{-1}$ ) por un tiempo de 20 minutos.
- d. Una vez que se ha concluido con el tiempo de floculación apagar el equipo y dejar sedimentar por un tiempo de 15 minutos.
- e. Medir la turbiedad residual.
- f. Repetir los pasos anteriormente detallados para tiempos de mezcla rápida de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 segundos.
- h. Realizar la gráfica turbiedad residual vs. tiempo de mezcla rápida.

### **6.4 CONCENTRACION OPTIMA DEL AGUA TERMAL**

- a. Acondicionar el agua cruda al pH óptimo
- b. Luego agregar la dosis óptima del agua termal a diferentes concentraciones a cada uno de los vasos, dejar que se mezcle por 5 segundos.

- c. Seguidamente disminuir la velocidad de rotación a 40 rpm ( $50\text{s}^{-1}$ ).
- d. Hecha la mezcla rápida, proceda a flocular y sedimentar en la forma usual.
- e. Durante el proceso evalúe el tamaño del floculo (índice de willcomb).
- f. Tome el sobrenadante y determine la turbiedad residual.
- g. Gráfica turbiedad final vs. concentración del agua termal.

## **6.5 GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION**

La determinación de los parámetros de gradiente y tiempo óptimo de floculación se llevó a cabo trabajando con cinco gradientes de floculación 20, 40, 60, 80 y  $100\text{ s}^{-1}$  (20, 34, 45, 56, y 64 rpm respectivamente). Asimismo, se varió el tiempo de mezcla lenta para cada gradiente (5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos).

- a. Se toma la muestra de agua cruda y se determina la turbiedad inicial ( $T_0$ ).
- b. Acondicionar el agua cruda al pH óptimo.
- c. Verter la muestra de agua acondicionada en las jarras de 2,000 ml de capacidad.
- d. Hacer girar las paletas a la velocidad óptima de mezcla rápida e inyectar la dosis óptima de Agua Termal de acuerdo a lo determinado en el ensayo respectivo. Dejar que se mezcle por el tiempo óptimo de mezcla rápida.
- e. Al finalizar la mezcla rápida, se inicia el proceso de floculación para lo cual se disminuye la velocidad a 20 rpm ( $20\text{ s}^{-1}$ ) por un tiempo de 5 minutos. Transcurrido el tiempo detener las paletas y dejar sedimentar por 15 minutos.
- f. Repetir los pasos mencionados anteriormente variando las gradientes y los tiempos de floculación, de acuerdo a los intervalos seleccionados.
- g. Se determina la turbiedad residual ( $T_f$ ) para cada muestra y se calcula la eficiencia remocional  $T_f/T_0$  y se registra en el cuadro N 6.1.
- h. Realizar la gráfica en escala aritmética los valores de  $T_f/T_0$  vs. periodos de floculación para los diversos valores de gradiente de velocidad. De esta curva se selecciona el periodo total de floculación en base al punto que produce el menor valor de  $T_f/T_0$  (mayor eficiencia remocional).



## **6.6 PROCEDIMIENTO DE DECANTACION**

- a. Llenar seis vasos con el agua cruda a floccular. Encender el equipo y agregar la dosis óptimas realizar la mezcla rápida a  $800\text{s}^{-1}$  ( 300 rpm ) durante el tiempo óptimo de mezcla rápida.
- b. Concluido los segundos de mezcla rápida iniciar la floculación con los gradientes y tiempos de floculación preseleccionados.
- c. Terminada la floculación detener el equipo y colocar los flotadores para tomar las muestras, tratando de no producir ninguna perturbación en las suspensiones.
- d. Tomar muestras a 6 cm. de profundidad, para lo cual se fijarán a esta altura los tubos de succión de los flotadores.
- e. Tomar la muestra para la primera jarra al  $\frac{1}{2}$  minuto y a los 3.5 minutos, para la segunda jarra al minuto y a los 4 minutos, para la tercera jarra a  $1\frac{1}{2}$  y a los 5 minutos, para la cuarta jarra a los 2 y 8 minutos, para la quinta jarra a los  $2\frac{1}{2}$  y a los 10 minutos, para la sexta jarra a los 3 minutos y a los 12 minutos.
- f. Determinar la turbiedad residual ( $T_f$ ) de las muestras y llenar con los datos obtenidos el formato de decantación (cuadro N° 6.2).
- g. Después de un periodo de decantación de por lo menos media hora, tomar una de las jarras y trasegar suavemente el sobrenadante.
- h. Vaciar los lodos a una probeta y determinar la cantidad de mililitros de lodos producidos por litro de agua tratada. Este dato se utiliza para diseñar el volumen de la tolva del decantador.
- i. Calcular los valores de  $V_s = h/t$
- j. Graficar los valores de  $C_o = (T_f/T_o)$  en las ordenadas y los valores de “ $V_s$ ” en las abscisas obteniéndose la curva de sedimentación para el agua estudiada.
- k. En la columna (1) del cuadro N° 6.3 tomar cargas superficiales que varían de 10 en 10, o de 20 en 20 , y deducir los valores de “ $V_s$ ” en cm/s para cada carga, colocándolas en la columna (2).

- l. Con los valores de ‘Vs’ de la columna (2), ingresar a la curva de sedimentación y determinar los respectivos valores de:  $C_o = T_f/T_o$ , los cuales se colocan en la columna (3). Tomar también de la curva los valores de ‘Cf’ y ‘a’.
- m. Calcular: En la columna (5), el porcentaje total de remoción ( $R_t$ ), en la columna (6), la turbiedad removida ( $T_r$ ) y en la columna (7) la turbiedad final o remanente ( $T_f$ )

$$R_t = \left[ 1 - (C_o - C_f) \right] + \frac{(a + V_s)}{2 V_s} (C_o - C_f)$$

$$T_r = R_t \times T_o$$

$$T_f = T_o - T_r$$

- n. La carga superficial del decantador será aquella que corresponda al valor de turbiedad final ( $T_f$ ) deseado en el efluente de la unidad.



CUADRO N° 6.3

**SELECCIÓN DE LA TASA DE SEDIMENTACION**

Turbiedad \_\_\_\_\_       $a =$  \_\_\_\_\_       $C_f =$  \_\_\_\_\_

( 1 ) q m/d	( 2 ) Vs cm/s	( 3 ) Co	( 4 ) 1-( Co - Cf )	( 5 ) Rt	( 6 ) Tr	( 7 ) Tf
10	0.012					
20	0.023					
30	0.035					
32	0.037					
40	0.046					
50	0.058					
60	0.069					
80	0.093					
100	0.116					
120	0.139					
140	0.162					
180	0.208					

## **CAPITULO VII**

### **RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO**

## VII. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

En este capítulo se detalla los resultados obtenidos para cada alternativa de tratamiento planteada, los cuales se han ordenado de acuerdo a la secuencia de trabajo.

### 7.1 TRATAMIENTO CON EL AGUA TERMAL

#### 7.1.1. VARIACION DE TURBIEDADES

Con la finalidad de determinar el rango de acción del tratamiento con el Agua Termal, se efectuaron una serie de ensayos de pruebas de jarras para turbiedades comprendidas entre 15 y 120 UNT, dichos ensayos se muestran en los cuadros N° 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7 y 7.8.

Los diferentes ensayos realizados permitieron establecer que la dosis del Agua Termal se incrementa a medida que aumenta la turbiedad del agua cruda.

En el cuadro N° 7.1 y gráfica N° 7.1, se indican los resultados obtenidos al variar la dosis de Agua Termal y la turbiedad agua cruda.

**CUADRO N° 7.1: DOSIS OPTIMA DEL AGUA TERMAL REQUERIDA PARA CADA TIPO DE AGUA DE TURBIEDAD VARIABLE**

PARAMETROS	MUESTRA N°					
	1	2	3	4	6	7
Dosis Optima	16	17	18	19	24	44
Turb. Inicial	15,00	20,00	30,00	50,00	55,00	120,00
Turb. Final	9,80	13,80	22,80	37,30	43,40	96,50
Eficiencia	35%	31%	24%	25%	21%	20%



**GRAFICA N° 7.1 : DOSIS OPTIMA DEL AGUA TERMAL VS. TURBIEDAD**

Como se observa en el cuadro N° 7.1, las mejores eficiencias se obtienen para turbiedades menores o iguales a 50 UNT, por lo tanto este tipo de tratamiento es recomendable para aguas que presenten estas características. Para mayores valores no son aconsejables porque la eficiencia de remoción de la turbiedad disminuye.

### **7.1.2. CORRELACION DE LA CALIDAD DE AGUA CRUDA CON LAS DOSIS OPTIMAS DEL AGUA TERMAL**

La dosis óptima del Agua Termal fue aquella que logró la mayor adsorción de partículas coloidales. Valores menores a esta dosis fueron insuficientes ya que las especies hidrolizadas formadas no se adhieren a los coloides no pudiendo así desestabilizarlo.

Los diferentes ensayos realizados para muestras con turbiedad en el rango de 15 a 50 UNT y alcalinidad de 218 mg/lit, permitieron establecer que la dosis del Agua Termal se incrementa a medida que aumenta la turbiedad, tal como se aprecia en el cuadro N° 7.2

Con la finalidad de establecer la correlación de la calidad del agua en función con la dosis óptima del Agua Termal, se efectuó ensayos para diferentes turbiedades, obteniéndose los resultados que se indican en los cuadros N° 7.3, 7.4, 7.5 y 7.6. El resumen de dichos ensayos se muestra en el cuadro N° 7.2.

Aplicando a los puntos (1), (2), (3) y (4), la teoría de mínimos cuadrados para obtener las constantes “a” y “b” de la ecuación de una recta  $y = a + bx$

en la cual:

$y = \text{Log de turbiedad de agua}$

$x = \text{Dosis óptima de coagulante}$

Se determinaron los siguientes valores

$a = - 1.640$

$b = 0.174$

con un grado de ajuste de 0.98. La ecuación final es por lo tanto:

$\text{Log } T_o = -1.640 + 0.174 x$

Obteniéndose la recta que está representada en la gráfica N° 7.2 de la cual se tiene los siguientes puntos:

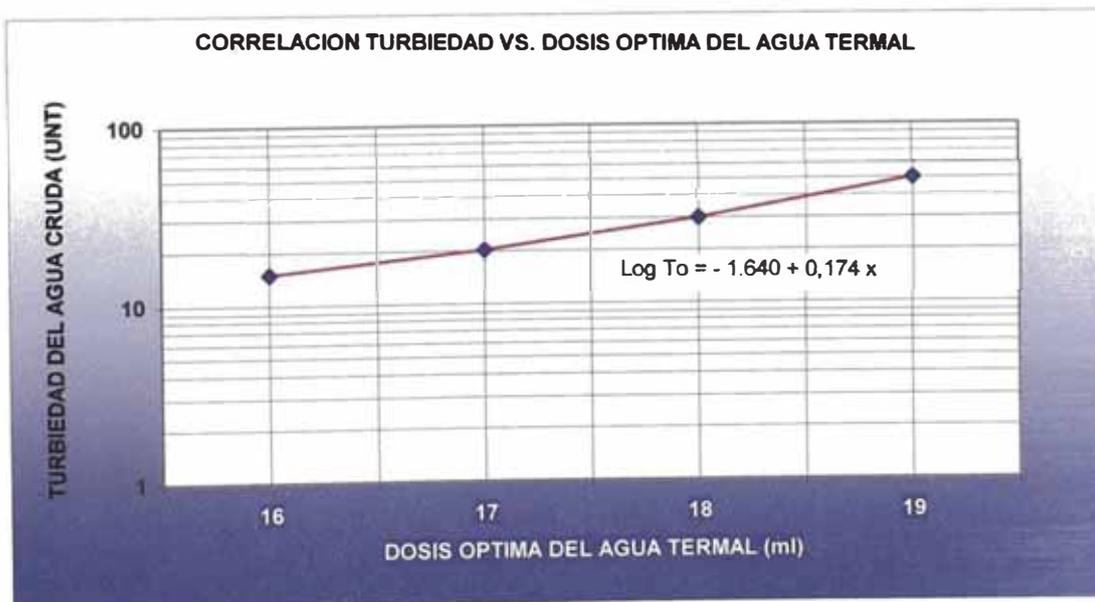
**DOSIS DEL AGUA TERMAL versus TURBIEDAD**

DOSIS (ml)	16.1	16.8	17.8	19.1
TURBIEDAD	15.0	20.0	30.0	50.0

**CUADRO N° 7.2 TURBIEDAD REMANENTE DEL AGUA TERMAL**

Turbiedad Dosis de Coagulante	15.00	20.20	30.00	50.00
15.00	11.80		23.80	40.50
16.00	9.80 (1)	14.50	23.40	39.50
17.00	11.40	13.80(2)	23.50	38.90
18.00	13.40	15.60	22.80(3)	38.10
19.00	13.20	16.40	24.30	37.30 (4)
20.00	14.60	16.20	23.90	38.60
21.00		14.60		

**GRAFICA N° 7.2 CORRELACION TURBIEDAD versus DOSIS OPTIMA DEL AGUA TERMAL**

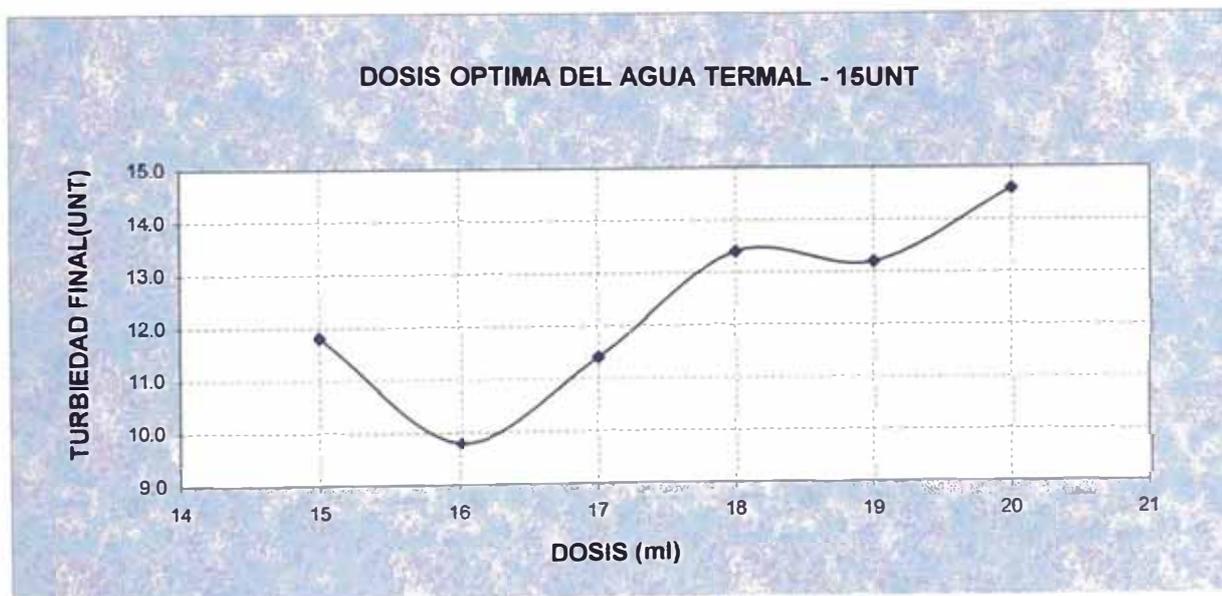


CUADRO N° 7.3

DOSIS OPTIMA DEL AGUA TERMAL - 15 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 15 UNT, pH 7,765, ALCALINIDAD 219 mg/lit CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 380 mg/lit CaCO <sub>3</sub>				
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)	FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm) SEDIMENTACION T = ...15 min		
		AGUA TERMAL DOSIS (ml)	pH	TURBIEDAD FINAL (UN)
1	15	7.740	11.8	21%
2	16	7.765	9.8	35%
3	17	7.818	11.4	24%
4	18	7.821	13.4	11%
5	19	7.813	13.2	12%
6	20	7.835	14.6	3%

GRAFICA N° 7.3

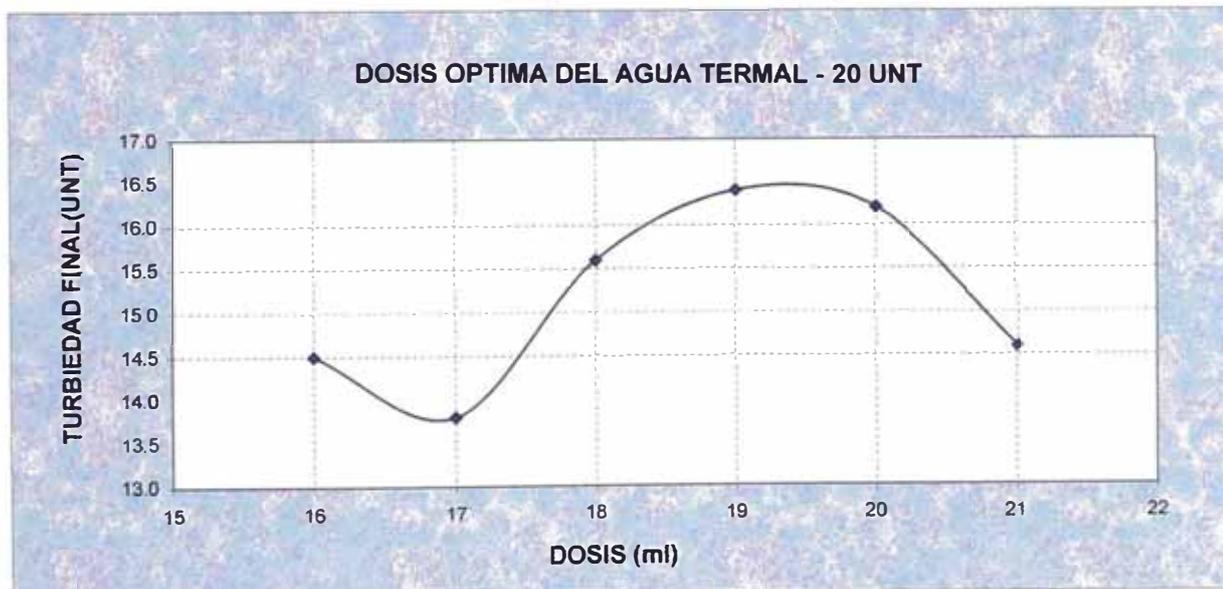


CUADRO N° 7.4

DOSIS OPTIMA DEL AGUA TERMAL - 20 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 20 UNT, pH 7,765, ALCALINIDAD 218mg/lt CaCO <sub>3</sub> ,				
DUREZA TOTAL 380 mg/lt CaCO <sub>3</sub>				
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)	FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm)		
		SEDIMENTACION T = ...15 min		
	AGUA TERMAL DOSIS (ml)	pH	TURBIEDAD FINAL (UN)	EFICIENCIA %
1	16	7.738	14.5	28%
2	17	7.760	13.8	31%
3	18	7.810	15.6	22%
4	19	7.818	16.4	18%
5	20	7.820	16.2	19%
6	21	7.832	14.6	27%

GRAFICA N° 7.4

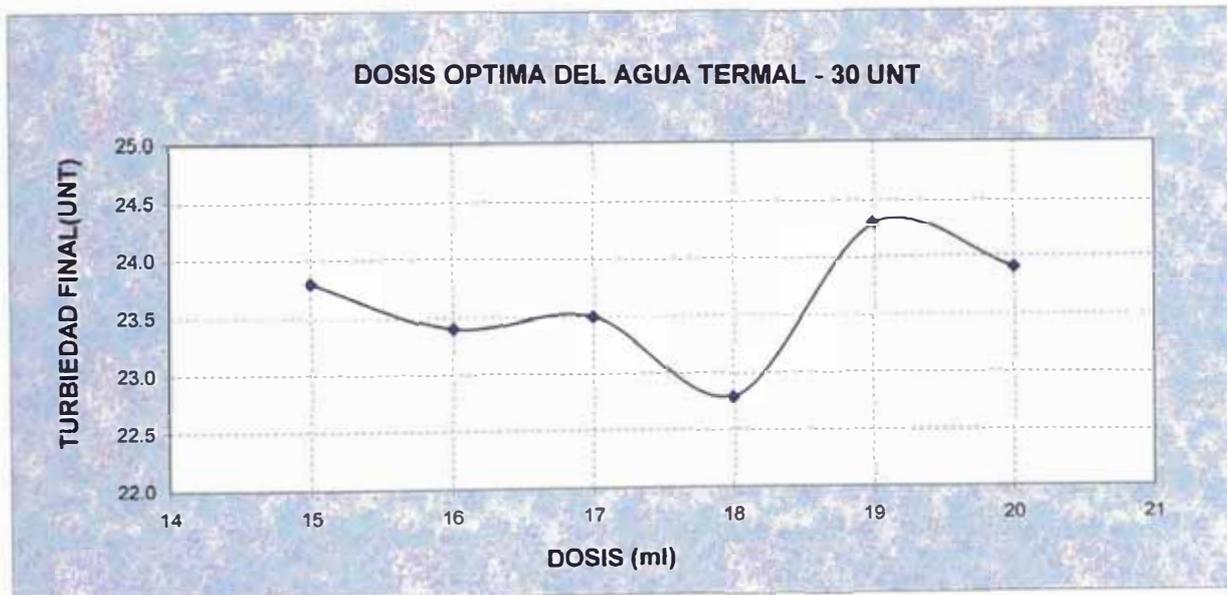


CUADRO N° 7.5

DOSIS OPTIMA DEL AGUA TERMAL - 30 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 30.10 UNT, pH 7,765, ALCALINIDAD 218mg/lit CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 380 mg/lit CaCO <sub>3</sub>				
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)	FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm)		
		SEDIMENTACION T = ...15 min		
	AGUA TERMAL DOSIS (ml)	pH	TURBIEDAD FINAL (UN)	EFICIENCIA %
1	15	7.732	23.8	21%
2	16	7.765	23.4	22%
3	17	7.808	23.5	22%
4	18	7.815	22.8	24%
5	19	7.823	24.3	19%
6	20	7.833	23.9	21%

GRAFICA N° 7.5

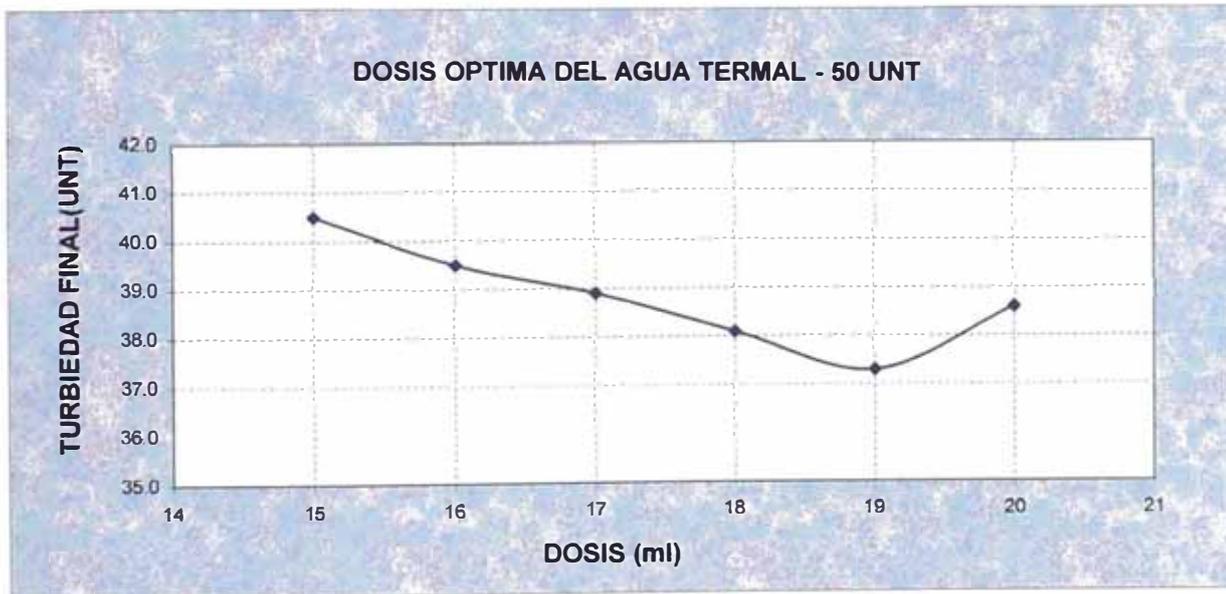


CUADRO N° 7.6

DOSIS OPTIMA DEL AGUA TERMAL - 50 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 50 UNT, pH 7,765, ALCALINIDAD 218mg/lt CaCO <sub>3</sub> ,				
DUREZA TOTAL 380 mg/lt CaCO <sub>3</sub>				
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)	FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm)	SEDIMENTACION T = ...15 min	
	AGUA TERMAL DOSIS (ml)	pH	TURBIEDAD FINAL (UN)	EFICIENCIA %
1	15	7.728	40.5	19%
2	16	7.760	39.5	21%
3	17	7.809	38.9	22%
4	18	7.811	38.1	24%
5	19	7.819	37.3	25%
6	20	7.829	38.6	23%

GRAFICA N° 7.6

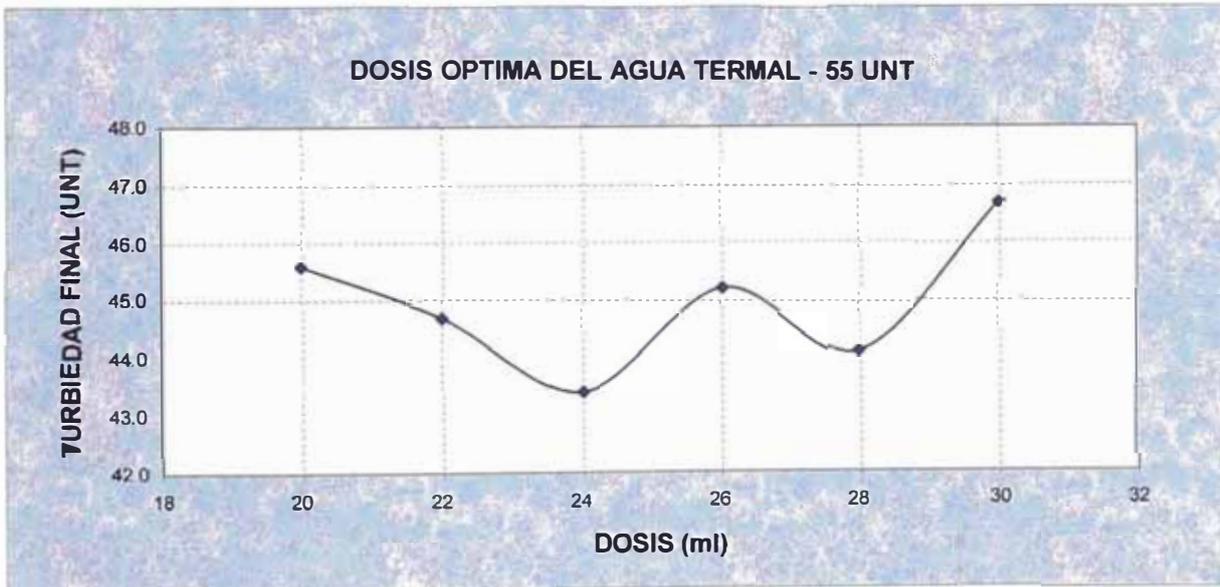


CUADRO N° 7.7

DOSIS OPTIMA DEL AGUA TERMAL - 55 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 55 UNT, pH 7,765, ALCALINIDAD 218mg/lt CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 380 mg/lt CaCO <sub>3</sub>				
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)	FLOCULACION T = ... 20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm) SEDIMENTACION T = ... 15 min		
	AGUA TERMAL DOSIS (ml)	pH	TURBIEDAD FINAL (UN)	EFICIENCIA %
1	20	7.788	45.6	17%
2	22	7.820	44.7	19%
3	24	7.869	43.4	21%
4	26	7.871	45.2	18%
5	28	7.879	44.1	20%
6	30	7.889	46.7	15%

GRAFICA N° 7.7

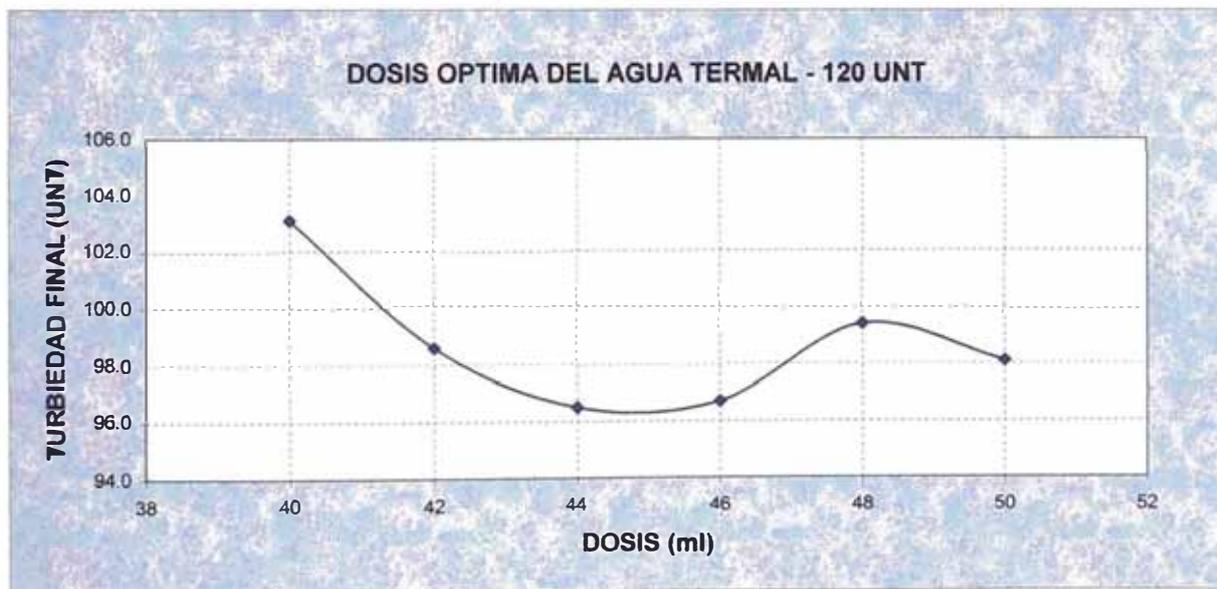


CUADRO Nº 7.8

DOSIS OPTIMA DEL AGUA TERMAL - 120 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 120 UNT, pH 7,765, ALCALINIDAD 218mg/lt CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 380 mg/lt CaCO <sub>3</sub>				
JARRA Nº	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)	FLOCULACION T = ... 20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm)	SEDIMENTACION T = ... 15 min	
	AGUA TERMAL DOSIS (ml)	pH	TURBIEDAD FINAL (UN)	EFICIENCIA %
1	40	7.754	103.1	14%
2	42	7.786	98.6	18%
3	44	7.835	96.5	20%
4	46	7.837	96.7	19%
5	48	7.793	99.4	17%
6	50	7.803	98.1	18%

GRAFICA Nº 7.8



### 7.1.3. DETERMINACION DE LA DOSIS OPTIMA DEL AGUA TERMAL

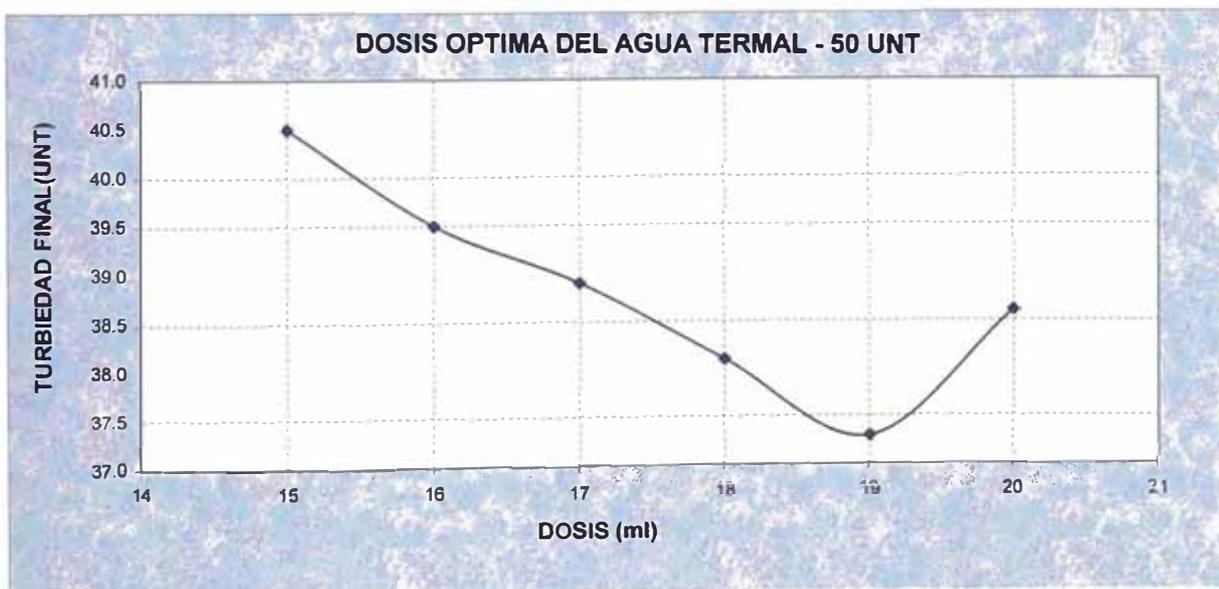
El objetivo de la realización de este ensayo fue determinar la dosis óptima del Agua Termal que produce la más rápida desestabilización de las partículas coloidales que forme un floc pesado y compacto que quede fácilmente retenido en los sedimentadores y no se rompa al pasar por los filtros.

En la gráfica N° 7.9 se puede observar de acuerdo con la información obtenida de la prueba de jarras que la dosis óptima del Agua Termal es 19 ml. con esta dosis determinada se logra alcanzar una turbiedad residual de 37.3 UNT, obteniéndose una eficiencia en el proceso del 25%.

CUADRO N° 7.9

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 50 UNT, pH 7,750, ALCALINIDAD 219 mg/lt CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 380 mg/lt CaCO <sub>3</sub>				
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)	FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm)	SEDIMENTACION T = ...15 min	
	AGUA TERMAL DOSIS (ml)	pH	TURBIEDAD FINAL (UN)	EFICIENCIA %
1	15	7.745	40.5	19%
2	16	7.774	39.5	21%
3	17	7.828	38.9	22%
4	18	7.827	38.1	24%
5	19	7.815	37.3	25%
6	20	7.841	38.6	23%

GRAFICA N° 7.9



### 7.1.4. PH OPTIMO DEL AGUA TERMAL

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados con el Agua Termal para diferentes valores de pH del agua cruda se muestran en la gráfica N° 7.10.

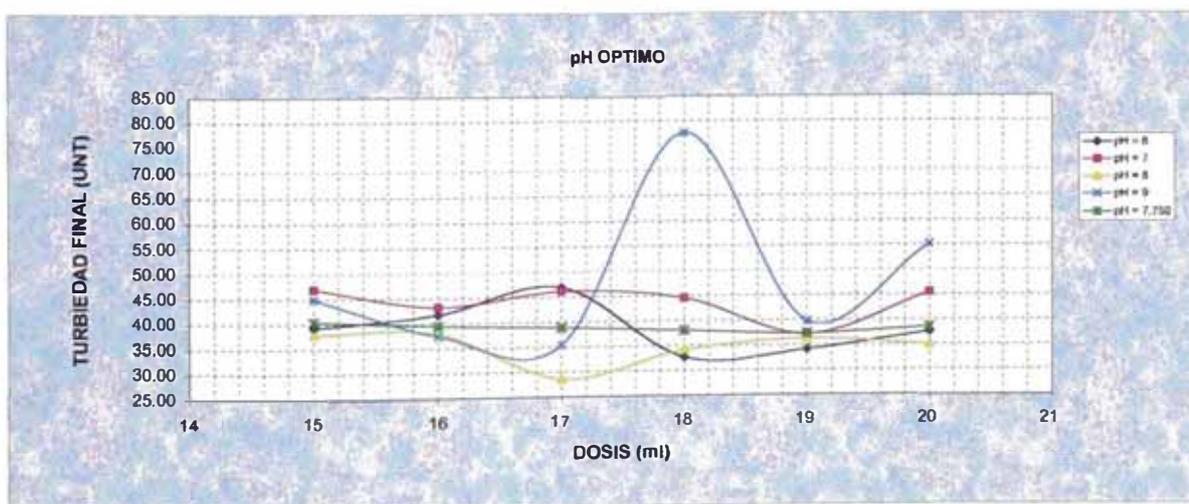
Para la determinación del pH óptimo de la muestra estudiada, se trabajó en un rango de pH de 6 a 9, ya que el objetivo principal del ensayo es reducir la turbiedad residual.

Con las pruebas realizadas se demostró que el pH óptimo para la remoción de la turbiedad es 8. Bajo estas condiciones se obtiene un incremento de la eficiencia del proceso en 18 % y una disminución de la dosis del Agua Termal.

CUADRO N° 7.10

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 50 UN, pH 7.750, ALCALINIDAD 219, DUREZA TOTAL 380 mg/l CaCO <sub>3</sub>																				
MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)										FLOCULACION T = 20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm)										
SEDIMENTACION T = 15 min																				
JARRA N°	pH = 6				pH = 7				pH = 7,760				pH = 8				pH = 9			
	Dosis ml	T <sub>f</sub>	pH <sub>f</sub>	Efic. %	Dosis ml	T <sub>f</sub>	pH <sub>f</sub>	Efic. %	Dosis ml	T <sub>f</sub>	pH <sub>f</sub>	Efic. %	Dosis ml	T <sub>f</sub>	pH <sub>f</sub>	Efic. %	Dosis ml	T <sub>f</sub>	pH <sub>f</sub>	Efic. %
1	15	39.30	6.303	21%	15	47.0	7.281	6%	15	40.50	7.745	19%	15	38.0	8.074	24%	15	45.0	8.779	10%
2	16	41.80	6.337	16%	16	43.3	7.342	13%	16	39.50	7.774	21%	16	37.9	8.116	24%	16	37.5	8.760	25%
3	17	47.00	6.347	6%	17	46.2	7.374	8%	17	38.90	7.828	22%	17	28.6	8.129	43%	17	35.4	8.823	29%
4	18	32.70	6.349	35%	18	44.6	7.344	11%	18	38.10	7.827	24%	18	34.2	8.215	32%	18	77.6	8.899	-55%
5	19	34.10	6.376	32%	19	37.2	7.287	26%	19	37.30	7.815	25%	19	36.3	8.126	27%	19	39.8	8.784	20%
6	20	37.80	6.370	25%	20	45.5	7.356	9%	20	38.80	7.841	23%	20	35.0	8.153	30%	20	55.3	8.815	-11%

GRAFICA N° 7.10



#### **7.1.5. CONCENTRACION OPTMA DEL AGUA TERMAL**

La finalidad de este ensayo es poder determinar la concentración óptima del Agua Termal, puesto que la concentración del coagulante influye en la eficiencia de la mezcla rápida y cambia los resultados de la coagulación.

En la prueba de jarras realizada se puede observar que a medida que disminuye la concentración del Agua Termal la turbiedad residual aumenta, por lo tanto la eficiencia del proceso disminuye. Para concentraciones menores al 60% la eficiencia aumenta llegando a una máxima para una concentración del 20 %.

También se puede observar un ligero incremento del pH del agua tratada a medida que la concentración disminuye.

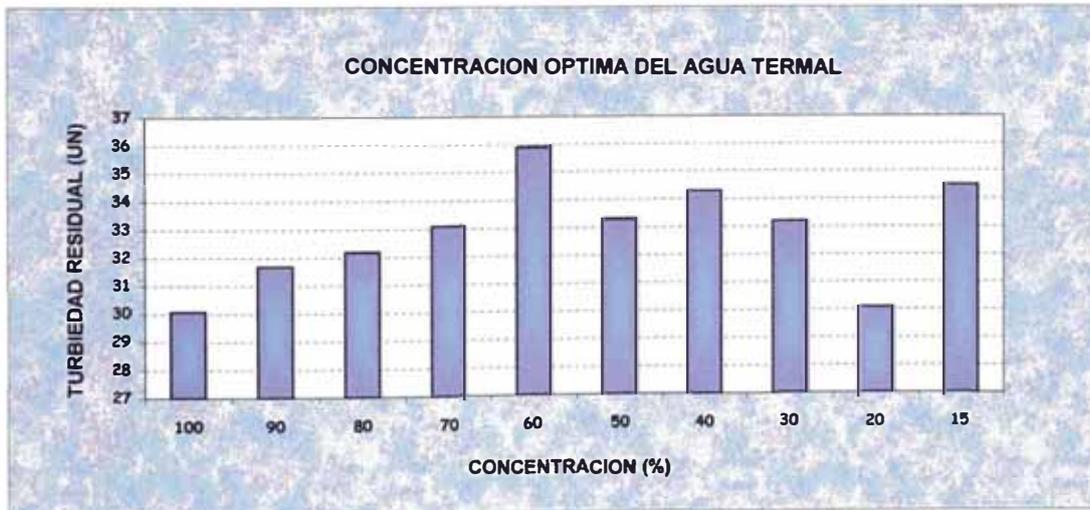
En el cuadro y gráfico N° 7.11, se observa los mismos resultados de turbiedad final para una concentración del 100% y 20%. Se debe precisar que las pruebas de decantación se trabajó con estas concentraciones para poder determinar con cual de estas se obtiene la mejor tasa de decantación.

CUADRO N° 7.11

CONCENTRACION OPTIMA DEL AGUA TERMAL

J A R R A	AGUA CRUDA		DOSIFICACION		AGUA SEDIMENTADA		
	Turbiedad 50 UNT Dureza Total = 380 mg/lit (CaCO <sub>3</sub> )		<b>Mezcla Rápida</b> Gradiente 800 s <sup>-1</sup> Tiempo 5 Seg.		<b>Floculación</b> Gradiente 50 s <sup>-1</sup> (40 rpm) tiempo 20 min.  <b>Sedimentación</b> Tiempo 15 min.		
	pH	Alcalinidad Total	Dosis ( ml )	Concentración (%)	pH	Turbiedad final ( UN )	Eficiencia (%)
1	8.079	219	17	100	8.072	30.10	39.80
2	8.079	219	17	90	8.108	31.70	36.60
3	8.079	219	17	80	8.153	32.20	35.60
4	8.079	219	17	70	8.159	33.10	33.80
5	8.079	219	17	60	8.147	35.90	28.20
6	8.079	219	17	50	8.172	33.30	33.40
7	8.079	219	17	40	8.187	34.30	31.40
8	8.079	219	17	30	8.193	33.20	33.60
9	8.079	219	17	20	8.198	30.10	39.80
10	8.079	219	17	15	8.190	34.50	31.00

GRAFICA N° 7.11



### 7.1.6. GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA

El gradiente de mezcla rápida es un parámetro importante a razón de que el mecanismo predominante es el adsorción y por lo tanto es recomendable producir gradientes de velocidad altos. La máxima velocidad que se pudo obtener con los equipos de laboratorio fue de 300 rpm, mediante el ábaco que relaciona velocidad y gradiente, para la temperatura de 20 °C se obtuvo el gradiente de 800 s<sup>-1</sup>.

La gráfica N° 7.12 nos muestra que a medida que se incrementa el tiempo de mezcla rápida a partir de los 5 segundos la turbiedad residual tiende a aumentar, por lo tanto se puede concluir que para tiempos de retención cortos favorecen la coagulación que se desarrolla por el mecanismo de adsorción y neutralización de cargas.

CUADRO N° 7.12

J A R R A	AGUA CRUDA		DOSIFICACION		AGUA SEDIMENTADA		
	Turbiedad:	50 UNT	<u>Mezcla Rápida</u>		<u>Floculacion</u>		
	Dureza Total	380 mg/lit (CaCO <sub>3</sub> )	Gradiente	800 s <sup>-1</sup>	Gradiente	50 s <sup>-1</sup>	
			Velocidad	300 rpm	Velocidad	40 rpm	
			Tiempo	Variable	Tiempo	20'	
					<u>Sedimentación</u>		
					Tiempo	15'	
	pH	Alcalinidad Total (mg/lit)	Dosis (ml)	Tiempo (seg)	pH	Turbiedad (UNT)	Eficiencia (%)
1	8.079	219	17	1	7.949	31.70	36.60%
2	8.079	219	17	5	8.001	28.20	43.60%
3	8.079	219	17	10	8.046	29.10	41.80%
4	8.079	219	17	15	7.995	30.80	38.40%
5	8.079	219	17	20	8.015	28.70	42.60%
6	8.079	219	17	25	7.929	30.40	39.20%
7	8.079	219	17	30	7.939	32.20	35.60%

GRAFICA N° 7.12



### 7.1.7. GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION DEL AGUA TERMAL

Mediante estos ensayos de laboratorio se trata de obtener los parámetros de diseño de una unidad de floculación para el tratamiento con el Agua Termal.

Los resultados de los ensayos de laboratorio se detallan en el cuadro N° 7.13

Graficando en escalas aritméticas los valores de:

$T_f$  versus.

$T_0$

los periodos de floculación para los diferentes valores de velocidad, se obtuvo la gráfica N° 7.13.1, de la cual se seleccionó el periodo total de floculación que es igual a 25 minutos, tiempo en el cual se produce la máxima eficiencia (mínimo valor de  $T_f/T_0$ ).

Graficando en escalas aritméticas los valores de:

$T_f$  versus

$T_0$

gradientes de velocidad para los diferentes periodos de floculación se obtuvieron seis curvas en las cuales se observa que para cada gradiente de velocidad existe un tiempo óptimo de floculación que produce la máxima eficiencia (mínimo valor de  $T_f/T_0$ ) gráfica N° 7.13.2.

Se determinaron las coordenadas de cada punto de mínima de las curvas de la gráfica N° 7.13.2, las cuales se indica en el siguiente cuadro.

**VALORES CRITICOS DE PARAMETROS DE FLOCULACION**

<b>T min</b>	5	10	15	20	25	30
<b>G s<sup>-1</sup></b>	73	48	40	40	37	20

Aplicando a estos puntos la teoría de los mínimos cuadrados para obtener las constantes “a” y “b” de la ecuación de una recta:

$y = a + b x$  en la cual:

$\text{Log } T = x$  y  $\text{Log } G = y$

Se determinaron los siguientes valores:

$a = 2.275$

$b = -0.572$

con un grado de ajuste de 0.81 . La ecuación final es por lo tanto:

$\text{Log } G = 2.275 - 0.572 \text{ Log } T$ , o

$\text{Log } (G \times T^{0.572}) = 2.275$

Reagrupando y encontrando los antilogaritmos, se encuentra la siguiente ecuación final:

$G^{1.748} \times T = 10^{3.977}$

Obteniéndose la recta que está representada en la gráfica N° 7.13.3 de la cual se obtienen los siguientes puntos:

<b>T min</b>	5	10	15	20	25	30
<b>G s<sup>-1</sup></b>	75	50	40	34	30	27

Si se seleccionan tres compartimentos para el floculador siendo el tiempo total de floculación de 25 minutos, se tendrán los parámetros de diseño indicados en el siguiente cuadro.

#### CRITERIOS DE DISEÑO DE LA UNIDAD DE FLOCULACION

COMPARTIMIENTO	PERIODO DE RETENCION (min)		GRADIENTE DE VELOCIDAD S <sup>-1</sup>
	PARCIAL	TOTAL	
1	8	8	57
2	8	16	39
3	9	25	30

CUADRO N° 7.13

ENSAYO DE JARRAS PARA DEFINIR PARAMETROS DE FLOCULACION DEL AGUA TERMAL

1.- Equipo de Prueba de Jarras

Volumen de jarras 2 lt.

2.- Agua cruda

Turbiedad 50 UT      pH      Alcalinidad 219 mg/l CaCO<sub>3</sub>

3.- Dosis óptima

Coagulante Agua termal      Dosis

4.- Mezcla rápida

Velocidad 300 rpm      Gradient 800 s<sup>-1</sup>      Tiempo de mezcl. 5 seg.

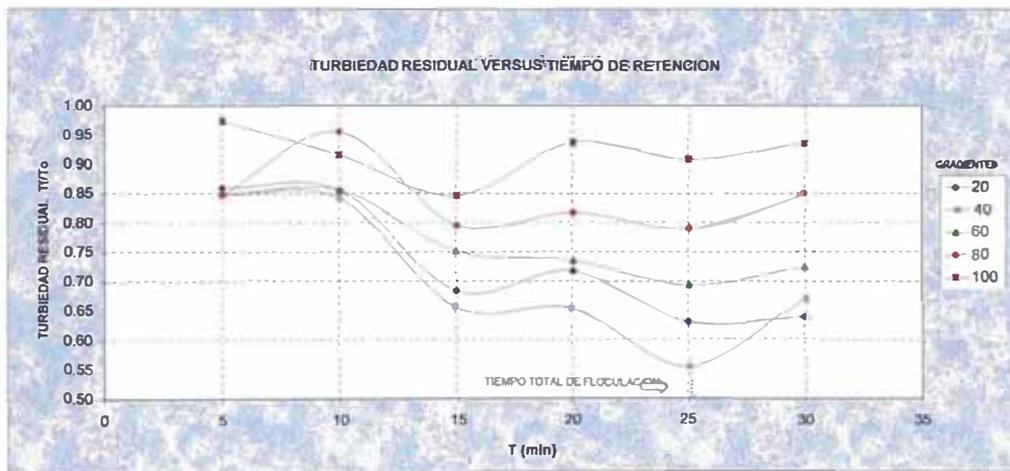
5.- Sedimentación

Profundidad de toma de muestra      Tiempo de sedim. 15 min

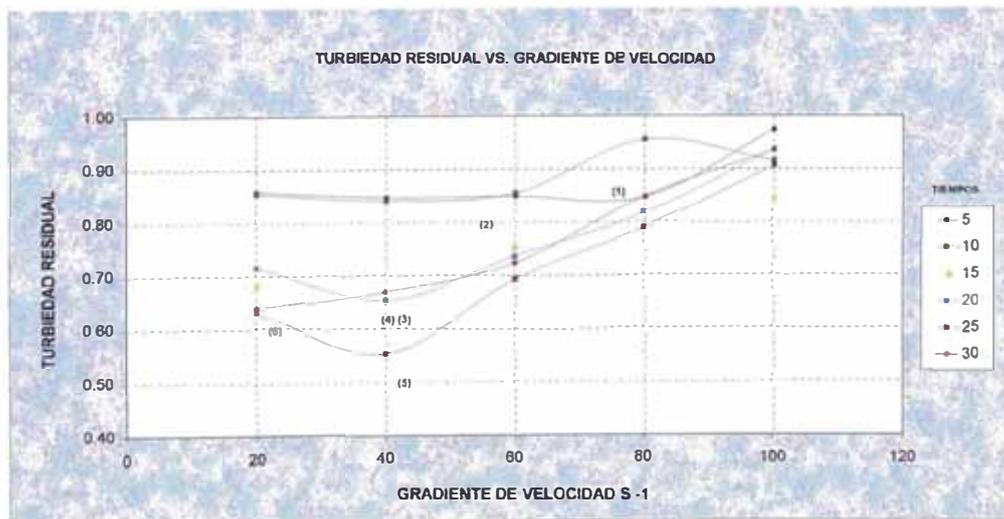
6.- Floculación

Velocidad rpm	Gradiente de Velocidad (s <sup>-1</sup> )	Tiempos de Floculación (min)											
		5 Min.		10 Min.		15 Min.		20 Min.		25 Min.		30 Min.	
		Tf	Tf/To	Tf	Tf/To	Tf	Tf/To	Tf	Tf/To	Tf	Tf/To	Tf	Tf/To
20	20	43.00	0.88	42.80	0.88	34.20	0.88	35.90	0.72	31.50	0.83	31.90	0.84
34	40	42.40	0.85	42.10	0.84	32.80	0.66	32.70	0.65	27.70	0.55	33.50	0.67
45	60	42.50	0.85	42.80	0.88	37.80	0.75	38.80	0.74	34.70	0.89	38.20	0.72
56	80	42.40	0.85	47.80	0.96	39.80	0.80	40.90	0.82	39.50	0.79	42.50	0.85
84	100	48.70	0.97	45.80	0.92	42.30	0.85	48.90	0.94	45.40	0.91	48.80	0.94

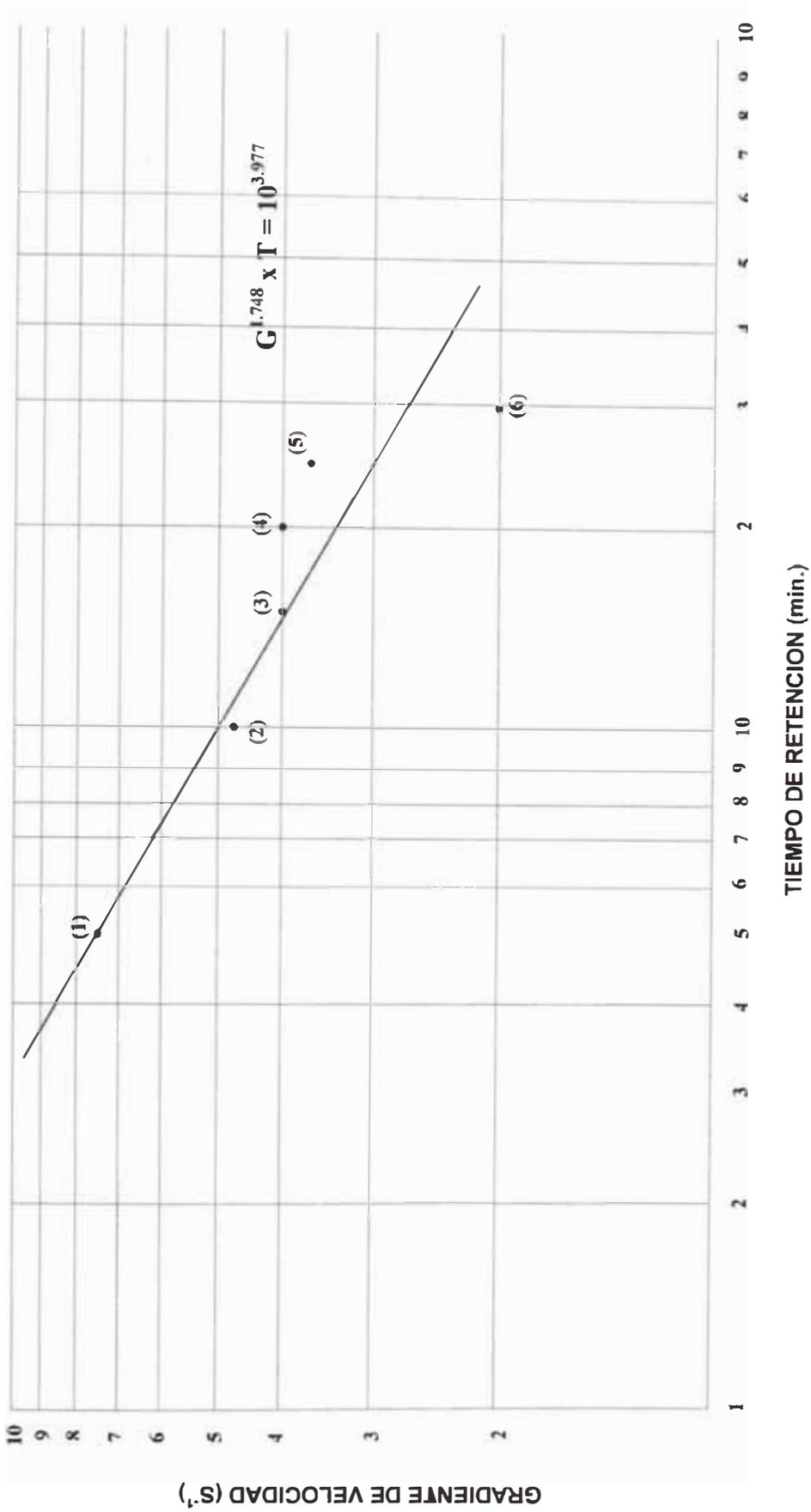
GRAFICA N° 7.13.1



GRAFICA N° 7.13.2



### GRADIENTE DE VELOCIDAD versus TIEMPO DE RETENCION



GRAF CO 7 13.3

### **7.1.8. DECANTACION DEL AGUA TERMAL**

Para poder determinar la mejor tasa de decantación se trabajó con cuatro alternativas de tratamiento las dos primeras es para una concentración del 100% y las dos restantes para una concentración del 20% del Agua Termal. Para cada concentración se trabajó con dos rangos de gradientes, para la primera se considera los gradientes determinados mediante la prueba de floculación y para la segunda se adicionó una gradiente de  $20 \text{ s}^{-1}$ .

Los cuadros N° 7.14, 7.15, 7.16 y 7.17, muestran los resultados de las pruebas efectuadas con concentración del 100% y 20% de Agua Termal y gradientes de floculación de 57, 39, 30  $\text{s}^{-1}$  y 68, 45, 36 y 20  $\text{s}^{-1}$ .

En las gráficas N° 7.14, 7.15, 7.16 y 7.17, se detallan las curvas de eficiencia en función a las gradientes establecidas en el proceso de floculación y a la concentración del Agua Termal.

Los cuadros N° 7.14.1, 7.15.1, 7.16.1 y 7.17.1, muestran los valores correspondientes al porcentaje total de remoción ( $R_t$ ), la turbiedad removida ( $T_r$ ) y la turbiedad final ( $T_f$ ) obtenidos.

#### **Interpretación de los Resultados**

1. La elección de la carga superficial se puede hacer basándose en dos criterios:
  - a. La velocidad de sedimentación que nos dé la máxima eficiencia remocional .
  - b. La velocidad de sedimentación que nos dé la máxima turbiedad tolerable para el filtro.
  
2. De acuerdo al primer criterio, se selecciona del cuadro N° 7.15.1 el valor de  $V_s = 0.029 \text{ cm/s}$ .

Al valor de  $V_s$  no se afectará de un coeficiente de seguridad ( $C$ ), ya que considerando evaluaciones efectuadas en plantas con decantadores laminares de placas paralelas se ha determinado que estas unidades en la práctica, producen eficiencias superiores a las determinadas en las pruebas de laboratorio.

3. Se calcula la velocidad media en el sedimentador

$$V_o = V_s ( \text{Sen } \theta + L \text{ Cos } \theta )$$

Si suponemos que los módulos de sedimentación laminar tienen 1.20 m de alto ( $l$ ) y 6 cm de separación ( $d$ ), la longitud relativa del sedimentador ( $L$ ) será de:

$$l = L = \frac{120}{6} = 20$$

Luego:

$$V_o = 0.029 (0.866 + 20 \cdot 0.50)$$

$$V_o = 0.315 \text{ cm/s}$$

4. La carga superficial aparente está dada por la expresión

$$q = \frac{V_o \times \text{Sen } \theta \times 86400}{100}$$

Reemplazando :

$$q = \frac{0.315 \times 0.866 \times 86400}{100}$$

$$q = 235.7 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times d$$

CUADRO N° 7.14

PRUEBA DE DECANTACION

1.- Equipo de prueba de jarras

Volumen de la jarra 2 lt.

2.- Calidad del agua cruda

Turbiedad 50 UT      pH 8.03      Alcalinidad 218 mg/lit

3.- Dosis Óptima

Coagulante Agua Termal      Dosis 17 ml      Concentración 100%

Modificador de pH Na OH      Dosis 1.5 ml      Concentración 1 M.

4.- Mezcla Rápida

Gradiente de velocidad 800 s<sup>-1</sup>      rpm 300      Tiempo de mezcla: 5 seg.

5.- Floculación

Velocidad 44, 33, 28 rpm      Gradiente 57, 39, 30 s<sup>-1</sup>

Tiempo 8, 8, 8 min.

6.- Sedimentación

Profundidad de toma de muestra ( h ) 6 cm

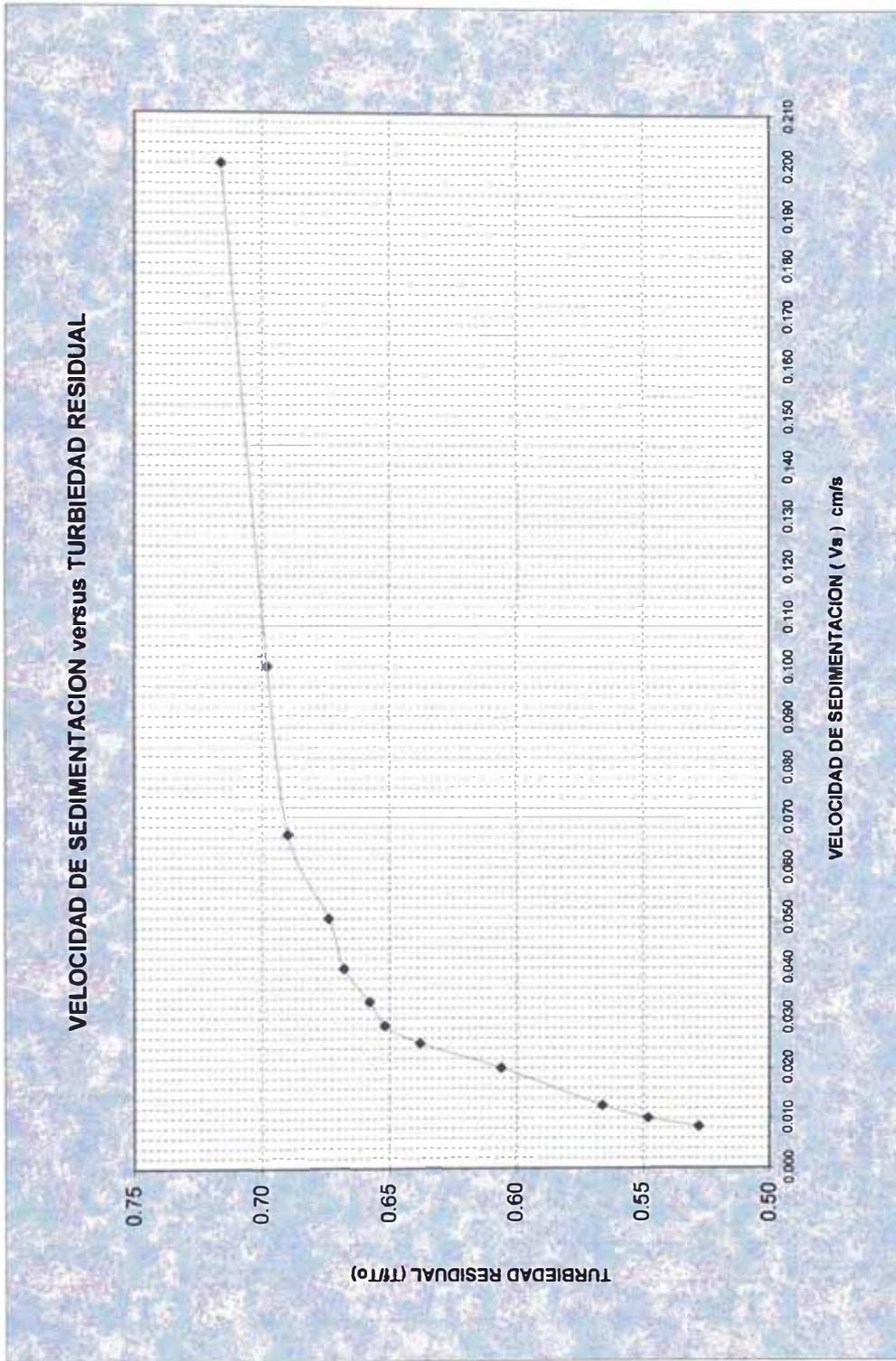
Tiempo de Sedimentación ( min. )	Velocidad de Sedimentación "Vs" (cm/sg)	Turbiedad (UN)		Tf/To
		Inicial To ( UN )	Final Tf (UN)	
0.5	0.2000	50	35.80	0.72
1.0	0.1000	50	34.90	0.70
1.5	0.0667	50	34.50	0.69
2.0	0.0500	50	33.70	0.67
2.5	0.0400	50	33.40	0.67
3.0	0.0333	50	32.90	0.66
3.5	0.0286	50	32.60	0.65
4.0	0.0250	50	31.90	0.64
5.0	0.0200	50	30.30	0.61
8.0	0.0125	50	28.30	0.57
10.0	0.0100	50	27.40	0.55
12.0	0.0083	50	26.40	0.53

**CUADRO N° 7.14.1**

**SELECCIÓN DE LA TASA DE SEDIMENTACION**

Turbiedad      50                       $\alpha =$       0.0083                       $C_f =$       0.53

( 1 ) q m/d	( 2 ) Vs cm/s	( 3 ) Co	( 4 ) 1-( Co - Cf )	( 5 ) Rt	( 6 ) Tr	( 7 ) Tf
10	0.012	0.57	0.96	0.994	49.71	0.29
20	0.023	0.63	0.90	0.967	48.37	1.63
22.5	0.026	0.65	0.88	0.960	47.99	2.01
30	0.035	0.66	0.87	0.950	47.49	2.51
40	0.046	0.67	0.86	0.942	47.09	2.91
50	0.058	0.69	0.84	0.933	46.64	3.36
60	0.069	0.69	0.84	0.929	46.44	3.56
80	0.093	0.70	0.83	0.924	46.18	3.82
100	0.116	0.70	0.83	0.920	46.01	3.99
120	0.139	0.71	0.82	0.916	45.79	4.21
140	0.162	0.71	0.81	0.912	45.59	4.41
180	0.208	0.72	0.81	0.909	45.46	4.54



GRAFICA N° 7.14

**CUADRO N° 7.15**

**PRUEBA DE DECANTACION**

1.- **Equipo de prueba de jarras**

Volumen de la jarra 2 lt.

2.- **Calidad del agua cruda**

Turbiedad 50 UT      pH 8.03      Alcalinidad: 218 mg/lit

3.- **Dosis Óptima**

Coagulante Agua Termal      Dosis 17 ml      Concentración 100%

Modificador de pH Na OH      Dosis 1.5 ml      Concentracion 1 M.

4.- **Mezcla Rápida**

Gradiente de velocidad 800 s<sup>-1</sup>      rpm 300      Tiempo de mezcla : 5 seg.

5.- **Floculación**

Velocidad 49, 37, 32, 20 rpm      Gradiente 68, 45, 36, 20 s<sup>-1</sup>

Tf 6, 6, 6, 6 min.

6.- **Sedimentación**

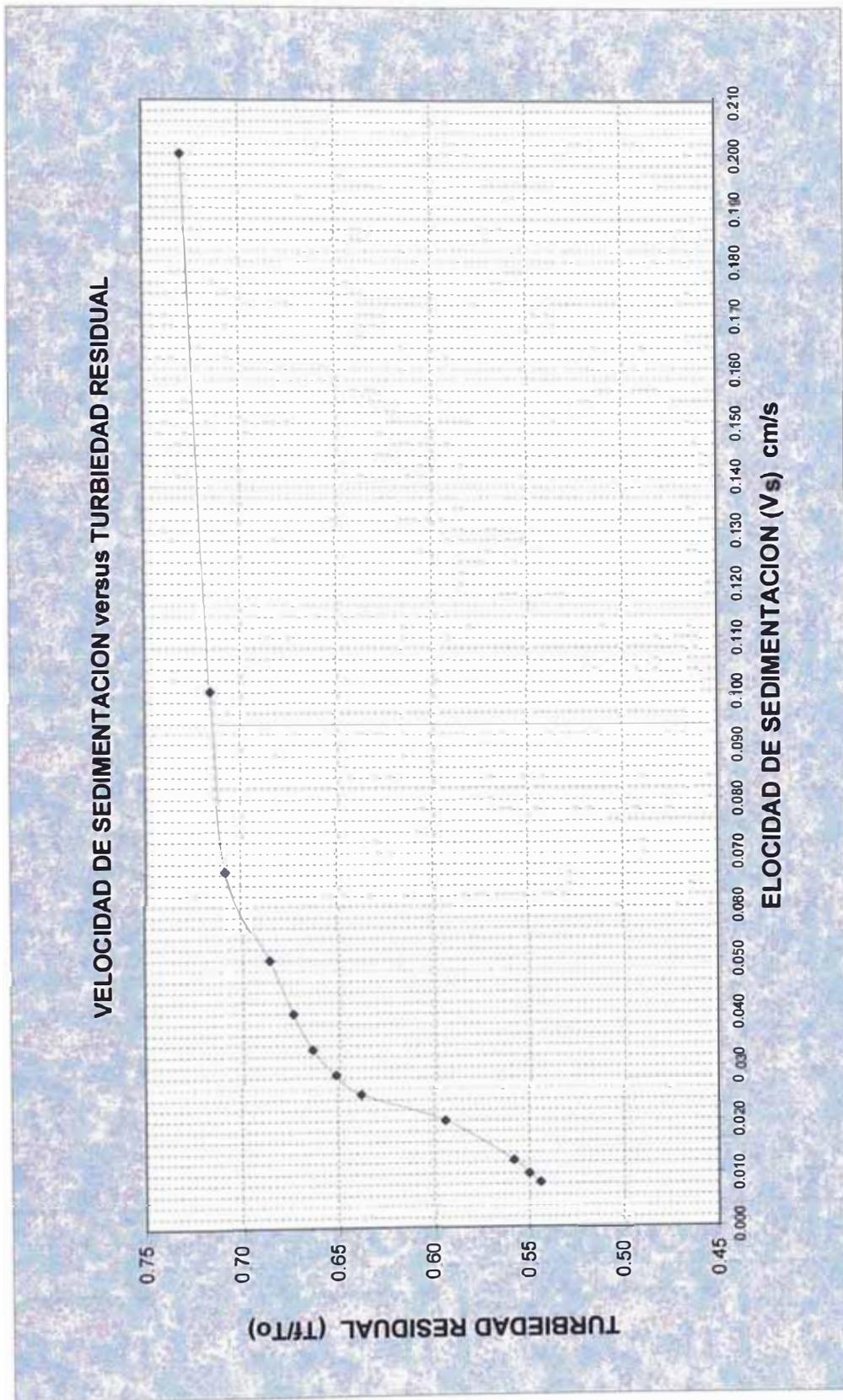
Profundidad de toma de muestra ( h ) 6 cm

Tiempo de Sedimentación ( min. )	Velocidad de Sedimentación "Vs" (cm/sg)	Turbiedad (UN)		Tf/To
		Inicial To ( UN )	Final Tf ( UN )	
0.5	0.2000	50	36.50	0.73
1.0	0.1000	50	35.80	0.72
1.5	0.0667	50	35.40	0.71
2.0	0.0500	50	34.30	0.69
2.5	0.0400	50	33.70	0.67
3.0	0.0333	50	33.20	0.66
3.5	0.0286	50	32.60	0.65
4.0	0.0250	50	31.90	0.64
5.0	0.0200	50	29.70	0.59
8.0	0.0125	50	27.90	0.56
10.0	0.0100	50	27.50	0.55
12.0	0.0083	50	27.20	0.54

**CUADRO N° 7.15.1**

**SELECCIÓN DE LA TASA DE SEDIMENTACION**

Turbiedad      50 $\alpha =$ 0.0083 $C_f =$ 0.54						
( 1 )	( 2 )	( 3 )	( 4 )	( 5 )	( 6 )	( 7 )
$q$ m/d	$V_s$ cm/s	$C_o$	$1-( C_o - C_f )$	$R_t$	$T_r$	$T_f$
10	0.012	0.558	0.99	0.998	49.90	0.10
20	0.023	0.620	0.92	0.976	48.78	1.22
25	0.029	0.657	0.89	0.960	47.99	2.01
30	0.035	0.667	0.88	0.953	47.66	2.34
40	0.046	0.683	0.86	0.943	47.15	2.85
50	0.058	0.700	0.84	0.933	46.66	3.34
60	0.069	0.708	0.84	0.928	46.39	3.61
80	0.093	0.716	0.83	0.922	46.09	3.91
100	0.116	0.721	0.82	0.918	45.90	4.10
120	0.139	0.722	0.82	0.916	45.82	4.18
140	0.162	0.725	0.82	0.914	45.71	4.29



GRAFICA Nº 7 15

CUADRO N° 7.16

**PRUEBA DE DECANTACION**

1.- **Equipo de prueba de jarras**

Volumen de la jarra 2 lt.

2.- **Calidad del agua cruda**

Turbiedad 50 UT      pH 8.03      Alcalinidad 218 mg/lit

3.- **Dosis Óptima**

Coagulante Agua Termal      Dosis 17 ml      Concentración 20%

Modificador de pH Na OH      Dosis 1.5 ml      Concentración 1M

4.- **Mezcla Rápida**

Gradiente de velocidad 800 s<sup>-1</sup>      rpm 300      Tiempo de mezcla 5 seg

5.- **Floculación**

Velocidad 44, 33, 28 rpm      Gradiente 57, 39, 30 s<sup>-1</sup>

Tf 8,8,8 min.

6.- **Sedimentación**

Profundidad de toma de muestra ( h ) 6 cm.

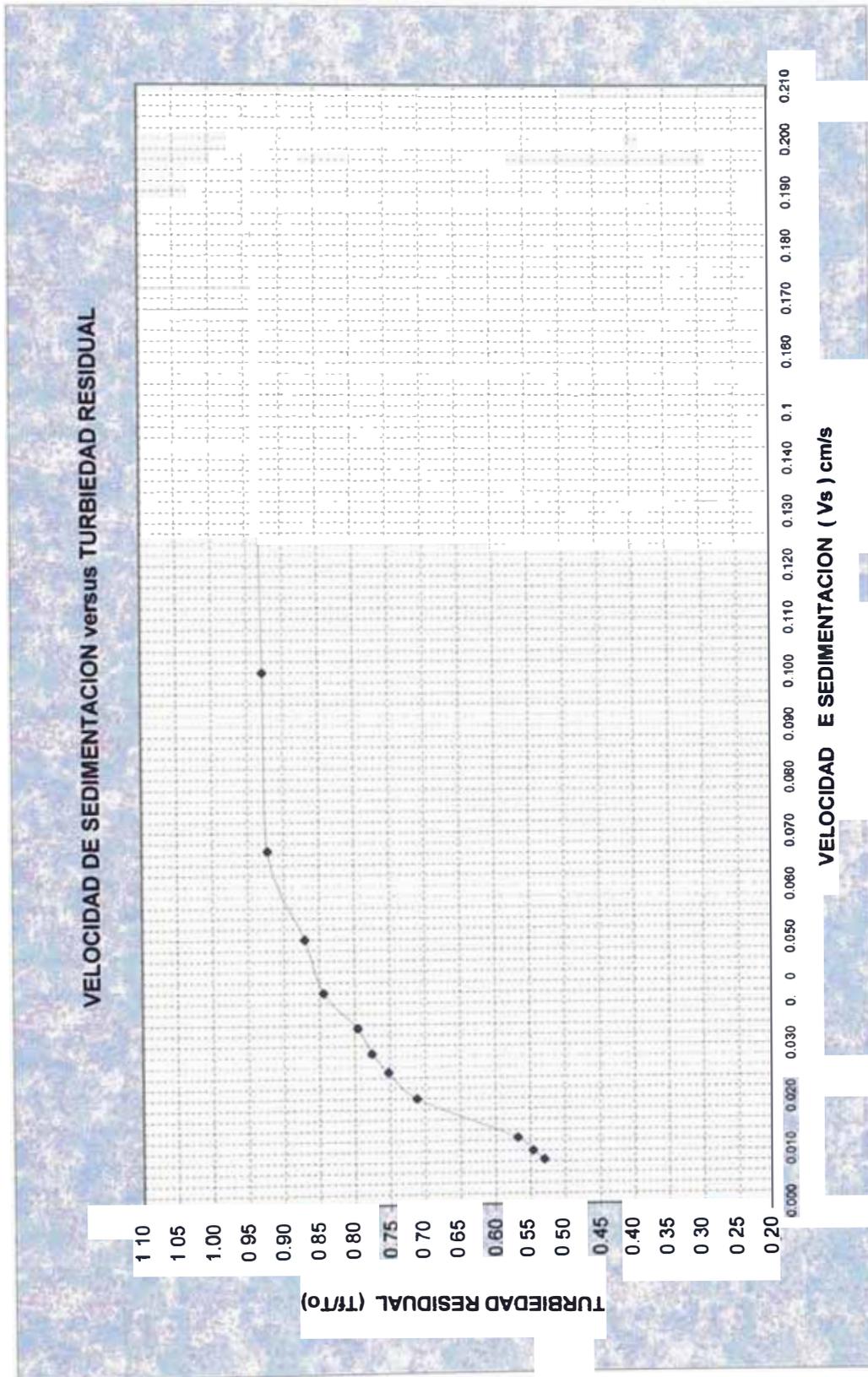
Tiempo de Sedimentación ( min. )	Velocidad de Sedimentación "Vs" (cm/sg)	Turbiedad (UN)		Tf/To
		Inicial To ( UN )	Final Tf (UN)	
0.5	0.2000	50	47.10	0.94
1.0	0.1000	50	46.40	0.93
1.5	0.0667	50	46.10	0.92
2.0	0.0500	50	43.50	0.87
2.5	0.0400	50	42.20	0.84
3.0	0.0333	50	39.80	0.80
3.5	0.0286	50	38.80	0.78
4.0	0.0250	50	37.62	0.75
5.0	0.0200	50	35.60	0.71
8.0	0.0125	50	28.40	0.57
10.0	0.0100	50	27.30	0.55
12.0	0.0083	50	26.50	0.53

CUADRO N° 7.16.1

**SELECCIÓN DE LA TASA DE SEDIMENTACION**

Turbiedad      50 UNT       $a =$       0.0083       $Cf =$       0.53

( 1 ) q m/d	( 2 ) Vs cm/s	( 3 ) Co	( 4 ) 1-( Co - Cf )	( 5 ) Rt	( 6 ) Tr	( 7 ) Tf
10	0.012	0.57	0.96	0.994	49.72	0.28
16	0.018	0.68	0.85	0.960	48.00	2.00
20	0.023	0.74	0.79	0.933	46.64	3.36
30	0.035	0.81	0.72	0.894	44.68	5.32
40	0.046	0.86	0.67	0.865	43.24	6.77
50	0.058	0.90	0.63	0.842	42.08	7.92
60	0.069	0.93	0.60	0.824	41.20	8.80
80	0.093	0.93	0.60	0.818	40.90	9.10
100	0.116	0.93	0.60	0.814	40.72	9.28
120	0.139	0.94	0.59	0.807	40.37	9.64
140	0.162	0.94	0.59	0.806	40.28	9.72



GRAFICA Nº 7.16

CUADRO N° 7.17

**PRUEBA DE DECANTACION**

**1 .- Equipo de prueba de jarras**

Volumen de la jarra 2 lt.

**2 .- Calidad del agua cruda**

Turbiedad 50 UT      pH 8.03      Alcalinidad: 218 mg/lit

**3 .- Dosis Óptimo**

Coagulante Agua Termal      Dosis 17 ml      Concentración 20%

Modificador de pH Na OH      Dosis 1.5 ml

**4 .- Mezcla Rápida**

Gradiente de velocidad 800 s<sup>-1</sup>      rpm 300      Tiempo de mezcla: 5 seg.

**5 .- Floculación**

Velocidad 49, 37, 32, 20 rpm      Gradiente 68, 45, 36, 20 s<sup>-1</sup>

Tf 6, 6, 6, 6 min.

**6 .- Sedimentación**

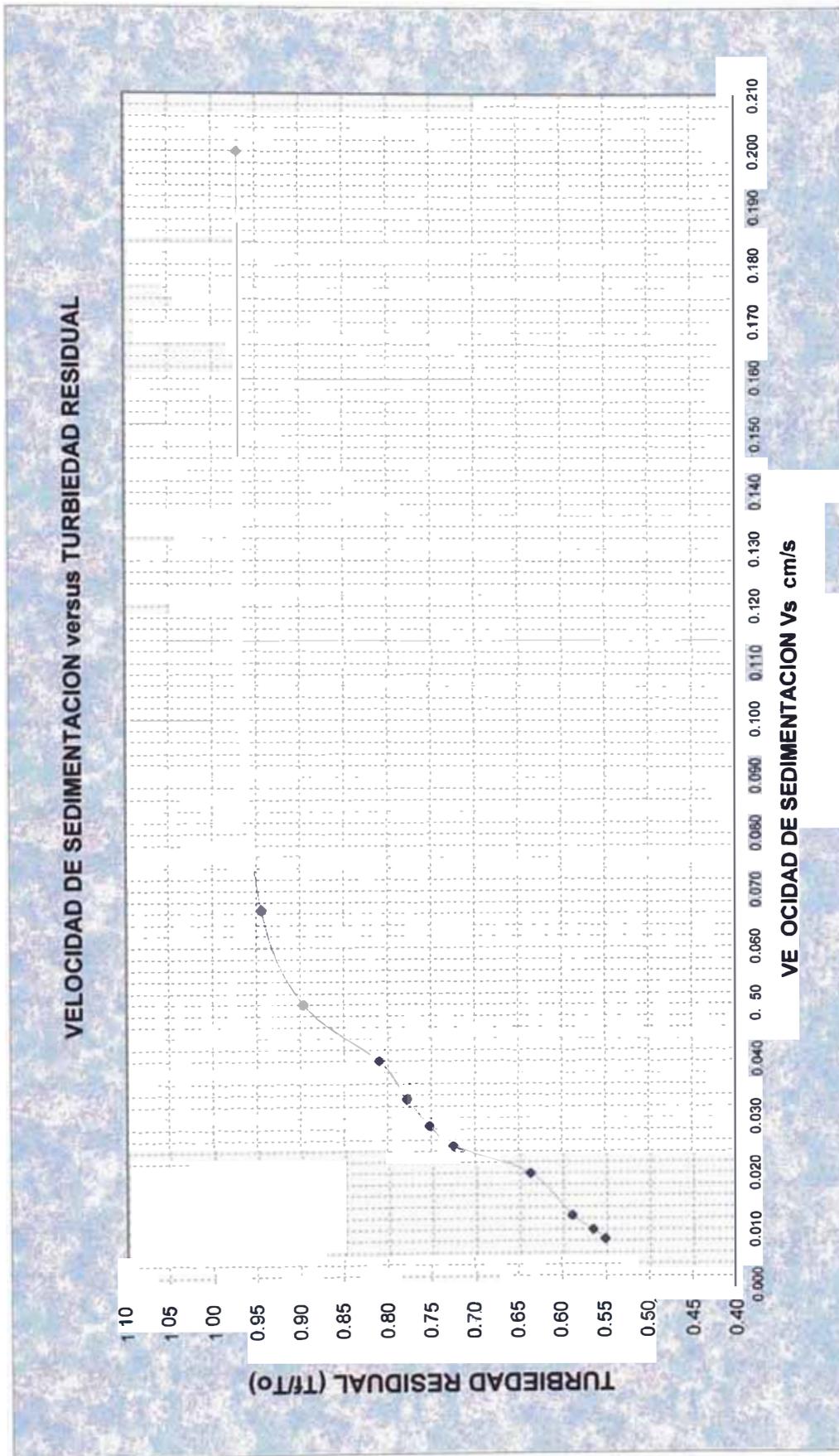
Profundidad de toma de muestra ( h ) 6 cm.

Tiempo de Sedimentación ( min. )	Velocidad de Sedimentación "Vs" (cm/sg)	Turbiedad (UN)		Tf/To
		Inicial To ( UN )	Final Tf ( UN )	
0.5	0.2000	50	48.50	0.97
1.0	0.1000	50	48.30	0.97
1.5	0.0667	50	47.20	0.94
2.0	0.0500	50	44.80	0.90
2.5	0.0400	50	40.50	0.81
3.0	0.0333	50	38.90	0.78
3.5	0.0286	50	37.60	0.75
4.0	0.0250	50	36.20	0.72
5.0	0.0200	50	31.90	0.64
8.0	0.0125	50	29.50	0.59
10.0	0.0100	50	28.30	0.57
12.0	0.0083	50	27.60	0.55

**CUADRO Nº 7.17.1**

**SELECCIÓN DE LA TASA DE SEDIMENTACION**

Turbiedad      50 $\alpha =$ 0.0083 $C_f =$ 0.55						
( 1 )	( 2 )	( 3 )	( 4 )	( 5 )	( 6 )	( 7 )
$q$	$V_s$	$C_o$	$1-( C_o - C_f )$	$R_t$	$T_r$	$T_f$
m/d	cm/s					
10	0.012	0.59	0.96	0.995	49.73	0.27
19.4	0.022	0.68	0.87	0.960	48.00	2.00
20	0.023	0.68	0.87	0.959	47.95	2.05
30	0.035	0.79	0.76	0.910	45.48	4.52
40	0.046	0.87	0.68	0.870	43.48	6.52
50	0.058	0.93	0.62	0.838	41.91	8.09
60	0.069	0.95	0.60	0.825	41.24	8.76
80	0.093	0.96	0.59	0.814	40.72	9.28
100	0.116	0.97	0.58	0.806	40.30	9.70
120	0.139	0.97	0.58	0.804	40.18	9.82
140	0.162	0.97	0.58	0.802	40.09	9.91



GRAFICA N° 7.17

## **7.2 TRATAMIENTO CON CLORURO FERRICO**

### **7.2.1. CORRELACION DE LA CALIDAD DE AGUA CRUDA CON LAS DOSIS OPTIMAS DEL CLORURO FERRICO**

El uso del Cloruro Férrico, dentro del rango de turbiedad estudiado favorece la formación de un floc compacto y grande con mucho poder de cohesión que sedimenta en forma rápida. En los ensayos realizados se empleó el Cloruro Férrico, ya que por experiencias anteriores se demostró que los flóculos formados son más pesados que los flóculos de aluminio y consecuentemente sedimentan más rápido.

Mediante ensayos de laboratorio se determinó la correlación de la calidad del agua en función de la dosis de Cloruro Férrico, para lo cual se realizó ensayos con muestras de agua cuya turbiedad varió en el rango de 50 a 200 UNT. Los resultados de los ensayos se muestran en los cuadros N° 7.19, 7.20 y 7.21.

El resumen de los ensayos se muestran en el cuadro N° 7.18, donde se indica las turbiedades remanentes para cada prueba de jarras.

Aplicando a los puntos (1), (2) y (3), la teoría de mínimos cuadrados para obtener las constantes “a” y “b” de la línea

$$y = a + bx,$$

en la cual:

y = Log de turbiedad de agua

x = Dosis óptima de coagulante

Se determinaron los siguientes valores de las constantes “a” y “b”:

$$a = 1.003$$

$$b = 0.034$$

con un grado de ajuste de 0.99. La ecuación final es por lo tanto:

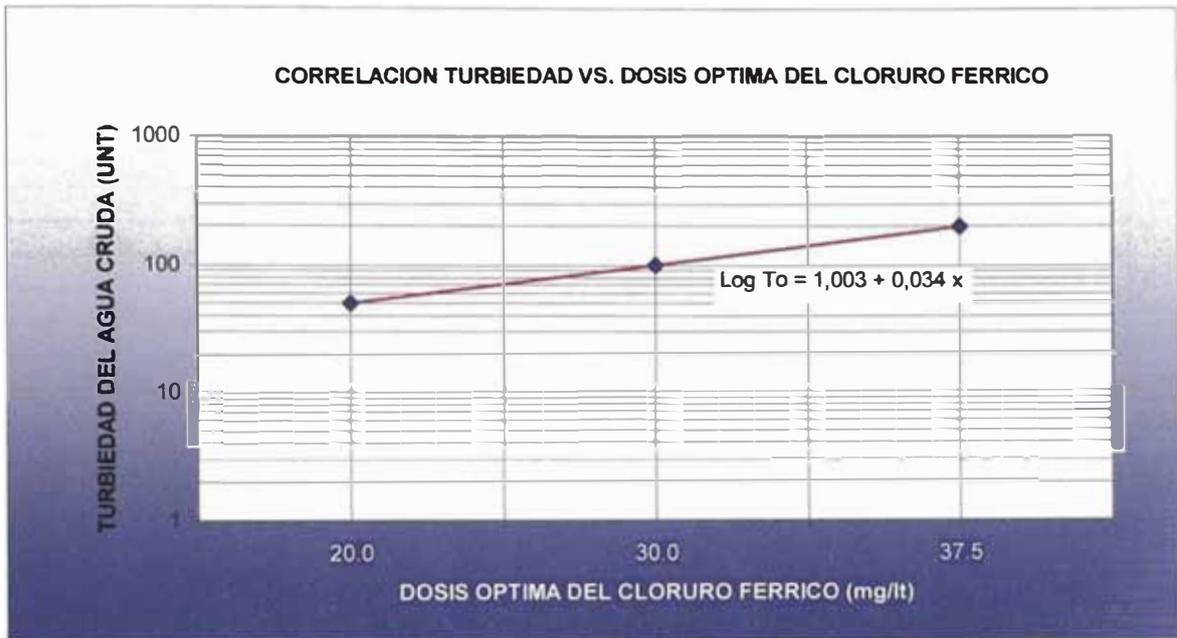
$\text{Log } T_o = 1.003 + 0.034x$ , obteniéndose la recta que está representada en la gráfica N° 7.18 de la cual se tiene los siguientes puntos:

<b>DOSIS (mg/l)</b>	20.36	29.17	37.98
<b>TURBIEDAD</b>	50	100	200

CUADRO N° 7.18  
TURBIEDAD REMANENTE DEL CLORURO FERRICO

<i>Turbiedad</i> <i>Dosis de Coagulante</i>	50	100	200
17.50	1.89		
20.00	1.28 (1)		
22.50	2.58		
25.00	2.32		
27.50	2.61	1.32	
30.00	2.08	0.64 (2)	
32.50		1.83	
35.00		1.36	
37.50		1.10	0.47 (3)
40.00		0.79	1.18
42.50			1.36
45.00			1.41
47.50			1.86
50			2.00

**GRAFICA N° 7.18: CORRELACION DE LA CALIDAD DE AGUA CRUDA CON LAS DOSIS OPTIMA DEL CLORURO FERRICO**

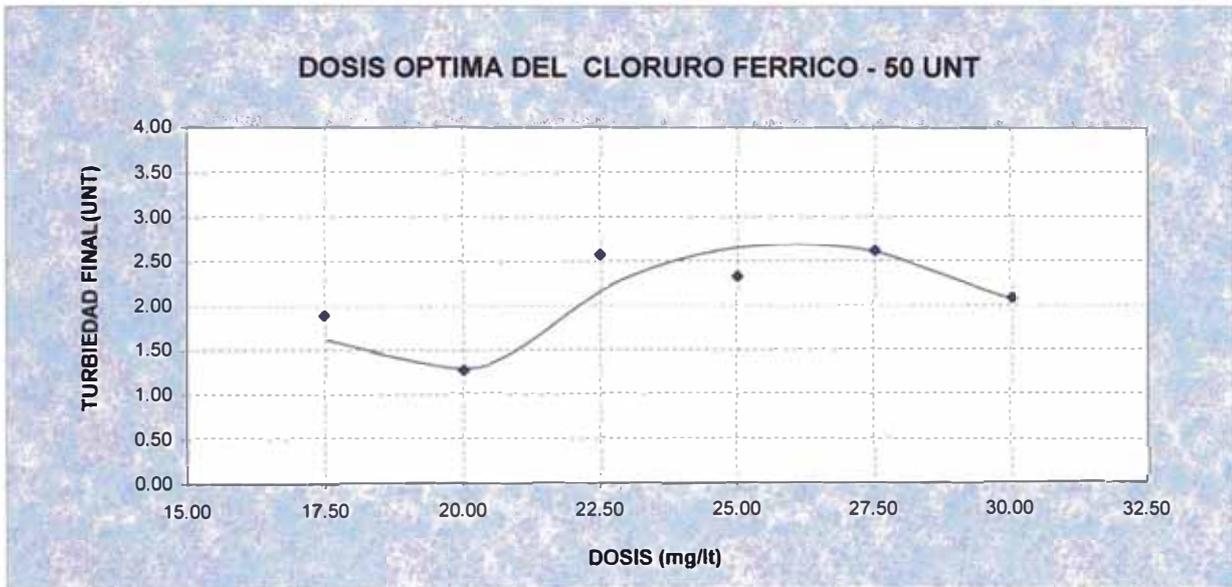


CUADRO N° 7.19

DOSIS OPTIMA DEL CLORURO FERRICO - 50 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 50,7 UNT, pH 7,488, ALCALINIDAD 230 mg/lit CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 380 mg/lit CaCO <sub>3</sub>						
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)		FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm)			
	COAGULANTE (1%)		SEDIMENTACION T = ...15 min			
	DOSIS (mg/lit)	ml	pH	TURBIEDAD FINAL (UN)	INDICE DE WILCOMB	EFICIENCIA %
1	17.50	3.50	7.316	1.89	B	96.22%
2	20.00	4.00	7.316	1.28	B	97.44%
3	22.50	4.50	7.579	2.58	C	94.84%
4	25.00	5.00	7.388	2.32	C	95.36%
5	27.50	5.50	7.352	2.61	C	94.78%
6	30.00	6.00	7.250	2.08	D	95.84%

GRAFICA N° 7.19



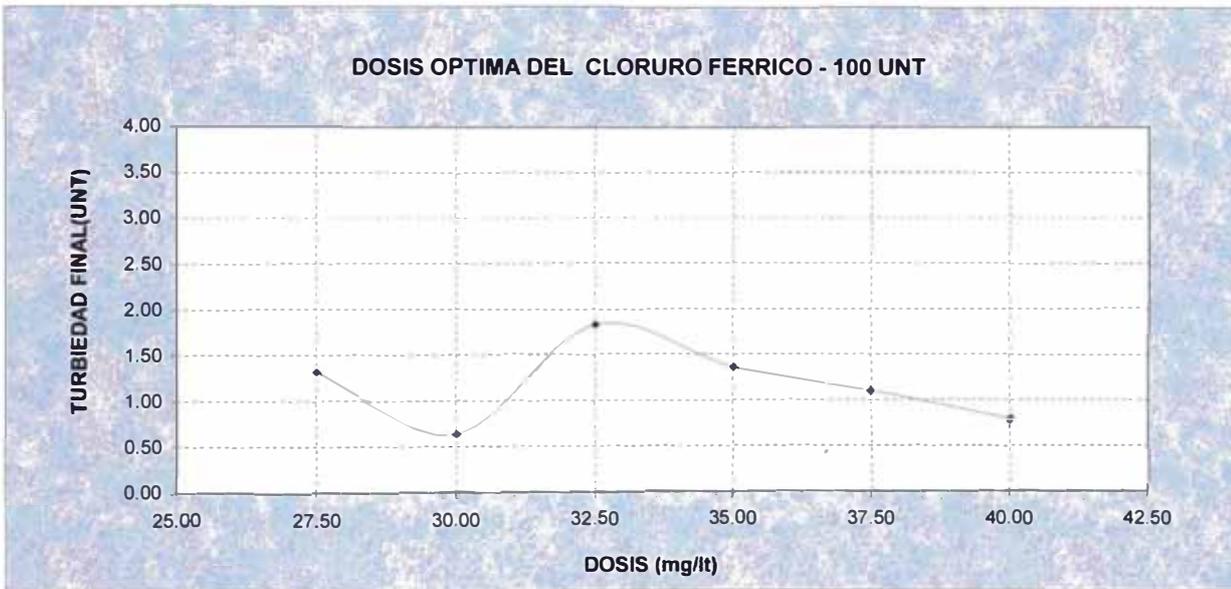
CUADRO Nº 7.20

DOSIS OPTIMA DEL CLORURO FERRICO - 100 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 100 UNT, pH 7,327, ALCALINIDAD 216 mg/lit CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 380 mg/lit CaCO <sub>3</sub>						
JARRA Nº	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)		FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm)			
	COAGULANTE (1%)		SEDIMENTACION T = ...15 min			
	DOSIS (mg/lit)	ml	pH	TURBIEDAD FINAL (UN)	INDICE DE WILCOB	EFICIENCIA %
1	27.50	5.50	6.694	1.32	C	98.68%
2	30.00	6.00	6.65	0.64	B	99.36%
3	32.50	6.50	6.584	1.83	B	98.17%
4	35.00	7.00	6.579	1.36	B	98.64%
5	37.50	7.50	6.57	1.10	B	98.90%
6	40.00	8.00	6.607	0.79	B	99.21%

pH del coagulante = 0,928

GRAFICA Nº 7.20

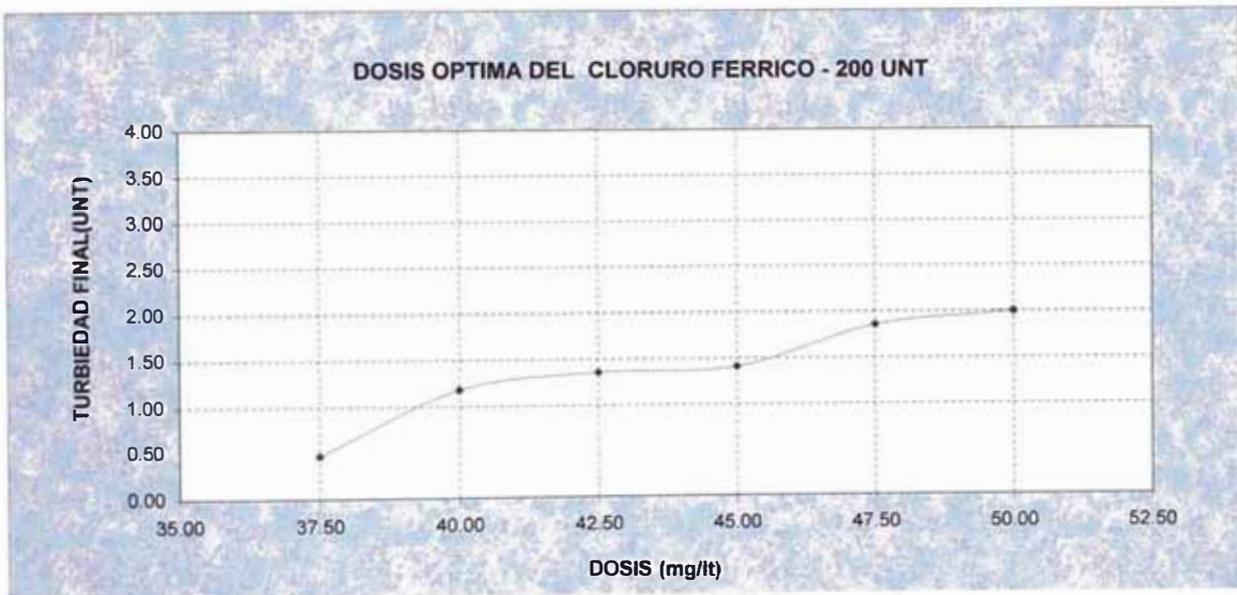


CUADRO N° 7.21

DOSIS OPTIMA DEL CLORURO FERRICO - 200 UNT

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 200 UNT, pH 7.549, ALCALINIDAD 218 mg/lt CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 458 mg/lt CaCO <sub>3</sub>						
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> (300 rpm)		FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> (40 rpm)			
	COAGULANTE (1%)		pH	TURBIEDAD FINAL (UN)	INDICE DE WILCOMB	EFICIENCIA %
	DOSIS (mg/lt)	ml				
1	37.50	7.50	6.473	0.47	C	99.77%
2	40.00	8.00	6.578	1.18	C	99.41%
3	42.50	8.50	6.528	1.36	C	99.32%
4	45.00	9.00	6.478	1.41	B	99.30%
5	47.50	9.50	6.506	1.86	B	99.07%
6	50.00	10.00	6.510	2.00	B	99.00%

GRAFICA N° 7.21



### 7.2.2. DOSIS OPTIMA DEL CLORURO FERRICO

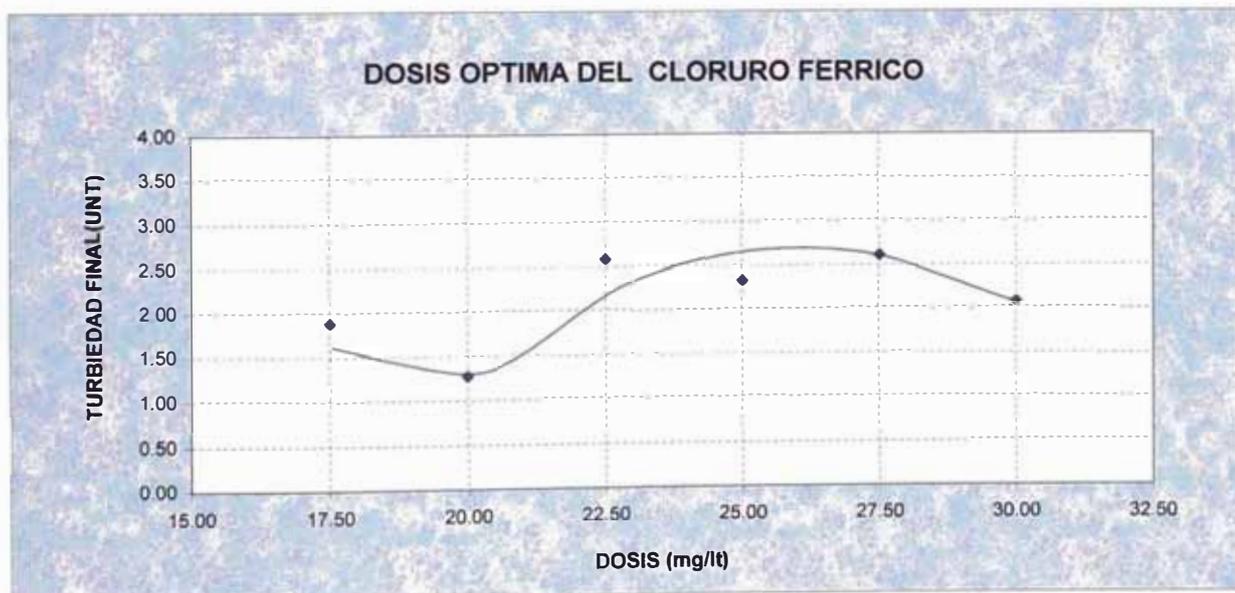
La dosis óptima del Cloruro Férrico para la muestra de agua en estudio, es aquella que logra mayor adsorción de partículas coloidales, obteniéndose con ella alta eficiencia en el proceso y agua de mejor calidad.

En la gráfica N° 7 se muestra que con dosis menores a 20 mg/lit, no es suficiente para desestabilizar las partículas coloidales por lo tanto la turbiedad residual es elevada y al incrementar la dosis de Cloruro Férrico los coloides se reestabilizan por lo tanto no se produce una buena coagulación.

CUADRO N° 7.22

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 50,7 UNT, pH 7,488, ALCALINIDAD 230 mg/lit CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 380 mg/lit CaCO <sub>3</sub>						
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)		FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm)			
	COAGULANTE (1%)		SEDIMENTACION T = ...15 min			
	DOSIS (mg/lit)	ml	pH	TURBIEDAD FINAL (UN)	INDICE DE WILCOMB	EFICIENCIA %
1	17.50	3.50	7.316	1.89	B	96.22%
2	20.00	4.00	7.316	1.28	B	97.44%
3	22.50	4.50	7.579	2.58	C	94.84%
4	25.00	5.00	7.388	2.32	C	95.36%
5	27.50	5.50	7.352	2.61	C	94.78%
6	30.00	6.00	7.250	2.08	D	95.84%

GRAFICA N° 7.22



### **7.2.3. EFECTO DEL PH**

La finalidad de los ensayos realizados es determinar el rango de pH que caracteriza a la muestra en estudio, la misma que está en función del tipo de coagulante a dosificar y la naturaleza del agua a tratar.

El cuadro y gráfica N° 7.23, nos muestran los resultados obtenidos mediante los ensayos de laboratorio, en los cuales se trabajó con pH 6, 7, 8 y 9.

De acuerdo a los resultados de los ensayos de laboratorio la mayor eficiencia se obtiene para pH = 7.5 (pH natural del agua) y pH = 8 con eficiencia de 97% y 98% respectivamente.

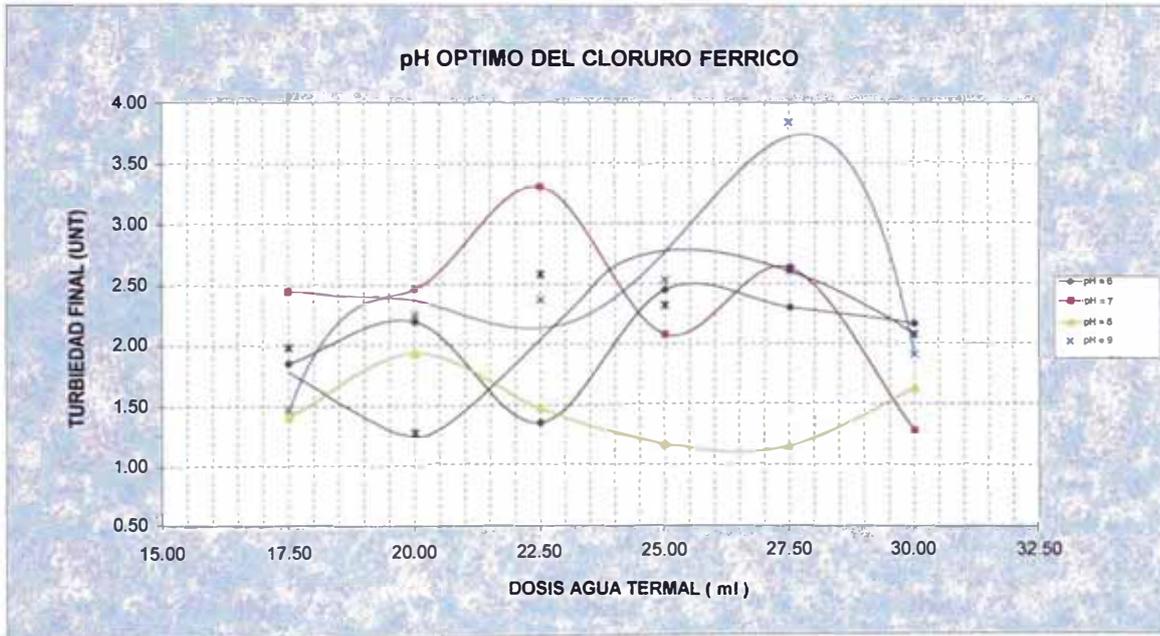
Evaluando los resultados, se determinó que la dosis de Cloruro Férrico se incrementa al elevarse el valor de pH. Para muestra de agua con la misma turbiedad la dosis varió de 20 mg/lt a 27 mg/lt, cuando el pH varía de 7.5 a 8 respectivamente, demostrándose que si la coagulación se realiza fuera del pH óptimo entonces se debe incrementar el coagulante y con ello la dosis del coagulante metálico.

**pH OPTIMO DEL CLORURO FERRICO**

CUADRO N° 7.23

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 50 UN, pH 7.488, ALCALINIDAD 230, DUREZA TOTAL 380																									
MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)												FLOCULACION T = 20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm)													
SEDIMENTACION T = 15 min																									
JARR A N°	pH = 6					pH = 7					pH = 7,5					pH = 8					pH = 9				
	Dosis mg/l	T <sub>r</sub>	pH <sub>r</sub>	I.W.	Efic. %	Dosis mg/l	T <sub>r</sub>	pH <sub>r</sub>	I.W.	Efic. %	Dosis mg/l	T <sub>r</sub>	pH <sub>r</sub>	I.W.	Efic. %	Dosis mg/l	T <sub>r</sub>	I.W.	pH <sub>r</sub>	Efic. %	Dosis mg/l	T <sub>r</sub>	pH <sub>r</sub>	I.W.	Efic. %
1	17.50	1.85	6.302	C	98%	17.50	2.44	7.098	C	95%	17.50	1.98	7.316	B	98%	17.50	1.42	B	7.381	97%	17.50	1.48	7.581	E	97%
2	20.00	2.19	6.250	C	98%	20.00	2.46	6.942	C	95%	20.00	1.28	7.316	B	97%	20.00	1.93	B	7.311	98%	20.00	2.25	7.613	C	96%
3	22.50	1.36	6.071	C	97%	22.50	3.31	6.866	C	93%	22.50	2.58	7.579	C	95%	22.50	1.48	C	7.223	97%	22.50	2.37	7.486	D	95%
4	25.00	2.45	6.090	C	95%	25.00	2.08	6.908	C	98%	25.00	2.32	7.388	C	95%	25.00	1.17	C	7.334	98%	25.00	2.53	7.639	B	95%
5	27.50	2.30	6.117	C	95%	27.50	2.83	6.813	B	95%	27.50	2.61	7.352	C	95%	27.50	1.15	D	7.137	98%	27.50	3.84	7.61	B	92%
6	30.00	2.17	6.103	C	98%	30.00	1.28	6.944	C	97%	30.00	2.08	7.250	D	98%	30.00	1.63	D	7.172	97%	30.00	1.91	6.758	A	98%

GRAFICA N° 7.23



#### **7.2.4. CONCENTRACIÓN ÓPTIMA DEL CLORURO FERRICO**

El objetivo de los ensayos es determinar la concentración óptima del Cloruro Férrico, para lo cual se considero que este coagulante metálico se hidroliza cuando su pH es superior a 2.5 y pierde gran parte su propiedad coagulante.

En el cuadro N° 7.24 se puede observar que con altas concentraciones de 10% y 5%, la turbiedad residual que se obtuvo no fue tan buena como con concentraciones bajas de 1% y 0.5%. En cambio, para una concentración de 0.1% pH se incrementa a 2.82, y los resultados se deterioran aún más debido a la hidrólisis parcial del coagulante. Ver gráfica N° 7.24.1.

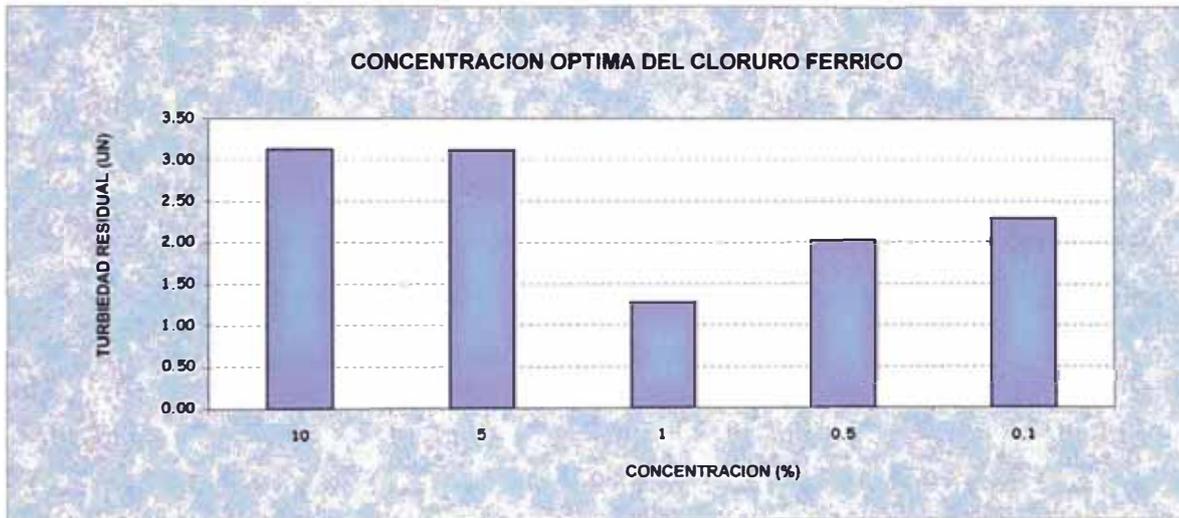
Se seleccionó la concentración de 1% cuyo pH es 2.00, con la cual se obtiene una turbiedad residual de 1.27 UNT y eficiencia del 97.46%.

CONCENTRACION OPTIMA DEL CLORURO FERRICO

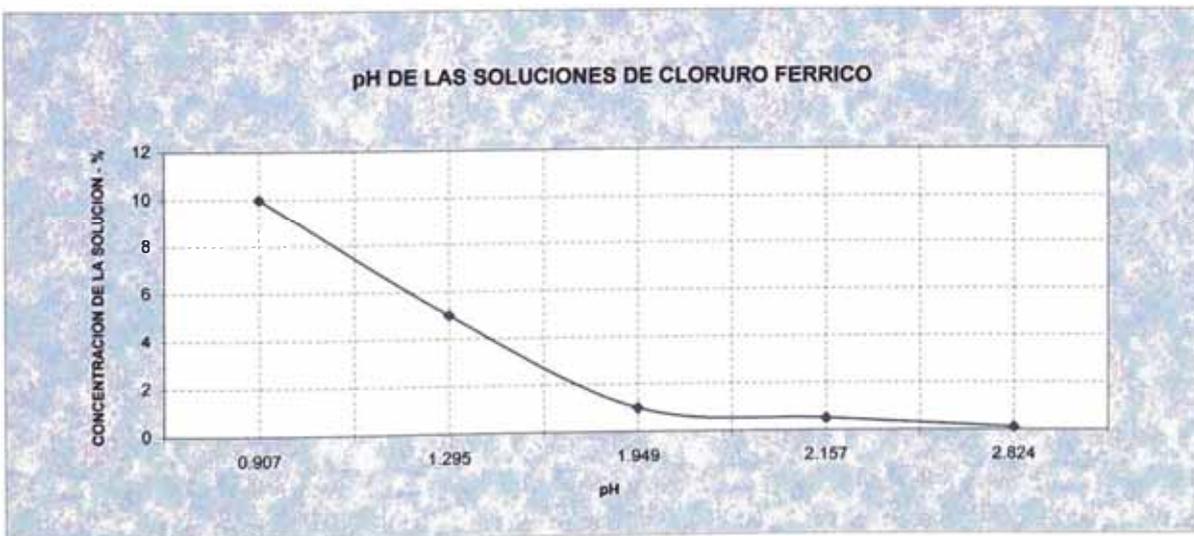
CUADRO Nº 7.24

J A R R A	AGUA CRUDA		DOSIFICACION				AGUA SEDIMENTADA			
	Turbiedad: 50 UNT	Dureza Total 380 mg/lit (CaCO <sub>3</sub> )	<b>Mezcla Rápida</b>		Gradiente	800 s <sup>-1</sup>	<b>Floculación</b>		Gradiente	50 s <sup>-1</sup> (40 rpm)
					Tiempo	5 Seg.	<b>Sedimentación</b>		tiempo	20 min.
									Tiempo	15 min.
	pH	Alcalinidad Total (mg/lit)	Dosis (mg/lit)	Dosis (ml)	Concentración	pH	Turbiedad Final (UN)	Indice de Willcomb	pH Final	Eficiencia (%)
1	7.488	230	20	0.4	10	0.907	3.13	A	6.481	93.74
2	7.488	230	20	0.8	5	1.295	3.12	C	6.598	93.76
3	7.488	230	20	4	1	1.949	1.27	C	6.552	97.46
4	7.488	230	20	8	0.5	2.157	2.02	B	6.639	95.96
5	7.488	230	20	40	0.1	2.824	2.29	B	6.600	95.42

GRAFICA Nº 7.24.1



GRAFICA Nº 7.24.2



### **7.2.5. TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA DEL CLORURO FERRICO**

El objetivo de los ensayos de laboratorio es determinar la intensidad de agitación y tiempo de retención que debe tener la muestra de agua en el momento de dosificar el coagulante, proporcionando las condiciones óptimas para que se lleve a cabo las reacciones de coagulación.

En la gráfica N° 7.25, se puede observar los resultados obtenidos mediante los ensayos de laboratorio, para lo cual se trabajó con una gradiente de  $800 \text{ s}^{-1}$  que proporciona a la muestra mayor energía, permitiendo distribuir homogéneamente el coagulante en toda la masa de agua.

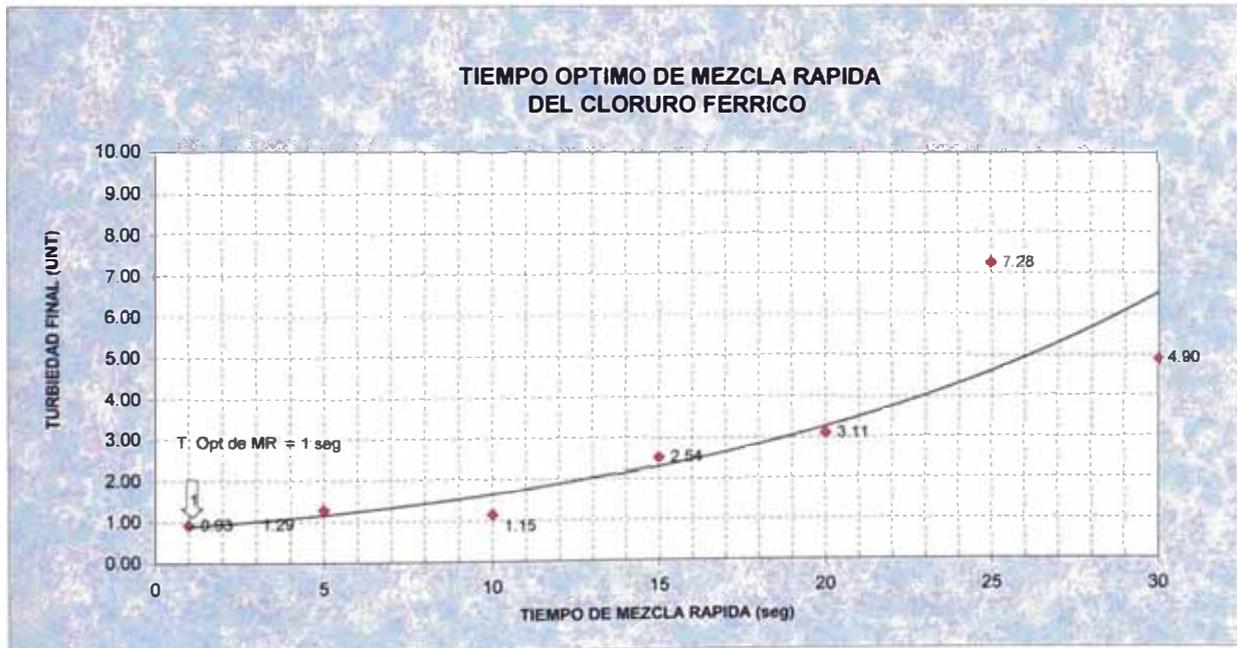
La adsorción de las partículas de turbiedad en la superficie del coagulante metálico se logra con un tiempo de contacto de 1 segundo. Además se observa que con tiempos muy cortos de mezcla rápida la eficiencia del proceso es mayor, con lo cual se puede concluir que el mecanismo de coagulación que predomina es el de adsorción de carga o neutralización.

CUADRO N° 7.25

TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA DEL CLORURO FERRICO

J A R R A	AGUA CRUDA		DOSIFICACION		AGUA SEDIMENTADA			
	Turbiedad:	50 UNT	<u>Mezcla Rápida</u>		<u>Floculación</u>			
	Dureza Total	380 mg/lit (CaCO <sub>3</sub> )	Gradiente	800 s <sup>-1</sup>	Gradiente	50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm )		
			Tiempo	Variable	Tiempo	20'		
			Concentración	1 %	<u>Sedimentación</u>	Tiempo 15'		
	pH	Alcalinidad Total (mg/lit)	Dosis (mg/lit)	Tiempo (seg)	pH	Turbiedad (UNT)	Indice de Willcomb	Eficiencia (%)
1	7.488	219	20	1	-	0.93	B	98.14%
2	7.488	219	20	5	6.954	1.29	B	97.42%
3	7.488	219	20	10	6.877	1.15	A	97.70%
4	7.488	219	20	15	6.878	2.54	A	94.92%
5	7.488	219	20	20	6.523	3.11	A	93.78%
6	7.488	219	20	25	6.883	7.28	A	85.44%
7	7.488	219	20	30	6.859	4.90	A	90.20%

GRAFICA N° 7.25

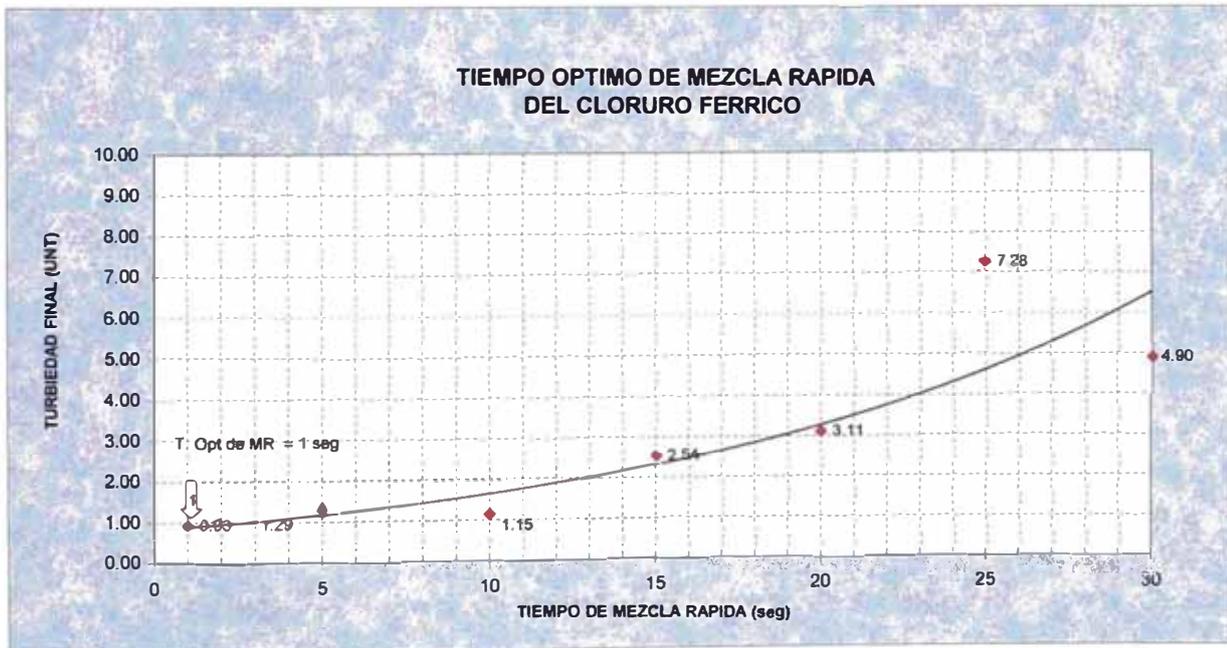


CUADRO N° 7.25

TIEMPO OPTIMO DE MEZCLA RAPIDA DEL CLORURO FERRICO

J A R R A	AGUA CRUDA		DOSIFICACION		AGUA SEDIMENTADA			
	Turbiedad:	50 UNT	<u>Mezcla Rápida</u>		<u>Floculación</u>			
	Dureza Total	380 mg/l (CaCO <sub>3</sub> )	Gradiente	800 s <sup>-1</sup>	Gradiente	50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm )		
			Tiempo	Variable	Tiempo	20'		
			Concentración	1 %	<u>Sedimentación</u>	Tiempo 15'		
	pH	Alcalinidad Total (mg/l)	Dosis (mg/l)	Tiempo (seg)	pH	Turbiedad (UNT)	Indice de Willcomb	Eficiencia (%)
1	7.488	219	20	1	-	0.93	B	98.14%
2	7.488	219	20	5	6.954	1.29	B	97.42%
3	7.488	219	20	10	6.877	1.15	A	97.70%
4	7.488	219	20	15	6.878	2.54	A	94.92%
5	7.488	219	20	20	6.523	3.11	A	93.78%
6	7.488	219	20	25	6.883	7.28	A	85.44%
7	7.488	219	20	30	6.859	4.90	A	90.20%

GRAFICA N° 7.25



#### **7.2.6. GRADIENTE Y TIEMPO OPTIMO DE FLOCULACION DEL CLORURO FERRICO**

El objetivo de los ensayos realizados es el de conocer la intensidad que debe dársele a la mezcla durante el proceso de floculación a fin de optimizar la remoción de partículas durante el proceso de sedimentación.

Los resultados de los ensayos de laboratorio se detallan en el cuadro N° 7.26.

Graficando en escalas aritméticas los valores de

$T_f$  versus

$T_o$

Los periodos de floculación para los diferentes valores de velocidad, se obtuvo la gráfica N° 7.26.1, de la cual se seleccionó el periodo total de floculación que es igual a 20 minutos, tiempo en el cual se produce la máxima eficiencia o mínimo valor de  $T_f/T_o$ .

Graficando en escalas aritméticas los valores de

$T_f$  versus

$T_o$

Gradiente de velocidad para los diferentes periodos de floculación se obtuvieron seis curvas en las cuales se observa que para cada gradiente de velocidad existe un tiempo óptimo de floculación que produce la máxima eficiencia (mínimo valor de  $T_f/T_o$ ) gráfica N° 7.26.2.

Se determinaron las coordenadas de cada punto de mínima de las curvas de la gráfica N° 7.26.2, los cuales se indican en el siguiente cuadro:

**VALORES CRITICOS DE PARÁMETROS DE FLOCULACION**

T min.	5	10	15	20	25	30
G s <sup>-1</sup>	100	80	55	47	33	20

Aplicando a estos puntos la teoría de los mínimos cuadrados para obtener las constantes “a” y “b” de la línea recta:

$$y = a + bx$$

$$\text{Log} T = x \quad \text{y} \quad \text{Log} G = y$$

Se determinaron los siguientes valores

$$a = 2.662$$

$$b = -0.828$$

con un grado de ajuste de 0.87. La ecuación final es por lo tanto:

$$\text{Log} G = 2.662 - 0.828 \text{ Log} T, \text{ ó}$$

$$\text{Log} (G \cdot T^{0.828}) = 2.662$$

Reagrupando y determinando los antilogaritmos, se encuentra la siguiente ecuación final:

$$G^{1.2077} \cdot T = 10^{3.215}$$

Obteniéndose la recta que esta representada en la gráfica N° 7.26.3 de la cual se obtiene los siguientes puntos:

T min.	5	10	15	20	25	30
G s <sup>-1</sup>	121	68	49	38	34	27

Si se selecciona tres compartimientos para la unidad de floculación, considerando el tiempo total de floculación de 20 minutos, se obtendrá los parámetros de diseño indicados en el siguiente cuadro.

COMPARTIMIENTO	PERIODO DE RETENCION (MIN)		GRADIENTE DE VELOCIDAD S <sup>-1</sup>
	PARCIAL	TOTAL	
1	7	7	92
2	7	14	52
3	7	21	37

Considerando las recomendaciones de proyecto para unidades de floculación, en el cual estipula un mínimo de 04 compartimientos, se diseñará una unidad de floculación con un periodo de retención de 5 minuto en cada uno de ello, obteniéndose gradientes de 121, 68, 49, 20 s<sup>-1</sup>.

CUADRO N° 7.26

ENSAYO DE JARRAS PARA DEFINIR PARAMETROS DE FLOCULACION DEL CLORURO FERRICO

1.- Equipo de Prueba de Jarras

Volumen de Jarras 2 lt.

2.- Agua cruda

Turbiedad 50 UI pH 7.5 Alcalinidad 210 mg/l CaCO<sub>3</sub>

3.- Dosis óptima

Coagulante Cloruro Férrico Dosis 20 mg/l (1%)

4.- Mezcla rápida

Velocidad 300 rpm Gradiente 600 s<sup>-1</sup> Tiempo de mezcla 1 seg.

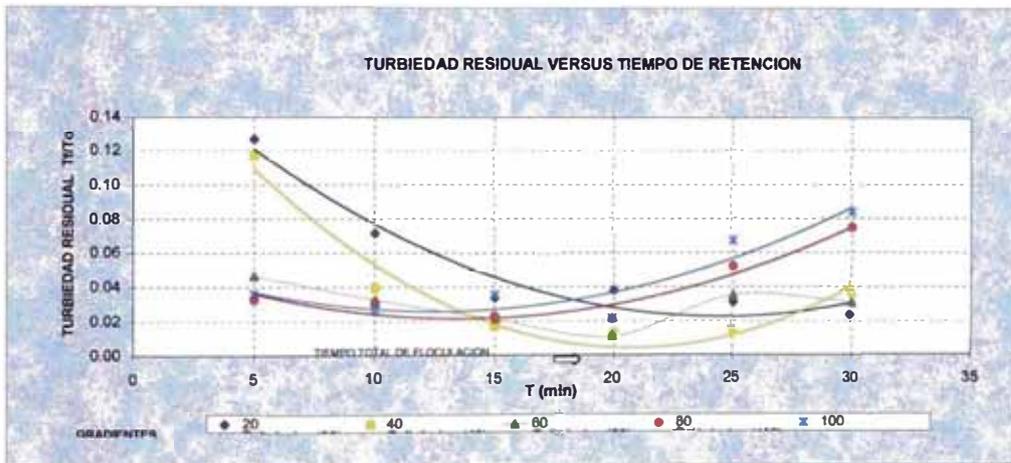
5.- Sedimentación

Profundidad de toma de muestra 5 cm Tiempo de sedimen 15 min.

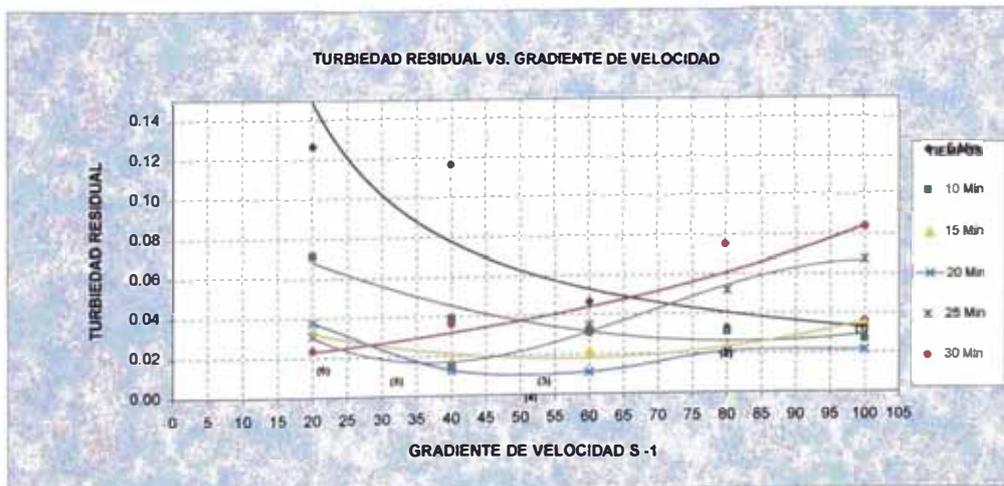
6.- Floculación

Velocidad rpm	Gradiente de Velocidad (s <sup>-1</sup> )	Tiempos de Floculación (min)											
		5 Min.		10 Min.		15 Min.		20 Min.		25 Min.		30 Min.	
		Tf	Tf/To	Tf	Tf/To	Tf	Tf/To	Tf	Tf/To	Tf	Tf/To	Tf	Tf/To
20	20	6.34	0.13	3.58	0.07	1.89	0.03	1.90	0.04	1.58	0.03	1.19	0.02
34	40	5.85	0.12	1.98	0.04	0.86	0.02	0.65	0.01	0.74	0.01	1.83	0.04
45	60	2.34	0.05	1.84	0.03	1.07	0.02	0.56	0.01	1.76	0.04	1.55	0.03
58	80	1.64	0.03	1.55	0.03	1.16	0.02	1.05	0.02	2.61	0.05	3.74	0.07
64	100	1.82	0.04	1.35	0.03	1.78	0.04	1.08	0.02	3.37	0.07	4.20	0.08

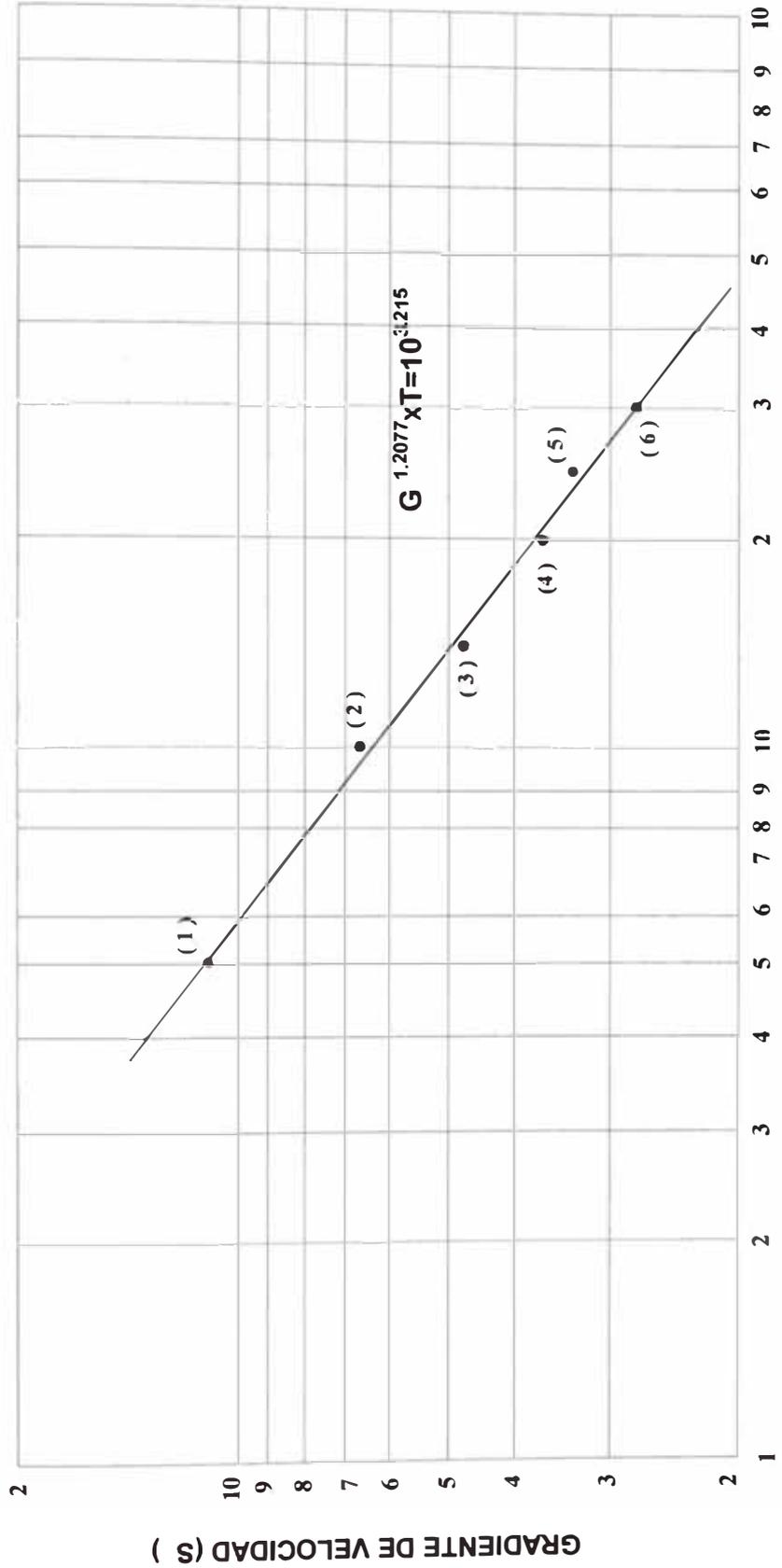
GRAFICA N° 7.26.1



GRAFICA N° 7.26.2



# GRADIENTE DE VELOCIDAD versus TIEMPO DE RETENCION



TIEMPO DE RETENCION ( minutos )

GRAFICA 7.35.3

### 7.2.7. DECANTACION DEL CLORURO FERRICO

Como se mencionó anteriormente para determinar la mejor tasa de decantación se trabajó con el Cloruro Férrico a una concentración del 1%. Un primer ensayo se efectuó considerando las gradientes obtenidos en los ensayos de floculación y para un segundo ensayo se incremento un gradiente de  $20 \text{ s}^{-1}$ .

Los cuadros N° 7.27 y 7.28 muestran los resultados de los ensayos realizados con concentración del coagulante metálico del 1% y gradientes de floculación de 92, 52,  $37 \text{ s}^{-1}$  y 121, 68, 49,  $20 \text{ s}^{-1}$ .

En las gráficas N° 7.27 y 7.28, se muestra las curvas de eficiencia en función a la gradiente establecido durante los ensayos de floculación.

Los cuadros N° 7.27.1 y 7.28.1, muestran los valores correspondientes al porcentaje total de remoción (Rt) la turbiedad removida (Tr) y la turbiedad final (Tf)

#### Interpretación de los Resultados.

1. Considerando que la elección de la carga superficial se puede realizar con el criterio que establece que la velocidad de sedimentación sea aquella que nos proporcione una máxima eficiencia remocional; de acuerdo a ello, se selecciona del cuadro N° 7.28.1 el valor de  $V_s = 0.037 \text{ cm/sg}$ .

El valor de  $V_s$  no se afectará de un coeficiente de seguridad ( C ), ya que considerando evaluaciones efectuadas en plantas con decantadores laminares de placas paralelas se ha determinado que estas unidades en la práctica producen eficiencias superiores a las determinadas en las pruebas de laboratorio.

3. Se calcula la velocidad media en el sedimentador

$$V_o = V_s (\text{Sen } \theta + L \text{ Cos } \theta )$$

Si suponemos que los módulos de sedimentación laminar tienen 1.20 m de alto (l) y 6 cm de separación (d), la longitud relativa del sedimentador (L) será de :

$$l = L = \frac{120}{6} = 20$$

Luego:

$$V_o = 0.037 * (0.866 + 20 * 0.50)$$

$$V_o = 0.402 \text{ cm/sg.}$$

4. La carga superficial aparente está dada por la expresión:

$$q = \frac{V_o * \text{Sen } \theta * 86400}{100}$$

Reemplazando:

$$q = \frac{0.402 * 0.866 * 86400}{100}$$

$$q = 300.8 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{d}$$

CUADRO N° 7.27

**PRUEBA DE DECANTACION**

1.- **Equipo de prueba de jarras**

Volumen de la jarra 2 lt.

2.- **Calidad del agua cruda**

Turbiedad 50 UT      pH 7.5      Alcalinidad : 230 mg/lit

3.- **Dosis Óptima**

Coagulante Cloruro Férrico      Dosis 20 mg/lit      Concentración 1%

4.- **Mezcla Rápida**

Gradiente de velocidad 800 s<sup>-1</sup>      rpm 300      Tiempo de mezcla : 1 seg.

5.- **Floculación**

Velocidad 62 , 40 , 32 . rpm      Gradiente 92 , 52 , 37 s<sup>-1</sup>

Tf 7,7,7 min.

6.- **Sedimentación**

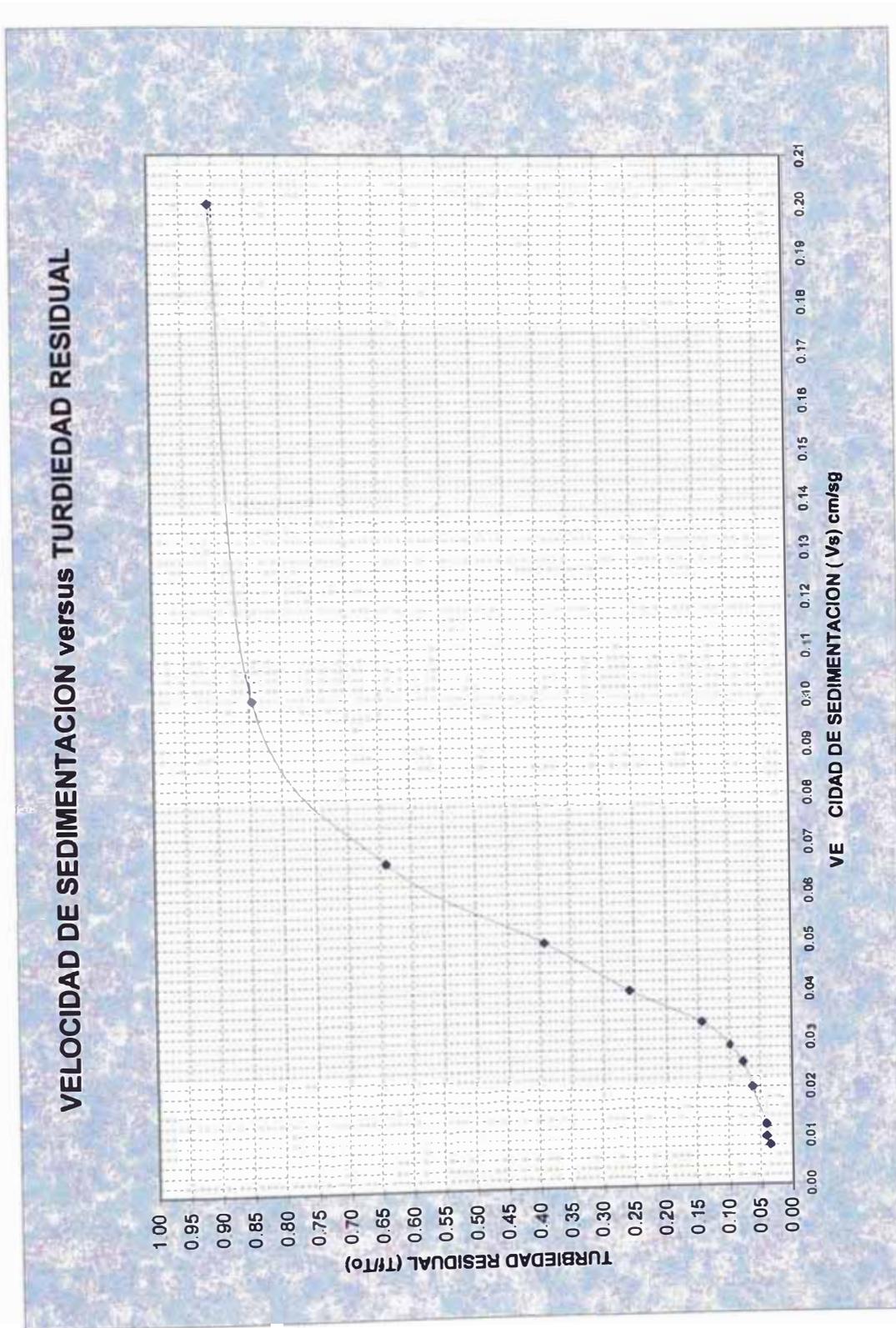
Profundidad de toma de muestra ( h ) 6 cm.

Tiempo de Sedimentación ( min. )	Velocidad de Sedimentación "Vs" (cm/sg)	Turbiedad (UN)		Tf/To
		Inicial To ( UN )	Final Tf (UN)	
0.5	0.2000	50	45.30	0.91
1.0	0.1000	50	42.30	0.85
1.5	0.0667	50	32.00	0.64
2.0	0.0500	50	19.60	0.39
2.5	0.0400	50	12.90	0.26
3.0	0.0333	50	7.18	0.14
3.5	0.0286	50	4.93	0.10
4.0	0.0250	50	3.83	0.08
5.0	0.0200	50	3.12	0.06
8.0	0.0125	50	2.00	0.04
10.0	0.0100	50	1.98	0.04
12.0	0.0083	50	1.71	0.03

CUADRO N° 7.27.1

SELECCIÓN DE LA TASA DE SEDIMENTACION

Turbiedad		50	$a =$	0.0083	$Cf =$	0.03
( 1 )	( 2 )	( 3 )	( 4 )	( 5 )	( 6 )	( 7 )
q	Vs	Co	$1-( Co - Cf )$	Rt	Tr	Tf
m/d	cm/s					
10	0.012	0.040	0.99	0.999	49.93	0.07
20	0.023	0.070	0.96	0.987	49.36	0.64
26	0.030	0.141	0.89	0.960	48.00	2.00
30	0.035	0.190	0.84	0.939	46.96	3.04
40	0.046	0.340	0.69	0.873	43.64	6.36
50	0.058	0.540	0.49	0.782	39.08	10.92
60	0.069	0.670	0.36	0.718	35.91	14.09
80	0.093	0.820	0.21	0.640	32.02	17.98
100	0.116	0.860	0.17	0.615	30.74	19.26
120	0.139	0.890	0.14	0.596	29.78	20.22
140	0.162	0.895	0.14	0.590	29.48	20.52
180	0.208	0.905	0.13	0.580	29.00	21.00



GRAFICA o 7.27

CUADRO N ° 7.28

PRUEBA DE DECANTACION

1.- Equipo de prueba de jarras

Volumen de la jarra 2 lt

2.- Calidad del agua cruda

Turbiedad 50 UT      pH 7.5      Alcalinidad: 230 mg/lit

3.- Dosis Óptima

Coagulante Cloruro Férrico      Dosis 20 mg/lit      Concentración 1%

4.- Mezcla Rápida

Gradiente de velocidad 800 s<sup>-1</sup>      rpm 300      Tiempo de mezcla : 1 seg.

5.- Floculación

Velocidad 72, 49, 44, 20 rpm      Gradiente 121, 68, 49, 20 s<sup>-1</sup>

Tf 5, 5, 5, 5 min.

6.- Sedimentación

Profundidad de toma de muestra ( h ) 6 cm.

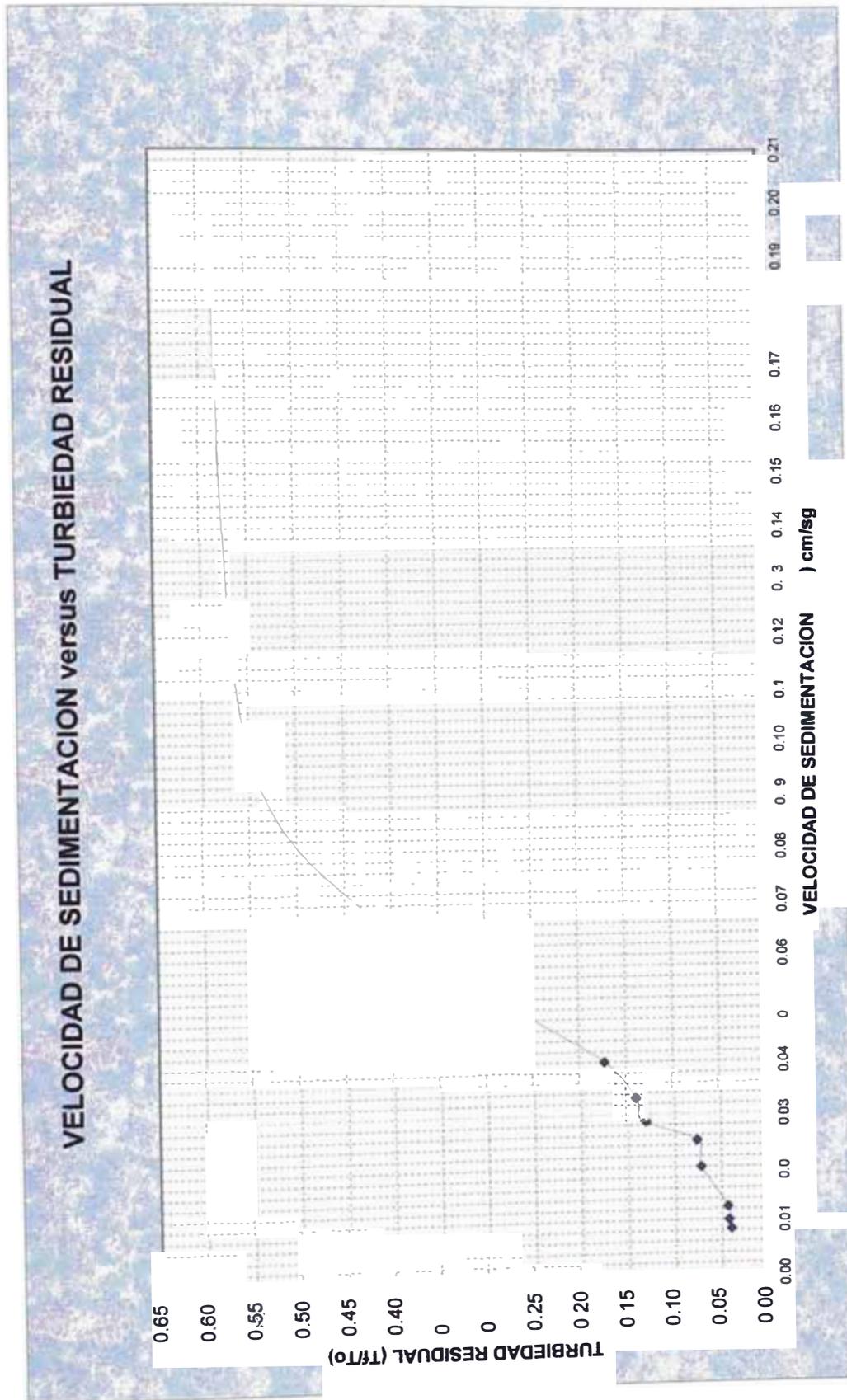
Tiempo de Sedimentación ( min. )	Velocidad de Sedimentación "Vs" (cm/sg)	Turbiedad (UN)		Tf/To
		Inicial To ( UN )	Final Tf (UN)	
0.5	0.2000	50	29.50	0.59
1.0	0.1000	50	27.60	0.55
1.5	0.0667	50	20.70	0.41
2.0	0.0500	50	13.30	0.27
2.5	0.0400	50	8.64	0.17
3.0	0.0333	50	6.93	0.14
3.5	0.0286	50	6.53	0.13
4.0	0.0250	50	3.79	0.08
5.0	0.0200	50	3.58	0.07
8.0	0.0125	50	2.15	0.04
10.0	0.0100	50	2.10	0.04
12.0	0.0083	50	1.98	0.04

CUADRO Nº 7.28.1

**SELECCION DE LA TASA DE SEDIMENTACION**

Turbiedad 50                       $\alpha =$  0.0125                       $C_f =$  0.04

( 1 ) q m/d	( 2 ) Vs cm/s	( 3 ) Co	( 4 ) 1-( Co - Cf )	( 5 ) Rt	( 6 ) Tr	( 7 ) Tf
10	0.012	0.040	1.00	1.000	50.00	0.00
20	0.023	0.080	0.96	0.991	49.54	0.46
30	0.035	0.140	0.90	0.968	48.40	1.60
32	0.037	0.161	0.88	0.960	48.00	2.00
40	0.046	0.230	0.81	0.931	46.53	3.47
50	0.058	0.350	0.69	0.878	43.92	6.08
60	0.069	0.430	0.61	0.840	42.01	8.00
80	0.093	0.540	0.50	0.784	39.19	10.81
100	0.116	0.560	0.48	0.768	38.40	11.60
120	0.139	0.570	0.47	0.759	37.94	12.06
140	0.162	0.580	0.46	0.751	37.54	12.46
180	0.208	0.590	0.45	0.742	37.08	12.93



RAFICA ° 7.28

### 7.3 TRATAMIENTO CON CLORURO FERRICO Y AGUA TERMAL

#### 7.3.1. NUEVA DOSIS OPTIMA DEL CLORURO FERRICO-AGUA

##### TERMAL

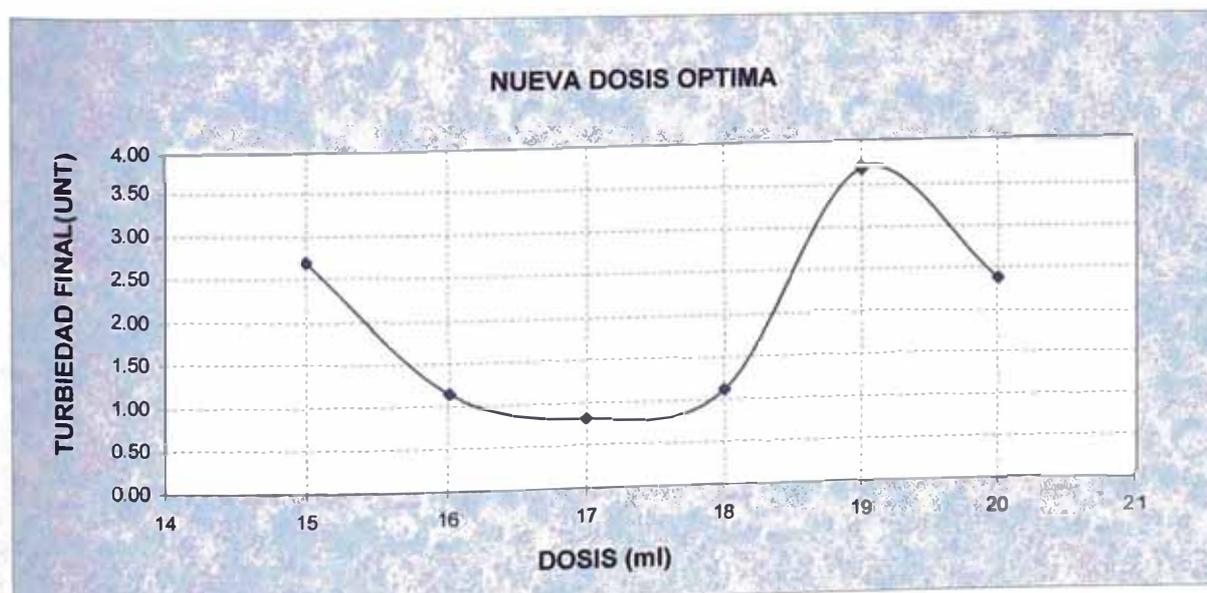
El mejor resultado de los ensayos se presentó cuando se empleó una cantidad superior de Cloruro Férrico (22,5 mg/l), que la correspondiente a la dosis óptima (20 mg/l), manteniéndose constante la dosis del Agua Termal (17 ml). Los resultados se presentan en el cuadro y gráfica N° 7.29.

Como se puede apreciar la dosificación adecuada del Agua Termal como ayudante de coagulación permite incrementar la eficiencia del proceso, esto se comprueba al comparar los resultados del tratamiento utilizando sólo el Cloruro Férrico con el cual se obtiene una turbiedad residual de 2,58 UT mientras que al aplicar el Cloruro Férrico y el Agua Termal se obtiene una turbiedad residual de 0.81 UT.

CUADRO N° 7.29

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 50 UNT, pH 7,50, ALCALINIDAD 219 mg/lit CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 380 mg/lit CaCO <sub>3</sub>					
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)		FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm) SEDIMENTACION T = ...15 min		
	CLORURO FERRICO DOSIS (mg/l)	AGUA TERMAL DOSIS (mg/l)	pH FINAL	TURBIEDAD FINAL (UN)	EFICIENCIA %
	1	22.5			
2	22.5	16	6.934	1.15	98%
3	22.5	17	6.929	0.81	98%
4	22.5	18	7.010	1.12	98%
5	22.5	19	6.951	3.69	93%
6	22.5	20	-	2.38	95%

GRAFICA N° 7.29

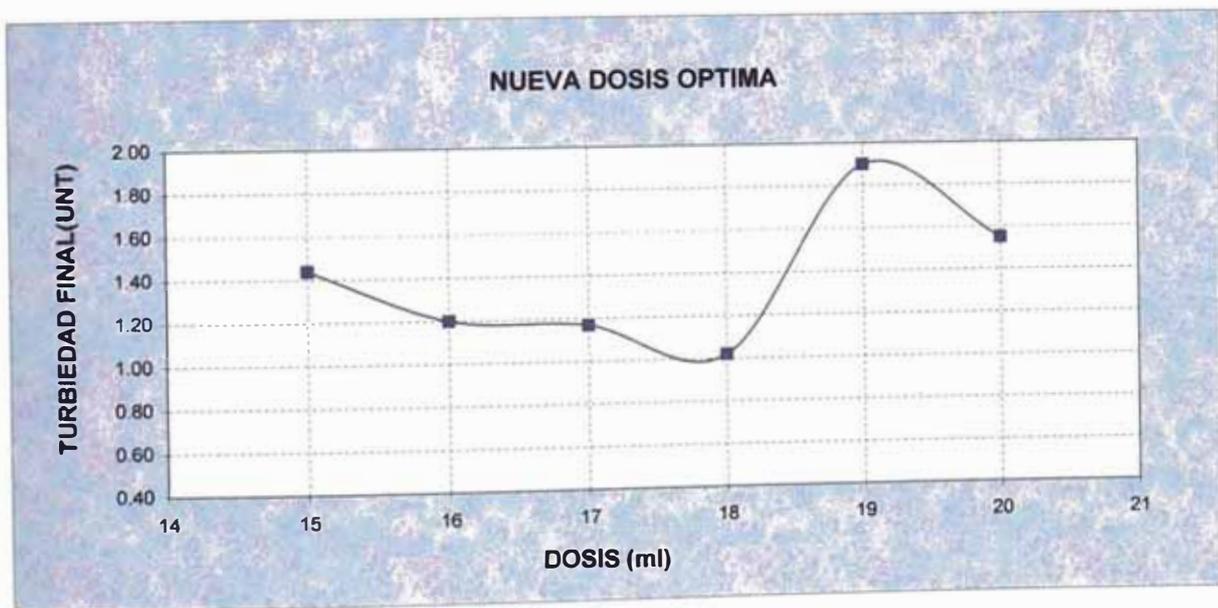


CUADRO N° 7.30

NUEVA DOSIS OPTIMA

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 50 UNT, pH 7,750, ALCALINIDAD 219 mg/lit CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 380 mg/lit CaCO <sub>3</sub>					
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)		FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm) SEDIMENTACION T = ...15 min		
	COLORURO FERRICO DOSIS (mg/l)	AGUA TERMAL DOSIS (ml)	pH FINAL	TURBIEDAD FINAL (UN)	EFICIENCIA %
1	15	15	6.977	1.44	97%
2	15	16	7.019	1.20	98%
3	15	17	7.052	1.17	98%
4	15	18	7.024	1.02	98%
5	15	19	7.033	1.90	96%
6	15	20	7.158	1.55	97%

GRAFICA N° 7.30

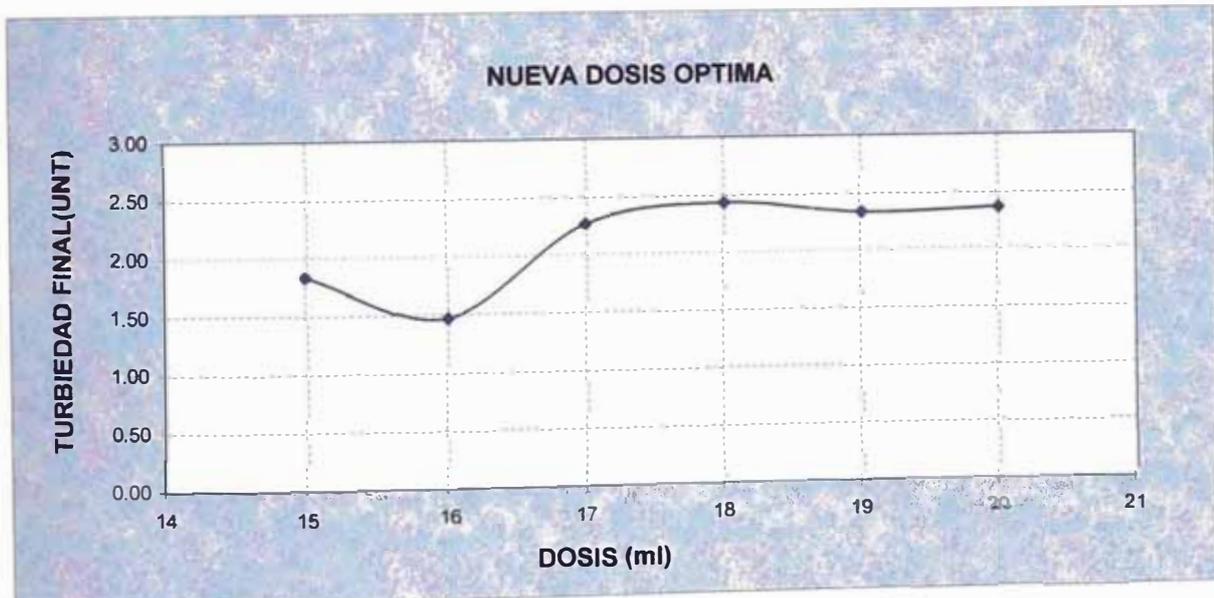


CUADRO N° 7.31

NUEVA DOSIS OPTIMA

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 50 UNT, pH 7,50, ALCALINIDAD 219 mg/l <sub>t</sub> CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 380 mg/l <sub>t</sub> CaCO <sub>3</sub>					
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)		FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm) SEDIMENTACION T = ...15 min		
	CLORURO FERRICO DOSIS (mg/l)	AGUA TERMAL DOSIS (ml)	pH FINAL	TURBIEDAD FINAL (UN)	EFICIENCIA %
1	17.5	15	7.124	1.84	96%
2	17.5	16	7.015	1.47	97%
3	17.5	17	7.011	2.27	95%
4	17.5	18	7.065	2.43	95%
5	17.5	19	7.123	2.33	95%
6	17.5	20	7.021	2.36	95%

GRAFICA N° 7.31

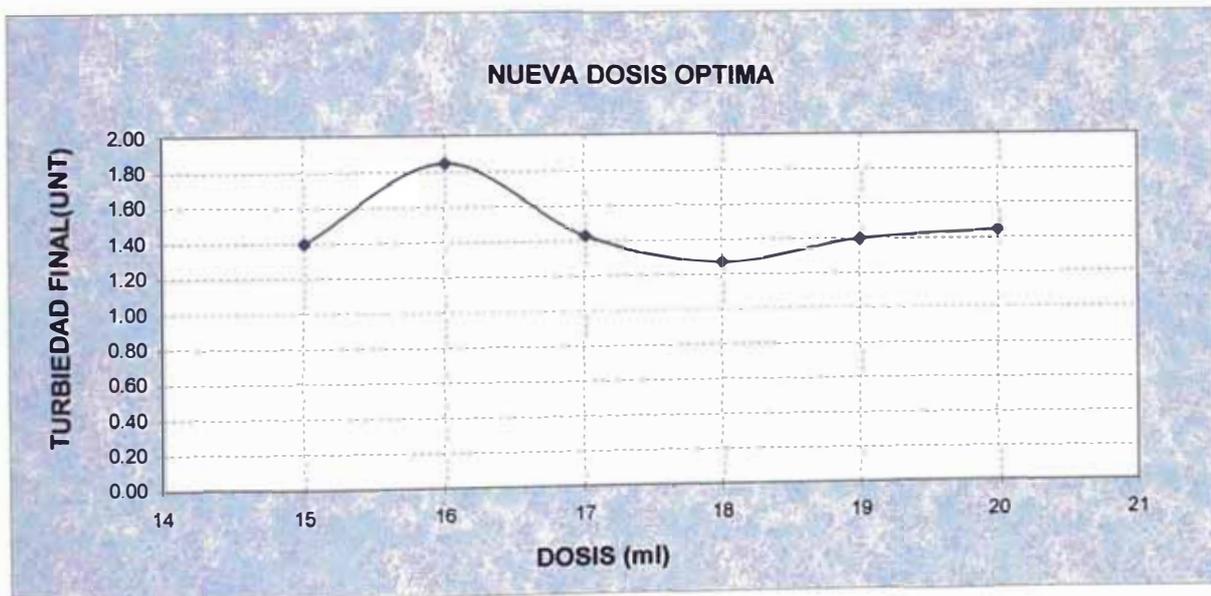


CUADRO N° 7.32

NUEVA DOSIS OPTIMA

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 50 UNT, pH 7,50, ALCALINIDAD 219 mg/lit CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 380 mg/lit CaCO <sub>3</sub>					
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)		FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm) SEDIMENTACION T = ...15 min		
	CLORURO FERRICO DOSIS (mg/l)	AGUA TERMAL DOSIS (ml)	pH FINAL	TURBIEDAD FINAL (UN)	EFICIENCIA %
1	20	15	7.119	1.40	97%
2	20	16	7.078	1.85	96%
3	20	17	7.024	1.43	97%
4	20	18	7.062	1.27	97%
5	20	19	7.165	1.40	97%
6	20	20	7.181	1.45	97%

GRAFICA N° 7.32

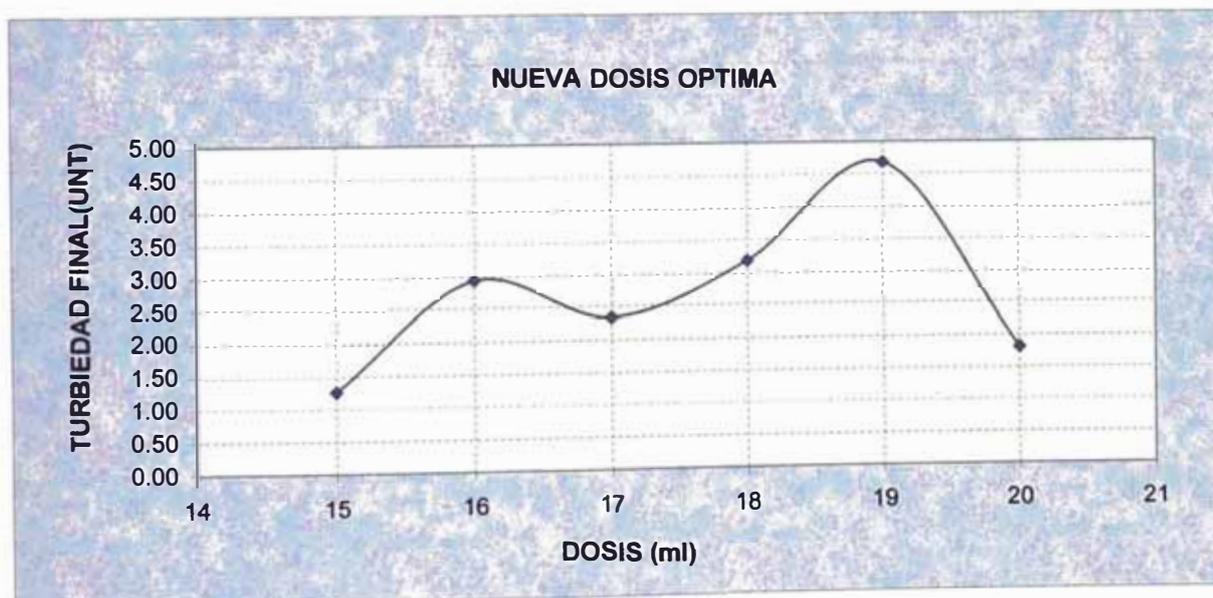


CUADRO N° 7.33

**NUEVA DOSIS OPTIMA**

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 50 UNT, pH 7,50, ALCALINIDAD 219 mg/lt CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 380 mg/lt CaCO <sub>3</sub>					
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)		FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm)		
	CLORURO FERRICO DOSIS (mg/l)	AGUA TERMAL DOSIS (mg/l)	SEDIMENTACION T = ...15 min		
			pH FINAL	TURBIEDAD FINAL (UN)	EFICIENCIA %
1	25	15	7.124	1.26	97%
2	25	16	6.955	2.93	94%
3	25	17	7.003	2.34	95%
4	25	18	7.053	3.18	94%
5	25	19	7.024	4.68	91%
6	25	20	7.001	1.81	96%

GRAFICA N° 7.33



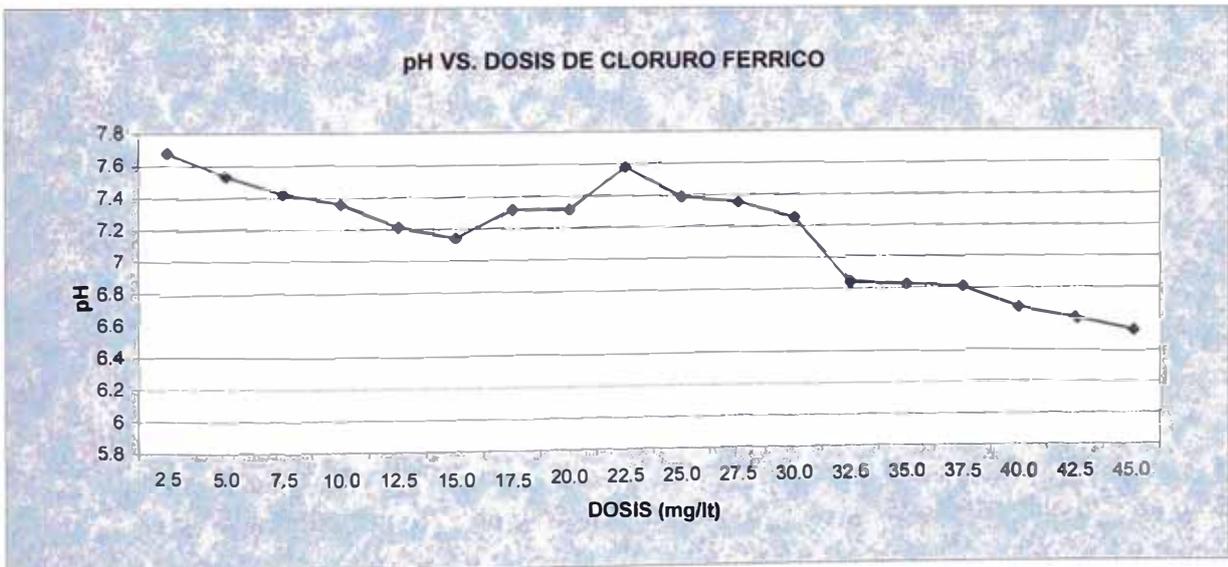
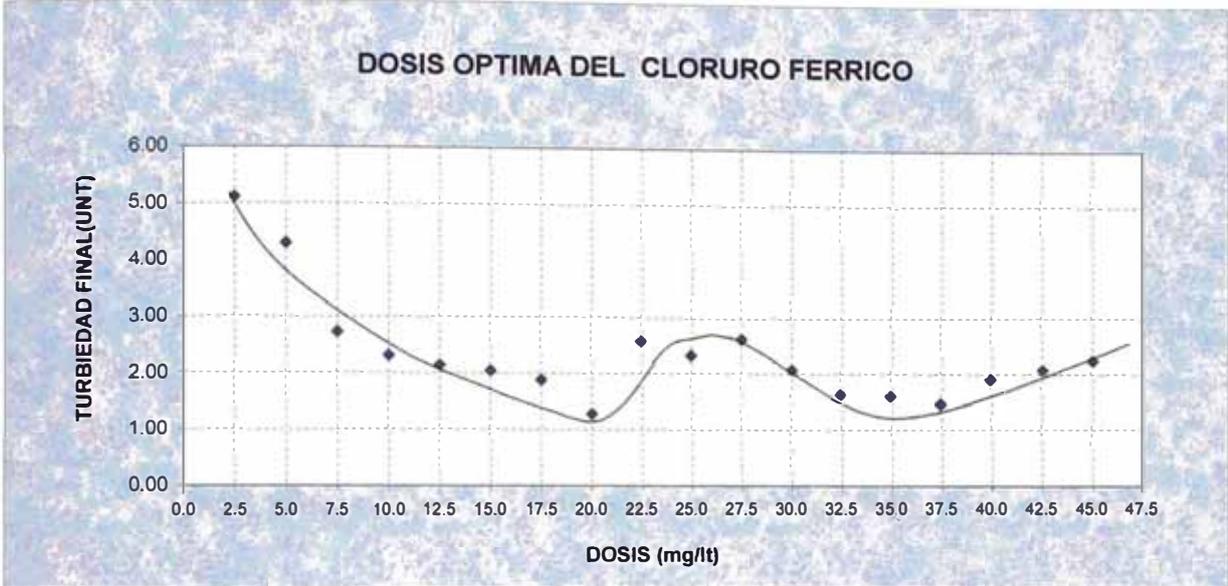
CUADRO N° 7.34

**ENSAYO DE JARRAS CON APLICACIÓN DE CLORURO FERRICO**

CALIDAD DEL AGUA CRUDA: TURBIEDAD 50,7 UNT, pH 7,58, ALCALINIDAD 230 mg/lt CaCO <sub>3</sub> , DUREZA TOTAL 380 mg/lt CaCO <sub>3</sub>						
JARRA N°	MEZCLA RAPIDA: T = 5 seg., G = 800 s <sup>-1</sup> ( 300 rpm)		FLOCULACION T = ...20 min G = 50 s <sup>-1</sup> ( 40 rpm)			
	CLORURO FERRICO (1%)		pH	TURBIEDAD FINAL (UN)	INDICE DE WILCOMB	EFICIENCIA %
	DOSIS (mg/lt)	ml				
1	2.5	0.50	7.542	5.11	A	89.78%
2	5.0	1.00	7.535	4.29	B	91.42%
3	7.5	1.50	7.422	2.73	B	94.54%
4	10.0	2.00	7.357	2.32	C	95.36%
5	12.5	2.50	7.211	2.15	C	95.70%
6	15.0	3.00	7.14	2.05	D	95.90%
1	17.5	3.50	7.316	1.89	B	96.22%
2	20.0	4.00	7.316	1.28	B	97.44%
3	22.5	4.50	7.579	2.58	C	94.84%
4	25.0	5.00	7.388	2.32	C	95.36%
5	27.5	5.50	7.352	2.61	C	94.78%
6	30.0	6.00	7.250	2.08	D	95.84%
1	32.5	6.50	6.838	1.64	B	98.72%
2	35.0	7.00	6.821	1.62	B	96.76%
3	37.5	7.50	6.807	1.48	B	97.04%
4	40.0	8.00	6.674	1.91	B	96.18%
5	42.5	8.50	6.606	2.09	C	95.82%
6	45.0	9.00	6.528	2.26	C	95.48%

El incremento de la dosis del Cloruro Férrico, produce una resuspensión parcial de los flóculos formados, pero se observa una disminución del pH.

GRAFICA N° 7.34 DIAGRAMA DE REMOCION DE TURBIEDAD - COAGULANTE CLORURO FERRICO



### **7.3.2. PARAMETRO DE FLOCULACION DEL AGUA TERMAL COMO AYUDANTE DE COAGULACION**

El objetivo de los ensayos es el de obtener los valores de gradiente de velocidad y tiempo de floculación que optimicen el proceso.

Con el pH natural del agua cruda (pH =7.5) y una dosis de Cloruro Férrico de 22.5 mg/lit y para el ayudante de coagulación de 17 ml se realizaron cuatro pruebas de floculación.

Los gradientes de velocidad seleccionados fueron de 20, 40, 60 y 80 s<sup>-1</sup> variándose los tiempos entre 5 y 30 minutos.

Los resultados obtenidos se indican en el cuadro N° 7.35.

La gráfica N° 7.35.1, muestra las curvas de los valores de  $T_f/T_o$  versus periodos de floculación para los diferentes valores de velocidad. A partir de esta gráficas, se seleccionó el periodo total de floculación que es igual a 25 minutos, tiempo en el cual se produce la máxima eficiencia o mínimo valor de  $T_f/T_o$ .

Graficando en escalas aritméticas los valores de:  $T_f/T_o$  versus gradientes de velocidad para los diferentes periodos de floculación se obtuvieron seis curvas en las cuales se observa que para cada gradiente de velocidad existe un tiempo óptimo de floculación que produce la máxima eficiencia (mínimo valor de  $T_f/T_o$ ) figura N° 7.35.2.

Se determinaron las coordenadas de cada punto de mínima de las curvas de la gráfica N° 7.35.2, los cuales se indica en el siguiente cuadro.

**VALORES CRITICOS DE PARAMETROS DE FLOCULACION**

<b>T min</b>	5	10	15	20	25	30
<b>G s<sup>-1</sup></b>	70	60	40	40	34	20

Aplicando a estos puntos la teoría de los mínimos cuadrados a la ecuación de una recta

$y = a + b x$  en la cual:

$\text{Log } T = x$  y  $\text{Log } G = y$

Se determinaron los siguientes valores:

$$a = 2.329$$

$$b = -0.611$$

con un grado de ajuste de 0.84. La ecuación final es por lo tanto:

$$\text{Log } G = 2.329 - 0.611 \text{ Log } T, \quad \text{o}$$

$$\text{Log } (G \times T^{0.611}) = 2.329$$

Reagrupando y encontrando los antilogaritmos, se encuentra la siguiente ecuación final:

$$G^{1.635} \times T = 10^{3.808}$$

Obteniéndose la recta que está representada en la figura N° 7.35.3, de la cual se obtienen los siguientes puntos:

<b>T min</b>	5	10	15	20	25	30
<b>G s<sup>-1</sup></b>	80	52	41	34	30	27

Si se seleccionan tres compartimentos para el floculador siendo el tiempo total de floculación de 25 minutos, se tendrán los parámetros de diseño indicados en el siguiente cuadro.

**CRITERIOS DE DISEÑO DE LA UNIDAD DE FLOCULACION**

COMPARTIMIENTO	PERIODO DE RETENCION (min)		GRADIENTE DE VELOCIDAD S <sup>-1</sup>
	PARCIAL	TOTAL	
1	8	8	57
2	8	16	39
3	9	25	30

Considerando cuatro compartimentos se consideró las siguientes gradientes de floculación

**CRITERIOS DE DISEÑO DE LA UNIDAD DE FLOCULACION**

COMPARTIMIENTO	PERIODO DE RETENCION (min)		GRADIENTE DE VELOCIDAD S <sup>-1</sup>
	PARCIAL	TOTAL	
1	6	6	71
2	6	12	47
3	6	18	36
3	7	25	20

CUADRO N° 7.35

**ENSAYO DE JARRAS PARA DEFINIR PARAMETROS DE FLOCULACION PARA CLORURO FERRICO Y AGUA TERMAL**

1.- **Equipo de Prueba de Jarras**

Volumen de Jarras 2 lt.

2.- **Agua cruda**

Turbiedad 50 UT      pH 7.5      Alcalinidad 219 mg/lit CaCO<sub>3</sub>

3.- **Dosis óptima**

Coagulante : Cloruro Férrico      Dosis 22,5 mg/lit  
Ayudante de Coagulación: Agua Termal      Dosis 17 ml

4.- **Mezcla rápida**

Velocidad 300 rpm      Gradiente 800 s<sup>-1</sup>      Tiempo de mezcl: 5 seg.

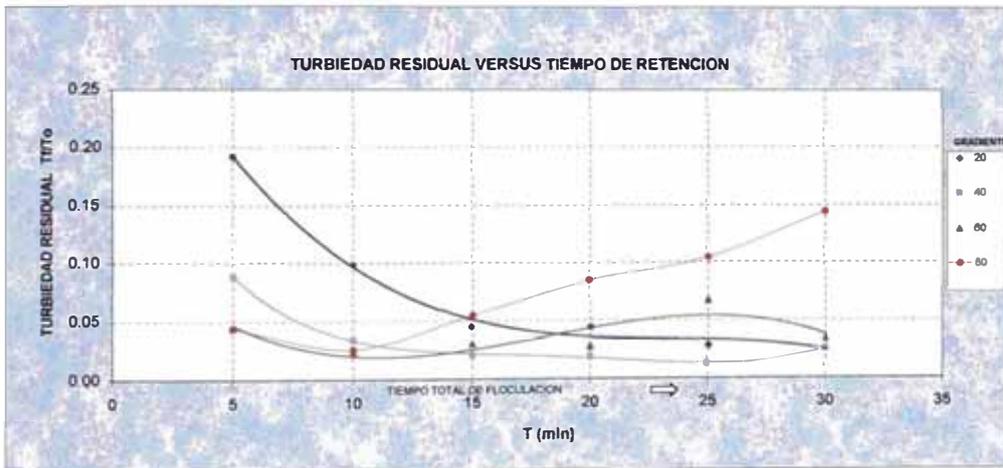
5.- **Sedimentación**

Profundidad de toma de muestra 9 cm      Tiempo de sedim: 15 min.

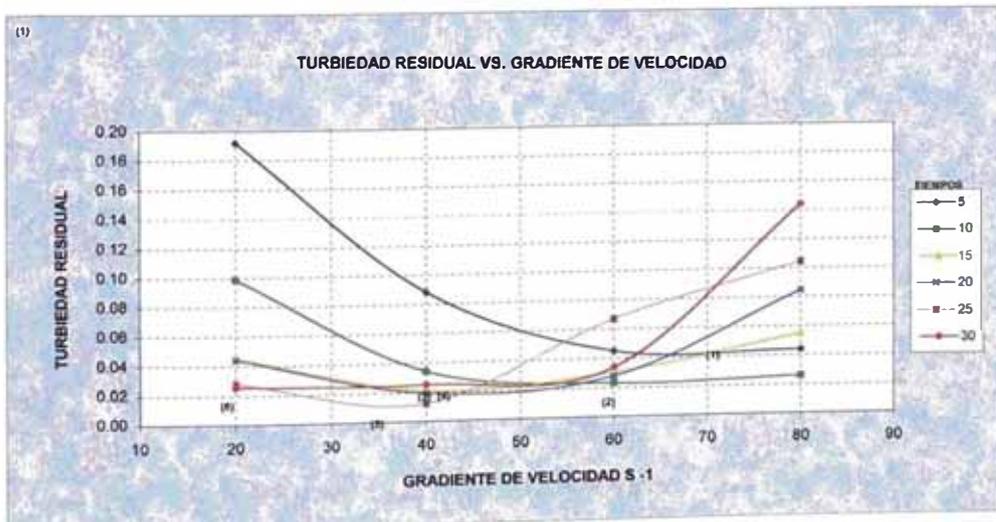
6.- **Floculación**

Velocidad rpm	Gradiente de Velocidad (s <sup>-1</sup> )	Tiempos de Floculación (min)											
		5 Min		10 Min		15 Min		20 Min		25 Min		30 Min	
		TI	TI/To	TI	TI/To	TI	TI/To	TI	TI/To	TI	TI/To	TI	TI/To
20	20	9.61	0.19	4.95	0.10	2.27	0.05	2.22	0.04	1.40	0.03	1.28	0.03
34	40	4.43	0.09	1.72	0.03	1.05	0.02	0.97	0.02	0.62	0.01	1.26	0.03
45	60	2.26	0.05	1.16	0.02	1.52	0.03	1.40	0.03	3.36	0.07	1.70	0.03
56	80	2.20	0.04	1.30	0.03	2.75	0.06	4.24	0.08	5.23	0.10	7.22	0.14

GRAFICA N° 7.35.1



GRAFICA N° 7.35.2



GRADIENTE DE VELOCIDAD versus TIEMPO DE RETENCION

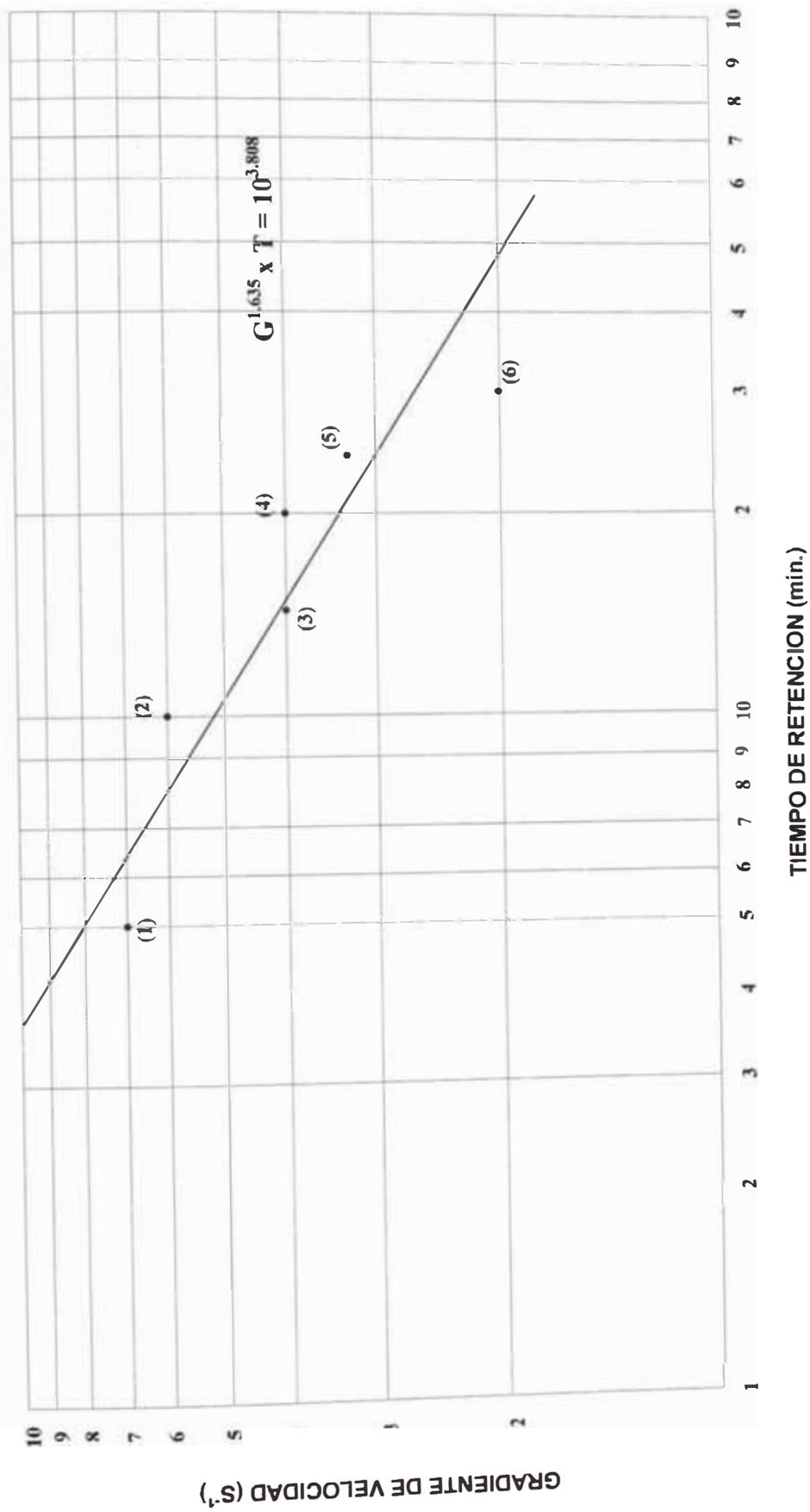


GRAFICO 7 35.3

### 7.3.3. DECANTACIÓN DEL CLORURO FERRICO-AGUA TERMAL

Para determinar la mejor tasa de decantación se realizaron dos pruebas, para la primera se consideró las gradientes resultantes del ensayo de floculación y para la segunda se incrementó un gradiente de  $20 \text{ s}^{-1}$  para el último compartimento.

Los cuadros N° 7.36 y 7.37, muestran los resultados de los ensayos realizados con gradientes de floculación de  $60, 39, 30 \text{ s}^{-1}$  y  $71, 47, 36$  y  $20 \text{ s}^{-1}$

En las gráficas N° 7.36 y 7.37, se muestran las curvas de velocidad de sedimentación versus la turbiedad residual.

Los cuadros N° 7.36.1 y 7.37.1, muestran los valores correspondientes al porcentaje total de remoción (Rt), turbiedad removida (Tr) y la turbiedad final (Tf)

#### Interpretación de los Resultados.

1. Considerando que la elección de la carga superficial se puede realizar con el criterio que establece que la velocidad de sedimentación sea aquella que nos proporcione una máxima eficiencia remocional; se selecciona del cuadro N° 7.37.1 el valor de  $V_s = 0.07 \text{ cm/sg}$ .

El valor de  $V_s$  no se afectará de un coeficiente de seguridad ( C ), ya que considerando evaluaciones efectuadas en plantas con decantadores laminares de placas paralelas se ha determinado que estas unidades en la práctica, producen eficiencias superiores a las determinadas en las pruebas de laboratorio.

2. Se calcula la velocidad media en el sedimentador

$$V_o = V_s (\text{Sen } \theta + L \text{ Cos } \theta )$$

Si suponemos que los módulos de sedimentación laminar tienen 1.20 m de alto (l) y 6 cm de separación (d), la longitud relativa del sedimentador (L) será de :

$$l = L = \frac{120}{6} = 20$$

Luego:

$$V_o = 0.07 ( 0.866 + 20*0.50)$$

$$V_o = 0.76 \text{ cm/sg.}$$

3. La carga superficial aparente está dada por la expresión:

$$q = \frac{V_o * \text{Sen } \theta * 86400}{100}$$

Reemplazando:

$$q = \frac{0.76 * 0.866 * 86400}{100}$$

$$q = 568.7 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{d}$$

CUADRO N° 7.36

**PRUEBA DE DECANTACION**

1 - **Equipo de prueba de jarras**

Volumen de la jarra 2 lt.

2 - **Calidad del agua cruda**

Turbiedad 50 UT      pH 7.5      Alcalinidad : 218 mg/lit

3 - **Dosis Óptima**

Coagulante Agua Termal      Dosis 17 ml      Concentración 100%

Coagulante Cloruro Férrico      Dosis 22.5 mg/lit      Concentración 1%

4 - **Mezcla Rápida**

Gradiente de velocidad 800 s<sup>-1</sup>      rpm 300      Tiempo de mezcla : 5 seg.

5 - **Floculación**

Velocidad 44, 32, 28 rpm      Gradiente 60, 39, 30 s<sup>-1</sup>

Tiempo 8, 8, 9 min.

6 - **Sedimentación**

Profundidad de toma de muestra ( h )      6 cm.

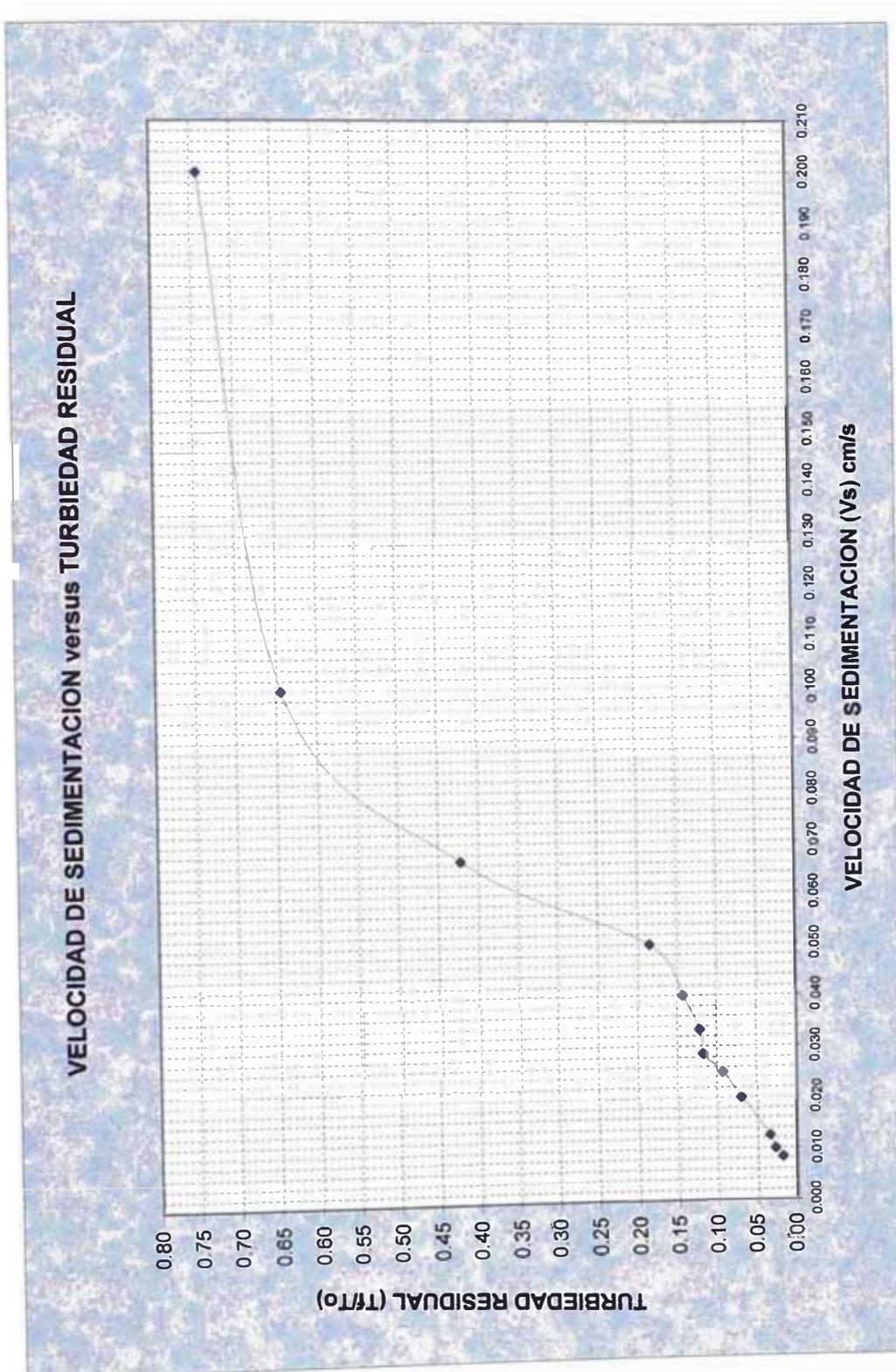
Tiempo de Sedimentación ( min. )	Velocidad de Sedimentación "Vs" (cm/sg)	Turbiedad (UN)		Tf/To
		Inicial To ( UN )	Final Tf (UN)	
0.5	0.2000	50	37.10	0.74
1.0	0.1000	50	32.20	0.64
1.5	0.0667	50	21.10	0.42
2.0	0.0500	50	9.24	0.18
2.5	0.0400	50	7.13	0.14
3.0	0.0333	50	6.08	0.12
3.5	0.0286	50	5.86	0.12
4.0	0.0250	50	4.60	0.09
5.0	0.0200	50	3.47	0.07
8.0	0.0125	50	1.70	0.03
10.0	0.0100	50	1.36	0.03
12.0	0.0083	50	0.89	0.02

CUADRO Nº 7.36.1

**SELECCIÓN DE LA TASA DE SEDIMENTACION**

Turbiedad      50                       $\alpha =$       0.0083                       $C_f =$       0.02

( 1 ) q m/d	( 2 ) Vs cm/s	( 3 ) Co	( 4 ) $1-( Co - C_f )$	( 5 ) Rt	( 6 ) Tr	( 7 ) Tf
10	0.012	0.04	0.98	0.997	49.84	0.16
20	0.023	0.09	0.93	0.977	48.84	1.16
28.65	0.033	0.12	0.89	0.960	48.00	2.00
30	0.035	0.13	0.89	0.957	47.87	2.13
40	0.046	0.16	0.86	0.942	47.08	2.92
50	0.058	0.31	0.71	0.875	43.75	6.25
60	0.069	0.44	0.58	0.814	40.71	9.29
80	0.093	0.63	0.39	0.721	36.07	13.93
100	0.116	0.68	0.34	0.693	34.64	15.36
120	0.139	0.70	0.32	0.679	33.97	16.03
140	0.162	0.71	0.31	0.672	33.58	16.42



GRAF CA Nº 7. 6

CUADRO N° 7.37

**PRUEBA DE DECANTACION**

1 - **Equipo de prueba de jarras**

Volumen de la jarra 2 lt. Paleta          Estatores         

2 - **Calidad del agua cruda**

Turbiedad 50 UT pH 7.5 Alcalinidad : 218 mg/lit

3 - **Dosis Óptima**

Coagulante Agua Termal Dosis 17 ml Concentración 100%

Coagulante Cloruro Férrico Dosis 22.5 mg/lit Concentración 1%

4 - **Mezcla Rápida**

Gradiente de velocidad 800 s<sup>-1</sup> rpm 300 Tiempo de mezcla : 5 seg.

5 - **Floculación**

Velocidad 51, 38, 32, 20 rpm Gradiente 71, 47, 36, 20 s<sup>-1</sup>

Tiempo 6, 6, 6, 7 min.

6 - **Sedimentación**

Profundidad de toma de muestra ( h ) 6 cm.

Tiempo de Sedimentación ( min. )	Velocidad de Sedimentación "Vs" (cm/sg)	Turbiedad (UN)		Tf/To
		Inicial To ( UN )	Final Tf (UN)	
0.5	0.2000	50	7.89	0.16
1.0	0.1000	50	7.00	0.14
1.5	0.0667	50	5.09	0.10
2.0	0.0500	50	3.86	0.08
2.5	0.0400	50	3.02	0.06
3.0	0.0333	50	2.63	0.05
3.5	0.0286	50	2.43	0.05
4.0	0.0250	50	2.30	0.05
5.0	0.0200	50	1.62	0.03
8.0	0.0125	50	1.18	0.02
10.0	0.0100	50	1.02	0.02
12.0	0.0083	50	0.97	0.02

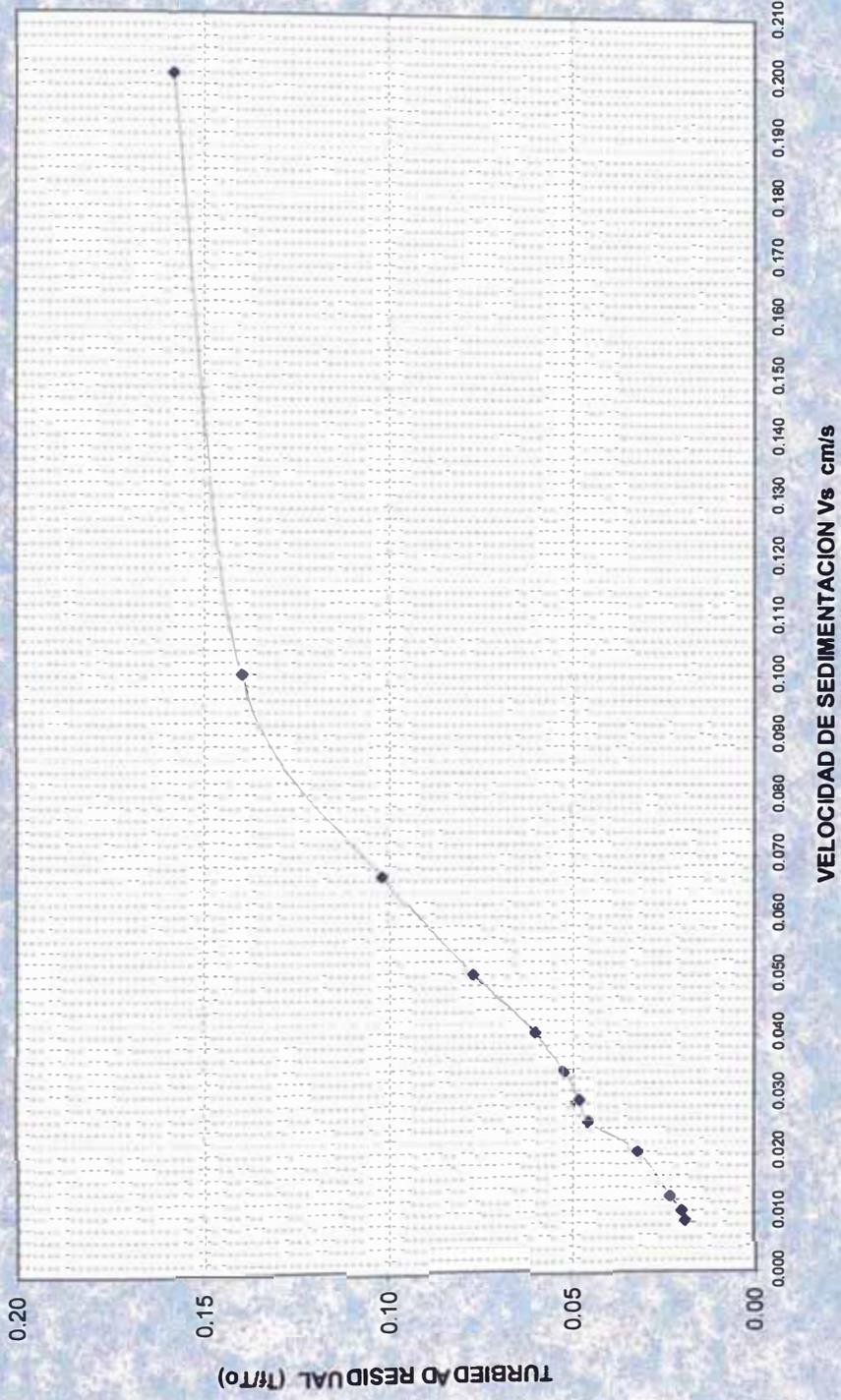
CUADRO Nº 7.37.1

**SELECCIÓN DE LA TASA DE SEDIMENTACION**

Turbiedad      50                       $\alpha =$       0.0083                       $C_f =$       0.02

( 1 ) q m/d	( 2 ) Vs cm/s	( 3 ) Co	( 4 ) $1 - ( Co - C_f )$	( 5 ) Rt	( 6 ) Tr	( 7 ) Tf
10	0.012	0.03	0.99	0.999	49.96	0.04
20	0.023	0.04	0.98	0.993	49.65	0.35
30	0.035	0.05	0.97	0.987	49.34	0.66
40	0.046	0.07	0.95	0.978	48.92	1.08
50	0.058	0.09	0.93	0.969	48.47	1.53
60	0.069	0.11	0.91	0.961	48.07	1.93
62	0.071	0.11	0.91	0.960	48.00	2.00
80	0.093	0.14	0.88	0.947	47.35	2.65
100	0.116	0.15	0.87	0.942	47.09	2.91
120	0.139	0.15	0.87	0.939	46.93	3.07
140	0.162	0.15	0.87	0.937	46.86	3.14

**VELOCIDAD DE SEDIMENTACION versus TURBIEDAD RESIDUAL**



**GRAFICA N° 7.37**

## **CAPITULO VIII**

### **DESCRIPCION DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO**

## **VIII. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO**

### **8.1 PROCESO DE TRATAMIENTO CON EL AGUA TERMAL**

Durante los ensayos realizados para esta alternativa de tratamiento, se ha demostrado que este tratamiento no es eficiente para muestras de agua cuya turbiedad es mayor a 50 UNT, ya que la eficiencia remocional obtenida disminuye al incrementar la turbiedad del agua.

Este proceso esta basado en la adición del Agua Termal como coagulante y se plantea para aguas que presentan turbiedad menor o igual a 50 UNT y con alta alcalinidad. La secuencia de este proceso se detalla en el esquema N° 8.1.

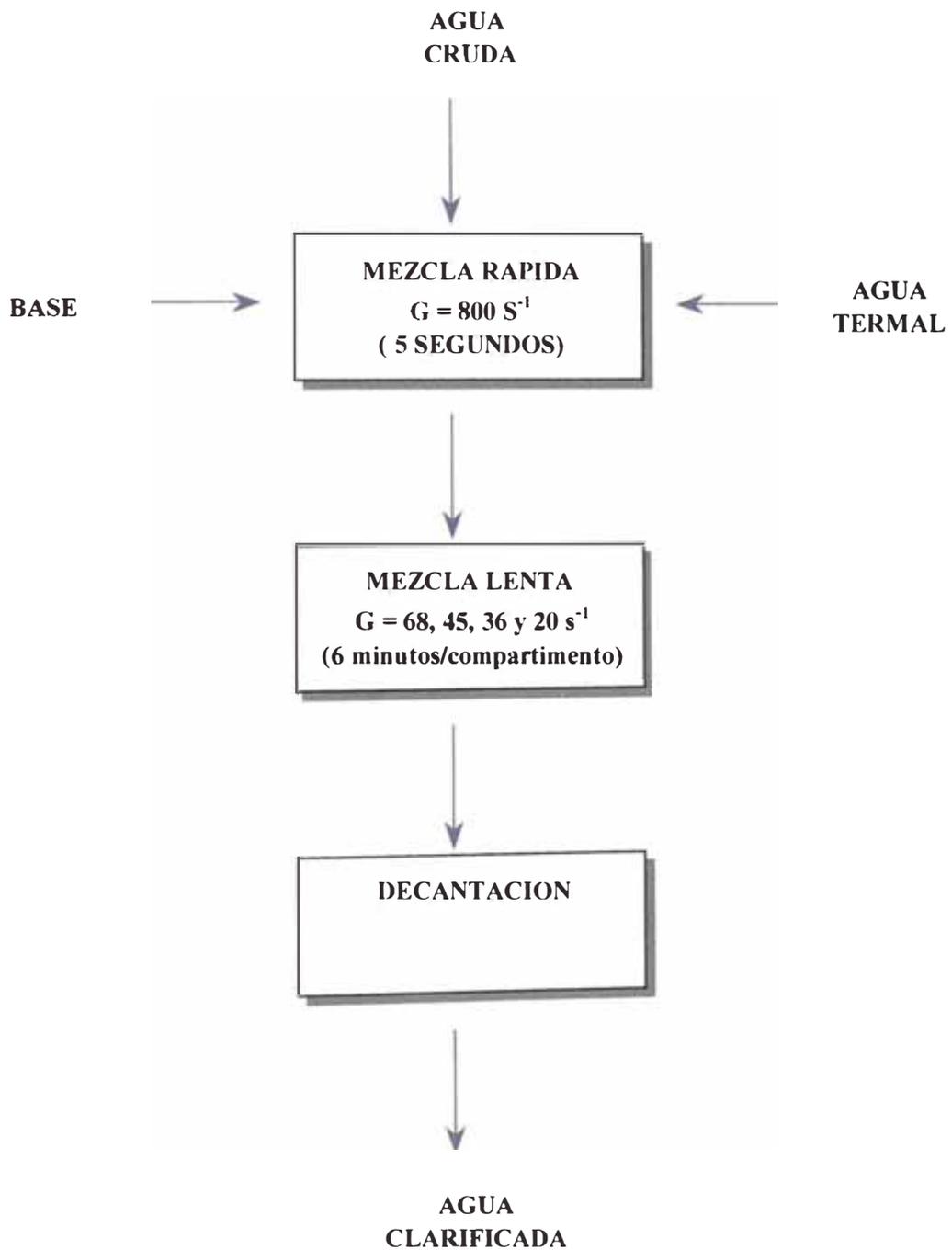
Se recomienda que el pH de la muestra de agua sea ligeramente básico (pH = 8), se utilizará para ello el hidróxido de sodio como modificador de pH. Posteriormente al acondicionamiento del agua cruda al pH óptimo, se dosifica el Agua Termal; la dosis dependerá de los niveles de turbiedad presentes en la muestra de agua.

Para que se lleve a cabo la homogenización del Agua Termal en toda la masa de agua se deberá aplicar un gradiente de velocidad de  $800 \text{ s}^{-1}$  durante un tiempo de contacto de 5 segundos, con el cual se obtiene mayor eficiencia en el proceso.

Una vez dispersado el Agua Termal se tiene que producir una agitación lenta en la masa de agua que permita el crecimiento del floc, lo cual se consigue con gradientes de velocidad de 68, 45, 36 y  $20 \text{ s}^{-1}$  para periodos de retención en cada compartimento de 6 minutos.

ESQUEMA N° 8.1

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO CON EL AGUA TERMAL



## **8.2 PROCESO DE TRATAMIENTO CON CLORURO FERRICO**

Para el proceso de tratamiento convencional no será necesario acondicionar el pH de la muestra de agua, ya que se trabaja con el pH natural de la muestra, es decir, pH= 7.5. El proceso de tratamiento, se detalla en el esquema N° 8.2.

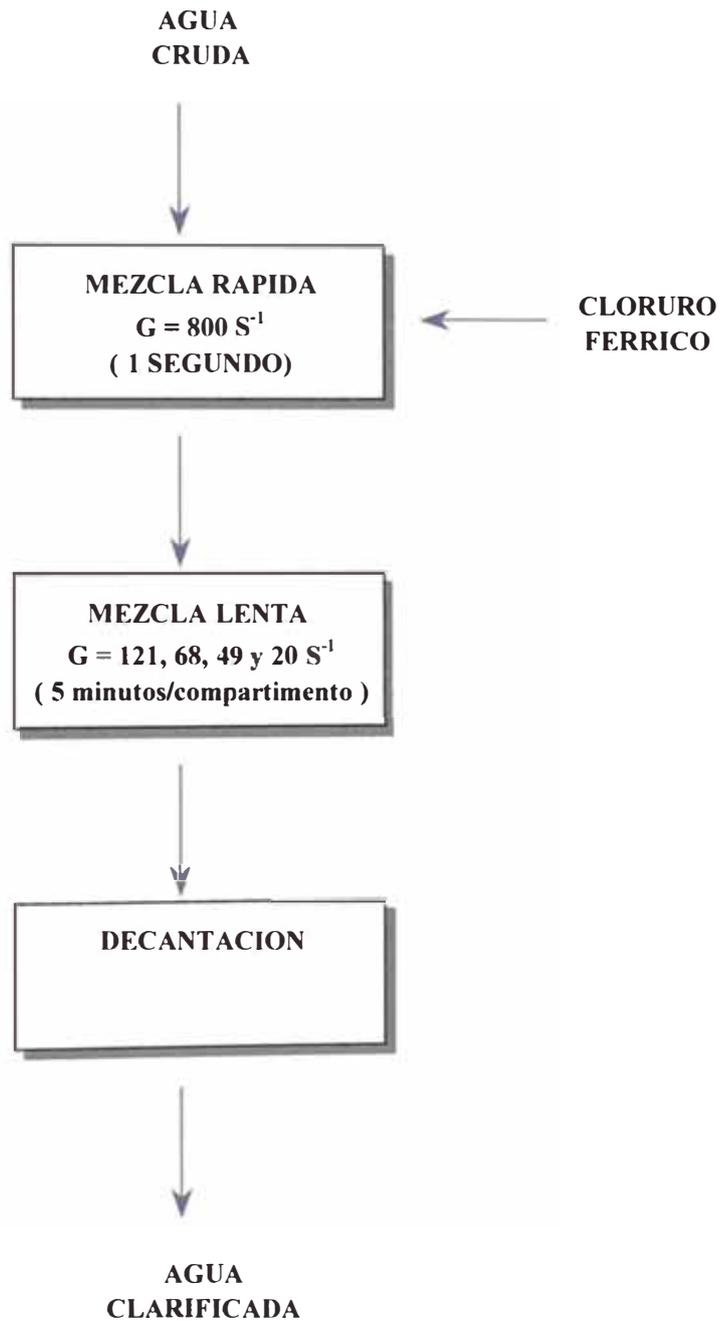
Considerando que el pH de la solución a dosificar debe ser siempre inferior a 4, para evitar la hidrólisis del coagulante, se adiciona la solución del Cloruro Férrico a una concentración del 1% ( $\text{pH}_{\text{sol.coagulante}} = 1.949$ ).

La distribución homogénea del Cloruro Férrico en la muestra de agua, al igual que en el proceso anterior, se efectúa con un gradiente de velocidad de  $800 \text{ s}^{-1}$  y tiempo de contacto de 1 segundo.

A continuación, se realiza la etapa floculación con la finalidad de optimizar la remoción de partículas durante el proceso de sedimentación, para lo cual se considera un tiempo total de floculación de 20 minutos y gradientes de velocidad de 121, 68, 49 y  $20 \text{ s}^{-1}$  con periodo de retención parcial de 5 minutos para cada compartimento.

**ESQUEMA N° 8.2**

**DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO CON EL CLORURO FERRICO**



### **8.3 PROCESO DE TRATAMIENTO CON EL AGUA TERMAL COMO AYUDANTE DE COAGULACION**

En esta alternativa de tratamiento se plantea el uso del Cloruro Férrico y el Agua Termal, este último como ayudante de coagulación. Esta alternativa se empleará para aguas que presenten alcalinidad alta y rango de turbiedad  $< 50$  UNT.

El proceso de tratamiento propuesto, se detalla en el esquema N° 8.3.

La dosis del Cloruro Férrico y el Agua Termal se adiciona a la muestra de agua cruda sin ser necesario acondicionar el pH.

En este proceso se observa un incremento de la dosis óptima de Cloruro Férrico en relación con la dosis aplicada cuando se emplea únicamente el Cloruro Férrico como coagulante.

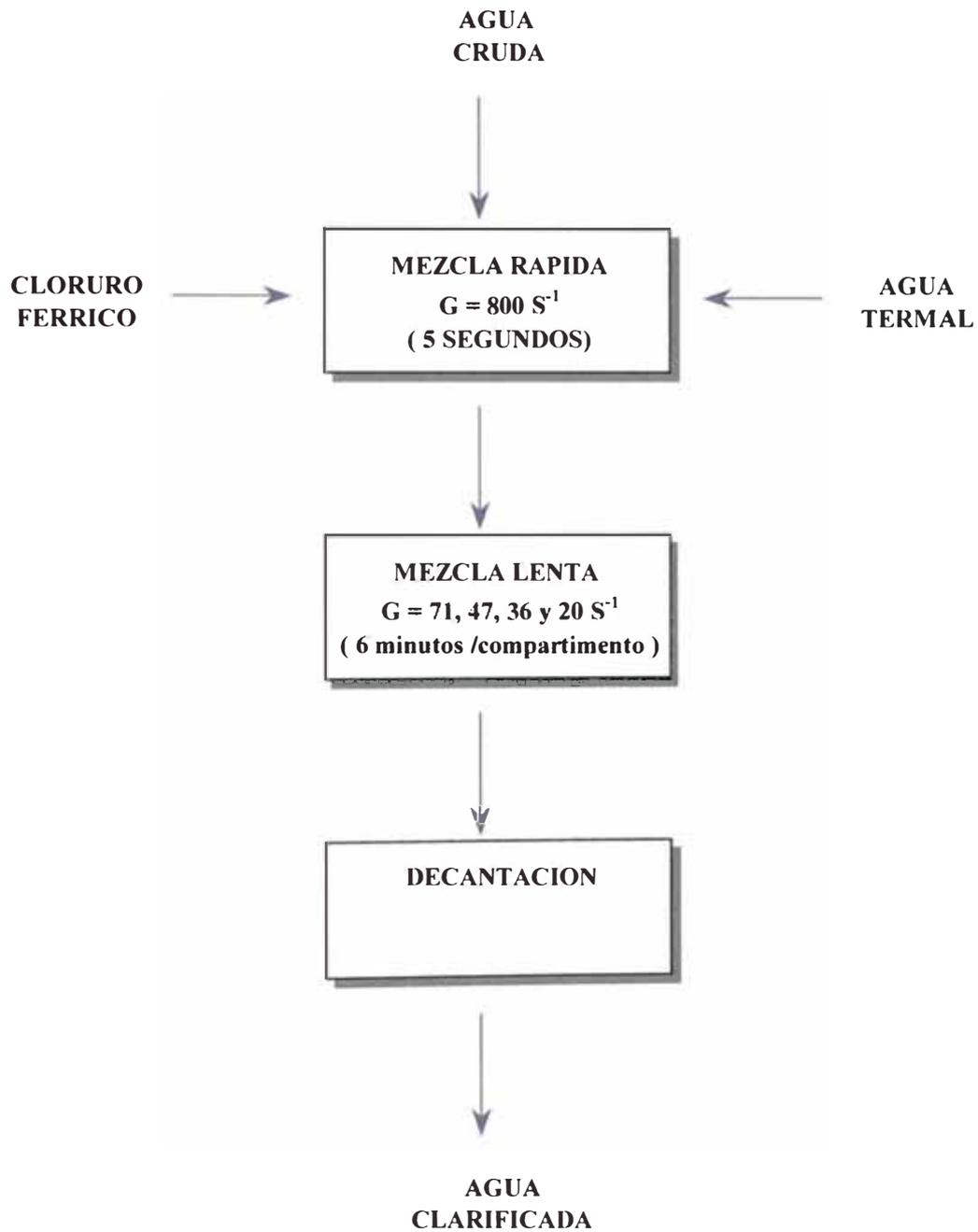
El Cloruro Férrico y el Agua Termal se aplican en forma consecutiva, lográndose dispersarse en forma instantánea en toda la masa de agua, al aplicar un gradiente de  $800 \text{ s}^{-1}$  durante un tiempo de mezcla rápida de 5 segundos.

A continuación, el agua es sometida a la etapa de floculación, mediante el cual se reúne a las partículas desestabilizadas para formar partículas de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor facilidad.

La prueba de floculación se realizó con gradientes de 20, 40, 60 y  $80 \text{ s}^{-1}$  y tiempos de floculación de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos. Para el diseño de la unidad de floculación se consideró las gradientes de velocidad de 71, 47, 36 y  $20 \text{ s}^{-1}$  con periodo de retención total de 25 minutos y tiempos de retención parcial de 6 minutos para cada compartimento.

ESQUEMA N° 8.3

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO CON CLORURO FERRICO Y AGUA TERMAL



## **CAPITULO IX**

### **EVALUACION TECNICA ECONOMICA**

## **IX. EVALUACION TECNICA – ECONOMICA:**

### **9.1. EVALUACION TECNICA:**

Los ensayos de laboratorio nos ha permitido determinar que la turbiedad que está presente en la muestra de agua utilizada, se logra eliminar en mayor porcentaje utilizando el Agua Termal como ayudante de coagulación.

El tratamiento con el Agua Termal, se utilizará solo para aguas claras, es decir con turbiedad menor o igual a 50 UNT, alcalinidad alta 218 mg/lit CaCO<sub>3</sub> y pH= 8. La tasa de decantación obtenida es de 25 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d.

En la alternativa de tratamiento con el Agua Termal, se debe considerar que al dosificar el Agua Termal, se incorpora partículas de hierro y según las guías de la OMS para la calidad del agua de bebida, recomienda no sobrepasar el límite de 0.3 mg/lit de hierro; en caso que el agua tratada supere este valor, la remoción de estas partículas se realizará en una unidad de filtración, la cual permitirá reducir las partículas de hierro presentes en el agua, incrementar el porcentaje de remoción de la turbiedad y el color presente.

La segunda alternativa de tratamiento se realiza utilizando únicamente Cloruro Férrico, es aplicable también para aguas con turbiedad de 50 UNT, pH casi neutro (pH=7.5) y alcalinidad alta 230 mg/lit de CaCO<sub>3</sub>. La tasa de decantación alcanzada con esta alternativa es de 32 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d. Asimismo, se demostró que al utilizar esta alternativa la dosis óptima del Cloruro Férrico es de 20 mg/lit.

Para la tercera alternativa, el Agua Termal se emplea como ayudante de coagulación, lográndose incrementar la tasa de decantación a 62 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d y la reducción de la turbiedad a 0.81 UNT, el único inconveniente es el incremento de la dosis del Cloruro Férrico en 22.5 mg/lit, comparando con los resultados del tratamiento al utilizar sólo el Cloruro Férrico para una dosis del 22.5 mg/lit se obtiene una turbiedad residual de 2.58 UNT.

## **9.2. EVALUACION ECONOMICA**

En la evaluación económica no se ha considerado los costos de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento de agua potable, a razón de que esta investigación sólo nos proporciona el requerimiento de los insumos químicos necesarios para lograr la clarificación del agua.

Para iniciar el análisis económico, es imprescindible tener los gastos de los productos químicos utilizados para cada alternativa planteada, el costo para transportar tanto el Agua Termal desde la fuente de Agua Termal hasta el punto de tratamiento y el costo del coagulante metálico Cloruro Férrico.

Además, para realizar el estudio económico comparativo, es necesario determinar el costo de las alternativas propuestas, asimismo el costo de la clarificación del agua mediante el tratamiento convencional, utilizando para ello el Cloruro Férrico (solución) como coagulante.

A continuación se detalla el análisis de costo para cada una de las alternativas (precios establecidos a la fecha).

### **9.2.1. COSTO DEL INSUMO DE TRATAMIENTO CON EL AGUA TERMAL**

Como se indico anteriormente, en esta alternativa de tratamiento se utilizó únicamente el Agua Termal como coagulante para la reducción de la turbiedad.

El requerimiento para el tratamiento de 1 m<sup>3</sup> de agua cruda es:

$$\text{Agua Termal} = 17 \text{ ml} \times 1000 \text{ lt} / 2 \text{ lt} = 8.5 \text{ lt.}$$

El costo del Agua Termal no será considerado por ser un producto de fácil obtención.

Los costos determinados corresponden para la clarificación de 1 m<sup>3</sup> de agua, por lo tanto el costo para el tratamiento es:

CUADRO N° 9.1: COSTO PARA EL TRATAMIENTO CON EL AGUA TERMAL.

Insumo y Transporte	Cantidad (Lt)	P. Unitario (\$)	P. Total (\$)
<b>Agua Termal</b>	8.5	0.000	0.000
<b>Transporte</b>	8.5	0.0033	0.028
<b>Costo Total (\$) :</b>			<b>0.028</b>

### 9.2.2. COSTO DEL INSUMO DE TRATAMIENTO CON EL CLORURO FERRICO

En este proceso de tratamiento, la dosis óptima de Cloruro Férrico a dosificar es de 20 mg/lit.

A continuación se detalla la cantidad requerida de Cloruro Férrico al 40% para el tratamiento de 1m<sup>3</sup> de agua cruda:

**Cloruro Férrico:** 20 mg/lit al 1% = 4 ml (1%) = 0.1 ml (40%)

0.1ml x 1000 lt / 2 lt = 50 ml (40%).

El costo para este tratamiento es el que de indica en el cuadro siguiente:

CUADRO N° 9.2: COSTO PARA EL TRATAMIENTO CON EL CLORURO FERRICO

Insumo y Transporte	Cantidad (Lt)	P. Unitario (\$)	P. Total (\$)
<b>Cloruro Férrico</b>	0.05	1.020	0.051
<b>Transporte Cl<sub>3</sub>Fe</b>	0.05	0.203	0.010
<b>Costo Total (\$) :</b>			<b>0.061</b>

### 9.2.3. COSTO DE LOS INSUMOS DE TRATAMIENTO CON EL CLORURO FÉRRICO Y EL AGUA TERMAL

En esta alternativa de tratamiento se utiliza el Cloruro Férrico y el Agua Termal, empleando este último como ayudante de coagulación.

A continuación se detalla los insumos requeridos para el tratamiento de 1 m<sup>3</sup> de agua cruda:

**Cloruro Férrico:** 22.5 mg/lit al 1% = 4.5 ml (1%) = 0.113 ml (40%)

$$0.113 \text{ ml} \times 1000 \text{ lt} / 2 \text{ lt} = 56.5 \text{ ml (40\%)}$$

**Agua Termal:** 17 ml x 1000 lt / 2 lt = 8.5 lt.

El costo para este tratamiento es el que de indica en el cuadro siguiente:

CUADRO N° 9.3: COSTO PARA EL TRATAMIENTO CON EL CLORURO FÉRRICO Y EL AGUA TERMAL

Insumos y Transporte	Cantidad (Lt)	P. Unitario (\$)	P. Total (\$)
<b>Cloruro Férrico</b>	0.056	1.020	<b>0.058</b>
<b>Agua Termal</b>	8.500	0.000	0.000
<b>Transporte Cl<sub>3</sub>Fe</b>	0.056	0.203	0.011
<b>Transp. Agua Termal</b>	8.500	0.0033	0.028
<b>Costo Total (\$):</b>			<b>0.097</b>

### 9.2.4. ANALISIS COMPARATIVO

Considerando los costos obtenidos para cada alternativa, se concluye que el tratamiento con el Agua Termal es el más económico, puesto que no requiere invertir en insumos químicos, por lo que su aplicabilidad desde este punto de vista es favorable.

El costo de tratamiento con el Cloruro Férrico resulta ser menor en 38% del costo de tratamiento empleando el Cloruro Férrico y Agua Termal como ayudante

de coagulación. Cabe señalar que en los cálculos no se ha considerado los costos por operación y mantenimiento del sistema de tratamiento de agua potable.

**CUADRO N° 9.4: COSTO COMPARATIVO DE LOS TRATAMIENTOS**

<b>ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO</b>	<b>COSTO (S/m3)</b>
<b>Agua Termal</b>	0.028
<b>Cloruro Férrico</b>	0.061
<b>Cloruro Férrico y Agua Termal</b>	0.097

**CAPITULO X :**

**CONCLUSIONES**

## **X. CONCLUSIONES**

- A través de los resultados obtenidos mediante los ensayos de laboratorio se demuestra que el uso del Agua Termal, como coagulante, permite reducir en 25% la turbiedad de una muestra de agua cruda de 50 UNT y alcalinidad inicial de 219 mg/lit CaCO<sub>3</sub>.
- Se demostró que el Agua Termal trabaja eficientemente para pH básico (pH= 8); acondicionando el agua cruda a este pH se logra incrementar la eficiencia del proceso en 18%.
- El mecanismo de coagulación predominante para el tratamiento con el Agua Termal es el de adsorción debido a que se demuestra que para tiempos cortos de mezcla rápida y gradiente de velocidad alto es más eficiente el proceso de coagulación.
- La ecuación  $G^{1.748} \times T = 10^{3.977}$  relaciona los parámetros óptimos de gradiente de velocidad y tiempo de retención para el tratamiento con el Agua Termal. Cada gradiente de velocidad optimiza el proceso con un tiempo de retención específico. Del análisis de las curvas se puede determinar que la calidad del efluente mejora considerando 25 minutos de floculación y con un gradiente de velocidad de 40 s<sup>-1</sup>.
- En el proceso de decantación con el Agua Termal se logra mayor concentración y volumen del floculo en el tratamiento considerando gradientes decrecientes de floculación de 70 s<sup>-1</sup> a 20 s<sup>-1</sup> y una concentración del 100 % del Agua Termal; además la eficiencia del proceso de decantación decrece a medida que aumenta la carga superficial.
- La eficiencia total alcanzada en el tratamiento con el Agua Termal para una turbiedad de 50 UNT es del 45.6 %
- Para el tratamiento con el Cloruro Férrico se concluye que la dosis del coagulante es directamente proporcional a la turbiedad del agua cruda y además existe un incremento en la eficiencia del proceso.
- La dosis del Cloruro Férrico se incrementa al elevarse el valor del pH. Para una muestra de agua de 50 UNT de turbiedad la dosis varió de 20 mg/lit a 27 mg/lit,

cuando el pH varía de 7.5 a 8 por lo tanto para el tratamiento con el Cloruro Férrico no será necesario regular el pH natural del agua cruda.

- El mecanismo de coagulación predominante en el tratamiento con el Cloruro Férrico es el de Adsorción y/o neutralización debido a que el proceso es más eficiente al utilizar gradientes de mezcla rápida altos y tiempos de retención cortos.
- El tiempo de retención que optimiza el proceso de floculación para el tratamiento con el Cloruro Férrico es de 20 minutos. Se ha considerado además cuatro tramos con gradientes de velocidad en orden decreciente de  $120 \text{ s}^{-1}$  a  $20 \text{ s}^{-1}$  para obtener mejores resultados en los procesos siguientes.
- La velocidad de sedimentación adoptada para el tratamiento con el Cloruro Férrico con el objeto de optimizar la eficiencia remocional del sedimentador es de  $0.037 \text{ m/sg}$ .
- Al tratar el agua cruda de 50 UNT de turbiedad, la alcalinidad desciende en 21 %, por lo tanto se comprueba que la disminución del pH es lenta, para muestras de agua con alcalinidad alta, actuando este parámetro como una solución amortiguadora que evita el descenso brusco del pH.
- El tratamiento con el Cloruro Férrico para una turbiedad de 50 UNT alcanza una eficiencia del 96.04%.
- La eficiencia del tratamiento empleando una dosis de  $22.5 \text{ mg/l}$  de Cloruro Férrico para una muestra de agua de 50 UNT se puede incrementar del 94.84 % al 98.38% empleando el Agua Termal como ayudante de coagulación. Además se observa un incremento en la tasa de decantación de  $32 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  para el tratamiento con el Cloruro Férrico a  $62 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$  para el tratamiento con el Agua Termal como ayudante de coagulación. Por lo tanto se puede concluir que técnicamente esta alternativa es factible.
- Luego de efectuar el análisis económico, se concluye que la alternativa Cloruro Férrico-ayudante de coagulación es menos ventajosa con respecto al tratamiento convencional en el cual se utiliza el Cloruro Férrico. A pesar que el costo de tratamiento con Cloruro Férrico-ayudante de coagulación es mayor con respecto a las dos alternativas planteadas es con la que se obtiene mayor eficiencia en la remoción de partículas coloidales.

## **CAPITULO XI**

### **RECOMENDACIONES**

## **XI. RECOMENDACIONES**

- La utilización del Agua Termal como coagulante primario no ofrece resultados satisfactorios, por lo que es recomendable utilizarlo solo como ayudante de coagulación.
- Se recomienda continuar los ensayos empleando aguas naturales con bajo contenido de alcalinidad, para poder definir efectivamente y en forma cuantitativa la contribución de la alcalinidad presente en el agua cruda para el tratamiento de agua potable.
- La alternativa de tratamiento Agua Termal, no se recomienda para muestras de agua cuya turbiedad sea mayor a 50 UNT, ya que considerando los resultados de los ensayos de laboratorio, la eficiencia remocional obtenida para las muestras de agua con estas características disminuye al incrementarse la turbiedad del agua.

## XII REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

- Alexeiev, V.N. *Semimicroanálisis Químico Cualitativo*, URSS, Editorial Mir Moscú, 1975. Traducido del ruso por Victoria Valdez Mendoza.
- Arboleda Valencia, Jorge. *Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua*, CEPIS, Perú, 1981.
- Andía Cárdenas, Yolanda. *Tratamiento de Agua Coagulación y Floculación*, Lima, 2000.
- Andrews, R.F., Campbeh, S.J. y Hess Alan. *Cloruro Férrico, un coagulante*, Philadelphia, 1968.
- Bertin, L. *La Tierra Nuestro Planeta*, Editorial Labor S.A., 1995.
- Cabrera La Rosa, Augusto. *Minerales No Metálicos, Arcilla, Lima*, Boletín del Cuerpo de Ingenieros de Minas y del Instituto Geológico del Perú, 1994.
- Castro de Esparza y Wong Mary. *Remoción de Arsénico a Nivel Domiciliario*, Argentina, 1999.
- Centro Panamericano de Ingeniería sanitaria y Ciencias del Ambiente. *Serie : Filtración Rápida, Manual I y II*, CEPIS, Perú, 1992.
- Centro Panamericano de Ingeniería sanitaria y Ciencias del Ambiente. *Serie : Filtración Rápida, Manual III*, CEPIS, Perú, 1992.
- Huamani, A. *Aguas Termales y Minerales en el Norte del Perú*, Lima, Ediciones IN-GEMMET, 2000.
- Kemmer, Frank N y Mccallion, John. *Manual del Agua - Su Naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones*, Ediciones Mc Graw-Hill, 1997. 3 Tomos.
- Kirchmer, Cheff, Antony. *Información sobre Ayudantes de Coagulación*, CEPIS, 1974.
- Marciales, Lidia, Cobos, Carlos y Cortés, Luis. *Comportamiento del Hierro Presente en el Sulfato de Aluminio Comercial*, Laboratorio de aguas, Departamento de Ingeniería Sanitaria, Universidad Central de Venezuela.
- Pavon, Silvia, Chávez, Carlos y Garrido Hoyos. *Planta de Potabilizadora para Pequeñas Comunidades*, Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química, Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA).
- Pérez, José M. *Estado del Arte – Coagulación*, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, CEPIS.

- Retamozo, Rodolfo. *Manual de Operación de una Planta de Tratamiento de Agua*, Lima, 1999.
- Rodriguez Sánchez, Augusto y Valdez Rozas, Gustavo. *Compendio de la Geología General –Introducción al Estudio Geológico*, Lima, Ediciones Culturales, 1190.
- Romero Rojas, Jairo Alberto. *Potabilización del Agua*, Colombia, Grupo Editor Alfaomega, 1999.
- Sánchez F., Agapito y León, Walter. *Rocas Igneas*, Lima, INGEMMET, 1987.
- San Martín Tejada, Manuel. *Turismo de Salud-Churin Fuentes Prodigiosas*, Lima, Ediciones Sucesos, 1996.
- Singley, J.E. *Revisión de la Teoría de la Coagulación del Agua*, EE.UU, 1987.
- Steinmuller, Klaus. *Hidrotermalismo en el Sur del Perú*, Lima, Edición INGEMMET, 1997.
- Steinmuller, Klaus y Nuñez. *Hidrotermalismo en el Sur del Perú*, Lima, Edición INGEMMET, 1998.
- Steinmuller, Klaus y Huaman Huancan, Alfredo. *Aguas Termales y Minerales en el Centro del Perú*, Lima, 1ra. Edición INGEMMET, 1999.
- Superintendencia de Producao-SPR, Departamento del Controle Sanitário – DCS e Divisao de Desenvolvimento de Recursos Humanos – DDH.2. *Tratamento de Agua*, Brasil, Volumen I.
- Superintendencia de Producao-SPR, Departamento del Controle Sanitário – DCS e Divisao de Desenvolvimento de Recursos Humanos – DDH.2. *Tratamento de Agua*, Brasil, Suplemento.
- Voguel, Artur I. *Química Analítica Cualitativa*, Buenos Aires, Editorial Kapelusz S.A., 1969.
- Wood, Jesse H, Keenan, Charles W y Bull, William, E. *Química General*, México, Ediciones Harla, 1992.
- Zapata, R. *Aguas Minerales-Perú, Parte I*, Boletín N° 1, Serie D, INGEMMET, 1971.
- Zapata, R. *Aguas Minerales-Perú, Parte II*, Boletín N° 2, Serie D, INGEMMET, 1973.