

SEDIMENTACION DISCONTINUA EN SEDIMENTADORES VERTICALES

R. Lama-Ramirez.*, C. Condorhuamán-Ccorimanya

Universidad Nacional Mayor De San Marcos Facultad de Química e Ingeniería Química
Departamento de Operaciones Unitarias
Av. Venezuela cdra. 34 s/n, Lima – Perú

Summary- It has been studied the batch sedimentation of aqueous suspensions of precipitated calcium carbonate, barium sulphate and lead oxide, in vertical thickeners of rectangular and circular cross sectional area. Suspensions vary in concentration between 19.4 and 617.9 g/l and the rate of sedimentation obtained between 0.008 and 7.70 cm/min. The effect of the specific gravity of the solid on the rate of sedimentation is the same for all the suspensions, that is, the greater the value of the specific gravity the greater the value of rate of sedimentation.

Key words: Sedimentation, solid – liquid separations, batch sedimentation.

Resumen- Se ha estudiado la sedimentación discontinua de suspensiones acuosas de carbonato de calcio precipitado, de sulfato de bario, y de óxido de plomo en sedimentadores verticales de sección transversal circular y rectangular, respectivamente, para suspensiones que varían en concentración entre 19.4 y 617.9 g/l. Las velocidades de sedimentación obtenidas fluctúan entre 0.008 y 7.70 cm/min. El efecto de la gravedad específica del sólido sobre la velocidad de sedimentación es el mismo para todas las suspensiones estudiadas, es decir, que a mayor gravedad específica del sólido mayor es la velocidad de sedimentación de la suspensión.

Palabras clave: Sedimentación, separaciones sólido - líquido, sedimentadores discontinuos

INTRODUCCION

La separación de partículas sólidas de una suspensión acuosa por medio de la sedimentación[1-6] es una Operación Unitaria utilizada en los procesos de preparación de compuestos químicos. La sedimentación es una operación de separación sólido - líquido cuyo mecanismo es generalmente poco conocido, observándose que muchas suspensiones son inestables y dan lugar a separaciones espontáneas en tiempos relativamente pequeños.

FUNDAMENTOS TEORICOS

El descenso de una partícula esférica en un fluido se calcula mediante la ecuación de Stokes[7], siempre que el sólido se desplace en régimen laminar.

La expresión de la ecuación es:

$$V_v = \frac{D_p^2 g (\rho_p - \rho_f)}{18 \mu_f} \quad (1)$$

donde V_v es la velocidad de descenso, ρ_p y ρ_f son las densidades de la partícula y el fluido, respectivamente; μ_f es la viscosidad del fluido, g es la aceleración de la gravedad y D_p es el diámetro de la partícula.

La ecuación (1), es válida para partículas individuales[8] que descienden sin perturbaciones.

Steinour[9] y Robinson[10] modifican la ecuación de Stokes tomando en cuenta la densidad ρ_b y viscosidad μ_b de la suspensión, así como, el efecto de volumen del líquido en la suspensión. Egolf y McCabe [11], al observar que la velocidad de sedimentación calculada usando la ecuación de Robinson difiere de datos experimentales, proponen una

* E-Mail: d160041@unmsm.edu.pe

relación que toma en consideración el grado de floculación de la suspensión. Los valores calculados usando las ecuaciones de Steinour, Robinson, Egolf y Mc Cabe difieren sustancialmente de los resultados obtenidos de datos experimentales.

Kynch[12] establece que la velocidad de sedimentación es función única de la concentración del sólido en la suspensión; y que el grado de floculación es independiente de la concentración inicial de la mezcla sólido - líquido.

Las publicaciones en las que se correlaciona la velocidad de sedimentación en función de la concentración de sólidos en la suspensión están basadas en los trabajos de Coe y Clevenger[13], Kynch[12] y modificaciones propuestas por Yoshioka y otros[14], Talmage[15] y Fitch [16,17, 18], así como las críticas analíticas efectuados por Scott[19,20].

Kos[21,22] considera que en una sedimentación, el medio poroso floculado de una suspensión sólido - líquido puede tener una estructura variante.

Tiller [23] generaliza la teoría de Kynch indicando que existen dos curvas durante la sedimentación; una que muestra el descenso de la interfase del líquido claro y la otra el ascenso del lodo acumulado en el fondo del sedimentador.

Fitch[16,17,18] aplicando los conceptos propuestos por Kynch amplía y simplifica el método usado por Tiller para predecir la velocidad de sedimentación.

DETALLES EXPERIMENTALES Y PRESENTACIÓN DE DATOS

EQUIPO EXPERIMENTAL

1. El equipo experimental consta de siete tubos de vidrio de 150 cm de altura y 1.19, 2.5, 5.3, 6.1, 6.9, 8.4 y 15.2 cm de diámetro interno; y dos columnas de material acrílico transparente de 120 cm de altura y con sección transversal rectangular de 5.54X7.62 y 5.08X 10.16 cm, cada una, respectivamente.
2. En el trabajo se utilizan partículas sólidas tales como carbonato de calcio precipitado de procedencia mexicana, con un tamaño de partícula equivalente a la abertura de la malla +400, sulfato de bario comercial, cuyo

tamaño de partículas corresponde a la malla +375 y óxido de plomo comercial, con un tamaño promedio entre las mallas +200 y -375 de la serie Tyler.

METODOLOGIA DEL TRABAJO

En la obtención de datos experimentales se ha seguido el siguiente procedimiento:

1. Los valores numéricos se obtienen a condiciones de presión y temperatura ambientales.
2. Las suspensiones acuosas se preparan para cada producto a concentraciones conocidas, se cargan en las columnas y luego, se homogenizan inyectando nitrógeno gaseoso.
3. Las muestras de las suspensiones se extraen por triplicado, aproximadamente unos 20 mililitros de cada columna, se pesan usando una balanza analítica, se evapora el contenido de agua en una estufa a 100°C y finalmente se pesan los residuos. Las concentraciones de los sólidos en la suspensión se calculan mediante la siguiente expresión:

$$C = \frac{1000\%}{100 - \frac{(\rho_p - \rho_f)\%}{\rho_p}} \quad (2)$$

donde: C es la concentración de las partículas sólidas en la suspensión por litro de suspensión, % es el tanto por ciento en peso de sólidos, ρ_p y ρ_f son las densidades absolutas del sólido y del agua, respectivamente.

4. La sedimentación se inicia al terminar la homogenización de la mezcla sólida - líquida. Los datos experimentales se obtienen al seguir el descenso de la altura de la interfase superior en función del tiempo.
5. Las densidades absolutas de los materiales sólidos, tales como carbonato de calcio precipitado, sulfato de bario, y óxido de plomo se determinan usando un picnómetro de 50 mililitros a la temperatura de 25 °C.
6. La velocidad de sedimentación es la pendiente de la porción recta de la curva de sedimentación.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Los datos experimentales de altura de interfase superior y el tiempo de sedimentación para suspensiones de carbonato de calcio precipitado se presentan en la **figura 1**. La pendiente de la porción recta de la curva es la velocidad de sedimentación. Resultados similares se obtienen para suspensiones de sulfato de bario y de óxido plomo.

La velocidad de sedimentación se puede representar como una función de la concentración inicial de sólidos en la suspensión, de acuerdo a:

$$V_v = K_t (C)^{-n} \quad (3)$$

donde: V_v es la velocidad de sedimentación en cm/min, C es la concentración inicial de sólidos de las suspensiones acuosas en g/l, K_t es la constante de proporcionalidad y n es una constante adimensional evaluada a partir de datos experimentales.

Las **figuras 2 a 4** muestran los intervalos de confianza (95 por ciento) de las velocidades de sedimentación encontradas en los rangos de concentraciones estudiados [25-30].

Los valores de los parámetros de la ecuación 3 para cada suspensión acuosa se muestran en la **tabla 1**, donde: ΔK_t y Δn son los intervalos de confianza de los parámetros K_t y n respectivamente.

Las velocidades de sedimentación de varias suspensiones de carbonato de calcio de procedencias mexicana, brasileña y canadiense se encuentra representadas en la **figura 5**. La diferencia entre los valores de las velocidades para una concentración dada se debe probablemente a la diferencia en el tamaño de las partículas.

En la **figura 6** se observa que el efecto de la gravedad específica del sólido sobre

la velocidad de sedimentación es el mismo para todas las suspensiones estudiadas, es decir, que a mayor gravedad específica del sólido mayor es la velocidad de sedimentación de la suspensión.

El cálculo del corredor de errores está basado en la función estadística aleatoria de Student cuya forma es:

$$V_v \pm \left[t_{(1-\alpha)}(f) \right] S(Y) \quad (4)$$

donde $S(Y)$ es la desviación cuadrática media muestral correspondiente a la dispersión, $t_{(1-\alpha)}(f)$ es la magnitud de la función de Student, f es el número de grados de libertad y α es el nivel de significancia. En este trabajo el valor de α es de 95 por ciento.

El análisis estadístico de la sedimentación de las suspensiones estudiadas muestra una distribución aleatoria de los errores residuales, lo cual indica que los parámetros correlacionados de la ecuación 3 son válidos.

El análisis de varianza efectuado para una hipótesis nula donde el valor de "n" en la ecuación 3 sea nulo se presentan en las **tablas 2 a 4**. La hipótesis es rechazada con un 95 por ciento de nivel de significancia; puesto que, los valores calculados de F superan largamente el valor de F de tabla.

CONCLUSIONES

- La velocidad de sedimentación es una función de la concentración de sólidos en la suspensión.
- El efecto de la gravedad específica del sólido sobre la velocidad de sedimentación es el mismo para todas las suspensiones estudiadas, es decir, que a mayor gravedad específica del sólido mayor es la velocidad de sedimentación de la suspensión.

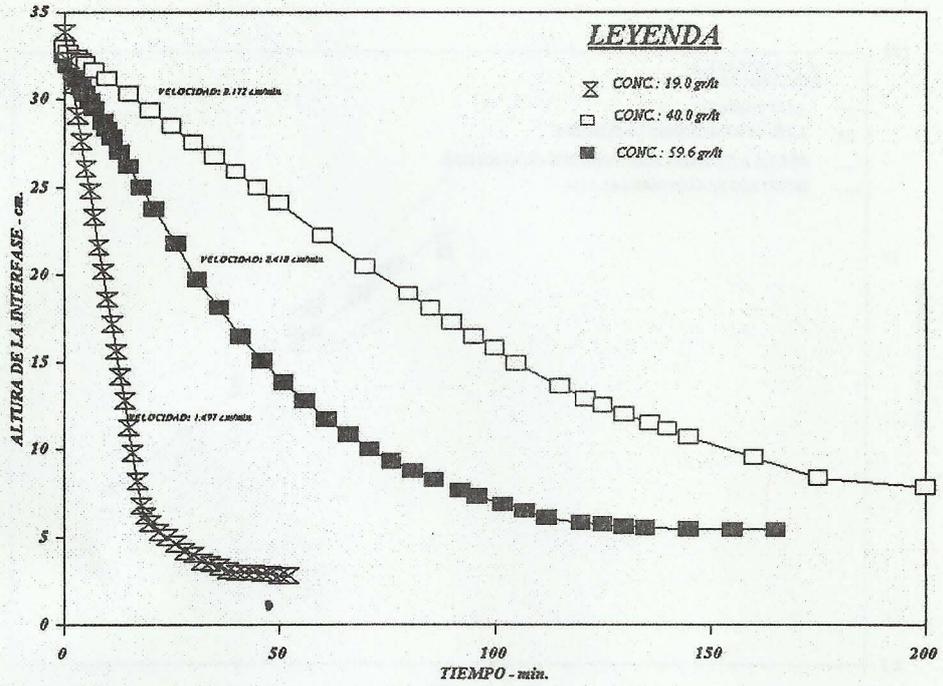


Fig. 1.1: Curvas de sedimentación discontinua de suspensiones acuosas de carbonato de calcio precipitado.

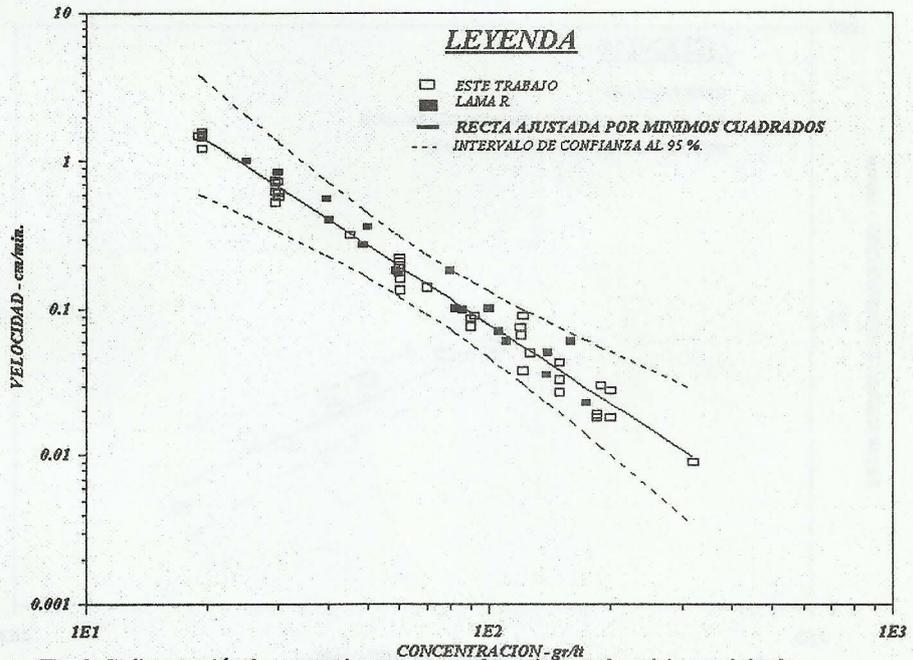


Fig. 2: Sedimentación de suspensiones acuosas de carbonato de calcio precipitado
 Gravedad específica de carbonato de calcio precipitado: 2.68

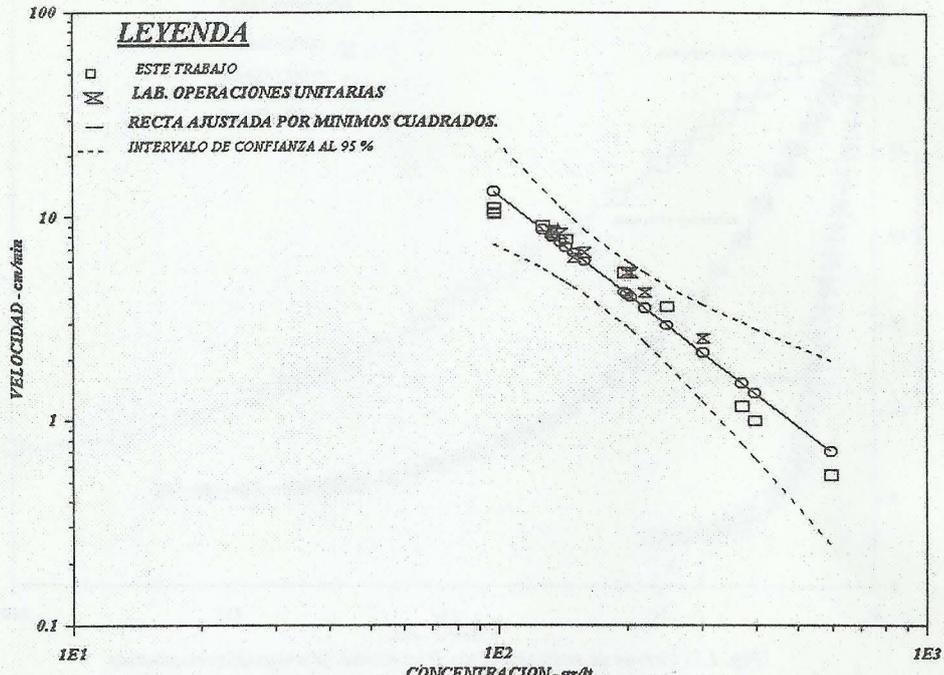


Fig. 3: Sedimentación discontinua de suspensiones acuosas de sulfato de bario.
Gravedad específica de sulfato de bario comercial: 4.5

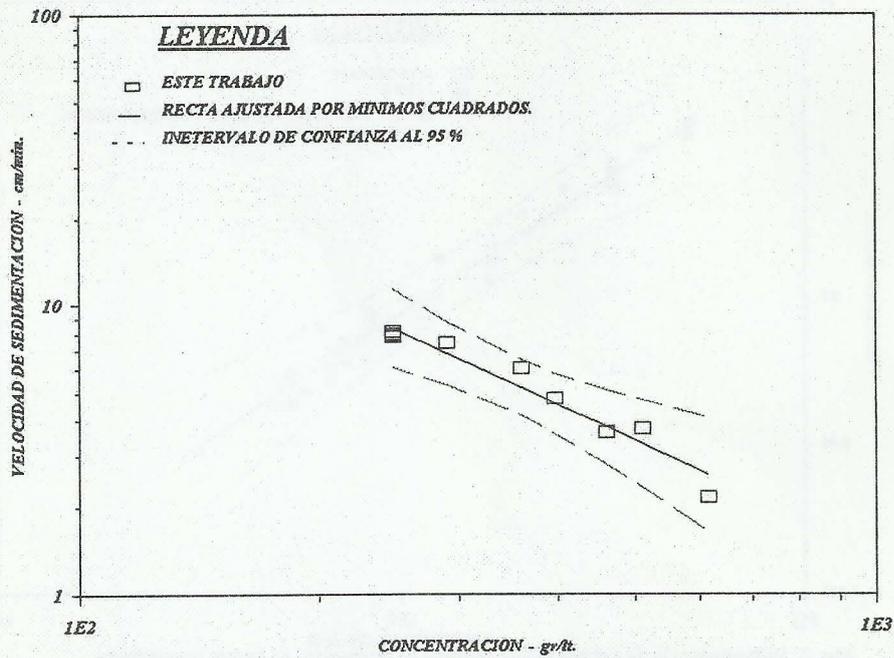


Fig. 4: Velocidad de sedimentación de suspensiones acuosas de óxido de plomo comercial.
Gravedad específica de óxido de plomo comercial: 9.20

Tabla 1: Valores de los parámetros del análisis de regresión de datos en sedimentación discontinua de varios materiales sólidos en sedimentadores verticales.

Parámetros	Carbonato de calcio	Sulfato de bario	óxido plomo
K_t	292.1	22971.7	9451.1
$\pm \Delta K_t$	1.3	1.2	1.1
N	1.787	1.626	1.278
$\pm \Delta n$	1.1	1.2	1.3

Tabla 2: Resultados del análisis de varianza de la sedimentación discontinua de carbonato de calcio precipitado

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrática media	Valor de F calculada	Valor de F de tabla
Debido a Regresión	1	10.690	10.690		
Sobre la regresión	56	0.210	0.004	2855.62	3.984
Corrector total para la media	57	10.690			

Tabla 3: Resultados del análisis de varianza de la sedimentación discontinua de sulfato de bario comercial.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrática media	Valor de F calculada	Valor de F de tabla
Debido a regresión	1	256.77	256.77		
Sobre la regresión	20	36.68	1.83	141.65	4.35
Corrector total para la media	21	259.77			

Tabla 4: Resultados del análisis de varianza de la sedimentación discontinua de óxido de Plomo comercial.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrática media	Valor de F calculada	Valor de F de tabla
Debido a regresión	1	48.30	48.30		
Sobre la regresión	8	2.25	0.28	171.37	5.32
Corrector total para la media	9	43.21			

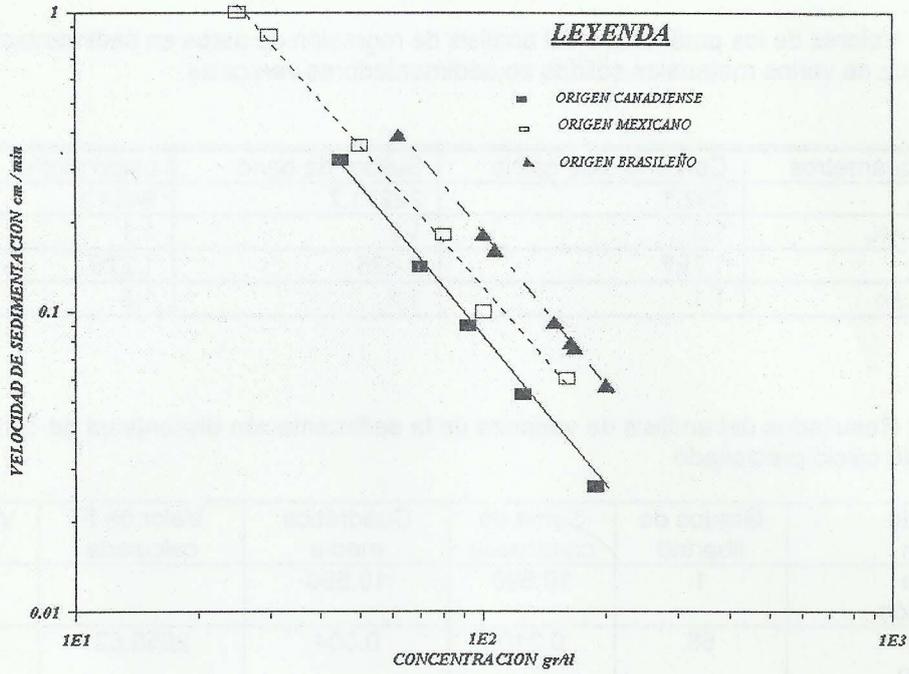


Fig. 5: Sedimentación discontinua de carbonato de calcio precipitado de varias procedencias.

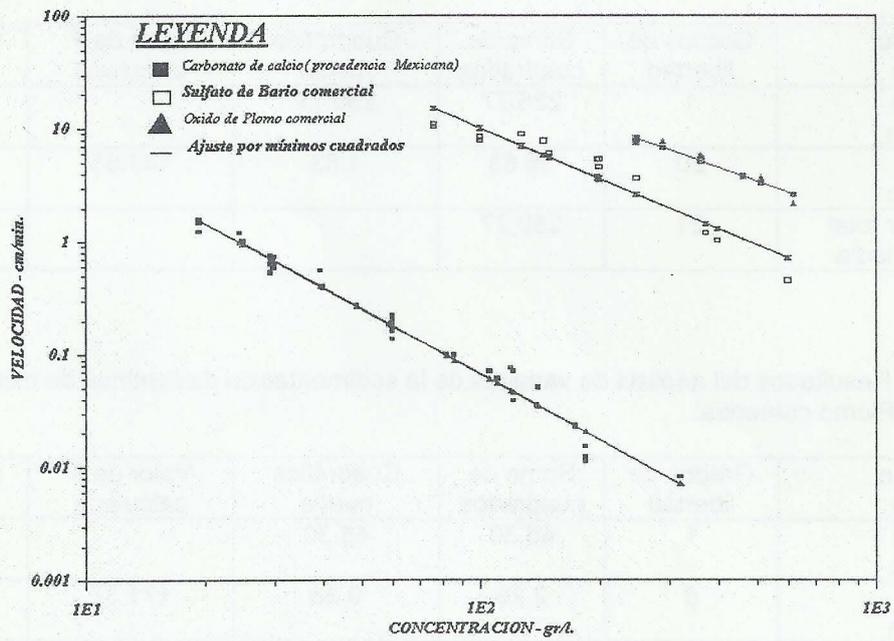


Fig. 6: Velocidad de sedimentación de varias suspensiones de sólidos en medio acuoso en función de la concentración de sólidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Newton, I., "Mathematical Principles of Natural Philosophy", part 2, sect. 7, H. Symonds, London, (1803).
- [2] Bueno, J. L. y Gutiérrez, L. A., "Teoría y Práctica de la Sedimentación", Ing. Quím., Junio, 159-75(1986)
- [3] Anderson, A. A., y Sparkman, J. E., "Review of Sedimentation Theory", Chem. Eng., 66(22), 75(1959)
- [4] Bochkov, A. D., "Sedimentation of suspended Particles in Tanks", Plo. Klim i Klim Teknol, 1,163-70(1964)
- [5] Cheng, D., "Sedimentation of suspensions and storage stability", Chem. & Ind., 17 may., 407-414(1980)
- [6] Dixon, D. C., "Theory of gravity Thickening", Prog. Filt. Sep., 113-78(1979).
- [7] Stokes, G. G., "On the Effect of the Internal Fricción of Fluids. On the motion of Pendulums", Proc. Cambridge, Phi. Soc., 1, 104 (1850).
- [8] Huamán, L. N., "Efecto de pared", Tesis de Bachiller en Ingeniería Química, Biblioteca de la Facultad de Química e Ingeniería Química U.N.M.S.M., Lima-Perú, 1973.
- [9] Steinour, H. D., "Rate of Sedimentation", Ind. Eng. Chem., 36(9), 840(1944).
- [10] Robinson, C. S., Ind. and Eng. Chem., 18,869(1920)
- [11] Egolf, C.B., and McCabe, W.L., "Trans. Am. Inst. Mech. Eng., 15,356(1937).
- [12] Kynch, G. J., "A Theory of Sedimentation", Trans. Faraday Soc., 48, 166 (1952)
- [13] Coe, H. C., y Clevenger, G. H., "Methods for Determining the Capacities of Slimes Settling Tanks", Trans. AIME, 55,356(1916).
- [14] Yoshioka, N., Hotta, Y., y Tanaka, S., "Batch Settling of Homogeneous Slurries", Kagaku Kogaku, 19(12), 816-26(1955).
- [15] Talmage, W. P., and E. B. Fitch, "Determining thickener Unit. Areas", I. & E. C. 47, 38(1955).
- [16] Fitch, B., "A Mechanism of Sedimentation", Ind. Eng. Chem. Fundam., 5(1), 129-234 (1966).
- [17] Fitch, B., "Kynch Theory and Compression Zones" A. I. Ch. E. J. 29(6), 940-947(1983).
- [18] Fitch, B., "Current Theory and thickener design", Ind. Eng. Prog., 58(10),18-28(1966).
- [19] Scott, K. J., "Mathematical Models of Thickening", Ind. Eng. Chem., 5(1), 109-113(1966)
- [20] Scott, K. J., "Thickening Calcium Carbonate Slurries", Ind. Eng. Chem. Fundam., 7(3),484-490(1968).
- [21] Kos, P., "Fundamentals of Gravity Thickening", Chem. Eng. Prog. November, 91, 105(1977).
- [22] Kos, P., "Review of Sedimentation and Thickening", Fine Part. Process, Proc. Int. Symp., 2, 1594(1980).
- [23] Tiller, F. M., "Revision of Kynch Theory", A. I. Ch. E. Journal, 27 (5), 823-829(1981).
- [24] Lama, R. F., "Sedimentación de Suspensiones de Carbonato de Calcio en Sedimentadores Inclinados", Tesis de Título Profesional en Ing. Química, Lima - Perú, 1965.
- [25] Neidig, H. A., Yingling, R. T. y Griswold, R. E., "Tratamiento estadístico de los datos experimentales", Rev. Iber. Ed. Quim. Vol. VI, 1, 18-24(1972).
- [26] Hilldebrand, F. B., "Introduction to Numerical Analisis", Ed. Mc Graw-Hill, 1ra. Ed., New York, 1956.
- [27] Carnahan, B., Luther, H.A. y Wilkes, J.O. "Applied Numerical Methods", Ed. John Wiley & Sons, Inc, 1ra. Ed. New York, 1969.
- [28] Draper, N. R. y Smith, H. "Applied Regression Analysis", Ed. John Wiley & Sons, Inc. 2da. Ed. New York 1981.
- [29] Spiridonov, V. P. y Lopatkin, A., "Tratamiento Matemático de Datos Físico Químicos", Ed. Mir. 2da ed., Moscú 1973.
- [30] Constantinedes, A., "Applied Numerical Methods with Personal Computers", Mc Graw -Hill, 1ra.ed., New York, 1988.