

Remoción de Metales de Aguas Residuales Industriales

Carlos Alberto Guerrero Fajardo*

* Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Química. Bogotá, D.E.

SUMARIO

En este trabajo se evalúa la tasa de remoción de cuatro metales pesados, comúnmente encontrado en Aguas Residuales Industriales (A.R.I.): Cobre, Cromo, Mercurio y Plata, mediante el empleo de plantas acuáticas vasculares "Jacintos de Agua". Las investigaciones para cada metal se realizaron, acondicionando aguas con cinco concentraciones diferentes que oscilaran por encima y por debajo del valor promedio encontrado en A.R.I.

Se adoptó un modelo de comportamiento del sistema debido a la similitud que muestra la remoción de metales por el Jacinto de Agua, con el estudio de cultivos puros de MONOD. Esto permite realizar los ajustes estadísticos a los datos experimentales encontrados en el presente proyecto.

La ecuación establecida para el estudio de remoción de metales por un método biológico es el siguiente:

$$\% \text{ Remoción} = A \times t / B + t$$

A= Porcentaje de remoción máxima

B= Tiempo mínimo para alcanzar la mitad de la remoción máxima.

t =Tiempo de remoción.

Las constantes A y B, indican la tendencia a la remoción y el tiempo mínimo de recolección, respectivamente.

El Jacinto de Agua presenta limitación en su capacidad de remoción de metales, esto determina concentraciones máximas permisibles de metales en el agua para poder utilizar estas plantas acuáticas.

El estudio de selectividad en la remoción de metales, indica que la presencia de Cromo, Mercurio y Plata disminuyen el porcentaje de remoción de Cobre. Se observa disminución en el porcentaje de remoción de Cromo, cuando están

presentes Cobre, Mercurio y Plata en el agua residual. El caso del Mercurio es diferente a los dos anteriores, observándose más bien un efecto sinérgico.

ABSTRACT

In this work we evaluate the rate of removal of four heavy metals, commonly found in Industrial Residual Water: Copper, Chrome, Mercury and Silver, by means of employing vascular aquatic plants "Water Hyacinth".

The investigations of each metal are realized altering the water with five different concentrations that oscilate above and bellow the average value of the Industrial Residual Water.

We adopted a model of the behavior system due to the similarity that is manifested by the removal of the metal by the Water Hyacinth with the study of pure samples of MONOD. This permits us bring about the estatical adjustment of the experimental data found in this proyect.

The equation established for the study of metal removal by a biological method is the following:

$$\% \text{ Removal} = A \times t / B + t \quad \text{in which}$$

A = Percentage of maximun removal

B = Minimun time to reach half of the maximun removal.

t = Time of removal.

The Water Hyacinth presents a limitation in this capacity to remove metals, this determines the maximun permissable concentrations of metals in the water in order to use these aquatic plants.

The study of selectivity in the removal of metals, indicates that the presence of Chrome, Mercury and Silver diminish the percentage of Copper removal. We have observed a reduction in the percentage of Chrome removed, when Cooper, Mercury and Silver are present in the residual water.

The case of Mercury is different from the two previously mentioned in that we have observed a sinérgistic effect.

The constants A and B, indicate the tendency of the removal and the minimun time of collection respectively.

INTRODUCCION

La utilización de plantas acuáticas como sistema depurador en los tratamientos biológicos, ha sido uno de los acontecimientos más importantes de los últimos años. Los resultados obtenidos en EEUU por los Laboratorios de Tecnología Nacional del Espacio (NSTL), pertenecientes a la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA), en la determinación de la capacidad de remoción de la polución de varios metales, nos lleva a pensar en la utilización de Jacintos de Agua en el control de las Aguas Residuales Industriales de nuestras Industrias Químicas (5). Ahora no solamente la incidencia del aspecto económico es importante sino la rapidez de remoción y la posible recuperación de metales mediante un sistema adecuado de recolección (1, 2).

Se propone entonces:

1. Determinar la tasa de remoción de cuatro metales pesados comúnmente encontrados en los residuos industriales: Cobre, Cromo, Mercurio y Plata.
2. Investigar la concentración máxima de cada metal en el agua residual, que la planta es capaz de soportar sin detrimento de su proceso metabólico, lo cual permitirá determinar hasta qué concentración de metal será posible remover por este sistema.
3. Estudiar la selectividad de remoción por parte de la planta frente a la presencia de varios metales, lo cual permitirá decidir si para un residuo dado es o no conveniente el empleo de Jacintos de agua como sistema de remoción. Esta fase es muy importante en la aplicación del proyecto a un caso particular, debido a la similitud del estudio con la realidad de un residuo industrial.
4. Analizar el sitio en el cual la planta acumula los metales absorbidos (raíces y tallos), lo cual es de vital importancia cuando se trata de recuperar metales valiosos.
5. Contribuir con la conservación de los recursos naturales, específicamente en cuanto a las fuentes receptoras se refiere evitando la contaminación por A. R. I. al utilizar sistemas de tratamiento diseñados con base en los resultados obtenidos en el presente estudio.

PARTE EXPERIMENTAL

Es necesario escoger una sustancia que sea altamente soluble en agua. Esta característica es indispensable, con el fin de tener el metal disponible a la planta para su remoción. Para el caso del Cobre, se toma el sulfato de Cobre. Aunque los iones cúpricos a pH 7 o superior precipitan como hidróxido o carbonato básico, no se puede modificar el pH del agua porque se cambian las condiciones óptimas de pH para el desarrollo de las plantas, el cual debe estar alrededor de 7. Si hay algo de cobre que se insolubiliza, se remueve por sedimentación apareciendo en los lodos resultantes del proceso.

Se escoge el dicromato de potasio como la sustancia patrón para observar la remoción del metal cromo. El Mercurio se puede encontrar en aguas en diferentes formas como mercurio metálico o en compuestos mercurícos y mercuriosos que son altamente solubles. El mercurio elemental insoluble en agua, no debe encontrarse como un agente poluyente en el agua, pero generalmente hay cantidades apreciables en forma de metil mercurio, debido al proceso de disolución del mercurio elemental de los lodos por cierto tipo de bacterias que se encargan de transformar el mercurio a la forma soluble: metil-mercurio.

Teniendo en cuenta que la forma soluble es la más importante en este trabajo, debido a que la remoción del metal por la planta acuática está sujeta a la disponibilidad que tenga la planta por él, se escoge un compuesto de mercurio soluble en agua como el cloruro mercuríco.

Son muchas las sustancias que contienen el metal plata y son muy solubles en agua, pero tienen el inconveniente para ser utilizadas en el ensayo de remoción del metal, debido a la precipitación del ión plata con los cloruros que contiene el agua residual doméstica que se utiliza como soporte nutritivo de los Jacintos. Este problema se trata de solucionar acomplejando la Plata con un quelato que impida la for-

mación del cloruro de plata y por lo tanto mantener todo el metal disponible en el agua para analizar su remoción. Los complejos de plata son también muy utilizados a nivel industrial y esto significa que se pueden encontrar en aguas residuales.

Se escoge el complejo EDTA-PLATA como representativo para analizar la remoción de la plata por el método biológico.

Para la recolección de las plantas a utilizar en el estudio, se escoge un sitio donde se tenga una gran extensión de ellas, para efectuar de este modo un muestreo representativo que incluya plantas con características similares. Estas, están determinadas especialmente por el tamaño y aspecto normal de desarrollo de raíces y tallos. El sitio escogido para la selección de las plantas en el análisis de Cobre, Cromo y Plata fue el Parque de la Florida, Bogotá D.E. y para el análisis de Mercurio fue escogido en las cercanías del Municipio de Chía, debido al control efectuado sobre las plantas en el Parque de la Florida.

Las plantas seleccionadas se acondicionan en baldes de capacidad de 10 litros, los cuales contienen el agua residual doméstica diluida en una proporción 1:1 con agua de acueducto. Esta dilución se hace con el fin de buscar una similitud con las condiciones reales, donde se efectúa la mezcla de agua residual industrial y agua residual doméstica.

Se observa la forma, el crecimiento y color de hojas y tallos.

Estos son los caracteres que en función del tiempo, indican una buena aclimatación de la planta en las condiciones del ensayo.

Los parámetros más importantes que se controlan en el período de aclimatación de las plantas son: pH, temperatura y sustancias nutrientes básicas para el desarrollo de ellas.

El período de aclimatación utilizado para cada ensayo de remoción de metales fue de cuatro semanas. Los valores de temperatura oscilaron entre 16-17°C. El valor del pH permaneció aproximadamente constante en el período de aclimatación, el intervalo de variaciones estuvo entre 6.7 - 7.3. Terminado el período de aclimatación, se observa un buen desarrollo de las plantas con aumento en biomasa sin cambio sustancial en el área foliar.

El medio nutriente es esencial para el desarrollo de la planta. Los Jacintos de agua muestran un crecimiento acelerado en aguas negras, por eso se utiliza agua residual doméstica como soporte nutritivo. El agua utilizada fue la del Colector combinado de El Campín, la cual se tomó en diferentes períodos de acuerdo al ensayo del metal seleccionado. Esta agua se caracteriza mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos como pH, DBO, nitrógeno total, amonio, nitritos, fosfatos y los respectivos metales a investigar en la remoción por la planta.

La caracterización del agua residual doméstica se hace en la fase inicial y final del período de aclimatación esto permite analizar la necesidad de nutrientes por parte de la planta. La muestra de agua en el período final de la aclimatación, se toma de cada uno de los baldes con el fin de obtener una muestra representativa del ensayo, esto es una muestra integrada.

Para el análisis de Cobre se toman valores de concentración alrededor de 12 mg/1, valor normal encontrado en aguas poluidas (3, 4, 6, 7, 8, 9). Los valores seleccionados fueron: 50-40-30-20-10- mg/1 de Cobre a partir de una solución de sulfato de cobre.

Para escoger las concentraciones de Cromo, se tiene en cuenta los valores encontrados en aguas residuales y además la alta toxicidad del Cromo para la vida acuática (3,4,6,7,8,9). Esto determina que el intervalo de concentraciones debe estar entre 5 y 40 mg/1 así: 5-10-20-30- y 40 mg/1 de Cromo, a partir de una solución concentrada de dicromato de potasio.

El valor considerado normal de Mercurio en aguas es de 0.2 μ g/1, pero en lodos se han encontrado valores hasta de 95 mg/1 (3,4,6,7,8,9). Esto muestra una gran diferencia de concentraciones de Mercurio en lodos y aguas, por tanto es necesario definir un valor máximo para el análisis de remoción. Este valor se fija en 10 mg/1. El valor mínimo es de 0.1 mg/1. En este intervalo de 0.1 - 10 mg/1 de Mercurio se distribuyen uniformemente las cinco concentraciones del análisis. Los valores seleccionados fueron: 10.0 - 5.0 - 1.0 - 0.5 - 0.1 mg/1, a partir de una solución concentrada de cloruro mercuríco. Las mismas concentraciones se toman para el análisis de remoción del metal por el recipiente plástico. La remoción de Mercurio por el recipiente hace necesario la realización de un experimento adicional y paralelo al ensayo de remoción de Mercurio por las plantas acuáticas.

Para la Plata, la escogencia de concentraciones se hace con base en las concentraciones utilizadas para los otros ensayos: Cobre y Cromo, con el fin de efectuar comparaciones en un mismo intervalo de concentraciones. Los valores seleccionados fueron: 40-30-20-10- y 5 mg/1 de plata, a partir de una solución concentrada del complejo EDTA - PLATA.

Es necesario observar el comportamiento de la planta en la remoción de metales cuando están presentes varios de ellos, por eso se realiza el ensayo de selectividad. Se utilizan las mismas sustancias escogidas para cada ensayo aislado.

Para la selección de concentraciones de los metales en el ensayo de selectividad, se escogen valores que estén dentro del intervalo óptimo de concentración para cada metal en estudio. Este intervalo se determina en el análisis individual de remoción de cada metal.

Se realizan dos ensayos que tienen concentraciones de cada metal de acuerdo al intervalo de selección de concentración y además que uno de ellos tenga los valores más altos de concentración para cada uno de los metales, encontrados en el estudio aislado. Este ensayo se hace con el fin de observar el posible efecto sinérgico o antagonístico entre los metales del estudio. El primer ensayo presenta las siguientes concentraciones: Cobre 38.0 mg/1, Cromo 12.0 mg/1, Mercurio 0.6 mg/1 y Plata 33.0 mg/1. El segundo ensayo presenta: Cobre 35.0 mg/1, Cromo 10.0 mg/1, Mercurio 0.4 mg/1 y Plata 25.0 mg/1.

Cada ensayo tiene su propio duplicado. También se lleva simultáneamente un testigo para el estudio de selectividad.

RESULTADOS Y DISCUSION

La planta acuática utilizada, Jacinto de agua, remueve metales de las aguas residuales. La eficiencia en la remoción está de acuerdo al metal y al efecto sinérgico o antagonístico causado por la presencia de otros metales.

El período de adaptación de la planta acuática es primordial para el logro de los objetivos establecidos. Si se quiere reproducibilidad en los resultados de porcentaje de remoción, se debe adaptar la planta a ciertas condiciones establecidas por las propiedades mismas de las plantas que se utilizan para el ensayo de remoción de metales. De acuerdo a la literatura seleccionada, se encuentra que las condiciones

óptimas de desarrollo de la planta y por ende de la capacidad de remoción son principalmente: pH, temperatura, y nutrientes.

La variación en el tamaño de raíces del Jacinto de agua, determina valores diferentes en el porcentaje de remoción. Esta relación es directa, a mayor tamaño o cantidad de raíces es mayor el porcentaje de remoción del metal. Esto se observa perfectamente en el análisis de plata, donde se emplean duplicados con amplia diferencia en las características de las plantas.

El intervalo de concentraciones iniciales de Cobre que se pueden utilizar para un tratamiento con la utilización de Jacintos de agua, es de 30.0 - 38.5 mg/l de Cobre (Tabla 1).

TABLA No. 1

VARIACION DE LA CONCENTRACION DE COBRE RESIDUAL EN EL AGUA A TRAVES DEL TIEMPO. ESTUDIO AISLADO

(Concentración (mg/l))

Ensayo									
Número	t = 0 días	1d	2d	3d	4d	7d	8d	9d	10d
T	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	42.0	26.0	20.0	17.0	13.0	10.0	8.0	8.0	10.0
10	35.0	23.6	20.0	16.0	9.6	8.0	6.6	6.0	7.0
2	29.6	23.6	17.2	3.6	8.0	7.6	5.0	5.0	6.0
9	30.4	20.0	18.0	15.0	10.8	9.4	9.0	6.0	9.0
3	21.0	14.0	13.0	10.0	8.0	5.0	5.6	3.2	4.4
8	21.0	14.4	13.0	11.0	10.0	7.0	8.4	6.0	5.6
4	17.0	11.6	10.4	11.0	10.0	5.4	6.6	3.2	4.4
7	17.6	13.6	11.0	13.0	10.0	9.0	9.5	8.4	8.2
9	9.0	7.6	5.6	7.0	5.0	6.0	5.6	5.0	5.0
6	9.0	7.6	5.8	6.4	6.0	4.6	5.6	4.4	5.0

El intervalo de concentraciones iniciales de Cromo que se pueden utilizar está entre 5.0 - 12.0 mg/l de Cromo (Tabla 2).

TABLA No. 2

VARIACION DE LA CONCENTRACION DE CROMO RESIDUAL EN EL AGUA A TRAVES DEL TIEMPO. ESTUDIO AISLADO.

(Concentración (mg/l))

Ensayo												
Número	t = 0 d	16h	1d 16h	4d 16h	5d 16h	6d 16h	7d 16h	8d 16h	11d 16h	12d 16h	13d 16h	
T	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	5.0	5.0	2.5	2.0	1.0	1.4	1.4	0.0	0.8	1.0	0.4	
10	5.0	5.0	3.6	2.6	1.6	2.0	2.0	1.0	1.4	1.8	1.8	
2	12.0	11.2	11.2	10.0	7.6	6.6	2.4	2.0	2.0	2.6	5.0	
9	12.0	11.5	11.6	11.0	10.8	10.0	8.4	7.0	8.0	8.0	7.0	
3	24.0	24.0	24.0	22.0	20.0	20.4	20.0	20.0	17.2	18.0	17.0	
8	24.0	24.0	24.0	23.2	21.2	20.4	17.2	17.6	20.0	20.0	16.0	
4	38.5	38.0	36.0	33.6	34.0	34.0	34.0	34.0	35.2	34.0	32.0	
7	39.0	39.0	38.0	35.2	34.0	34.0	36.0	36.0	34.0	34.0	34.0	
5	50.0	50.0	50.0	46.8	48.0	46.2	48.0	45.0	46.2	40.8	45.0	
6	49.0	49.0	49.0	46.8	45.0	45.0	45.0	43.8	48.0	44.4	45.0	

El estudio de la remoción de Mercurio, indica que las concentraciones iniciales de Mercurio en aguas residuales, deben estar en el rango de 0.60 - 7.70 mg/1 de Hg (Tabla 3).

TABLA No. 3

VARIACION DE LA CONCENTRACION DE MERCURIO RESIDUAL EN EL AGUA A TRAVES DEL TIEMPO. ESTUDIO AISLADO

Concentración (mg/1)

Ensayo Número	t = 0 días	18h	1d 18h	2d 18h	5d 18h	6d 18h	7d 18h	8d 18h	11d 18h
T	0.01	0.028	0.028	0.032	0.020	0.010	0.000	0.018	0.018
1	0.07	0.060	0.050	0.046	0.033	0.031	0.030	0.015	0.013
10	0.06	0.047	0.040	0.021	0.020	0.017	0.025	0.008	0.009
2	0.27	0.180	0.105	0.090	0.050	0.045	0.060	0.033	0.020
9	0.28	0.200	0.131	0.105	0.038	0.068	0.080	0.048	0.032
3	0.59	0.260	0.165	0.120	0.065	0.086	0.105	0.062	0.048
8	0.64	0.230	0.140	0.110	0.056	0.062	0.080	0.065	0.050
4	3.24	1.640	0.990	0.865	0.490	0.400	0.440	0.315	0.209
7	3.79	1.015	0.640	0.465	0.290	0.230	0.340	0.290	0.230
5	7.59	2.890	1.740	1.190	0.790	0.790	0.940	0.830	0.830
6	6.69	2.540	1.290	1.040	0.730	0.660	0.840	0.670	0.540

TABLA No. 4

VARIACION DE LA CONCENTRACION DE MERCURIO RESIDUAL EN EL AGUA A TRAVES DEL TIEMPO. ESTUDIO DE ABSORCION POR EL RECIPIENTE PLASTICO.

Concentración (mg/1)

Ensayo Número	t = 0 días	1d	2d	3d	4d	6d	7d	8d	9d	12d
1	7.29	6.56	6.25	6.09	—	4.69	4.49	4.29	4.29	3.79
2	4.10	2.95	2.70	2.70	2.25	—	2.60	2.45	2.35	—
3	0.67	0.48	0.45	0.39	0.34	—	0.34	0.27	0.22	—
4	0.42	0.27	0.24	0.19	0.14	—	0.065	0.09	0.065	—
5	0.085	0.048	0.045	0.039	0.030	—	0.016	0.011	0.013	—

El análisis de la remoción del metal Plata, da como resultado la aplicación de concentraciones iniciales menores de 32.0 mg/1 de Ag (Tabla 5).

El metal que puede resistir en mayor concentración la planta, es el Cobre seguido de la Plata. El cromo en cambio, es letal en concentraciones mucho menores.

El metal que remueve con mayor facilidad el Jacinto, es la Plata. Se alcanzan altos porcentajes de remoción en el primer día, de ahí la dificultad de hacer el ajuste por mínimos cuadrados.

TABLA No. 5**VARIACION DE LA CONCENTRACION DE LA PLATA RESIDUAL EN EL AGUA A TRAVES DEL TIEMPO. ESTUDIO AISLADO**

Ensayo Número	Concentración (mg/1)							
	t = 0 días	1d	4d	5d	6d	7d	8d	9d
T	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	9.00	0.38	0.48	0.38	0.31	0.56	0.38	0.69
20	10.00	0.38	0.48	0.38	0.31	0.31	1.00	1.62
12	17.00	4.75	0.94	0.75	0.81	3.31	2.38	3.50
19	17.00	3.62	0.94	1.44	2.00	1.12	1.38	0.81
13	32.00	6.81	0.94	1.75	1.62	2.00	3.62	0.56
18	32.00	10.88	10.75	10.12	10.75	7.44	8.69	8.38
14	52.00	17.75	16.75	16.31	12.88	11.12	15.62	17.31
17	49.60	42.00	20.00	30.75	27.38	28.50	23.25	21.75
15	56.00	34.50	43.50	37.88	30.38	41.25	33.38	32.62
16	56.00	40.12	40.88	45.38	41.25	43.50	35.25	24.00

Otro metal que remueve con gran facilidad es el Mercurio.

El periodo mínimo de recolección de Jacintos en la remoción de Cobre, está entre 1.47 - 1.75 días.

El tiempo mínimo de recolección de Jacintos en el análisis de Cromo es bastante variable para el rango de concentraciones iniciales escogidas. Aún para una misma concentración se encuentran valores diferentes de tiempo mínimo para una remoción igual, debido a la diferencia de tamaño de raíces en el duplicado. La mejor concentración de Cromo inicial es de 5.0 mg/1, para la cual el tiempo mínimo de recolección varía entre 1.57 y 3.90 días de acuerdo a la planta utilizada.

El tiempo mínimo de recolección de las plantas para las concentraciones iniciales escogidas en el ensayo de remoción de Mercurio, varía entre 0.38 y 0.45 días, tiempo para la concentración más elevada.

El tiempo mínimo para la recolección de las plantas en el estudio de la remoción de Plata, es menor de un día.

El tiempo mínimo de recolección de plantas en el análisis de selectividad, es de un día aproximadamente (resultado del ensayo aislado). La presencia de Cromo, Mercurio y Plata, disminuyen el porcentaje de remoción de Cobre por parte del Jacinto de agua.

Se presenta una disminución en el porcentaje de remoción de Cromo, cuando están presentes los otros metales (Cobre, Mercurio y Plata) en el agua residual.

El caso del Mercurio es diferente a los dos anteriores. Se observa más bien un efecto sinérgico, por lo menos para la concentración 0.28 mg/1.

El efecto del incremento en la remoción de mercurio cuando están presentes otros metales, se puede observar analizando la remoción para un tiempo definido en los dos casos (ensayo de selectividad y aislado).

La presencia del Cobre, cromo y mercurio en el agua residual, no tienen realmente un efecto representativo sobre la remoción de Plata por el Jacinto de agua.

La remoción de metales la efectúa el Jacinto de agua en proporciones variables de acuerdo a la parte de la planta. Se observa en todos los casos un mayor porcentaje de remoción en raíces que en tallos. La presencia de metales en los lodos, se debe a procesos físicos, químicos y biológicos. Aunque se pretende efectuar un mecanismo biológico de remoción de metales, no se pueden aislar otros mecanismos diferentes de remoción. Estos pueden ser: sedimentación y cambios de las sustancias por reacciones químicas (oxidación, etc.).

En términos generales la remoción de metales del agua residual, está de acuerdo con la distribución del metal en el sistema de análisis: raíces, tallos, lodos, metal residual en el agua.

BIBLIOGRAFIA

1. JAMES JOSEPH. 1976. Lagunas de Jacintos. Tratamiento Barato de Aguas Cloacales. Revista Desarrollo Nacional. Octubre.
2. WOLVERTON, B. BARLOW, R. Mc DONALD. R. 1975. Application of Vascular Aquatic Plants for Pollution Removal Energy and Food Production in a Biological Sistem "Nasa Technical" Memorandum, N 75-22938, May.
3. PLUNKETT, ER. 1968. Manual de Toxicología Industrial. Bilbao Ediciones Urmo.
4. RUTHERFORD, T.J. 1955. Medicina del Trabajo e Higiene Industrial. Buenos Aires. Editorial Nova.
5. JAMES JOSEPH. 1978 Exterminio o Recolección de Jacintos de Agua. Revista Desarrollo Nacional. Marzo.
6. MITCHEL, R. 1974. Introduction to Enviromental Microbiology. London. Prentice Hall.
7. FAIRHALL, L.T. 1949. Industrial Toxicology. Baltimore: Usa the Williams Wilkins Company.
8. CERVANTES, CRUZ, E. HENAO, L. 1971. Contribución al estudio de la contaminación del Río Bogotá: Tesis de Grado.
9. Mc. KEE, J. WOLF, H. 1963. State Water Quality Control Board. Segunda Edición.