

Determinación de los coeficientes de partición de los iones Ca^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} y Pb^{2+} del arroyo Río Puerta Grande

Espejo Montes Fátima de los Ángeles¹, Barceló Quintal Icela Dagmar^{1*}, Gómez Nuñez Jersaín¹,
Gómez Salazar Sergio², García Albortante Julisa¹, Beltrán Rocha Julio César³

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Ciencias Básicas. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02200, México.

²Departamento de Ingeniería Química. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara. Blvd. Marcelino García Barragán No.1421, Guadalajara, Jalisco, C.P. 44430, México.

³Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Francisco Villa S/n. Col Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, C.P.66050, México.

*Autor para correspondencia: ibarceloq@gmail.com.mx

Recibido:

2/junio/2021

Aceptado:

23/octubre/2021

Palabras clave:

Coefficientes de partición,
metales,
arroyo

Keywords:

Partition coefficients,
metals,
stream

RESUMEN

El arroyo Río Puerta Grande corre en una cañada en la microcuenca Tarango de la CDMX, dentro de un Área de Valor Ambiental, recibe descargas residuales de tipo urbano. La contaminación de este arroyo es preocupación de grupos como: gobierno, empresas y sociedad civil, por lo que buscan su recuperación. El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de los iones Ca^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} y Pb^{2+} en la fase disuelta y en la particulada, con el fin de determinar sus coeficientes de partición (π), que están a su vez relacionados con el oxígeno disuelto, la DBO, la DQO y principalmente con los sólidos en suspensión, la mayor parte de los iones resultó sorbida a estos sólidos, donde la MO es el principal sorbente. Cobre y plomo resultaron con coeficientes de partición altos. Por la oxigenación el hierro se presenta como Fe^{3+} , forma coloide y contribuye como una superficie de sorción.

ABSTRACT

The Río Puerta Grande stream runs in a ravine in the Tarango micro-basin of CDMX, within an Area of Environmental Value, receives urban-type residual discharges. The contamination of this stream is the concern of groups such as: government, companies and civil society, which is why they seek its recovery. The objective of this work is to present the results of the Ca^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} and Pb^{2+} ions in the dissolved phase and in the particulate, in order to determine their partition coefficients (π), which are related to oxygen. dissolved, the BOD, the COD and mainly with the suspended solids, most of the ions were absorbed to these solids, where the OM is the main sorbent. Copper and lead resulted with high partition coefficients. Due to oxygenation, iron appears as Fe^{3+} , forms colloid and contributes as a sorption surface.

Introducción

Tomando en cuenta: la deposición, la resuspensión, el intercambio difusivo entre el sedimento y la columna de agua, la pérdida que ocurre como consecuencia. Actualmente la calidad de los sistemas acuáticos en México se encuentran cada vez más deteriorados por procesos naturales y antropogénicos, donde estos últimos han incrementado este deterioro debido a la mala planeación del uso de suelos en cuencas hidrográficas, sobreexplotación de acuíferos, crecimiento demográfico, actividades agrícolas, ganaderas, industriales, turísticas y nulo tratamiento de aguas residuales. Es el caso de la microcuenca cuenca Tarango en la Alcaldía Álvaro Obregón en la Ciudad de México, en donde se encuentra el arroyo denominado Río Puerta Grande que está dentro de un Área de Valor Ambiental, (Gaceta Oficial CDMX, 2009), recibe descargas residuales de tipo urbano con gran cantidad de material en suspensión. Grupos como: gobierno, empresas y sociedad civil, están preocupados por el riesgo de que estas descargas estén contaminando este arroyo, por lo que buscan su recuperación. La zona fue decretada como Área de Valor Ambiental en el 2009 (Gaceta Oficial CDMX, 2009), cuenta con una superficie de cerca de 280 hectáreas, así como con dos arroyos principales, denominados Río Colorado y Río Puerta Grande. Esta zona recibe anualmente cerca de mil milímetros de agua de lluvia anualmente, lo que significa que podría captar un volumen cercano a los 3 millones de metros cúbicos de agua de lluvia (Valencia, 2017). Principalmente en el arroyo Río Puerta Grande, se requiere de estudios de la calidad de sus aguas, ya que se encuentra en una barranca importante de la microcuenca Tarango, donde el arroyo arrastra gran cantidad de material en suspensión.

Por lo que el objetivo de este trabajo es principalmente presentar los resultados de la relación de los iones Ca^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} y Pb^{2+} disueltos y el material en suspensión a través de coeficientes de partición. El conocer los coeficientes de partición es de gran utilidad cuando se requiere de la modelación de la calidad del agua en un río, la cual data de los trabajos de Streeter y Phelps (López, 2010), considerando la relación de contaminante disuelto-contaminante adsorbido por el material en suspensión, como por ejemplo el caso de iones metálicos, así mismo en combinación con la hidrología del cuerpo de agua. En los procesos de transformación que experimentan las sustancias contaminantes o no contaminantes en medios acuáticos como ríos, lagos, estuarios, etc., es preciso destacar procesos físicos y químicos tales como: la adsorción-desorción entre las formas disueltas y particuladas tanto en la columna de agua, donde es importante considerar a los iones

disueltos como los adsorbidos y/o absorbidos, por el material en suspensión, así como la relación con los sedimentos, de procesos de fotólisis, la biodegradación o cualquier otro tipo de reacción química o bioquímica favorecida por las condiciones del medio, así como su pérdida definitiva en capas más profundas del sedimento (Thoman y Muller, 1987)

El transporte de materiales poco cohesivos corresponde a partículas de tamaño mediano y grandes y el material cohesivo, principalmente compuesto de partículas del tamaño de las arcillas y cienos finos, aunque a veces incluye cantidades pequeñas de detritus biogénico como algas y materia orgánica, debe modelarse de acuerdo a la adsorción y desorción de contaminantes hacia y desde los sedimentos de todos los tamaños. Las propiedades de las arcillas que causan la adsorción y la absorción de contaminantes tienen un área específica grande, carga eléctrica superficial negativa y su capacidad de intercambiar cationes. Los contaminantes "particulados" pueden ser adsorbidos y/o absorbidos: en el mineral, en la superficie de los óxidos hidratados, unidos a los materiales húmicos, en los precipitados e como sulfuros metálicos, sorbidos en los sitios de intercambio de arcillas o incorporado en el detritus de la fase orgánica o del mineral asociado con todos los tamaños de partículas del material (Rueda y Schladow, 2003). El volumen de la carga del contaminante en aguas superficiales es de hecho a menudo transportado en forma adsorbida y absorbida sobre el material en suspensión cohesivo (Kirby y Parker 1973). Algunos estudios han mostrado que, generalmente el incremento en las concentraciones del metal está en una correlación positiva respecto: al tamaño de partícula del material suspendido, al aumento en el área específica de éste y de las concentraciones de la materia orgánica y de los óxidos hidratados de hierro y manganeso (Horowitz y Elrick, 1987). Los procesos que afectan la asociación de contaminantes inorgánicos con el material en suspensión en los sistemas acuáticos, incluyen a: los fenómenos de adsorción/desorción, a los metales complejados y a la relación con el material orgánico (Dzombak y Morel 1990; Stumm y Morgan, 1981).

La sorción de contaminantes generalmente se refiere a la adsorción y absorción (Elzerman y Coates, 1987). La sorción de compuestos inorgánicos se describe como un proceso de coordinación química que involucra ciertas reacciones entre los adsorbentes y los absorbentes (Dzombak y Morel, 1990). Los modelos en el caso de la adsorción para los contaminantes inorgánicos responden a la interacción entre las cargas eléctricas superficiales y la adsorción del ion. Estos modelos de adsorción son muy empíricos en su naturaleza debido a las interacciones electroquímicas complejas y son generalmente aplicables a sólo un par adsorbente-

adsorbato específico (Dzombak y Morel, 1990); la desorción es el proceso inverso de la adsorción. Para este tipo de estudios es importante considerar el **coeficiente de partición (π)**.

El coeficiente de partición (π), se utiliza para definir la distribución de un compuesto químico o un contaminante, entre la fase particulada, que es la asociada al sólido o material sedimentario en suspensión y la disuelta (López, 2010). Los valores reportados de π , normalmente corresponden a condiciones de equilibrio en las que las velocidades de adsorción y desorción del contaminante respecto al material en suspensión son iguales. El coeficiente de partición π , se obtiene relacionando las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$\pi = \frac{f_p}{(f_d)m} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$C_T = (1 + \pi m / r) r \quad \text{Ecuación 2}$$

$$C_T = C_p + C_d \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

π = coeficiente de partición

f_p = Fracción particulada

f_d = Fracción disuelta

C_T = concentración total del contaminante

m = es la concentración de sólidos suspendidos en la columna de agua

r = es la concentración de contaminante en los sólidos de la columna de agua y es igual a C_p/m

Metodología

Muestreo

Se realizó el muestreo para la caracterización del agua del arroyo Río Puerta Grande. En la figura 1a se indican los sitios de muestreo sobre el arroyo considerando el perfil de la microcuenca. Por cada sitio se tomaron cuatro muestras simples a un metro de distancia de un punto central como se indica en la figura 1b, en recipientes previamente limpios para los análisis *ex situ*. Los parámetros *in situ* se midieron en el mismo lugar de captación de las muestras.

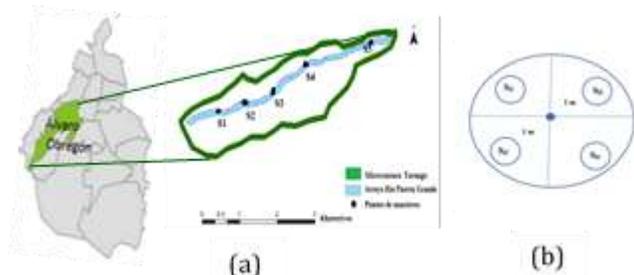


Figura 1. (a). Sitios de muestreo en el arroyo Río Puerta Grande. (b). Representación de la toma de muestras por sitio en el cuerpo de agua

Determinación de oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno disuelto (OD) se monitoreó con un equipo (YSI 55 Dissolved Oxygen), mediante una sonda acoplada al equipo, midiéndose a una profundidad de 20 cm en promedio. Para el análisis de este parámetro se consideró la norma NMX-AA-012-SCFI-2001.

Determinación de la DBO de la DQO

La determinación de este parámetro se efectuó con un equipo VELD SCIENTIFICA, Modelo FOC225E, para este análisis se consideraron el manual del equipo y la norma NMX-AA-028-SCFI-2001. En el caso de la DQO se utilizó el método Hach 8000 (reflujo cerrado) y aplicando la norma APHA 5220C (1995). Las muestras fueron analizadas utilizando una solución oxidante con un intervalo de 20 a 1500 mg/L estas fueron previamente digeridas a 150°C en un digestor Hanna modelo CR-2200. Posteriormente se procedió a la lectura de la DQO mediante un espectrofotómetro de luz visible DR/2400 Hach con el programa precargado 435

Determinación de los iones metálicos Ca^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} y Pb^{2+}

Las muestras simples de cada punto por sitio se recolectaron y se mantuvieron en refrigeración para su análisis. Una parte sirvió para el análisis de los diferentes iones metálicos totales, donde las muestras fueron previamente digeridas en un horno de microondas CEM-MARS 5, para su posterior análisis por absorción atómica en un equipo Thermo Elemental, modelo SOLAAR M6. Otra parte fue filtrada y cada muestra se pasó a través de un filtro Whatman No. 1 (de 18.5 cm de diámetro para retener el material grueso, luego por otro papel filtro Whatman No. 54 (11.0 cm, con retención de 22 mm de filtración rápida para precipitados gruesos y gelatinosos y finalmente con uno de acetato de celulosa de poro de 0.45 μm , según Morrison, 1985; De Mora y Harrison, 1983; Florence, 1982, consideraron como ion metálico disuelto aquel que pasa a través de un filtro de 0.45 μm . Los análisis fueron por triplicado. La parte correspondiente a los metales particulados (asociados al material en suspensión se obtuvieron por diferencia entre los metales totales promedio por sitio menos los disueltos.

Resultados y discusión

OD, DBO y DQO

Se presentan los resultados promedio del oxígeno disuelto (OD), la DBO y la DQO por cada punto por sitio en el arroyo, donde la DBO_5 es uno de los parámetros importantes en el comportamiento de los iones metálicos respecto a los fenómenos de adsorción, por su relación

con el material húmico, así como el OD que se relaciona con el estado de oxidación de los iones metálicos.

En las Figura 2a, 2b y 2c, se indican los valores promedio de cuatro muestras por sitio del oxígeno disuelto (OD), la DBO y la DQO respectivamente. El OD es un parámetro importante, pues indica el grado de oxigenación del cuerpo de agua, debido a la pendiente que presenta el arroyo, a pesar de que los valores no resultaron altos, aún hay algo de oxigenación.

La pendiente del arroyo ayuda a su fluidez y a la oxigenación, sin embargo, al analizar los resultados de la DBO₅ y de la DQO, figuras 3a y 3b respectivamente, se puede observar que presentan valores altos. En el primer caso, la DBO₅ con la degradación de la materia orgánica (MO) por los procesos biológicos, indica la cantidad de oxígeno consumido en el proceso. En las aguas residuales domésticas medianamente contaminadas se encuentra entre 100 y 500 mg/L, y muy contaminada arriba de 500 mg/L, (SEMARNAT, 2014)

En el segundo caso la DQO, es un parámetro también relacionado con la cantidad de O₂ consumido por las otras materias oxidables existentes en el agua, cualquiera que sea su origen, orgánico o mineral.

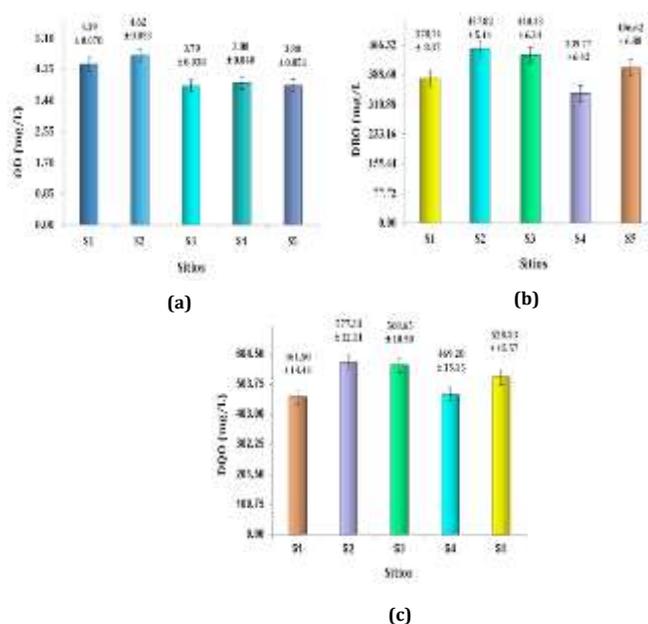


Figura 2. (a). Variación del OD promedio. (b) variación de la DBO promedio. (c). Variación de la DQO promedio de los cinco sitios a lo largo del arroyo.

Las aguas residuales domésticas suelen contener entre 250 y 600 mg/L de la DQO (SEMARNAT, 2014), si bien presenta este cuerpo de agua, oxigenación, esta no es la adecuada, ya que lo ideal es una concentración de 5 a 6 mg/L, sin embargo, la concentración que existe puede

mantener los estados de oxidación más estables de los iones metálicos. Es importante señalar que la MO presenta superficies adsorptivas y absorptivas importantes por la presencia del material húmico.

Calcio, hierro, cobre y plomo totales

En la tabla 1 se indican los resultados de los metales totales promedio de los 5 sitios: S1, S2, S3, S4 y S5, donde el valor de cada sitio es un promedio de las muestras de cuatro puntos por sitio. En el caso del calcio, se observa que la concentración aumentó a partir de la descarga del sitio S2, este catión es uno de los causantes de la dureza. Se observa que a partir del sitio S2, donde se encuentra una descarga, inicia el aumento de este catión, a medida que el agua avanza, se presentó una mayor concentración en el sitio S3, disminuyendo después, probablemente, por dilución, presentando luego un ligero aumento.

Tabla 1. Variación de iones metálicos totales en los cinco sitios a lo largo del arroyo.

Sitios	Calcio total (mg/L)	Hierro total (mg/L)	Cobre total (mg/L)	Plomo total (mg/L)
S1	124.83 ± 2.008	86.25 ± 1.491	1.17 ± 0.028	0.182 ± 0.008
S2	147.87 ± 1.858	42.05 ± 1.024	5.72 ± 0.152	0.558 ± 0.024
S3	183.11 ± 1.962	78.17 ± 1.099	3.45 ± 0.191	0.496 ± 0.026
S4	145.22 ± 2.465	31.78 ± 1.555	3.80 ± 0.162	0.659 ± 0.029
S5	106.89 ± 5.147	32.99 ± 1.089	5.88 ± 0.095	0.824 ± 0.035

En cuanto al hierro, el sitio S1 resultó el de mayor valor, parece que este metal proviene del mismo suelo y debido a la pendiente del arroyo, es arrastrado y se va diluyendo a medida que el flujo avanza. Es importante señalar que por la presencia de OD y por lo poco profundo del tirante del agua, el hierro presenta su estado de oxidación más estable, que es el +3 (Fe³⁺), no fue posible medir si había algo de Fe²⁺ por el tiempo de estancia de las muestras, se sabe que el Fe²⁺ reacciona con O₂ oxidándose a Fe³⁺.

En el caso del cobre se observa que la incorporación del cobre es en el sitio S2, donde se encuentra la primera descarga, y posteriormente va disminuyendo. El cobre presenta afinidad hacia la materia orgánica, donde posiblemente se asocie al material en suspensión o tienda hacia los sedimentos.

Como en el caso del cobre, el plomo total prácticamente se encontró en concentraciones muy bajas, es claro que su presencia es de naturaleza antropogénica. El sitio S5, presentó la mayor concentración. Se nota que el aporte viene de esta primera descarga, disminuye un poco y luego vuelve aumentar, donde hay una segunda descarga, y en el sitio S5, vuelve aumentar, esto pudiera ser debido a la cantidad de basura presente en este lugar y al suelo arrastrado por el arroyo en su trayectoria. En estudios de especiación química, se ha observado que el plomo se encuentra interrelacionado con los oxihidróxidos de Mn y de Fe, además con la materia orgánica, (Lion et. al., 1982). Barceló, 2000, observó que este metal encuentra

repartido en las fracciones menos móviles, donde se encuentran arcillas y sólidos amorfos de Fe (goethita) que presentan buenas superficies de adsorción.

Calcio, Hierro, Cobre y Plomo disueltos

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis de calcio, hierro, cobre y plomo disueltos de cada sitio. Se observó una drástica disminución en la concentración del calcio. Se nota que este ion está más asociado al material en suspensión, donde posiblemente la mayoría esté sorbido presentando tanto el fenómeno de adsorción como el de absorción.

Las concentraciones del Fe disuelto resultaron pequeñas respecto a las medidas del Fe total, lo que hace suponer que se encuentra más en el material en suspensión, lo que refuerza que proviene del suelo, es decir su presencia es más geogénica que antropogénica.

Las concentraciones del cobre disuelto resultaron pequeñas, un 70% está relacionado al material en suspensión o en el derrotero del arroyo se fue una parte al sedimento, esta última aseveración está íntimamente relacionada al carácter agresivo o incrustante del agua (Barceló et al., 2020). También las concentraciones del plomo disuelto en los diferentes sitios resultaron muy bajas. Parece que también el plomo está más relacionado al material en suspensión, el comportamiento está más reflejado a la interacción con coloides de hierro (Barceló, 2000), cuya superficie de adsorción es afín al plomo, aunque también se asocia a la materia orgánica a la MO presente en el material suspendido, donde esta actúa como una superficie adsorptiva.

Tabla 2. Variación de iones metálicos disueltos en los cinco sitios a lo largo del arroyo.

Sitios	Ca disuelto (mg/L)	Fe disuelto (mg/L)	Cobre disuelto (mg/L)	Plomo disuelto (mg/L)
S1	46.98 ± 2.246	16.24 ± 0.648	0.42 ± 0.009	0.070 ± 0.003
S2	53.50 ± 2.730	9.05 ± 0.3804	1.75 ± 0.105	0.208 ± 0.010
S3	65.58 ± 2.761	14.11 ± 0.734	1.20 ± 0.098	0.189 ± 0.011
S4	58.16 ± 2.783	6.88 ± 0.299	1.33 ± 0.116	0.250 ± 0.009
S5	61.61 ± 2.976	6.40 ± 0.235	1.28 ± 0.072	0.311 ± 0.013

Sólidos totales

Un aspecto importante que se observó en este arroyo, es la concentración alta de los sólidos en suspensión que se arrastran, donde seguramente es la participación de la materia orgánica, además del material arcilloso, que contienen grandes áreas adsorptivas y absorptivas, de ahí su importancia en los estudios de transporte, por lo que fue necesario medir la concentración de este material en los cuatro puntos de cada sitio. En la Figura 3 se presentan los promedios de los sólidos totales por sitio.

Se observó que cada punto por sitio no resultó homogéneo, lo que será interesante para los estudios de la hidrodinámica del arroyo y por lo tanto del transporte, pues son las superficies que conducen a los metales. A medida que avanza el flujo se va arrastrando más material en suspensión.

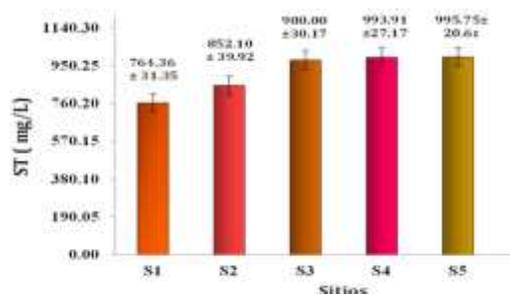


Figura 3. Variación de los sólidos totales en los cinco sitios a lo largo del río.

Determinación de la relación de cada ion disuelto/particulado y sus coeficientes de partición (π)

A continuación se presentan los resultados de la relación entre cada ion metálico disuelto y particulado (el sorbido con el material en suspensión), y de los coeficientes de partición (π). Para el cálculo de π se utilizó la ecuación 1.

Calcio

En la Figura 4 para el caso del calcio se observa que la mayor parte del ión está interaccionado al material en suspensión, al que se denominará, “calcio particulado”, prácticamente el ion presenta en los cinco sitios la misma proporción, tanto en la parte particulada como la disuelta, donde esta última es la que proporciona la dureza del agua.

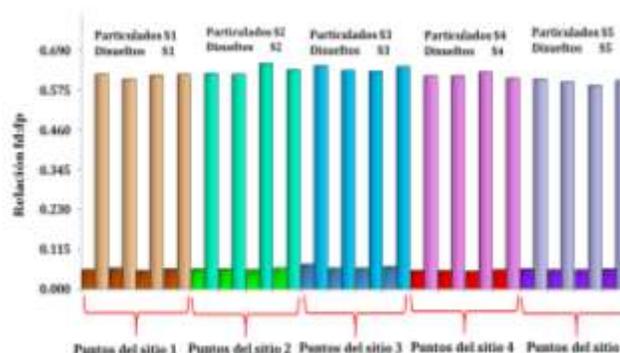


Figura 4. Relación de Ca^{2+} disuelto/particulado. Se consideraron cuatro puntos por cada sitio a lo largo del arroyo.

En la Figura 5 se indican los resultados de cada coeficiente de partición en los sitios S1, S3, S4 y S5 y de los cuatro puntos de cada sitio, en todos los casos se dieron valores semejantes, con muy poca variación. En el sitio S2, los puntos S2.1 y S2.2 tuvieron los mismos valores, pero el S2.3, fue el de mayor valor seguido del S2.4, siendo este punto donde existe una descarga residual urbana importante que altera el material en suspensión.

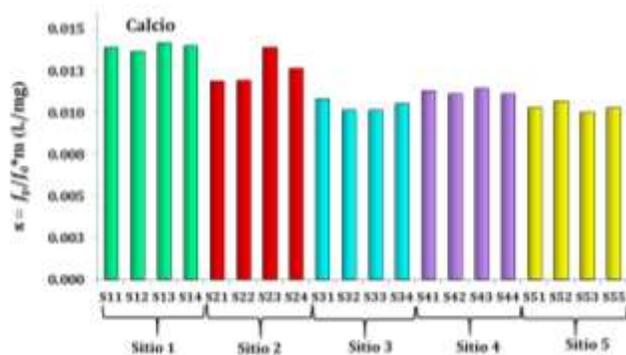


Figura 5. Coeficientes de partición (π) del Ca^{2+} . Se consideraron cuatro puntos por cada sitio a lo largo del arroyo

Hierro

En la Figura 6, se indica que el hierro particulado fue el predominante, donde la presencia de oxígeno disuelto, la baja profundidad del arroyo y la pendiente ayudan a que la oxigenación genere que la especie predominante del hierro sea el Fe^{3+} , el cual tiende a adsorberse principalmente con la materia orgánica y lo importante, es que a su vez, también se vuelve una superficie adsorbente (Tessier, *et al.*, 1979, Calmano y Föstner, 1983, Barceló, 2000) ver la figura 7, donde se ilustra cómo se van depositando los diferentes materiales que conforman el material en suspensión.

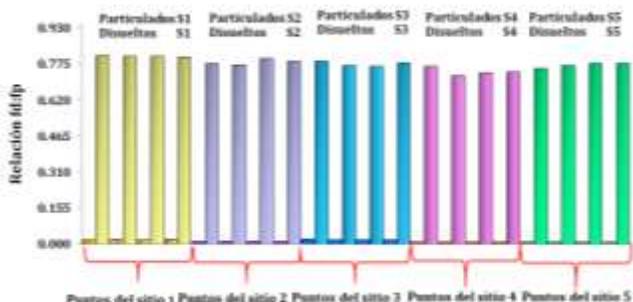


Figura 6. Relación de Fe^{3+} disuelto/particulado. Se consideraron cuatro puntos por cada sitio a lo largo del arroyo.

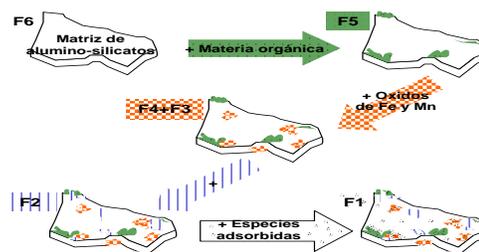


Figura 7. Representación del depósito de los diferentes materiales móviles, en las partículas del material en suspensión (Barceló, 2000).

En la figura 8 se presentan los coeficientes de partición del Fe^{3+} . En los sitio S1 y S3 se obtuvieron los menores valores. Si se considera la ecuación 1, se tiene que el producto (f_{dm}) es grande, ya que la fracción disuelta en general es muy pequeña, por lo que al aplicar dicha ecuación los valores dependen del soporte (material en suspensión) y la concentración disuelta. En los sitios S2, S4 y S5, los coeficientes indican que puede haber más metal particulado y por lo tanto menos del disuelto.

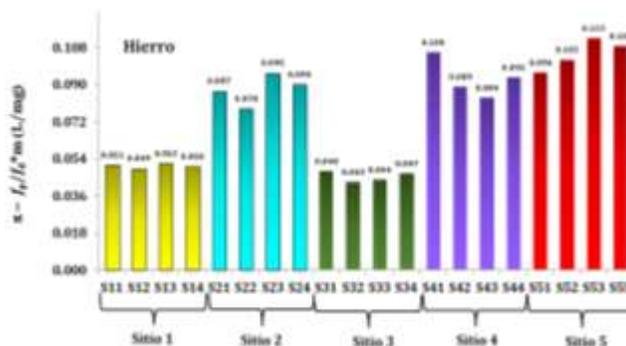


Figura 8. Coeficientes de partición (π) del Fe^{3+} . Se consideraron cuatro puntos por cada sitio a lo largo del arroyo.

Cobre

Como en el caso de los dos iones anteriores, en la Figura 9, se indica la gráfica de la relación del cobre disuelto y el particulado, se puede ver que prácticamente es muy grande la cantidad de Cu^{2+} en la parte relacionada al material en suspensión (cobre particulado) y casi nada del disuelto. En los estudios de Barceló, 2000, se observó que una fracción considerable de cobre se encuentra unida a la fracción orgánica, parece formar un complejo bien establecido entre el cobre y los ácidos húmicos que conforman una gran parte de la materia orgánica. Estos complejos se basan en uniones del tipo:

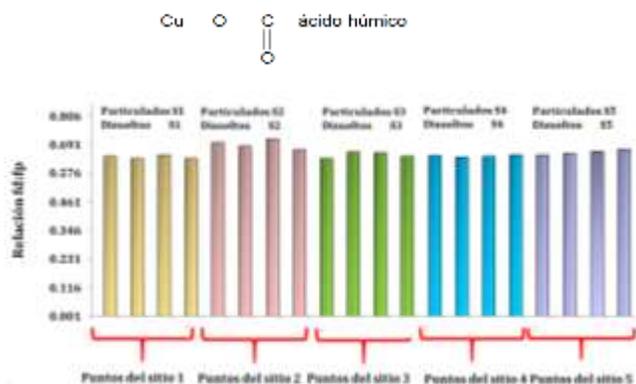


Figura 9. Relación de Cu^{2+} disuelto/particulado. Se consideraron cuatro puntos por cada sitio a lo largo del arroyo.

Analizando la figura 10, el sitio que presentó el valor más elevado de π fue el sitio 1, que es el sitio más elevado, donde puede existir algo de cobre diluido, que se desorbe en el arrastre y en los demás sitios, donde hay más materia orgánica, el cobre se puede estar adsorbiendo y quizá parte absorbiendo, lo cual será más difícil de desorber. Además, en los estudios de especiación química se ha observado por la afinidad hacia el material húmico, sumado al de las superficies de oxihidróxidos de hierro, presenta una reducida movilidad. Korte, *et al.*, (1976), señalan que este ion presenta la menor movilidad entre los oligoelementos, por ejemplo, en los suelos.

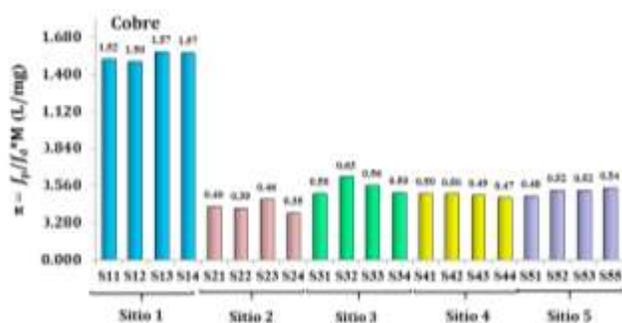


Figura 10. Coeficientes de partición (π) del Cu^{2+} . Se consideraron cuatro puntos por cada sitio a lo largo del arroyo.

Plomo

Finalmente, en las Figuras 11 y 12, se indican tanto la relación del Pb^{2+} disuelto/particulado, como sus coeficientes de partición. En el primer caso, también prácticamente las concentraciones del plomo soluble resultaron muy pequeñas, menos que en el caso del cobre

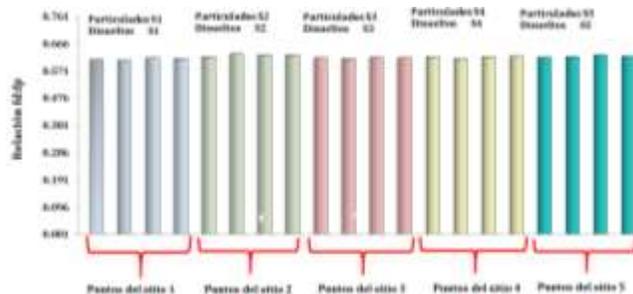


Figura 11. Relación de Pb^{2+} disuelto/particulado. Se consideraron cuatro puntos por cada sitio a lo largo del arroyo.

El Pb se encuentra interrelacionado con los oxihidróxidos de Mn y de Fe, además de la materia orgánica. Según los resultados de la especiación química (Calmano y Föstner, 1983; Barceló, 2000), este metal tiende a desplazarse fácilmente hacia las fracciones de menor movilidad. Este resultado concuerda con estudios de Korte, *et al.* (1976), que indican que el plomo es poco móvil en suelos y sedimentos, aunque menos que el cobre. En la Figura 12, se nota que sigue un comportamiento semejante al cobre, pero con valores más altos de π , lo cual puede significar que al encontrarse en menor concentración, prácticamente todo el Pb está adsorbido.

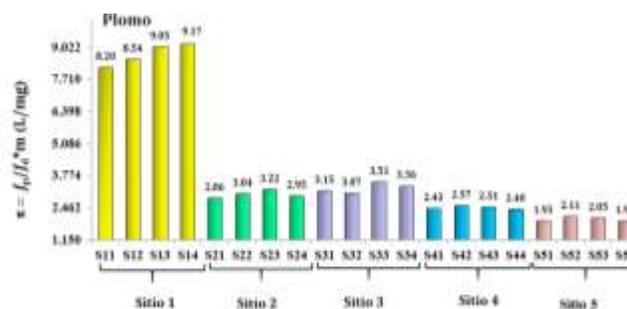


Figura 12. Coeficientes de partición (π) del Pb^{2+} . Se consideraron cuatro puntos por cada sitio a lo largo del arroyo.

Conclusiones

La DBO_5 y la DQO resultaron altas y están íntimamente relacionadas con la MO, tanto la biodegradable como la no biodegradable. La DBO_5 con la degradación de la materia orgánica por los procesos biológicos, indica la cantidad de oxígeno consumido en el proceso. La DQO , es un parámetro relacionado con la cantidad de oxígeno consumido por las otras materias oxidables existentes en el agua, cualquiera que sea su origen, orgánico o mineral. Un indicativo de la biodegradabilidad de la materia

contaminante es la relación entre los valores de la DBO y de la DQO. En las aguas residuales, un valor de la relación DBO/DQO mayor de 0.6, se puede interpretar como un vertido de tipo orgánico; en el caso de este estudio la relación resultó entre 0.723 y 0.793, lo que significa que es la materia orgánica es la predominante en el material en suspensión.

En cuanto al OD, aunque no se presenta en el arroyo con una concentración ideal, el movimiento del agua permite la oxidación de los metales y de la materia orgánica, lo preocupante es la basura que se incorpora y las descargas urbanas de la población arriba de la cañada por donde se encuentra el arroyo, que de no controlarse, se perdería el OD en el proceso de oxidación principalmente de la MO, acelerando la degradación de la calidad del agua.

Respecto a los sólidos totales en suspensión que arrastra el arroyo, su concentración resultó alta, donde hay una alta concentración de MO, además del material arcilloso, estos materiales presentan grandes áreas de sorción, de ahí su importancia en los estudios de transporte.

Los iones metálicos en su mayor parte se encontraron sorbidos en el material en suspensión. Los iones Cu^{2+} y Pb^{2+} , presentaron concentraciones muy bajas, como iones disueltos, En cuanto al hierro, debido a la presencia de OD, se encontró como Fe^{3+} que es su estado de oxidación estable y lo importante es que en este estado de oxidación tiende a formar coloides como oxihidróxido que se deposita en las superficies del material en suspensión y tiende hacia los sedimentos, formando en ambos casos superficies de sorción para los iones metálicos.

En cuanto a los coeficientes de partición (π), el plomo y el cobre presentaron los valores más altos, lo que significa que prácticamente están sorbidos, donde probablemente predomine más la adsorción. Este parámetro es de suma utilidad para los estudios de transporte de los metales y también para otros contaminantes tanto inorgánicos como los orgánicos, en este último caso el material húmico. Cabe indicar que el coeficiente de partición de sustancias combinado con la hidrología es una herramienta importante en la modelación matemática del comportamiento de los cuerpos de agua, ya permite planear los posibles tratamientos, como los humedales, las lagunas de estabilidad, entre otros.

Referencias

APHA. (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater. AWWA/PHA-WEF (American Water Works Association, American Public Health Association, Water Environment Federation). Franson, M.A., Ed. 19a. ed. Washington, D.C. EEUUA.

Barceló Q.I.D. (2000). Estudio de la movilidad de Ca, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn en sedimentos de la presa José Antonio Alzate en el Estado de México. Tesis doctoral en Ingeniería-Ciencias del Agua; Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería de Universidad Autónoma del Estado de México.

Calmano W. y Förstner U. (1983). Chemical extraction of heavy metals in polluted river sediment in Central Europe. *Sci. Tot. Environ.*, 28, 77-90.

Conesa C. (2010). Áreas de aplicación medioambiental de los SIG. Modernización y avances recientes. *Papeles de Geografía*, 23-24, 101-115

De Mora S. J., Harrison R. M. (1983). The use of physical separation techniques in trace metal speciation studies. *Wat. Res.*, 17, 723-733

Dzombak D., Morel F.M.M. (1990). Surface complexation modeling: hydrous ferric oxide. John Wiley & Sons, New York, NY, 393 pp

Elzerman A. W., Coates J.T. (1987). Hydrophobic Organic Compounds on Sediments: Equilibria and Kinetics of Sorption. *Advances in Chemistry*. Vol. 216. ISBN13: 9780841209831, eISBN:9780841223981. American Chemical Society. DOI: 10.1021/ba-1987-0216.ch010

Florence T.M. (1982). The speciation of trace elements in waters. *Talanta*, 29, 345-364

Flores F., Marcelino S. (2013). Sistemas de Información Geográfica. Maestría en Desarrollo Económico Local de la Universidad Autónoma de Nayarit. Recuperado el 20 de mayo de 2020 de: http://www.uan.edu.mx/d/a/sip/posgrados/MDEL/pr ogr_estudio/Optativas/sistem_informa_geog ra.pdf

Gaceta Oficial CDMX (2009). Administración pública del Distrito Federal, Jefatura de Gobierno. Decreto por el que se declara "Área de Valor Ambiental del Distrito Federal", con la categoría de barranca, a la "Barranca de Tarango". Recuperado el 20 de mayo de 2020. <http://www.cms.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/595/17d/22a/59517d22afb37065805530.pdf>

Horowitz A.J., Eldrick, K. A. (1987). The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry. *Appl. Geochem.* 2, 437.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). Diccionario de Datos Topográficos. Escala 1:20 000

Kirby R., W.R. Parker, (1973). Fluid Mud in the Severn Estuary and the Bristol Channel and its Relevance to Pollution Studies. Proceedings of the International Chemical Engineers Exeter Symposium, Exeter, U.K., pp. 1-14.

- Korte N.E., Skoop J., Fuller W.H., Niebla E.E., Alesh B.A. (1976). Trace elements movement, in soils. Influence of soil physical and chemical properties. *Soil Sci.*, 122, 350-357
- Lion L.W., Altmann R.S., Leckie J.O. (1982). Trace metal adsorption characteristics of estuarine particulate matter: evaluation of contributions of Fe/Mn oxide and organic surface coatings. *Environ. Sci. Technol.*, 16, 660-666.
- López G. E. (2010). Determinación de la movilidad geohidrodinámica de Cd, Cu, Cr, Fe, Mn y Pb en la presa José Antonio Alzate en el estado de México, Tesis doctoral. Instituto Tecnológico de Toluca. Metepec Toluca, México
- Morrison G. M. P. (1985). Metal speciation in urban runoff. PhD Dissertation. Middlesex Polytechnic, Enfield, U.K
- Norma oficial mexicana NMX-AA-012-SCFI-2001. Análisis de agua-Determinación de Oxígeno Disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Publicada en el Diario Oficial de la Federación México. Recuperado el 23 de octubre de 2020 de: <https://www.dof.gob.mx>.
- Norma oficial mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua-Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas. Publicada en el Diario Oficial de la Federación México. Recuperado el 25 de octubre de 2020 de: <https://www.dof.gob.mx>.
- Rueda F. J S.; Schladow G., Monismith S.G., Stacey M.T. (2003). Dynamics of Large Polymictic Lake. I: Field Observations. *J. Hydr. Engrg.*, 129, 2, 82-91.
- SEMARNAT (2014). El medio ambiente en México, 2013-2014. Agua. Aguas residuales. Recuperado el 8 de junio de 2021 de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_3.html
- Stumm J., Morgan J. J. (1981). Aquatic Chemistry: An Introduction emphasizing chemical equilibrate in natural waters. John Wiley and Sons Inc, New York, pp 780.
- Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate metals. *Anal. Chem.* 51, 844-851.
- Thomann R. V., Mueller J. A. (1987). Principles of surface water quality modeling and control. Harper and Row Pub. New York.
- Valencia E. (2017). Autosuficiencia hídrica para la Microcuenca de Tarango, Ectagono. Recuperado el 23 de febrero de 2020 de: <http://demo.m500.mx/ectagono/2017/09/27/autosuficiencia-hidrica-para-la-micro-cuenca-de-tarango/>