



Conciencia Tecnológica  
ISSN: 1405-5597  
contec@mail.ita.mx  
Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
México

# Efecto de la Relación L/D del Lecho Empacado en el Proceso de Adsorción de Fluoruros

García-Alfárez, Hugo Daniel; Tovar-Gómez, Rigoberto

Efecto de la Relación L/D del Lecho Empacado en el Proceso de Adsorción de Fluoruros

Conciencia Tecnológica, núm. 61, 2021

Instituto Tecnológico de Aguascalientes, México

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94467989003>

## Efecto de la Relación L/D del Lecho Empacado en el Proceso de Adsorción de Fluoruros

*Effect of the L/D Ratio of the Packed Bed in the Fluoride Adsorption Process*

Hugo Daniel García-Alfárez  
Tecnológico Nacional de México/IT de Aguascalientes,  
México

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94467989003>

Rigoberto Tovar-Gómez  
Tecnológico Nacional de México/IT de Aguascalientes,  
México  
rigoberto.tg@aguascalientes.tecnm.mx

Recepción: 28 Enero 2021  
Aprobación: 30 Mayo 2021

### RESUMEN:

En este trabajo se muestran los estudios para evaluar el efecto de la relación longitud/diámetro (L/D) del lecho empacado en la columna, en el proceso de adsorción en sistema dinámico de una solución de fluoruros de 30 mg/L empleando un carbón comercial empacado en columnas de lecho fijo. Además, se utilizó el modelo de Thomas e integración numérica para estimar la capacidad de adsorción máxima y poder determinar este efecto.

**PALABRAS CLAVE:** relación L/D, adsorción, fluoruros, sistema dinámico.

### ABSTRACT:

In this work, studies are shown to evaluate the effect of the length/diameter (L/D) relationship of the packed bed in the column, in the dynamic system adsorption process of a 30 mg/L fluoride solution using a bonechar commercial packed in fixed bed columns. Furthermore, the Thomas model and numerical integration were used to estimate the maximum adsorption capacity and to be able to determine this effect.

**KEYWORDS:** L/D ratio, adsorption, fluorides, dynamic system.

### INTRODUCCIÓN

Generalmente, en los cuerpos de agua subterráneos se encuentra una diversidad de materiales orgánicos e inorgánicos, ya sea que estos hayan sido depositados por las diferentes actividades industriales o se encuentran de manera natural. Por lo tanto, la población está expuesta a los efectos que estos pueden causar debido a las formas de contaminación más comunes, entre las que se encuentran, fuentes antropogénicas [1], productos agrícolas fluorados como los fertilizantes y plaguicidas [2], las actividades de fluoración cotidiana de agua potable y la contribución de diversas industrias entre las que se incluyen productores de cerámica, fabricación de vidrio y silicatos, entre otras [3]. Particularmente, los fluoruros (F<sup>-</sup>) están de manera natural en el agua que consumimos, los cuales tienen propiedades benéficas en la salud si el agua que se ingiere tiene una concentración menor a 1.5 mg/L (límite máximo que establece la Norma Oficial Mexicana [4]). Sin embargo, cuando dicho límite se excede, tiene efectos contraproducentes en la salud como lo son la fluorosis dental y esquelética [5].

---

### NOTAS DE AUTOR

Contacto: rigoberto.tg@aguascalientes.tecnm.mx

De tal manera, el objetivo principal de este trabajo consistió en estudiar el efecto de la relación L/D del lecho empacado en la columna, en el proceso de adsorción de fluoruros, y evaluar el rendimiento del material adsorbente utilizado en estos estudios. Además, se realizó la modelación matemática de los resultados para obtener la máxima capacidad de adsorción de las columnas empacadas.

Este trabajo de investigación se divide en cuatro partes fundamentales. En la primera se mencionan los fundamentos teóricos, es decir, la problemática que existe debido a la contaminación por fluoruros, además, se hace énfasis en las alternativas que existen para la remoción de este contaminante, así como la evaluación del proceso de adsorción, que es de los procesos más rentables que se mencionan en este apartado; y de la misma manera, las condiciones que se deben de tener en cuenta para poder implementar un sistema dinámico o en continuo en la remoción de dicho contaminante. En la segunda parte que comprende los materiales y métodos, se describe a fondo la metodología utilizada, como lo son las concentraciones de fluoruros, el tipo de flujo de alimentación y las condiciones de operación con las que trabajaron las columnas de adsorción. Dentro de la tercera parte de este trabajo se presentan los resultados y su discusión, donde se menciona el efecto que tuvo la relación L/D en el proceso de adsorción, es decir, comprobar si efectivamente se mejora o no la máxima capacidad de adsorción. Y finalmente, en el apartado de conclusiones, se menciona que efectivamente los cambios en la relación L/D no son sustanciales en la capacidad de adsorción, por lo que dichos cambios representan incremento en los costos de operación y no son equiparables con la mejora de dicha capacidad de adsorción.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La contaminación del agua se ha convertido en un tema de interés para muchos sectores, especialmente en el medioambiental. Es por ello que se están realizando esfuerzos por parte de diversos investigadores en ofrecer una gama de alternativas eficientes en la remoción de los diferentes contaminantes que están afectando la calidad del vital líquido. En particular, la contaminación causada por los fluoruros se ha convertido en un tema de estudio debido a que ha estado incrementando por diversas causas, entre las que se encuentran las actividades industriales [6], o de manera natural por las grandes cantidades en las que se pueden encontrar en los cuerpos de agua [7]. La mayoría de los métodos utilizados para la remoción de contaminantes del agua son costosos y requieren de equipo especializado [8]. En particular, el proceso de adsorción ha sido reconocido como uno de los procesos de tratamiento más efectivos y rentables para enfrentar los problemas de contaminación. Dicho proceso se puede dividir en sistemas por lotes o dinámicos. El primero se caracteriza porque el adsorbente alcanza el equilibrio y, en consecuencia, se logra la máxima capacidad de adsorción para los adsorbatos presentes en la solución [9]. No obstante, los tiempos de operación de esta configuración son prolongados y se requieren sistemas de agitación para favorecer los procesos de transferencia de masa [10]. Por otra parte, los sistemas de adsorción que operan bajo condiciones dinámicas ofrecen la posibilidad de tratar grandes volúmenes de fluido utilizando equipos de menor tamaño en comparación con los sistemas por lotes. Este tipo de sistemas comprende a las columnas empacadas que pueden operar con lechos fijos, los cuales son utilizados como filtros que permiten la adsorción de las especies al entrar en contacto en forma continua con el adsorbente [11]. Es importante mencionar que se presentan desventajas en los sistemas dinámicos como el tiempo de contacto del adsorbato con el adsorbente, por lo tanto, la transferencia de masa se ve afectada [12]. Así mismo también depende de las condiciones de operación, por ejemplo, concentración del adsorbato, flujo de alimentación, tamaño del lecho, entre otras. Es por ello que es importante analizar el rol que juega la relación (L/D) en el proceso de adsorción debido al efecto que puede suscitarse en el fenómeno de transporte de masa. Bajo esta perspectiva, el proceso de adsorción en sistemas dinámicos depende de ciertas variables involucradas, entre ellas el efecto de la relación L/D, que se tiene que identificar para poder obtener el aprovechamiento máximo de este tipo de sistemas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En estos estudios se utilizaron columnas de lecho fijo con el objetivo de analizar el efecto de la relación longitud/diámetro de lecho (L/D), del flujo de alimentación y del tiempo de residencia en la capacidad de adsorción de fluoruros empleando columnas de lecho fijo. Para estos experimentos, se realizaron tres casos de estudio que comprenden, primeramente, en el caso 1 se efectuaron estudios utilizando columnas con las siguientes longitudes y diámetros de lecho empacado: 1) 7.5 y 2.5 cm (L/D=3); 2) 48 y 1.1 cm (L/D=43.63); y 3) 75 y 0.9 cm (L/D=83.33). Las columnas se operaron a flujos de 3.3, 4.1 y 4.3 mL/min respectivamente. Dichos flujos de alimentación corresponden a un tiempo de residencia aproximado de 3 minutos. Se empacaron 27 g de carbón carmex en cada una de las 3 columnas. Enseguida, en el caso 2 se estudió el efecto del flujo de alimentación (1.65, 3.3 y 6.6 mL/min) empleando tres columnas empacadas con una L/D=3. Finalmente, el caso 3 fue similar al caso 1, es decir, usando columnas con L/D=3, 43.63 y 83.33; pero manteniendo constante el flujo de alimentación en 3.3 mL/min. Para mantener constante el flujo de alimentación de las soluciones en las columnas, se usó una bomba peristáltica. En este caso la variable fue el tiempo de residencia. Después de empacado el material adsorbente, a las columnas se les hizo pasar agua desionizada en forma ascendente con el fin de lavar y acondicionar el carbón a la temperatura de la solución a tratar. Enseguida, a las columnas se les comenzó a pasar la solución de fluoruros a una concentración de 30 mg/L al flujo correspondiente.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En estos estudios se utilizó el modelo de Thomas e integración numérica para determinar la capacidad de adsorción de cada una de las columnas empacadas. En las Tablas 1,2,3 se puede observar que para el primer caso se obtuvieron capacidades de adsorción de 3.78, 4.21 y 4.24 mg/g para las L/D de 3, 43.63 y 83.33 respectivamente. En el segundo caso fueron de 2.48, 3.11 y 3.24 mg/g para 1.65, 3.3 y 6.6 mL/min. En el tercer caso fueron de 2.81, 3.42 y 2.28 mg/g para las L/D de 3, 43.63 y 83.33, respectivamente. Además, la capacidad de adsorción también se estimó mediante integración numérica para hacer un comparativo con los valores obtenidos mediante el modelo de Thomas. Para el primer caso se obtuvieron capacidades de adsorción de 4.16, 4.58 y 4.75 mg/g; en el segundo caso fueron de 2.26, 3.35 y 3.52 mg/g; y finalmente, para el tercer caso resultaron 2.95, 3.38 y 2.35 mg/g, respectivamente. Es importante resaltar la diferencia que existe en la capacidad de adsorción obtenida en el experimento 1 del caso 1 y del caso 3; esto es debido a que se toma una muestra de carbón para efectuar simultáneamente los 3 experimentos de cada caso de estudio; sin embargo, estas muestras de carbón pueden ser diferentes entre sí. Esto es válido porque lo más importante es analizar los resultados obtenidos dentro de cada caso de estudio.

En el primer caso se puede apreciar que al incrementar la L/D, aumenta un poco la capacidad de adsorción; esto debido principalmente al fenómeno de transferencia de masa que se lleva a cabo en el lecho empacado y tiene un comportamiento similar en las tres columnas empacadas, como se puede observar en la Tabla 1 y Figura 1. De acuerdo a la literatura se reporta que el mecanismo de transporte de masa opone la misma resistencia, es decir, podrían estar, generalmente, limitados por la difusión de la película externa y porosidad del material.

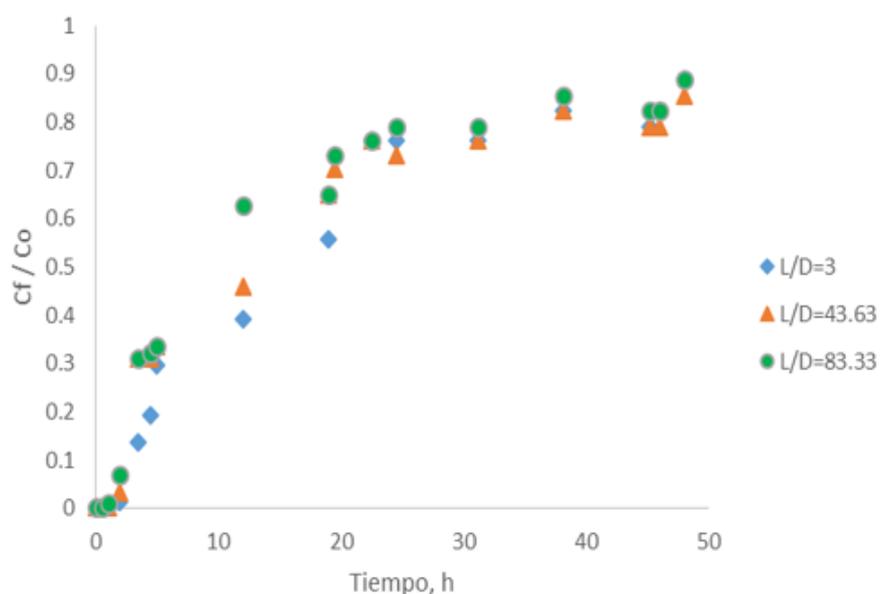


FIGURA 1.

Curvas de ruptura para evaluar el efecto de la relación L/D en el proceso de adsorción (caso 1).

En el segundo caso, en la Tabla 2 y Figura 2 se puede apreciar que al variar el flujo de alimentación se incrementa ligeramente la capacidad de adsorción aunque la diferencia entre los tres valores de las capacidades de adsorción no representa un cambio sustancial. De acuerdo a la literatura, la velocidad con la que se transporta el contaminante dentro del lecho empacado debe de ser proporcional a la altura del lecho, es decir, el flujo de alimentación se debe modificar cuando las columnas sean de mayor longitud o mayor diámetro para así evitar trayectorias irregulares de la velocidad de transporte [13]. Es por ello que al aumentar al doble el flujo solamente se obtiene un incremento en la capacidad de adsorción solamente del 4% aproximadamente, por lo que no es rentable operar en esas condiciones.

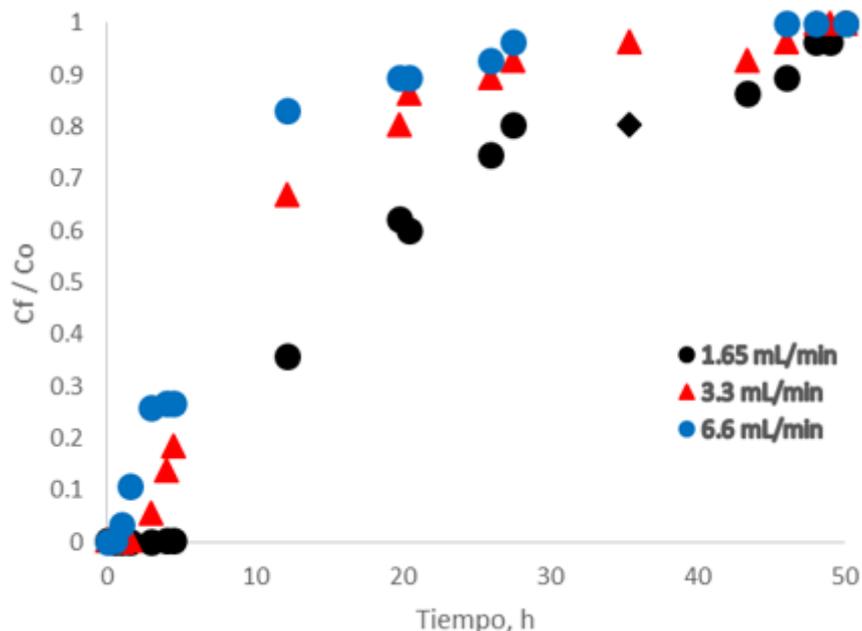


FIGURA 2.

Curvas de ruptura para evaluar el efecto del flujo de alimentación en el proceso de adsorción (caso 2).

En la Tabla 3 y Figura 3 se muestran las capacidades de adsorción a valores de L/D de 3, 43.63 y 83.33, a un flujo de alimentación constante de 3.3 mL/min y tiempo de residencia variable. En el cambio en la altura del lecho empacado, de acuerdo a la literatura, en un lecho de menor altura predomina el efecto de dispersión axial que es la prolongación del tiempo de residencia en el flujo unidireccional; esto debido a que no se establece un flujo de tipo pistón; y en un lecho de mayor altura se tienen más sitios activos ya que hay mayor superficie expuesta donde se producirá la adsorción del contaminante [14]. Aunque se debe de considerar, al aumentar la altura de lecho, la masa de adsorbente de manera constante durante todo el proceso de adsorción [15]. Se observa que al aumentar la altura de lecho se vio favorecida ligeramente la capacidad de adsorción al aumentar la L/D de 3 a 43.63, pero dicho incremento se podría considerar bajo, ya que la relación L/D es alta. De acuerdo con la literatura, a valores altos de L/D la capacidad de adsorción se ve favorecida, pero en estos casos de estudio se puede concluir que dichos valores de L/D tiene un límite, es decir, por más que se pretenda incrementar la relación L/D el material adsorbente tiene cierta capacidad de adsorción.

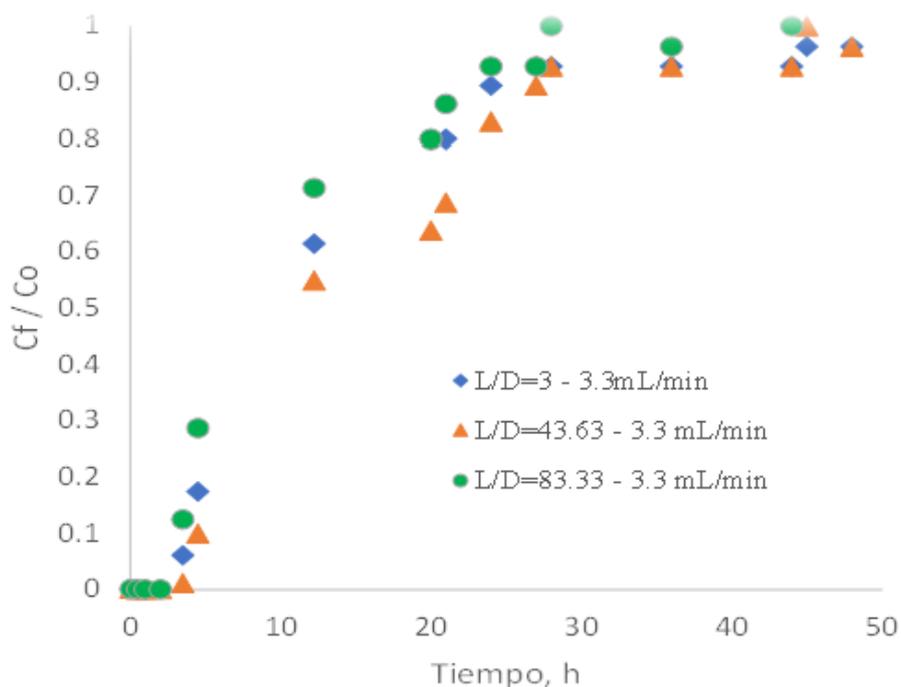


FIGURA 3.

Curvas de ruptura para evaluar el efecto de la relación L/D en el proceso de adsorción (caso 3).

TABLA 1.

Capacidades de adsorción obtenidas mediante el modelo de Thomas e integración numérica para el caso 1.

L/D	Parámetros Modelo de Thomas				Integración numérica	
	Flujo de alimentación, mL/min	$K_{TH}$ , L/h mg	$q_{0s}$ , mg/g	$R^2$	$q_{cal}$ , mg/g	$R^2$
3	3.3	4.3E-03	3.78	0.957	4.16	0.986
43.63	4.1	4.02E-03	4.21	0.9363	4.58	0.986
83.33	4.3	4.2E-03	4.24	0.945	4.75	0.991

TABLA 2.  
Capacidades de adsorción obtenidas mediante el modelo de Thomas e integración numérica para el caso 2.

L/D	Parámetros Modelo de Thomas				Integración numérica	
	Flujo de alimentación, mL/min	$K_{TH}$ , L/h mg	$q_0$ , mg/g	$R^2$	$q_{cal}$ , mg/g	$R^2$
3	1.65	3.8E-03	2.48	0.965	2.26	0.998
3	3.3	5.9E-03	3.11	0.966	3.35	0.996
3	6.6	1.2E-02	3.24	0.992	3.52	0.997

TABLA 3.  
Capacidades de adsorción obtenidas mediante el modelo de Thomas e integración numérica para el caso 3.

L/D	Parámetros Modelo de Thomas				Integración numérica	
	Flujo de alimentación, mL/min	$K_{TH}$ , L/h mg	$q_0$ , mg/g	$R^2$	$q_{cal}$ , mg/g	$R^2$
3	3.3	7.6E-03	2.81	0.989	2.95	0.999
43.63	3.3	6.4E-03	3.42	0.987	3.38	0.997
83.33	3.3	9.1E-03	2.28	0.979	2.35	0.997

## CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que efectivamente la relación L/D tiene injerencia en el proceso de adsorción debido a que la capacidad máxima de adsorción sufre un decremento. Particularmente, en los tres casos de estudio el fenómeno de transporte se comporta de manera similar, es decir, a una mayor o menor altura opone la misma resistencia al movimiento, por lo que el proceso de adsorción no se ve favorecido. Además, en el caso 2, al duplicar el flujo de alimentación, es decir, de 3.3 a 6.6 mL/min, solamente se obtuvo un incremento de aproximadamente del 4% en la capacidad de adsorción, el cual no es un incremento sustancial, ya que se debe de considerar los costos de operación que implica trabajar a flujos tan altos.

En general, los resultados obtenidos en cada uno de los casos de estudio demuestran que efectivamente el proceso de adsorción tiene un rendimiento en los primeros minutos, posteriormente se va afectando por las condiciones de operación que se plantearon en dichos casos de estudio, y esto se ve reflejado en la máxima capacidad de adsorción.

## REFERENCIAS

- 1 Hernández Montoya, V.; Elizalde González, M. P.; Trejo Vázquez, R. Screening of commercial sorbents for removal of fluoride in synthetic and groundwater, *Environ Technol* 2007, 28, 595-607.
- 2 Amit Bhatnagara, Eva Kumar, Mika Sillanpaa, Fluoride removal from water by adsorption – A review, *Chem Eng J* 2011, 171, 811-840.
- 3 C.K. Rojas-Mayorga, A. Bonilla-Petriciolet, I.A. Aguayo-Villarreal, V. Hernández-Montoya, M.R. Moreno-Virgen, R. Tovar-Gómez, M.A. Montes-Morán, Optimization of pyrolysis conditions and adsorption properties of bone char for fluoride removal from water, *J Anal Appl Pyrol* 2013, 104, 10-18.
- 4 Dirección General de Normas. Norma Oficial Mexicana NOM – 127 – SSA1 – 1994, “Salud ambiental, agua para uso y consume humano – límites permisibles de calidad y tratamientos que se debe de someter el agua para su potabilización”. Diario Oficial de la Federación, 22 de noviembre de 2000. México.
- 5 Gupta, V.K.; Ali, I.; Saini, V.K. Defluoridation of wastewaters using waste carbon slurry. *Water Res.* 2007, 41, 3307-3316.
- 6 Fan, X.; Parker, D.J.; Smith, M.D. Adsorption kinetics of fluoride on low cost materials. *Water Res.* 2003, 37, 4929-4937.
- 7 Shiv Singh, Mohammad Ashfaq, Rohitashaw Kumar Singh, Harish C. Joshi, Anurag Srivastava, Ashutosh Sharma, Nishith Verma, Preparation of surfactant-mediated silver and copper nanoparticles dispersed in hierarchical carbon micro-nanofibers for antibacterial applications, *New Biotechnol* 2013, 30, 656-665.
- 8 Fawell, J.; Bailey, K.; Chilton, J.; Dahi, E.; Fewtrell, L.; Magara, Y. Fluoride in drinking water, World Health Organization (WHO), IWA Publishing, London, UK, 2006, 2-134.
- 9 M.T. Hernández-Eudave, A. Bonilla-Petriciolet, M.R. Moreno-Virgen, C.K. Rojas-Mayorga, R. Tovar-Gómez. Design analysis of fixed-bed synergic adsorption of heavy metals and acid blue 25 on activated carbon. *Desalination and Water Treatment* 2016, 57, 9824-9836.
- 10 Delgado Velasco, L.; Hernández Montoya, V.; Cervantes, J.F.; Montes Morán, M.; Lira Berlanga, D. Bone char with antibacterial properties for fluoride removal: Preparation, characterization and water treatment, *J Environ Management* 2017, 201, 277-285.
- 11 Wang, S., Ariyanto, E. Competitive adsorption of malachite green and Pb ions on natural zeolite. *J. Colloid Interface Science.* 2007, 314, 25-31.
- 12 C.E. Gimba, M. Turoti, P.A. Enwaikhide, E.E. Akporhonor, Adsorption on indigo blue dye and some toxic metals by activated carbons from coconut shells. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, 8 2009 1194-1201
- 13 R. Hafelia, C. Huttera, M. Damsohnb, H.-M. Prasserb, Ph. Rudolf von Rohra. Dispersion in fully developed flow through regular porous structures: Experiments with wire-mesh sensors. *Chem Eng and Processing* 2013, 69, 104-111
- 14 K.K.H. Choy, C.K. Ko, C.W. Cheung, J.F. Porter, G. McKay. Film and intraparticle mass transfer during the adsorption of metal ions onto bone char. *Journal of Colloid and Interface Science* 2004, 271, 284-295.
- 15 Tovar Gómez, R; Moreno Virgen, M.R; Dena Aguilar, J.A; Hernández Montoya, V.; Bonilla Petriciolet, A; Montes Moran, M.A. Modeling of fixed-bed adsorption of fluoride on bone char using a hybrid neural network approach, *Chem Eng J* 2013, 228, 1098-1109.