

Análisis de costos del proceso de bioadsorción de níquel sobre biomasa de brócoli

Rubio Campos Beatriz Eugenia¹, Rubio Campos Nallely Yunuen¹, Juárez Jasso Josué Giovanni¹, Jiménez Verver y Vargas Paulina¹, Ramírez Luna Carlos Alberto Jorge¹, Miramontes Espinoza Luis Daniel², Murrieta Escoto Samantha², Ibarra Rivera Brenda Marlene³.

¹ Escuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, Colegio de Nivel Medio Superior, Universidad de Guanajuato. be.rubiocampos@ugto.mx

² División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato.

³ División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato.

Resumen

En este trabajo se presenta el análisis económico preliminar del proceso para la remoción de níquel sobre biomasa de brócoli. La metodología se basa en el método de Guthrie, que comienza con la estimación de un costo base del equipo en función del diámetro, altura de la columna empacada y flujo de alimentación. Los resultados muestran que conforme aumenta el flujo de alimentación del efluente, la producción de níquel se incrementa, mientras que el precio de venta del metal disminuye, favoreciendo los tiempos de operación y haciendo más eficiente el proceso. Asimismo, el precio de venta de níquel resulta ser seis veces más económico empleando biomasa de brócoli.

El estudio se efectúa en el año 2003 y la estimación económica para la construcción de la planta de tratamiento de agua residual para el año 2021.

Palabras clave: níquel; brócoli; bioadsorción, Guthrie.

Introducción

Durante los últimos 50 años, la actividad humana ha ocasionado la contaminación de recursos hídricos. Entre los diversos contaminantes que produce esta actividad, los metales pesados se encuentran como unos de los más peligrosos y que más efectos provocan al medio ambiente (Farooq, 2010).

Uno de los metales pesados de uso frecuente es el níquel. Es un elemento traza que se encuentra en la naturaleza. Las menas naturales no representan riesgo alguno, pero los productos obtenidos artificialmente son una considerable amenaza. Este metal, se acumula en el medio ambiente a través de los lodos de clarificación y composta. A su vez, el procesamiento industrial del níquel, durante el cual se originan productos intermedios y desechos altamente tóxicos.

Como contaminante en aguas residuales proviene principalmente de materias primas por muchas industrias tales como: metalurgia, baterías, equipos solares, galvanización, catalizador en la producción de aceite combustible; los cuales representan peligro para la salud. El níquel es uno de los elementos para los cuales los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal en el medio ambiente está regulada por la Norma Oficial Mexicana (Normas Oficiales Mexicanas, 2021).

La contaminación por níquel presente en aguas residuales de industrias de galvanoplastia, ha impulsado la investigación sobre métodos de tratamiento adecuados para tales vertidos. Los tratamientos normalmente recomendados para remover metales pesados incluyen procesos de precipitación, evaporación, electrodiálisis, adsorción en carbón, extracción por solventes e intercambio iónico con resinas sintéticas (Farooq, 2010).

Estudios previos para la bioadsorción de níquel empleando biomasa de brócoli, mostraron que se obtiene el 98% de remoción, considerado como un valor alto en comparación con otros materiales de alto costo (Rubio Campos, 2003).

Un proceso industrial, solamente tiene estabilidad en el mercado si su aspecto económico es favorable, por lo cual, es necesario diseñar dicho proceso en el cual deberán cumplirse tres fases: diseño preliminar, estudio pre-inversión y diseño final (ingeniería de detalle). El análisis económico de los procesos es un aspecto fundamental para la toma de decisiones porque permite comparar alternativas de diseño y de proyectos (Seader, 2010).

En esta investigación se presenta el análisis económico preliminar (sin regeneración del bioadsorbente) de un proceso para la remoción de níquel procedente de los efluentes de la industria de la galvanoplastia, el cual se encuentra fuera de la norma oficial mexicana con un contenido máximo de 50 ppm.

Marco Teórico

En 1969, Guthrie publica una de las mejores recopilaciones que exista en estimaciones de costos. Para ello, la información deberá ser utilizada para dividir la planta en módulos. Esta técnica se usa para estimar el costo de unidad o planta instalada. El artículo fue basado en datos de 42 proyectos de plantas de proceso, a pesar de que estos son de 1968, constituye un trabajo clásico en el área y su uso para estimación de inversiones ha sido notable (Seider, 2003).

Aunque el trabajo de Guthrie incluye la posibilidad de estimar módulos como edificios, oficinas, terrenos y desarrollo del lugar, los módulos de equipo de proceso son los más importantes para nuestro caso de estudio. Estos módulos consisten en una combinación de varios elementos de costo, tales como:

- Costo de equipo (F_{ob})
- Material directo
- Mano de obra directa de campo
- Costo directo de material y mano de obra
- Costos indirectos
- Costo del módulo desnudo
- Costo del módulo total

La estimación del costo de un módulo de equipo de proceso representa el costo de la construcción de equipo (intercambiador de calor, bomba, columna, entre otros) y el costo del material, mano de obra e indirectos necesarios para instalar el equipo en un circuito de proceso químico.

El método inicia con la estimación de un costo base en función de alguna dimensión del equipo. Ese costo base implica el material de construcción, una geometría base del equipo, una presión de operación (si aplica) y el año base de 1968. Ese costo debe corregirse luego al incorporar los datos de material de construcción, geometría, presión y año para la estimación del equipo deseado. Los costos base para varios equipos de procesos se muestran en las referencias bibliográficas consultadas.

Otra parte del ajuste implica el uso de los factores de módulo, aplicables al costo base para luego corregir ese valor por el efecto de las características de la unidad deseada.

Economía de los Procesos

Para establecer una actividad económica se requiere una inversión, I . A cambio de esa inversión se obtienen ingresos en forma de ventas, las cuales deben de ofrecer un excedente adecuado sobre los costos que implica la operación del proceso para que éste tenga un potencial favorable de comercialización (Seider, 2003). La inversión requerida puede descomponerse en:

A) Inversión fija:

Corresponde a la cantidad de dinero necesaria para construir totalmente una planta de proceso, con sus servicios auxiliares y ubicarla en situación de poder producir. Es básicamente la suma del valor de todos los activos de la planta. Los activos pueden ser tangibles o intangibles. Los primeros se integran con la maquinaria (que incluye el costo de su montaje), edificios, instalaciones auxiliares, por solo mencionar algunos; y los segundos: las patentes, conocimientos técnicos, gastos de organización, puesta en marcha, entre otros.

B) Inversión de trabajo:

Aquí se consideran aquellos recursos que requiere la planta para atender las operaciones de producción y operación, contempla el monto de dinero que se precisa para dar inicio al ciclo de producción en su funcionamiento, o bien, es el capital adicional con el que se debe contar para que comience la producción, esto es, financiar antes de percibir ingresos.

Criterios para la evaluación económica de procesos

Se puede establecer algunos criterios para comparar alternativas en una base económica:

1. Utilidad Bruta (Beneficio Bruto) R .
2. Utilidad Neta (Beneficio Neto), P .
3. Tasa de Retorno, ROI .
4. Beneficio Extra, V .
5. Tiempo de recuperación del Capital, T_R .

Metodología

Para la estimación de los costos, se realizó una búsqueda bibliográfica. Se empleó el método de Guthrie, el cual comienza con la estimación de un costo base en función de alguna dimensión del equipo. Este costo base implica el material de construcción del equipo, geometría base, presión de operación y un año base. Ese costo debe corregirse luego al incorporar los datos del material de construcción, geometría, presión y año para la estimación del equipo deseado. El cálculo se dividió en tres partes y son las que se mencionan a continuación:

- Estimación del monto de inversión
- Costo de operación
- Estimación del precio de venta

- Estimación del monto de inversión

Con los datos de (Rubio-Campos, 2003) se realizan estos cálculos y en la Tabla 1 se presentan los datos de una columna experimental a nivel laboratorio.

Diámetro	0.8 cm
Altura	12 cm
Alimentación	2 mL/cm ³
Densidad del bioadsorbente	25 kg/m ³

Tabla 1. Datos de la columna a nivel laboratorio.

Se determinó el área de la columna nivel laboratorio empleando la ecuación:

$$A = \pi r^2 \quad (1)$$

$$A = \pi(0.4 \text{ cm})^2$$

$$A = 0.5 \text{ cm}^2$$

A su vez se calculó el flux volumétrico de la columna a nivel laboratorio:

$$FR = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

$$FR = \frac{2 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}}{0.5 \text{ cm}^2}$$

$$FR = 4 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^2 - \text{min}}$$

Para el proceso mencionado, se realizó a través de una columna empacada (recipiente vertical). Para determinar el diámetro de dicha columna, se utilizan los flujos de alimentación: 150, 200 y 250 m³/día.

Para tratar 150 m³/día de efluente (agua residual con contaminante que para este caso de estudio es níquel), se tiene:

$$\begin{aligned} & 150 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \left(\frac{\text{cm}^2 - \text{min}}{4 \text{ cm}^3} \right) \left(\frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \right) \left(\frac{1 \times 10^6 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3} \right) \\ & = 26041 \text{ cm}^2 \\ & = 26041 \text{ cm}^2 \left(\frac{1 \text{ m}^2}{1 \times 10^4 \text{ cm}^2} \right) \end{aligned}$$

$$= 2.6 \text{ m}^2$$

Enseguida se determinó el radio de la columna:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3)$$

$$r = \sqrt{\frac{2.6 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$r = 0.9 \text{ m}$$

El diámetro requerido para la columna es $D = 1.8 \text{ m}$ ($5.94 \text{ ft} \cong 6 \text{ ft}$). Además, para el caso de estudio se determina la altura de la columna empleando la ecuación:

$$H = \frac{4M_{\text{bioadsorbente}}}{\pi r^2 \rho_{\text{bioadsorbente}}} \quad (4)$$

$$H = \frac{4(87.5 \text{ kg})}{\pi(0.9 \text{ m})^2 \left(25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}$$

$$H = 5.5 \text{ m} \cong 6 \text{ m}$$

Lo cual equivale a $19.8 \text{ ft} \cong 20 \text{ ft}$. Asimismo, se calculó el volumen requerido para rellenar la columna:

$$BV = \frac{Q}{Q_b} = \left(150 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right) \left(\frac{\text{min}}{0.33 \text{ BV}}\right) \left(\frac{1 \text{ día}}{1440 \text{ min}}\right) = 0.32 \text{ m}^3 = 11.34 \text{ ft}^3$$

Se realiza la misma metodología para los diferentes flujos de alimentación mencionados con anterioridad.

Para encontrar el costo de compra del equipo se utilizan los datos de (Seider, 2003) y son mostrados en la Tabla 2.

Equipo	Factor de medida	Ecuación de costo de compra
Relleno de tamiz fino (biomasa)	$S=BV$ (Bulk volume) (ft^3)	$C_{fob} = 60S$

Tabla 2. Costo de compra para el equipo de bioadsorción.

La metodología que se muestra a continuación se emplea para calcular el costo de la columna de bioadsorción, conforme a cada valor de alimentación. Se muestra un ejemplo para un flujo de $150 \text{ m}^3/\text{día}$.

1) El costo (C_{fob}) que es el costo base por efecto de la geometría requerida para el equipo y el material de construcción es:

$$C_{fob} = 60(11.34 \text{ ft}^3) = \$680.40$$

2) El costo base (C_b), el cual depende de la geometría base, material de construcción y año base; se calculará utilizando gráficas específicas para hornos verticales de proceso (Seider, 2003). Se usa primero la gráfica superior empleando el diámetro y la altura o longitud del recipiente para el valor de la abscisa, y con este valor se usa la segunda gráfica para obtener el costo con la curva correspondiente a recipientes verticales. El valor obtenido es:

$$C_b = \$6500$$

3) El factor de módulo de acuerdo con Guthrie para este tipo de equipo corresponde a 4.34. Por lo tanto, el costo por efecto del factor módulo (C_{md}) es:

$$C_{md} = C_b \times \text{Factor módulo} \quad (5)$$

$$C_{md} = \$6500 \times 4.34 = \$28210$$

4) El costo de la unidad deseada es:

$$C_{mda} = C_{md} + (C_{fob} - C_b) \quad (6)$$

$$C_{mda} = \$28210 + (680.4 - 6500) = \$22390.40$$

5) Este valor representa el costo de la unidad deseada en 2003, año base de la información recopilada. Para estimar el costo de la unidad en el año 2021, se utilizan los índices de costos (Seider, 2003).

Para 2003: 440

Para 2021: 580

Por lo tanto:

$$C_{mda}^* = C_{mda} \times \left(\frac{I_{2021}}{I_{2003}} \right) \quad (7)$$

$$C_{mda}^* = \$22390.40 \times \left(\frac{580}{440} \right) = \$29514.62$$

Añadiendo el 15% de contingencias se obtiene el costo del equipo:

$$\text{Costo del equipo} = \$29514.62 \times 1.15 = \$33941.81$$

6) El costo del equipo se encuentra en dólares americanos, entonces tomando el valor en peso mexicano (19.96 MXN, junio 2021):

$$\text{Costo del equipo} = \$33941.81 \left(\frac{19.96 \text{ MXN}}{\$1} \right) = 677487.53 \text{ MXN}$$

El costo de inversión será calculado utilizando las siguientes ecuaciones:

$$I = I_F + I_w \quad (8)$$

$$I = (80\%)I_F + (20\%)I_w \quad (9)$$

Donde

I : inversión total

I_F : inversión fija

I_w : inversión de trabajo o circulante

Cabe mencionar que la inversión fija para este caso de estudio corresponde al costo del equipo incluyendo las contingencias y a los servicios auxiliares (bomba, columna, mano de obra, instrumentación, cañerías y tuberías, así como las instalaciones eléctricas). Por otro lado, la inversión de trabajo circundante está relacionada a un porcentaje de la inversión fija (20%).

La inversión fija puede dividirse en:

$$I_F = I_E + I_A \quad (10)$$

$$I_F = I_E(75\%) + I_A(25\%) \quad (11)$$

Donde:

I_E : se refiere a la inversión de los equipos de proceso, y

I_A : inversión en equipo auxiliar como: generadores de vapor, torres de enfriamiento, entre otros y, son los considerados en la Tabla 3.

Equipo y servicios auxiliares	Porcentaje
Bomba	10
Columna	25
Mano de obra	8
Instrumentación	6
Cañerías y tuberías	20
Instalaciones eléctricas	14

Tabla 3. Consideraciones para el cálculo de la inversión en equipo auxiliar del proceso (I_A) (Seider, 2003).

La inversión de los equipos de proceso (I_E) es:

$$I_E = 677487.53 \text{MXN}$$

y la inversión de los servicios auxiliares (I_A) para la columna empacada con biomasa de brócoli es:

$$I_A = 562307.18 \text{MXN}$$

Por lo tanto, la inversión fija es:

$$I_F = I_E(75\%) + I_A(25\%)$$

$$I_F = 648685.69 \text{MXN}$$

La inversión de trabajo es:

$$I_w = 20\%I_F$$

$$I_w = 129737.14 \text{MXN}$$

Entonces,

$$I = (80\%)I_F + (20\%)I_w$$

$$I = 544895.98 \text{MXN}$$

b) Estimación del costo de operación

El costo de operación de un proceso C puede evaluarse por unidad de tiempo o por unidad de producción. Esto incluye los costos asociados a la inversión, los costos variables y los costos de mano de obra:

$$aI_f + dMO = 5\%(I) \quad (12)$$

$$C = 27244.80 \text{MXN/día}$$

En este caso: no se generan subproductos, la materia prima (efluente de la industria de la galvanoplastia a 50 ppm) y el material para remover el metal es un desecho orgánico, ambos gratuitos.

c) Estimación del precio de venta

Para estimar el precio de venta, se utiliza el punto de equilibrio (en este caso la empresa no gana ni pierde globalmente, ya que sus utilidades se usan para pagar los impuestos y recuperar su inversión), en el cual el beneficio extra es igual a cero y se representa por la siguiente ecuación:

$$V = P - i_{min} \times I = 0 \quad (13)$$

Donde:

V : es el beneficio extra,

P : es el beneficio neto,

i_{min} : es el beneficio mínimo establecido por la empresa, con un valor de 0.035,

I : es la inversión total del proceso.

$$P = i_{min} \times I$$

$$P = 19071.36 \text{ MXN}$$

Por otro lado, el beneficio neto está definido por:

$$P = R - el - (R - dl)t \quad (14)$$

Y, además:

$$R = s - C \quad (15)$$

Entonces:

$$s = \frac{P + C + el - t(C + dl)}{1 - t} \quad (16)$$

Donde:

R : es el beneficio bruto,

s : son las ventas anuales,

C : es el costo de operación,

P : es el beneficio neto,

e : es el factor de depreciación para fines contables con un valor de 0.1,

d : es el factor de depreciación para fines de impuestos con un valor de 0.1 y,

t : es la tasa de impuestos con un valor de 0.5.

Realizando la sustitución en la ecuación se obtiene que:

$$s = 185264.63 \frac{\text{MXN}}{\text{año}}$$

Las ventas anuales están definidas por:

$$s = pQ \quad (17)$$

Donde:

p : es el precio de venta y,

Q : es la producción anual de cobre.

Para calcular la producción anual de cobre, se parte de la alimentación, así como de la cantidad de níquel disponible.

$$Q_{Ni} = \left(150 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right) \left(\frac{50 \text{ mg Ni}}{\text{L solución}}\right) \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}}\right) \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}\right) \left(\frac{365 \text{ día}}{1 \text{ año}}\right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}\right) = 2737.5 \text{ kg/año}$$

Por lo tanto, el precio de venta será:

$$p = \frac{s}{Q} = \frac{185264.63 \text{ MXN/año}}{2737.5 \text{ kg/año}} = 67.68 \text{ MXN/kg}$$

Se efectúa la misma metodología para los diferentes flujos.

Resultados y discusión

Geometría de la columna

Conforme a los flujos de alimentación considerados, se realizaron los cálculos necesarios descritos en la metodología para establecer los valores del diámetro, altura y factor de medida para la columna, los cuales se muestran en la Tabla 4.

Flujo alimentación m ³ /día	Área m ²	Diámetro ft	Altura ft	Factor de medida S
150	2.60	6.00	20.00	11.34
200	3.47	7.00	13.20	15.13
350	6.08	9.24	7.50	26.47

Tabla 4. Valores del diámetro y factor de medida para el proceso de bioadsorción de níquel.
Fuente: Elaboración propia.

Factibilidad económica del proceso

En la Tabla 5 se muestran los resultados del cálculo del costo del tanque del proceso llevando a cabo por el método de Guthrie, en donde se sugieren tanques de acero al carbón, (Seider, 2003).

Flujo alimentación m ³ /día	C _{fob} \$	C _{mda} \$	C _{mda*} \$	Costo 15% contingencias \$	Costo equipo /E MXN
150	680.40	22390.40	29514.62	33941.81	677478.53
200	907.80	20947.80	27613.01	31524.96	629238.20
350	1588.20	19290.20	25427.99	29242.19	583674.11

Tabla 5. Costo del equipo para el proceso de bioadsorción de níquel para diferentes flujos de alimentación.

Cabe mencionar que el costo base del equipo se determina a partir del diámetro obtenido y de la altura de la columna.

a) Estimación del monto de inversión

Para la estimación del monto de inversión se utilizaron las ecuaciones de la metodología. En este apartado se considera la inversión fija (capital inmovilizado en los componentes del proceso: columna, así como, servicios auxiliares como: bombas, mano de obra, instrumentación e instalaciones eléctricas) y la inversión de trabajo.

La Tabla 6 muestra la inversión requerida para cada uno de los servicios del proceso de bioadsorción de níquel, para los diferentes flujos de alimentación.

Flujo alimentación m ³ /día	Costo equipo / ϵ MXN	Bomba MXN	Columna MXN	Mano de obra MXN	Instrumentación MXN	Cañerías y tuberías MXN	Instalaciones eléctricas MXN	Servicios auxiliares / A MXN
150	677478.53	67747.85	169369.63	54198.28	40648.71	135495.71	94846.99	562307.18
200	629238.20	62923.82	157309.55	50339.06	37754.29	125847.64	88093.35	522267.71
350	583674.11	58367.41	145918.53	46693.93	35020.45	116734.82	81714.38	484449.51

Tabla 6. Inversión para servicios auxiliares para el proceso de bioadsorción de níquel.

b) Costo de operación

En la Tabla 7 se muestran los resultados para el costo de operación del proceso de bioadsorción de níquel para diferentes flujos de alimentación.

Flujo alimentación m ³ /día	I_f MXN	I_w MXN	I MXN	Costo de operación MXN/día
150	648685.69	129737.14	544895.98	27244.80
200	602495.58	120499.12	506096.29	25304.81
350	558867.96	111773.59	469449.09	23472.45

Tabla 7. Costo de operación para el proceso de bioadsorción de níquel.

El precio del costo de operación es por día, considerando los costos asociados a la inversión, costos variables y costos de mano de obra ($aI_f + dMO = 5\%(I)$).

c) Estimación del precio de venta

Para realizar la estimación del precio de venta se emplearon las ecuaciones (13, 14, 15, 16 y 17) mostradas en la metodología.

En la Tabla 8 se presenta el precio de venta de níquel, así como, las ventas anuales para los diferentes flujos de alimentación.

Flujo alimentación m ³ /día	Inversión total / MXN	Beneficio neto P MXN	Costo operación C MXN	Ventas anuales S MXN/año	Producción anual de níquel kg/año	Precio de venta níquel MXN/Kg
150	544895.98	19071.36	27244.80	185,264.63	2737.50	67.68
200	506096.29	17713.37	25304.81	172,072.74	3650.00	47.14
350	469449.09	16430.72	23472.45	159,612.69	6387.50	24.99

Tabla 8. Precio de venta del níquel para los diferentes flujos de alimentación.

Como puede apreciarse en la Tabla, conforme aumenta el flujo de alimentación al proceso, la producción de níquel es mayor y el precio de venta del metal se ve disminuido. Esto puede verse favorecido porque los tiempos de operación disminuirán y, por lo tanto, se podrán tratar mayores cantidades de efluente por día.

El precio internacional de níquel según la Secretaría de Economía Minera (SINEM) es de 8.4890 USD/Lb (Sistema Integral sobre Economía Minera (SINEM), 2021), lo cual corresponde a 373.21 MXN/kg

Esto constituye una alternativa para remover níquel proveniente de los efluentes de la industria de la galvanoplastia, de bajo costo y amigable con el medio ambiente, el cual es seis veces más económico, empleando esta alternativa en comparación con los métodos convencionales.

Conclusiones

A partir de la metodología de Guthrie, se realizó el estudio económico del proceso para la remoción de níquel proveniente de los efluentes de la industria de la galvanoplastia, la cual facilita estimar el costo de una unidad instalada, partiendo de la geometría del equipo y del flujo de alimentación. A su vez, se determinó el costo de operación, la inversión total requerida para el proceso y el precio de venta de níquel en MXN/kg. Estos resultados mostraron que es más económico remover níquel utilizando este proceso y además de bajo impacto con el ambiente. Además, se obtuvo un precio de venta de níquel seis veces menor al que se produce por métodos convencionales que emplean materiales costosos.

De manera que estos indicadores ayudan a la reutilización y reincorporación de este metal nuevamente en la industria del recubrimiento de piezas metálicas, favoreciendo el cuidado del medio ambiente y disminuyendo los costos de inversión en la materia prima.

Agradecimientos

El presente trabajo de investigación fue realizado bajo la supervisión de la Dra. Beatriz Eugenia Rubio Campos y Profr. Nallely Yunuen Rubio Campos, a quienes expresamos nuestro más profundo agradecimiento por hacer posible la realización de este estudio: gracias por su apoyo. Y en honor al Dr. Alberto Florentino Aguilera Alvarado (+) y Dra. Irene Cano Rodríguez, quienes fueron pioneros en este proyecto científico y mentores de las ahora profesoras-investigadoras arriba mencionadas, contribuyendo al desarrollo sustentable en favor del medio ambiente.

Referencias

Farooq, J. A. (2010). Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents a review of the recent literature. *Bioresour. Technol.*, 107(14), 5043-5053.

Normas Oficiales Mexicanas. (10 de julio de 2021). *Normas Oficiales Mexicanas*. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>

Rubio Campos, B. E. (2003). *Eliminación de níquel de soluciones acuosas con biomasa libre e inmovilizada de brócoli*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química.

Seader, J. D. (2010). *Separation Process Principles: Chemical and Biochemical Operations*. (Tercera Edición ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Seider, W. D. (2003). *Product and Process Design Principles*. USA: Wiley.

Sistema Integral sobre Economía Minera (SINEM). (1 de julio de 2021). Obtenido de https://www.sgm.gob.mx/SINEMGobMx/precio_hist_metal.jsp