



Publicación cuatrimestral del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. Año 22, No 63, enero-abril de 2024

# TECNOCULTURA

ISSN: 1870-7157

Investigación · Ciencia · Tecnología · Cultura



<https://revistas.tec.mx/revistas/2022/06/20>

**Oportunidades y Retos que Enfrentan las Sociedades en Nombre Colectivo en México del 2018 al 2022**

**Dediferenciación de Explantos de Hojas de Moringa Oleífera**

**Adaptación de un Sistema Anaerobio-Aerobio para el Tratamiento Conjunto de Aguas Residuales y Residuos de Frutas y Hortalizas**

**Alternativa Electroquímica para el Tratamiento de Aguas con Cromo Hexavalente**







Mtra. Delfina Gómez Álvarez  
Gobernadora Constitucional  
del Estado de México

Mtro. Miguel Ángel  
Hernández Espejel  
Secretario de Educación del  
Estado de México

Tecnológico de Estudios  
Superiores de Ecatepec

#### SUBCOMITÉ EDITORIAL:

José Antonio Arcos  
Casarrubias  
Mara Brisa López Vargas  
Juan Carlos Bretón Pozas  
Judith Cervantes Ruiz  
José Luis Chávez Rojas  
Verónica Martínez Martínez  
Daniel Cedillo Román  
Esther Acevedo Arcos  
Irisbeth Ramírez Díaz  
Ángel Hernández Estrada  
Ángel Mazza Arias

Corrección de estilo  
Rafael Ortiz Hernández

Diseño  
Mara Brisa López Vargas

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN  
SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR Y NORMAL  
TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC  
UNIDAD DE RELACIONES PÚBLICAS Y DIFUSIÓN



#### CONSEJO EDITORIAL

Dr. Juan Humberto Sossa Azuela  
Dr. Alfonso Totosaus Sánchez  
Dr. Martín Salazar Pereyra  
Mtro. Fernando Lugo  
Dr. Armando Gama Goicochea  
Dr. Salvador Contreras Hernández  
Mtro. Gustavo Calvillo Gandulfo  
Dr. Graciano Calva Calva

#### COMITÉS TÉCNICOS DE ARBITRAJE

##### INGENIERÍA INFORMÁTICA

Mtro. Derlis Hernández Lara  
Académico de la División de Ingeniería  
Informática

Mtro. Emmanuel Tonatiuh Juárez Velázquez  
Académico de la División de Ingeniería  
Informática

Mtro. Leonardo Moreno Villalba  
Académico de la División de Ingeniería  
Informática

##### INGENIERÍA EN GESTIÓN EMPRESARIAL

Mtra. Claudia Lozano Mora  
Académico de la División de Ingeniería en  
Gestión Empresarial

Mtra. Ingrid Trinidad Calderón  
Académico de la División de Ingeniería en  
Gestión Empresarial

Dr. Hugo Nathanael Lara Figueroa  
Académico de la División de Ingeniería en  
Gestión Empresarial

##### CONTADOR PÚBLICO

Mtra. Juana Mora López  
Académico de la División de Contaduría  
Pública

Mtra. Elizabeth Mercedes Garmendia  
Guerrero  
Académico de la División de Contaduría  
Pública

##### INGENIERÍA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES

Dr. Abraham Jorge Jiménez Alfaro  
Académico de la División de Ingeniería en  
Sistemas Computacionales

##### INGENIERÍA MECÁNICA, MECATRÓNICA E INDUSTRIAL

Mtro. Wenceslao Cuauhtémoc Bonilla  
Académico de la División de Ingeniería  
Mecánica, Mecatrónica e Industrial

Dra. Belem Arce Vázquez  
Académico de la División de Ingeniería  
Mecánica, Mecatrónica e Industrial

##### INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

Dra. Mariana Bárcenas Castañeda  
Académico de la División de Ingeniería  
Química y Bioquímica

Dra. Isabel de la Luz Membrillo Venegas  
Académico de la División de Ingeniería  
Química y Bioquímica

*Tecnocultura*, revista de divulgación del conocimiento científico, tecnológico y humanístico del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. Año 22, No. 63, enero-abril de 2024. Fecha de publicación: mayo 2024. Número de autorización del Comité Editorial de la Administración Pública Estatal CE: 205/05/10/12-01. Edita y distribuye la Unidad de Relaciones Públicas y Difusión, domicilio: Av. Tecnológico s/n, Col. Valle de Anáhuac, C.P. 55210, Ecatepec, Estado de México. Teléfono 50 00 23 14. Correo electrónico: urpd@tese.edu.mx.

Número de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Educación Pública: 04-2023-010917424300-102, ISSN: 1870-7157. Certificados de Título y de Contenido en trámite. Se autoriza la reproducción total o parcial del material publicado en *Tecnocultura*, siempre y cuando cite la fuente. Los artículos son responsabilidad de los autores.

Revista registrada en el Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (Latindex), No. Folio 13782.

Página oficial: <https://tecnocultura.org/index.php/Tecnocultura>

## Infancia, ciencia y tecnología

*Necesitamos un batallón de pingos intrépidos y analíticos, llenos de bloques en los bolsillos, curiosos con alma de exploradores, eso sí decididos, sorteando con valor el no caer en la lava.*

La presencia de la cultura científica y tecnológica en la sociedad actual, debería ser un tema de gran relevancia, especialmente en lo que concierne a la infancia. La niñez es una etapa crucial para el fortalecimiento de los aspectos cognitivos y emocionales del ser humano; es ahí donde se desarrolla el pensamiento crítico, la creatividad y la capacidad de resolver problemas, así como las habilidades esenciales para desenvolverse en un mundo condicionado por los avances de la ciencia y la tecnología.

Es en la infancia cuando se cultiva la curiosidad y el espíritu de investigación, de una forma que podría catalogarse como natural, pues los niños y las niñas buscan con avidez explorar y conocer el mundo que los rodea. Es ahí cuando la ciencia y la tecnología les puede brindar la oportunidad de hacer preguntas, investigar y descubrir cosas por sí mismos, alimentando su capacidad de asombro y maravilla por el mundo natural, y motivándolos a aprender más sobre el cómo funciona todo.

La ciencia y la tecnología acrecientan las habilidades del pensamiento crítico y alientan a la resolución de problemas, a actuar de manera crítica y a valorar la información recibida, ya que es indudable que en las primeras etapas de la vida se tienen que experimentar y encontrar soluciones creativas a los diversos desafíos. Les brinda la base para ser ciudadanos responsables e informados, y los impulsa a seguir una formación profesional en estos campos, con un sentido creativo e innovador.

La educación en ciencia y tecnología ayuda a los niños a despertar su imaginación y a pensar en nuevas ideas y soluciones. Pero, ¿cómo fomentar la cultura científica y tecnológica en la infancia? Estas son algunas propuestas:

**Cotidianeidad.** Hacer presente la ciencia y la tecnología en la vida diaria con los niños, por ejemplo, explicarles la manera en que se crean o funcionan las comunicaciones, los juegos *on line*, la ropa, los juguetes, la comida, los transportes, etcétera. Infaltable acercarlos a programas que enriquecen su curiosidad y otorgan respuestas extraordinarias, como: Pregunte a los StoryBots de Netflix

**Tomar por asalto a los museos de ciencia y tecnología.** Muchos museos ofrecen exhibiciones, programas y talleres diseñados específicamente para niños, con áreas para adquirir el conocimiento de manera lúdica y divertida, como es el caso de El Papalote Museo del Niño, Universum Museo de la Ciencias, el Museo de la Luz, y lo que es un referente para relacionarnos de manera única con la ciencia y tecnología, el *Discovery Cube* en Los Ángeles California, son una muestra que la cultura de la Ciencia y Tecnología es divertida, enriquecedora y formadora.

**Incentivar la lectura.** La lectura fortalece la imaginación, recrea imágenes y motiva a la reflexión. Un ejemplo de una obra literaria infantil con carácter científico muy simple, sin ninguna pretensión de ser el gran libro de la ciencia en la infancia, es *Aquí Estamos. Notas para vivir en el Planeta Tierra*, de Oliver Jeffers.

**Experimentar en el hogar.** Nada como crear un pequeño laboratorio de experimentos hogareños, por más sucio y desastroso que esto sea, pues por cada descubrimiento abierto, vale la pena un ligero desorden.

**Kermés de Ciencia y Tecnología.** Así como existe la costumbre de celebrar una festividad con dulces, juegos y comida, construyamos en las escuelas la costumbre de mantener una relación festiva con la ciencia y la tecnología, con programas, ferias, actividades y eventos divertidos y enriquecedores sobre estos conocimientos.

Fomentar la cultura científica y tecnológica en la sociedad mexicana, es un tema complejo y desafiante, pero todo esfuerzo, tiempo o recurso destinado a esta iniciativa, seguramente habrá de rendir frutos, pues debemos considerar que la infancia es una inversión en el futuro.

# INFORMACIÓN PARA LOS AUTORES

La Revista **Tecnocultura** es un órgano de difusión del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE); su publicación es cuatrimestral, el objetivo principal es la divulgación del pensamiento y los avances científicos, tecnológicos y humanísticos, ya sea que se generen en las diferentes áreas académicas de la Institución o de origen externo, pero que puedan ser de interés general.

- La información podrá presentarse en forma de artículo, ensayo o reportaje, incluyendo materiales de divulgación. Los trabajos deben ser producto de investigaciones de elevado nivel académico, que contribuyan al conocimiento en la materia y ser inéditos en español. Igualmente, las ponencias o presentaciones deberán adaptarse para su edición escrita. En todos los casos, se buscará que su contenido sea ameno y novedoso.

- El lenguaje debe ser accesible a estudiantes de licenciatura, sin perjuicio de la información científica o académica contenida en el artículo. Cuando sea necesario el uso de tecnicismos, deberá explicarse su significado con la amplitud necesaria. Se recomienda la inclusión de recuadros que aclaren el significado de conceptos de difícil comprensión.

- Los artículos deben tener subtítulos o incisos; un resumen introductorio (*abstract*) en español e inglés, no mayor de diez líneas, que atraiga el interés del lector. En seguida, mencionar las palabras clave del artículo, y su respectiva versión en inglés (*keywords*). Asimismo, al final del artículo incluir una breve conclusión, y la bibliografía o fuentes consultadas.

- Para las citas y referencias bibliográficas que aparezcan en el texto, se utilizará el modelo APA (Asociación de Psicología de Estados Unidos de América), cuyas características se detallan en el documento en PDF anexo, titulado *El Manual de Publicación APA al Alcance de Todos*.

- Para fines de registro, se solicita anexar una hoja que contenga datos curriculares del autor o autores, como nombre completo, grado académico, institución de procedencia, domicilio, teléfono, y dirección electrónica.

## Recomendaciones

- Revisar meticulosamente la ortografía, signos de puntuación, sintaxis, redacción, aparato crítico (notas, citas, fuentes, bibliografía, etcétera), y la estructura del trabajo.

- En la bibliografía o fuentes consultadas, deberán incluirse todos los datos para la identificación de la fuente informativa:

apellidos y nombres del(los) autor(es), año, título de la obra, número de edición, país, editorial, tomo o volumen, número de páginas totales, colección, etcétera.

- Evitar o reducir al mínimo los documentos, ilustraciones o fuentes de consulta provenientes de Internet, o en su caso, indicar claramente su origen mediante las respectivas cibergrafías. Si los cuadros, tablas dibujos, fotografías o gráficos en general son de creación propia, también deberá mencionarse al pie de éstos.

- En el caso de las citas textuales, identificar claramente dónde se abren y cierran las comillas.

- Verificar la correcta jerarquización y numeración de capítulos, subcapítulos, incisos, u otras divisiones, mismas que deberán conservar un orden lógico y constante a lo largo del texto. El resumen, introducción, palabras clave, agradecimientos, conclusiones y bibliografía o fuentes, no son numerables para el desarrollo del tema.

- Utilizar un lenguaje claro, preciso, con conceptos, siglas o signos bien explicados. Procurar el uso de sinónimos para no repetir palabras. Evitar las cacofonías (palabras con sonido semejante), solecismos (falta de sintaxis), barbarismos (uso de términos extranjeros, arcaicos y neologismos), muletillas, "queísmos", verbos fáciles (hacer, poner, decir, tener, haber, etcétera), adjetivos, frases hechas, y otros vicios del lenguaje.

- Conservar un estilo constante de redacción.

- Evitar los párrafos largos o con cadenas de ideas demasiado extensas. Es preferible utilizar párrafos cortos, de cinco a siete líneas en promedio.

- Eludir el uso excesivo de atributos tipográficos para destacar palabras, frases o párrafos (como negritas, cursivas, subrayados, mayúsculas, tipografía diferente, etcétera), si no son estrictamente necesarios.

## Características de Presentación

- Se recomienda una extensión máxima de 10 cuartillas, incluyendo cuadros, notas y bibliografía. El texto deberá estar elaborado en Office Word 2003 o versiones posteriores, guardando el documento con la extensión .doc. y entregar copia del archivo digital, así como una copia impresa. Los materiales serán evaluados por el Consejo Editorial de la revista.

- El trabajo deberá presentarse en hojas tamaño carta y por una sola cara, sin tachaduras ni guiones al final de cada línea,

ni tampoco división de palabras. El cuerpo del texto deberá estar a una sola columna, con un interlineado de 1.5; la caja de texto será de 28 líneas por cuartilla en promedio y 64 caracteres por línea (es decir, 1790 caracteres por cuartilla). La página deberá poseer márgenes de 2.5 cm en cada lado.

- La tipografía deberá ser Times, Arial, o alguna otra de uso común, con un tamaño de 14 puntos para títulos y subtítulos; 11 a 12 puntos para el texto, y 9 a 10 puntos para las notas o citas.

- Al inicio de los párrafos se debe omitir la sangría, o en su caso, que tenga un máximo de tres espacios. Cada párrafo deberá separarse con un espacio (o *enter*).

- Estructurar el texto con un diseño básico, que permita identificar la conformación y ordenamiento de los elementos que integrarán el texto impreso, pero no emplear atributos automáticos (numeraciones o viñetas), especiales, etiquetas u otros recursos de diseño que no sean estrictamente necesarios.

- Si el archivo del texto es muy extenso o contiene elementos que lo hacen demasiado grande, se recomienda segmentar la obra en capítulos o secciones independientes.

- Las ilustraciones, fotografías gráficas o figuras deberán incluirse dentro del texto impreso y por separado en archivos electrónicos u originales de óptima calidad (imágenes nítidas, uniformes y sin distorsiones), en formato TIFF o JPG con una resolución de 300 ppp, y deberán tener como atributo el estar "delante del texto". Las gráficas, esquemas, figuras, cuadros y similares se deben elaborar en computadora a línea, en Word, Power Point, Corel Draw o similares, sin pantallas.

- Si se utilizan fórmulas matemáticas, signos o símbolos especiales generados con algún programa expofeso, cerciorarse de que sean editables y compatibles con Office Word.

Para fines de registro, se solicita anexar una hoja que contenga datos del autor, como nombre, grado académico, institución de procedencia, domicilio, teléfono y dirección electrónica.

Atentamente  
Unidad de Relaciones Públicas y Difusión  
del Tecnológico de Estudios  
Superiores de Ecatepec  
Teléfono: 55 5000 2314  
urpd@tese.edu.mx

# C contenido



## Oportunidades y Retos que Enfrentan las Sociedades en Nombre Colectivo en México del 2018 al 2022

Elizabeth M. Garmendia Guerrero  
Héctor Colín Alexander  
Alejandro Iván Flores Galloso  
Iván Emmanuel Montecinos Anguiano  
Manuel Eduardo Salvatierra Pantoja  
Montserrat Velázquez Hernández



## Dediferenciación de Explantes de Hojas de Moringa Oleífera

Montserrat Lizbeth Sánchez Martínez  
Pedro López-Ordaz  
Alfonso Totosaus Sánchez  
Ignacio García-Martínez



## Adaptación de un Sistema Anaerobio-Aerobio para el Tratamiento Conjunto de Aguas Residuales y Residuos de Frutas y Hortalizas

Ivonne Abigail Rivera Bueno  
Alberto Zarate Zamora  
Andrea Guadalupe Popoca Cuestas  
Miguel Ángel Villalobos Silva  
Sergio Esteban Vigueras Carmona



## Alternativa Electroquímica para el Tratamiento de Aguas con Cromo Hexavalente

Juan Antonio Yáñez Varela  
Sergio Alejandro Martínez Delgadillo  
Jesús Eduardo Lugo Hinojosa

# Oportunidades y Retos que Enfrentan las Sociedades en Nombre Colectivo en México del 2018 al 2022

Elizabeth M. Garmendia Guerrero<sup>1</sup>, Héctor Colín Alexander<sup>2</sup>, Alejandro Iván Flores Galloso<sup>2</sup>, Iván Emmanuel Montecinos Anguiano<sup>2</sup>, Manuel Eduardo Salvatierra Pantoja<sup>2</sup>, y Monserrat Velázquez Hernández<sup>2</sup>



## Resumen

Asumiendo que es común el conflicto de establecer qué tipo de sociedad crear al constituir una sociedad mercantil, el presente artículo realiza una revisión conceptual de lo que se entiende por sociedad mercantil y las principales diferencias entre la Sociedad Anónima (S.A.) y la Sociedad en Nombre Colectivo (S.N.C.). Se revisan también conceptos como tipos de socio, capital y aportación, responsabilidad de los socios, forma de constitución y entidad económica. Posteriormente, se describen las circunstancias en las que se puede registrar una entidad económica en ambos tipos de sociedades,

### Acerca de los autores

<sup>1</sup> Docente del Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

<sup>2</sup> Egresado del Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.



prestando especial atención al marco jurídico instaurado por la Ley General de Sociedades Mercantiles (LGSM), para la utilización del registro en dichas sociedades. Finalmente, se detalla el trabajo que el Contador Público asumirá en su labor de consultor, para que los emprendedores elijan la sociedad mercantil que mejor les funcione de acuerdo con su actividad, evitando así problemas al elegir el tipo de sociedad, lo que podría evitarles problemas fiscales y legales a largo plazo, durante su trayectoria como empresarios e incluso el cierre de operaciones por falta de asesoría de un profesional con conocimientos mercantiles.

**Palabras clave:** Sociedad mercantil, Socios, Tipo de aportación, Tipo de capital.

### **Abstract**

*Assuming that the conflict is common of establishing what type of company to create when establishing a commercial company, this article carries out a conceptual review of what is understood by a commercial company and the main differences between the anonymous society (S.A.), and society in name collective (S.N.C.). We revised concept such as types of partner, capital and contribution, responsibility of the partners, form of constitution and economic entity are also reviewed. Subsequently, the circumstances in which an economic entity can be registered in both types of companies are described, paying special attention to the legal framework established by the General Law of Commercial Companies, for the use of the registry in said companies. Finally, the work that the Public Accountant will assume in his work as a consultant is detailed, so that entrepreneurs choose the commercial company that works best for them according to their activity, thus avoiding problems when choosing the type of company, which could avoid tax and legal problems in the long term, during their career as entrepreneurs and even the closure of operations due to lack of advice from a professional with commercial knowledge.*

**Keywords:** Commercial company, Partners, Type of contribution, Type of capital.

### **Introducción**

Esta investigación documental, tiene el propósito de dar a conocer la importancia de las sociedades mercantiles en México, dado que a través ellas se fomenta la inversión nacional, como la fabricación de productos o la prestación de servicios profesionales. Formalizar un ente económico amplía la oferta de trabajo para muchos mexicanos, así como recaudar impuestos para la participación del gasto público.

El principal objetivo de las sociedades mercantiles es respaldar las actividades lucrativas que desarrollan, dándoles a las entidades comerciales el derecho a poseer propiedades y efectuar contratos.

La tradicional Sociedad Anónima (S.A.) se puede emplear para todo tipo de negocios en los que exista un lucro. Integrada por acciones y accionistas, la forma de administración puede ser a través de una sola (Administrador Único) o varias personas (Consejo de Administración), considerando que existe un monto mínimo en el capital social para constituir la sociedad y que las responsabilidades de los accionistas se limitan a sus aportaciones al capital de la empresa.



Por otra parte, una Sociedad en Nombre Colectivo (S.N.C.) tiene varios dueños y permite distribuir las responsabilidades de la compañía entre cada uno de los socios por partes iguales. No pueden ceder sus derechos o admitir un nuevo socio sin el consentimiento de los demás o de la mayoría, según el contrato social. Además, este tipo de sociedad mercantil se pone al alcance de muchos emprendedores, ya que no hay un mínimo de capital para su constitución.

Los requisitos para la creación de las sociedades antes mencionadas hacen que su creación sea laboriosa, debido a que se debe tener en mente detalles como el nombre, domicilio, tipo de aportación de los socios, razón social, importe de capital, pago de impuestos a la que está obligada, la forma de distribución de utilidades, así como su posible disolución.

Por ende, los factores como el objeto social, la relación entre los socios, el riesgo o incluso la propia actividad económica, llevan a clasificar las sociedades mercantiles en distintos tipos, lo cual causa confusión cuando se está por constituir una sociedad mercantil.

Como primer punto, se presenta el marco teórico, considerando los antecedentes presentados por algunos autores como Alba (2018), quien analizó el tipo de socios, y Carlos A. Gabuardi (2019) que mencionó las soluciones que ofrecen las S.N.C.

El siguiente contenido, es la metodología que se realizó a través de la técnica cualitativa, y permite conocer los conceptos básicos necesarios para la constitución de una sociedad mercantil. Se partió de la definición de sociedades mercantiles, en el cual se describen las principales características de la S.A. y la S.N.C.

Posteriormente, se realizó el análisis de resultados con base en el objetivo principal (la comparación entre la S.A. y S.N.C.), con la finalidad de estructurar la guía que permite la orientación al emprendedor en la correcta constitución de una sociedad mercantil, según sus necesidades.

Finalmente, se presentan las referencias obtenidas de las citas utilizadas durante la investigación; cabe mencionar que éstas se obtuvieron de los antecedentes presentados en la investigación.

## Marco Teórico

La presente investigación se enfoca en las sociedades mercantiles de México, que se definen como: "Aquellas que se constituyan en alguna de las formas reconocidas por la Ley General de Sociedades Mercantiles y podrán realizar los actos de comercio necesarios para el cumplimiento de su objeto social, salvo lo expresamente prohibido por las leyes y los estatutos sociales." (LGSM, 2018)



Es importante señalar que en el país existen siete tipos de sociedades mercantiles: sociedad en nombre colectivo; sociedad en comandita simple; sociedad de responsabilidad limitada; sociedad anónima; sociedad en comandita por acciones; sociedad cooperativa y sociedad por acciones simplificada (LGSM, 2018); sin embargo, generalmente las personas que optan por constituir una sociedad, se dejan llevar por la más común, la Sociedad Anónima, entendiendo ésta como una sociedad mercantil capitalista, con denominación y capital fundacional, representada por acciones nominativas suscritas por accionistas que responden hasta por el monto de su aportación (Jiménez, 2020).

Es importante señalar, que esta decisión en ocasiones se toma sin saber cuál es la que mejor se adapta a sus necesidades. Las personas optan por la Sociedad Anónima (S.A.), ya que se guían por la característica más simple y común, es decir, no tiene límite de accionistas. Entendiendo accionista como la persona física, moral o extranjera que legalmente posee una o más acciones en una corporación pública o privada. (Portal de Gobierno de México, 2022). Lo que se puede interpretar como más capital social de los accionistas, pero esto no significa que realmente el aumento de capital vaya a ser proporcional al aumento de accionistas. Dicho esto, tiene que ver con el capital que de cada accionista aporta al capital general.

El capital mínimo para constituir una Sociedad Anónima es de 50,000 pesos. La provisión por sí sola debe ser igual al 5% de las ganancias anuales hasta completar el 20% del capital social (Empresas, 2020). Asimismo, una característica interesante de este tipo de sociedad, es que el período puede ser desde 1 año hasta 99 años; otro aspecto de relevancia, es que las empresas pueden cerrar o cotizar en bolsa.

Un enfoque diferente es la Sociedad en Nombre Colectivo (S.N.C), aquella que existe bajo una razón social y en la que todos los socios responden, de modo subsidiario, ilimitada y solidariamente, a las obligaciones sociales. Su denominación oficial es la de ente económico.

Este nombre con validez jurídica es el que se empleará en la documentación donde conste la creación de ésta. Los socios se comprometen participar en la proporción que establezcan, de los mismos derechos y obligaciones, respondiendo subsidiaria, personal, solidaria e ilimitadamente con todos sus bienes. Entendiendo bienes como todo inmueble o derecho que puede ser valorado económicamente y que casi siempre tiene un dueño o, al menos, un poseedor. (Sol, 2020)

La característica más sobresaliente de la Sociedad Colectiva es que su constitución no exige un capital, es decir, el conjunto de activos, bienes o dinero que utiliza un ente económico o una persona para generar riqueza y conseguir ingresos produciendo otros bienes y servicios, que carecen de un beneficio importante para el inicio de su actividad (Lange, 1979). Además, todos los socios se comprometen a participar personalmente, constituyéndose una comunidad de trabajo. Asimismo, todos los socios están obligados a trabajar, lo cual es una cualidad independientemente de su aportación.

Ahora bien, una Sociedad por Acciones Simplificada (S.A.F.), está integrada por una o más personas físicas, quienes sólo están obligadas a pagar sus aportes en acciones y en ningún caso podrán ser accionistas de otro tipo de sociedad mercantil, de acuerdo con las fracciones I a VII, del artículo 1 de la Ley General de Sociedades Mercantiles.

El total de ingresos acumulables anualmente no podrá exceder de 5 millones de pesos, y en caso de que así sea, en automático cambiará de régimen societario ofrecido por la LGSM.

Para la constitución de este tipo de sociedad se requiere uno a más accionistas (solo personas físicas), firma electrónica de cada uno de ellos y tener la autorización de la dominación.

El principal objetivo de este tipo de sociedad, es eliminar la informalidad, simplificar el proceso de constitución de las micro y pequeñas empresas, y fomentar el desarrollo de estas sociedades, para que puedan adaptarse a formas de operación más complejas en el futuro.

Por otra parte, una Sociedad Cooperativa (S.C., de aquí en adelante) es una organización social, constituida por personas físicas, basada en los principios del interés común y la solidaridad (Portal de Gobierno de México, 2022), con el objetivo de satisfacer las necesidades de individuos a través de la realización de actividades empresariales, así como la producción, distribución y consumo de bienes y servicios.

Los requisitos para constituir una Sociedad Cooperativa, son: tener un mínimo de cinco suscriptores para poder constituirse; el importe mínimo para su constitución es del 10% cuando menos del valor de los certificados y considerando solamente un voto por socio, independientemente de la cantidad que aporte. (México, 2022)

En cuanto al acta constitutiva, debe incluir el horario de funcionamiento de la cooperativa, el monto del capital social (variable), el domicilio de la empresa y el motivo de la liquidación.

Ahora bien, las Sociedades en Comandita por Acciones (S. C. A), según Hanni A. Lámbarry (2016):



“Es la que existe bajo una razón social y se compone de uno o varios accionistas comanditarios, es decir, que únicamente parte de los accionistas suministran los fondos económicos, sin participar en la gestión de ésta, y están obligados solamente al pago de sus acciones, y de uno o varios accionistas comanditados que operan a través de las aportaciones de los comanditarios, y tienen responsabilidad ilimitada y solidaria de las obligaciones sociales.”

Al igual que las sociedades mercantiles antes mencionadas, se constituye a través de un fedatario público, pero la diferencia radica en que no existe un mínimo de capital social para formar este tipo de sociedad, poniéndose al alcance de muchos emprendedores. Asimismo, las reservas deben ser del 5% de las utilidades anuales y hasta del 20% del capital. (EMPLEO, 2021). En ésta si pueden participar como socios las personas físicas y morales. Existen dos tipos de socios: los comanditados, que responden de manera subsidiaria, ilimitada y solidariamente de las obligaciones de la sociedad, y los comanditarios, quienes responden de manera limitada, únicamente por el pago de sus acciones.

Las únicas dos condiciones para poder constituir una S.C.A., son: contar mínimo con dos socios y tener claro qué tipo de socio se registrará en el acta constitutiva, que puede ser industrial o capitalista.

En cuanto a las Sociedades de Responsabilidad Limitada (S.R.L.), los socios se reúnen únicamente para el pago de aportaciones, sin tener que usurpar sus bienes personales, es decir, solo responderán con bienes de la empresa.

Esta empresa puede tener hasta 50 socios para conocerse y generar confianza dentro de la empresa, siendo dirigida por un gerente (socio de la empresa o ajeno a la sociedad) y puede ser temporal o de manera indeterminada. (EMPLEO, 2021)

En este tipo de sociedades, los requisitos son: contar mínimo con dos socios y tener claro qué tipo de socio se registrará en el acta constitutiva, puede ser industrial o capitalista, al igual que la sociedad anterior (S.C.A.).



Para constituir esta sociedad, es necesario lo siguiente: realizarlo mediante un fedatario público; no existe una cantidad mínima de capital; se debe expresar la identidad de cada uno de los socios y tener claro qué tipo de socios se registrarán en el acta constitutiva.

Además, el nombre de la empresa incluye “Sociedad en Comandita”, o más comúnmente su abreviatura “S.C.”. En cuanto al capital mínimo, este tipo de sociedad no se constituye, pero las reservas deben ser equivalentes al 5% de las utilidades anuales, que pueden llegar hasta el 20% del capital fijo total. (EMPLEO, 2021)

Por último, la Sociedad en Comandita Simple es la que existe bajo una razón social y ésta debe tener el nombre de uno o más socios colectivos, seguido de “y compañía” u otra palabra equivalente (Infoautónomos, 2020). Consta de uno o más socios comanditarios, lo cual significa que una parte de los socios que aportan el fondo económico, no intervienen en la administración, y están obligados a pagar solo la parte que aportaron inicialmente.

Dicho lo anterior, los aspectos importantes que se debe tener en cuenta al momento de seleccionar una sociedad, son: el tipo de socios, donde se puede encontrar a los socios industriales que aportan su trabajo y perciben un sueldo. Y los socios capitalistas, que aportan el capital monetario que ésta tiene; otro factor es el tipo de aportaciones, entendiéndose como dinero, bienes o trabajo, aspecto no menos importante, al igual que los derechos y obligaciones, donde el derecho a votar que tienen los accionistas es el más importante de los derechos de consecución (persiguen como objetivo garantizar los derechos patrimoniales del accionista, fundamentalmente a través de los órganos de administración y vigilancia), ya que a través de él, los accionistas manifiestan su voluntad, tomando parte en las decisiones colectivas de la sociedad, participando en la gestión social, en la realización de su finalidad y en el propósito último de la sociedad.



De esta forma, se puede tener mayor perspectiva para un análisis y tener una inscripción a una sociedad que realmente pueda beneficiar en sus proyecciones a futuro, que será saber a dónde va la empresa, prever cambios en el mercado y ser capaz de adaptarse antes que la competencia. Se conseguirá con esto una mayor motivación para los socios, al contar con una mayor información sobre constitución de la sociedad, proceso que muchos negocios omiten, a pesar de que el resultado siempre vale la pena para avanzar en su formalización legal, contable y fiscal. Cuando se constituye una sociedad mercantil, “se conforma un sujeto de derecho dotado de personalidad jurídica” distinta a la de sus socios.

Finalmente, cada tipo de sociedad mercantil tiene una estructura específica que es necesario comprender, ya que se debe elegir la que más convenga

según el giro principal y particularidades del ente económico. Todas las sociedades mercantiles se constituyen con un fin económico, por lo que es importante tener claro cuál es la que mejor se adapta, y así obtener una mayor rentabilidad.

Además de elegir la sociedad que más se adapta, es indispensable que el contrato contenga todos los acuerdos, reglas, condiciones y mecanismos para las diferentes situaciones. Por todo lo anterior, se destaca la importancia de buscar asesoría profesional.

## Metodología

Para la presente investigación de tipo documental, se realizó el análisis de la Norma Internacional de Contabilidad No. 28, con el propósito de señalar las características de “entidad económica”.

Del antecedente de Alba (2018) se analizó el tipo de socios que existen en las sociedades mercantiles. Con esta información se realizó la comparación del mismo indicador entre la Sociedad en Nombre Colectivo y la Sociedad Anónima.

De la misma Norma Internacional de Contabilidad No. 28, se analizó el concepto de “Inversiones en asociadas”, bajo los siguientes indicadores: entidad de inversión, valor razonable, entidades controladas, valor fiscal y valor de adquisición. Esto con la intención de que el interesado determine la contabilidad de las inversiones en asociadas y establezca los requerimientos para la aplicación del método de participación al contabilizarlo.

Para los indicadores: inversionista, negocio, voto adquirido, valor nominal y participación controladora, se analizó la Norma de Información Financiera B-7, que hace referencia a las adquisiciones de negocios, con el propósito de conocer los beneficios de registrar una Sociedad en Nombre Colectivo.

Con base en el artículo de Gabuardi (2019), se analizaron las soluciones que ofrecen las Sociedades en Nombre Colectivo en México, de acuerdo con las necesidades del año 2022.

Asimismo, con fundamento en la Norma Internacional de Contabilidad 32, se indicó que un instrumento financiero derivado, es un activo o un pasivo financiero cuando otorga a una de sus partes la posibilidad de elegir cómo liquidarlo, salvo que dentro de todas las alternativas de liquidación surja que se trata de un instrumento de patrimonio. De esto, se consideró el indicador de instrumento financiero, relaciones contractuales, entidades jurídicas, pasivo financiero, capital financiero y patrimonio. El estudio del artículo “Análisis de los determinantes de revelación de instrumentos financieros mediante el uso de componentes principales: el caso de empresas mexicanas”, tuvo como objetivo identificar las características que impulsan a las empresas mexicanas a proporcionar más y mejor información sobre instrumentos financieros.

Se precisó que el término Capital Contable, es un indicador clave para el cumplimiento del objetivo, este concepto se utilizó como referencia en marcadores como: Estado de Resultado Integral, Estado de Situación Financiera, Estado de Flujos de Efectivo, y Estado de Cambios en el Capital. La información financiera está considerada en la preparación y presentación de los Estados Financieros.

## Análisis de Resultados

Se analizó que la Sociedad en Nombre Colectivo, tal como está prevista en la Ley General de Sociedades Mercantiles, siendo una de las sociedades organizada por un grupo de personas vinculadas asociativamente, con un propósito en común.

Se obtuvo que registrarse en una Sociedad en Nombre Colectivo tiene ciertas ventajas, entre ellas, que ningún socio podrá concederle a un extraño la participación, salvo que los demás socios estén de acuerdo. Por otro lado, este tipo de sociedad se pone al alcance de cualquier entidad económica, ya que no existe un mínimo de capital, por lo que puede registrarse a partir de un peso mexicano, y solo se necesitan dos socios. Asimismo, los socios pueden aportar dinero o conocimientos para poner la sociedad en marcha.

No obstante, es una de las Sociedades Mercantiles que lamentablemente ha caído en desuso por la falta de información.

Durante años, la mayoría de las personas decidían registrar su empresa como Sociedad Anónima, ya que es una de las sociedades más comunes, pero lo ideal sería tener una asesoría con un especialista en derecho mercantil, para conocer cuál de las sociedades es la que mejor les conviene y no caer en el error de registrarse en una sociedad, sin antes analizarla.

Con estos resultados se dio origen al siguiente proyecto documental denominado “Guía comparativa entre Sociedad en Nombre Colectivo y Sociedad Anónima”. En la guía se especificarán todos los requisitos, que van desde solicitar identificaciones oficiales, comprobantes de domicilio, RFC y CURP, hasta pedir el nombre con el que se registrará la sociedad frente a la Secretaría de Economía, el objeto social, los datos en general de los aliados o accionistas, domicilio de la compañía, capital social, maneras de gestión y vigilancia, y datos de quienes incorporan estos organismos, si admite integración de extranjeros, y vigencia de la sociedad.

Dicho lo anterior, la principal finalidad de la guía, es orientar a los emprendedores al momento de constituir una sociedad, identificando los conceptos más importantes para que cualquier persona pueda comprenderlos de manera clara y sencilla.

En el instante en que se forma una sociedad con socios, es preciso tomar muchas decisiones y una de las primeras es la elección del tipo de sociedad que más convenga a la persona y a la empresa. Elegir un tipo de sociedad mercantil para pequeñas y medianas empresas depende de las necesidades de cada negocio, es por eso que se busca orientar al interesado para tomar la mejor decisión posible.

Independientemente de que el interesado sepa o no cuál es la sociedad que mejor se ajusta a su modelo de comercio y necesidades, debe continuar haciendo el trabajo que aún lleva a cabo. Ciertos emprendedores se detienen o esperan el instante ideal para emprender su compañía, sin embargo, solo agregan pausas y trabas a sus ideas, o peor todavía, cierran esa oportunidad.

Sin duda alguna, México necesita nuevas y mejores estrategias, y las sociedades mercantiles son ejemplo de ello.



### Fotografías

<https://cicde.mx/diferentes-tipos-sociedades-mexico/>

<https://mexico.justia.com/derecho-corporativo/representacion-legal-de-las-sociedades/>

<https://legamy.com/publicacion/puede-emitirse-bonos-de-fundador-en-una-sociedad-mercantil-distinta-a-una-sociedad-anonima>

<https://escuela-emprendedores.alegra.com/administracion-finanzas/cuales-los-tipos-empresas-sociedades-colombia/>

<https://economia3.com/sociedad-comanditaria/>

[https://www.postposmo.com/sociedad-en-nombre-colectivo/#google\\_vignette](https://www.postposmo.com/sociedad-en-nombre-colectivo/#google_vignette)



## Conclusión

Una vez realizado el respectivo análisis de los datos obtenidos y tomando en consideración los objetivos trazados en la investigación, fue posible llegar a las siguientes conclusiones:

Las sociedades mercantiles, como persona jurídica, son susceptibles de obligaciones y derechos, por lo que están reguladas en la Ley General de Sociedades Mercantiles, donde se establecen los tipos de sociedades, requisitos, capital, administración y todo lo necesario para su constitución y regulación.

Es importante señalar que no toda entidad que tiene un fin común, es jurídicamente una sociedad, sino solo aquellas que nazcan de un pacto contractual, cumpliendo así una característica importante y esencial de la sociedad, ya que permite excluir de su regulación a la comunidad, la copropiedad, y otras.

Durante la investigación, se encontraron más beneficios al constituir una Sociedad en Nombre Colectivo, ya que ningún socio podrá concederle a un extraño la participación en ella, hasta que todos los socios estén de acuerdo. La ventaja aquí, es que se puede constituir solo con dos socios, lo que lleva a una mejor organización, contribuyendo cada uno con su esfuerzo para conseguir que la sociedad mercantil progrese.

Al estudiar algunos artículos señalados en la investigación, se puede decir que ésta es una opción viable, por las siguientes razones:

- La ventaja de que haya mínimo dos personas, es que obliga a los socios a participar en las decisiones de la empresa, sin que ninguno se imponga a los demás, la responsabilidad es solidaria e ilimitada, es decir, todos responden por las actuaciones que realicen la sociedad y los otros socios.
- Existe una más amplia posibilidad de reunir un mayor capital para la empresa, en comparación con una sociedad individual.

Se llegó al resultado que puede formalizarse desde un pequeño negocio, como podría ser una PYME, hasta grandes empresas de reconocimiento municipal, estatal o incluso nacional. Solo hace falta fomentar la investigación o incluso mejorar la orientación para los interesados. Como resultado de esta necesidad, se elaboró la “Guía de comparación entre la Sociedad Anónima (S.A) y Sociedad en Nombre Colectivo (S.N.C)” basada en los artículos que se consultaron y en la información recopilada, la cual se procesó e interpretó para que el lector o entidad económica interesada pueda comprender mejor qué tipo de sociedad es la conveniente, según la actividad principal que realice el emprendedor, así como el monto de capital reunido y el número de socios.

Por otro lado, como resultado del proceso, se logró obtener un glosario útil para aclarar las ideas y tener mejor entendimiento de los tecnicismos utilizados en el ámbito mercantil.

## Referencias

EMPLEO, S. D. (01 de enero de 2021). *Gobierno de la Ciudad de México*. Obtenido de <https://trabajo.cdmx.gob.mx/storage/app/media/guia-para-la-formacion-de-cooperativas-en-mexico.pdf>

Empresas, E. (Septiembre de 2020). *Formas jurídicas de las empresas*.

Infoautonomos. (01 de octubre de 2020). *Infoautonomos*. Obtenido de <https://www.infoautonomos.mx/sociedades/sociedad-en-comandita-simple/>

Jiménez, V. M. (20 de mayo de 2020). *Concepto de Sociedad Anónima*.

Lámbarry, H. A. (2016). *Contabilidad de Sociedades. Teoría y Práctica*, México, Ed. Patria.

Lange, O. (1979). *Economía Política. Fondo de cultura económica*.

LGSM. (14 de junio de 2018). *Ley General de Sociedades Mercantiles*. Obtenido de <https://auren.com.mx/blog/constitucion-de-sociedades-mercantiles/>

México, S. D. (22 de Septiembre de 2022). *Secretaría del Trabajo, Gobierno del Estado de México*. Obtenido de [https://strabajo.edomex.gob.mx/constitucion\\_sociedades\\_corporativas](https://strabajo.edomex.gob.mx/constitucion_sociedades_corporativas)

Portal del Gobierno de México. (2022).

SA, E. E. (Septiembre de 2022). *Formas Jurídicas de las Empresas*.

Sol, D. (20 de enero de 2020). *Tipos de bienes*.

# Dediferenciación de Explantes de Hojas de *Moringa Oleífera*

Montserrat Lizbeth Sánchez Martínez<sup>a</sup>, Pedro López-Ordaz<sup>b</sup>, Alfonso Totosaus Sánchez<sup>a</sup> e Ignacio García-Martínez<sup>a\*</sup>



## Resumen

Debido al impacto que tiene la *Moringa oleifera* por sus múltiples propiedades, se requiere producirla en grandes cantidades para satisfacer la demanda industrial, tomando en cuenta que debe contar con características similares, ya que los productos comercializados necesitan cumplir con un grado de estandarización (Swati, G. *et al.*, 2018). En el presente trabajo se obtuvieron células dediferenciadas de *Moringa oleifera* mediante la técnica de propagación *in vitro*, para generar una multiplicación masiva

## Acerca de los autores

<sup>a</sup>Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

<sup>b</sup>Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Biotecnología Alimentaria.

Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec

Investigación · Ciencia · Tecnología · Cultura



de este árbol, induciéndolo a estrés con acción antibiótica. Se adaptó una técnica de asepsia para explantes de hojas y peciolo de *Moringa oleifera* con soluciones de hipoclorito de sodio (NaClO) al 2% y etanol al 50%, para evitar el crecimiento ventajoso de microorganismos dentro del medio de cultivo. Los explantes fueron colocados en medios basales, elaborados con medio Murashige y Skoog y Phytigel; se realizaron diez repeticiones de cada tratamiento variando el tipo de antibiótico y su concentración en 250 ppm, 400 ppm y 500 ppm. En las técnicas de asepsia, ofreció mejores resultados el tratamiento 4, debido a que el 100% de los tratamientos no mostraron daños de clorosis o necrosis en los explantes. En el tratamiento con antibióticos el que presentó una mayor actividad estimulante fue la clindamicina, obteniendo el 90% de los tratamientos con callo a una concentración de 250 ppm.

Palabras clave: *Moringa oleifera*, Antibióticos, Propagación *In vitro*, Células dediferenciadas.

### Abstract

*Due to the impact that Moringa oleifera has due to its multiple properties, its required to produce it in large quantities to satisfy industrial demand, taking into account that it must have similar characteristics, since the products marketed require compliance with a degree of standardization (Swati, G. et al., 2018). In the present work, dedifferentiated Moringa oleifera cells were obtained using the in vitro propagation technique, to generate massive multiplication of this tree, inducing it to stress with antibiotic action. An asepsis technique was adapted for explants of leaves and petioles of Moringa oleifera with solutions of 2% sodium hypochlorite (NaClO) and 50% ethanol,*

*to avoid the advantageous growth of microorganisms within the culture medium. The explants were placed in basal media, made with Murashige and Skoog and Phytigel medium; ten repetitions of each treatment were carried out, varying the type of antibiotic and its concentration at 250 ppm, 400 ppm and 500 ppm. In the asepsis techniques, treatment 4 offered better results, because 100% of the treatments did not show chlorosis or necrosis damage in the explants. In the treatment with antibiotics, the one that presented the greatest stimulating activity was clindamycin, obtaining 90% of the treatments with callus at a concentration of 250 ppm.*

**Keywords:** *Moringa oleifera*, Antibiotics, *In vitro* Propagation, Dedifferentiated cells.

### Introducción

La *Moringa oleifera* es un árbol nativo del sur de Asia, como Pakistán, Afganistán, India y Bangladesh, perteneciente a la

familia *moringaceae* (Pérez, A. et al., 2010); es resistente a la sequía debido a que crece a temperaturas de -1°C – 48 °C y es cultivado en regiones áridas, así como en condiciones de estrés en un rango de pH de suelo entre 4.5 y 8 (Pérez, A. et al., 2010); por lo tanto, hoy día se puede encontrar en distintas partes del mundo, como en América Central, América del Norte, Filipinas, Camboya, Sudamérica y las Islas del Caribe (Anwar, F. et al., 2007). Asimismo, a la *Moringa oleifera* se le identifica con una gran variedad de nombres, dependiendo la región en la que se encuentre, como por ejemplo en América Latina es llamado árbol rábano picante, palo tambor, flor de Jacinto, árbol de perlas, entre otros; en Filipinas, Malunkai; en Haití, Ben Oleifere, etcétera. (Bonal, R. et al., 2012).

En la actualidad, la *Moringa oleifera* se ha destacado por contener una gran cantidad de propiedades y nutrientes que aportan grandes beneficios a la salud, a la industria alimenticia, farmacéutica y cosmética, debido a que se ha demostrado que todas sus partes cuentan con componentes bioactivos, que se utilizan en el forraje de animales, en la producción de biogás, en productos de limpieza, en la elaboración de medicamentos, en la producción de fertilizantes, y se ha demostrado que es un excelente floculante de metales pesados, por lo tanto, es una alternativa en la purificación de aguas; de igual forma, la corteza y la madera son útiles en la producción de colorantes y cuerdas (Muñoz, J. 2015); además, las semillas contienen aproximadamente 40% de aceite, mejor conocido como aceite “ben”, utilizado en la producción de cosméticos (Tabio, D. et al., 2018 Marfori). En general, la *Moringa oleifera* es usada como suplemento alimenticio, ya que contiene grandes cantidades de vitaminas, como la A, la B (B1, B2, B3, B5, B6 y B12), la C, la D, la E y la K; cuenta con minerales como potasio, calcio, fósforo, hierro, selenio, magnesio, triptófano y zinc, así como un alto contenido de proteínas y aminoácidos esenciales, entre otros compuestos (Nieves, M. y Aspuri, E., 2011). Por otro lado, se ha utilizado en aplicaciones tradicionales y en la producción de medicamentos para el tratamiento de enfermedades de la piel, insuficiencia respiratoria, padecimientos del oído, infecciones dentales, problemas de hipertensión, diabetes, anemia y tratamiento del cáncer.

Por lo anterior, la *Moringa oleifera* se ha convertido en un árbol de gran importancia industrial y, por lo tanto, es necesario cumplir con la demanda de las industrias que comercializan productos derivados de moringa, siendo la micropropagación una alternativa para obtener grandes cantidades de moringa de forma estandarizada y a bajo costo, debido a que es una técnica utilizada para la obtención de clones somáticos y generar plantas completas con características iguales y libres de microorganismos, a partir de células vegetales cultivadas *in vitro* (Calva, G. y Pérez, J., 2005). En el presente trabajo, se obtuvieron células dediferenciadas de *Moringa oleifera* a partir de la acción de diferentes antibióticos (cefuroxima, lincomicina y clindamicina), ya que en estudios realizados se demuestra que al colocar los explantes en estrés con acción antibiótica se produce una masa amorfa de células dediferenciadas que





poseen una capacidad totipotencial, o sea, que forman una planta completa con características iguales a la plántula madre.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Material vegetal

La *Moringa oleifera* se obtuvo de los invernaderos de Xochimilco, ubicado al sureste de la Ciudad de México, de la cual se utilizaron explantes juveniles de hojas y peciolo, debido a que los tejidos jóvenes tienen mayor resistencia a la técnica aséptica que el tejido maduro (Magaña, 2016).

### Técnica aséptica

Los explantes fueron expuestos a desinfección mediante una técnica aséptica adaptada para el tejido vegetal de la *Moringa oleifera* (Magaña, 2016; Rodríguez, N. *et al.*, 2016; Muñoz, J., 2015). Cada uno de los explantes juveniles de hojas y peciolo de *Moringa* fueron lavados a mano con detergente comercial, evitando daños en los tejidos. Posteriormente, se cubrió el vaso con una gasa y se expuso al chorro de agua durante diez minutos; el agua fue decantada, evitando tocar los explantes, se llevaron a una campana de flujo laminar horizontal marca Labconco® (Purifier™ Clean Bench), previamente limpia con cloro comercial y alcohol etílico.

Se prepararon diferentes soluciones, las cuales fueron utilizadas en la técnica de asepsia de los explantes dentro de la campana laminar de flujo horizontal, como se muestra en la siguiente tabla.

TABLA 1  
SOLUCIONES

Solución	Preparación
<b>Antibióticos</b>	Se prepararon 200 ml con agua desionizada de solución antibiótica en un matraz Erlenmeyer con 0.003 g de cefalexina, 0.04 g de ampicilina y 0.04 g tetraciclina; esta solución fue esterilizada a 120 °C durante 20 minutos en una olla de presión marca Presto de aluminio.
<b>Hipoclorito de sodio</b>	Se preparó una solución con hipoclorito de sodio comercial al 2% con agua desionizada, la cual fue esterilizada a 120 °C durante 20 minutos en una olla de presión Presto de aluminio
<b>Alcohol etílico</b>	Se formó una solución de etanol al 50%, la cual fue preparada dentro de la campana de flujo laminar horizontal marca Labconco® (Purifier™ Clean Bench), con agua desionizada previamente esterilizada 120 °C durante 20 minutos, en una olla de presión Presto de aluminio.
<b>Antioxidante</b>	Se prepararon 200 ml de solución de antioxidantes en un matraz Erlenmeyer con agua desionizada, 0.03 g de ácido ascórbico y 0.02 g de ácido cítrico; ésta fue esterilizada 120 °C durante 20 minutos en una olla de presión Presto de aluminio.

Dentro de la campana de flujo laminar horizontal marca Labconco® (Purifier™ Clean Bench), se introdujeron los explantes previamente lavados en un vaso de precipitado estéril, junto con 200 ml de solución antibiótica, la cual se dejó actuar durante 30 minutos en agitación constante; posteriormente, se enjuagó con agua desionizada estéril y se añadió la solución de etanol al 50% preparada dentro de la campana; se dejó durante 20 segundos; se enjuagó nuevamente con agua desionizada estéril; se agregó la solución de cloro al 2% y se dejó actuar por diez minutos; se volvió a enjuagar con agua desionizada estéril y se llevaron a cabo cuatro enjuagues con la solución de antioxidantes, en lapsos de un minuto, manteniéndose en agitación constante. Esta técnica fue adaptada con base en la revisión de trabajos realizados previamente (Barbosa, I. y Chaparro, A., 2011; Bhau, B. y Wakhlu, A., 2001; Nieves, M. y Aspuri E., 2011; Marfori, E., 2010).

### Solución de hipoclorito de sodio

Se adaptó una solución de hipoclorito de sodio para la desinfección de explantes, debido a que las hojas de *Moringa oleifera* son pequeñas y delgadas, por lo tanto, pueden ser dañadas con mayor facilidad; se realizaron cuatro pruebas de tratamiento con dicha solución, como se muestra en la Tabla 2 para determinar mediante prueba y error la concentración óptima en la cual los explantes no presentan alguna enfermedad, como clorosis o necrosis.

TABLA 2  
TRATAMIENTOS PARA PRUEBA CON HIPOCLORITO DE SODIO

Concentración de NaClO	T	Tratamientos	Concentración de Antioxidantes	
			Ácido Ascórbico	Ácido Cítrico
4%	20 min	10	0.03 g. /200ml	0.02 g./200ml
4%	10 min	10	0.03 g. /200ml	0.02 g./200ml
2%	20 min	10	0.03 g. /200ml	0.02 g./200ml
2%	10 min	10	0.03 g. /200ml	0.02 g./200ml



## Medio de cultivo

Se prepararon tres diferentes medios de cultivo, donde se utilizaron 21.2 g/500 ml de medio basal Murashige y Skoog (SIGMA-ALDRICH®), 2 gL<sup>-1</sup> de Phytigel, y se les adicionó un antibiótico distinto en cada medio, variando su concentración, como se muestra en la Tabla 3. El pH se ajustó a 5.7 3 5.8 con ácido clorhídrico 1N y con hidróxido de sodio 1N. Se prepararon 500 ml de medio de cultivo para cada sistema, del cual se dosificaron 50 ml en diez frascos de vidrio de 150 ml; posteriormente, los frascos fueron esterilizados en una olla de presión Presto de aluminio, a 120 °C, durante 20 minutos.

**TABLA 3**  
**CONCENTRACIONES DE TRATAMIENTO DE ANTIBIÓTICOS.**

	Sistemas de 500 ml								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Medio MS (g)</b>	21.2	21.2	21.2	21.2	21.2	21.2	21.2	21.2	21.2
<b>Cefuroxima (ppm)</b>	250	400	500	-	-	-	-	-	-
<b>Lincomicina (ppm)</b>	-	-	-	250	400	500	-	-	-
<b>Clindamicina (ppm)</b>	-	-	-	-	-	-	200	400	500
<b>Phytigel (g)</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Fracos totales</b>	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Los experimentos realizados con lincomicina y clindamicina fueron variados en gotas, debido a la falta de material, por lo tanto, se añadió una gota para 250 ppm, dos gotas para 400 ppm y tres gotas para 500 ppm de ambos antibióticos.

## Siembra de explantes

Los explantes de hojas y peciolo que fueron enjuagados con la solución de antioxidantes se tomaron con pinzas de bisección estériles y se colocaron dentro de los frascos con medio de cultivo estéril, cuidando el no dañar al medio de cultivo ni al tejido vegetal; los frascos fueron tapados y sellados con parafilm (Laboratory Film).

Todo el material utilizado para sembrar, fue previamente esterilizado a 120 °C durante 20 minutos en una olla de presión Presto de aluminio, esto para evitar la contaminación en el medio de cultivo.

## Condiciones de incubación

Los frascos fueron incubados a temperatura ambiente, expuestos a un fotoperiodo constante con lámparas fluorescentes blancas frías, a 8,86 m mol<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> PAR, durante 21 días, para verificar el crecimiento de células dediferenciadas en los explantes de *Moringa oleifera*.

## RESULTADOS

### Técnica aséptica

Se efectuaron cuatro tratamientos con solución de hipoclorito de sodio, a diferentes concentraciones y tiempos de acción sobre los explantes de Moringa, posteriormente se realizaron enjuagues con una solución de antibióticos; esto para contrarrestar el daño causado por el hipoclorito de sodio y por la solución de etanol, disminuyendo radicales que hayan quedado libres con la acción anterior; esto se muestra en la Tabla 4.

**TABLA 4**  
**PORCENTAJE DE TRATAMIENTOS DAÑADOS POR HIPOCLORITO DE SODIO.**

Porcentaje	Tiempo	Concentración de Antioxidantes g/200 mL		Tratamientos (No. Frascos)	Porcentaje de clorosis o necrosis en los tratamientos
		Ácido Ascórbico	Ácido Cítrico		
<b>1) 4%</b>	20min.	0.03	0.02	10	100%
<b>2) 4%</b>	10 min.	0.03	0.02	10	70%
<b>3) 2%</b>	20 min.	0.03	0.02	10	20%
<b>4) 2%</b>	10 min.	0.03	0.02	10	0%

Por lo tanto, se observó que los explantes dañados presentaron clorosis, debido a que iniciaron a tornarse amarillentos y traslucidos, sin embargo, no se tuvo la presencia de necrosis en los mismos.

En los tratamientos con concentración al 4% los explantes de moringa tuvieron un mayor daño, en comparación con los expuestos a la concentración de 2%; el primer tratamiento se estableció con un tiempo de acción de 20 minutos, en donde se produjo un daño total en los explantes cultivados *in vitro*, con las características antes mencionadas; el segundo, con un tiempo de 10 minutos, el daño a los explantes disminuyó un 30%; por el contrario, en los tratamientos con una concentración del 2%, decreció notablemente la presencia de clorosis; así, los tratamientos con un tiempo de 20 minutos de acción mostraron un 20% de hojas amarillentas y traslucidas, y en los tratamientos con duración de 10 minutos, se obtuvo un comportamiento favorable, ya que las hojas y peciolo seguían manteniendo su color y no presentaron cambios. Por lo



tanto, se utilizó una solución de hipoclorito de sodio al 2%, puesto que es la concentración donde hubo ausencia de clorosis en los explantes, como lo señala el artículo escrito por Posada Pérez, L. *et al.* (2004).

### Acción antibiótica en cultivo *In vitro* de *Moringa oleífera*.

Se cultivaron hojas y peciolo como explantes de *Moringa oleífera*, con la acción de tres diferentes antibióticos (lincomicina, clindamicina y cefuroxima), con los cuales se realizaron 10 tratamientos de cada uno y se dejaron actuar durante 20 días, con los siguientes resultados.

**TABLA 5**  
**OBTENCIÓN DE CALLOS EN TRATAMIENTOS *IN VITRO* DE *MORINGA OLEÍFERA*.**

Antibióticos	Concentraciones		
	250 ppm (1 gota)	400 ppm (2 gotas)	500 ppm (3 gotas)
Lincomicina	20%	40%	0%
Clindamicina	90%	70%	0%
Cefuroxima	20%	0%	0%

El antibiótico clindamicina es un derivado de la lincomicina; ambos pertenecen al grupo de las lincosamidas, lo cual explica el por qué las dos mostraron una mayor presencia de callos, en comparación con la cefuroxima, que pertenece al grupo de las cefalosporinas.

### Acción con lincomicina

Los tratamientos con Lincomicina presentaron una mayor formación de células dediferenciadas, a una concentración de 400 ppm, el doble de lo producido a menor concentración (250 ppm); en cambio, la concentración de 500 ppm, no mostró presencia de callos y el explante cobró una tonalidad amarillenta y sin rigidez en su consistencia (ver Tabla 5).

### Acción con clindamicina

Los tratamientos con clindamicina ofrecieron una excelente adaptación, al darse una estimulación en la generación de células ápices (raíces y callos) en los extremos de los explantes con un 90% de producción en los frascos, a una concentración de 250 ppm; asimismo, se obtuvo un 70% de producción de callos en los frascos, a una concentración de 400 ppm, sin embargo, a 500 ppm no hubo presencia de callos, aunque en los meristemas se apreciaba la presencia diminuta de una masa amorfa, de color amarillento y, por consiguiente, las hojas también fueron invadidas (Figura 5).

### Acción con cefuroxima

En los tratamientos realizados con cefuroxima se obtuvieron únicamente dos frascos con crecimiento de células apicales, a una concentración de 250 ppm, ya que las hojas y peciolo se encontraban con un tono amarillento-transparente.

## DISCUSIÓN

### Acción antibiótica

La producción de callos de *Moringa oleífera* fue estimulada por los tres antibióticos embebidos en cada medio de cultivo. La adición de clindamicina produjo un mayor brote de callos a una concentración de 250 ppm y de 400 ppm, seguido de lincomicina a 400 ppm; de igual forma, se observó un crecimiento nulo a 500 ppm en los tres tratamientos con diferentes antibióticos, y una baja producción de callos en el tratamiento con cefuroxima a una concentración de 250 ppm. Por lo anterior, se comprueba que los antibióticos podrían ser utilizados como reguladores de crecimiento, debido a que estimulan la proliferación de células dediferenciadas, como lo menciona Turrialba Catie (1987), quien explica la existencia compuestos generalmente sintéticos que actúan como reguladores de crecimiento, debido a que retrasan o inhiben los procesos fisiológicos o bioquímicos, como los antibióticos. En este caso, se utilizan dos grupos de antibióticos, el primero son las lincosamidas (clindamicina y la lincomicina) la cuales actúan inhibiendo la síntesis proteica de la células, afectando a los ribosomas, aunque aún se desconoce el mecanismo de acción, el cual favorece la generación de



células dediferenciadas; en estudios realizados han demostrado que existen antibióticos que también poseen la capacidad de inhibir la síntesis proteica que estimulan la generación de callos, como es el caso del cloranfenicol, descrito por Bhau, B. y Wakhlu, A., 2001, quienes señalan que al adicionar 100 mg de cloranfenicol en el medio de cultivo, se favoreció la callogénesis. Así también, se observa que de las dos lincosamidas utilizadas, la clindamicina tuvo un mayor efecto, debido a que la clindamicina es un compuesto derivado de la lincomicina, ya que dicho compuesto se mejoró adicionando cloro, en vez de un grupo hidroxilo (Sanchez, L., *et al.*, 2004); por ello, se supone que el cloro actúa provechosamente en el crecimiento de la *Moringa oleífera*. Von Uexkull, H.R. (1991) menciona que las plantas absorben el cloro de forma rápida y que es utilizado en la activación de enzimas y logrando un mayor beneficio en el crecimiento de la planta.

El segundo, son las cephalosporinas (Cefuroxima) que ofrecen una baja producción de células de 250 ppm y no muestran crecimiento a 400 y 500 ppm, por lo tanto, se define que tienen un efecto inhibitorio en el desarrollo de la *Moringa oleífera* a concentraciones arriba de 250 ppm. No obstante, estudios realizados anteriormente, demuestran que algunos  $\beta$ -lactámicos son estimuladores en el crecimiento de células dediferenciadas. Borrelli, G. y colaboradores, en 1992, mencionaron que la adición de cefotaxima a 50 ppm y 100 ppm aumentó el crecimiento de la planta de creso, y que al adicionar 200 ppm de cefotaxima en el medio de cultivo, se tuvo un efecto tóxico para la planta, Con lo anterior, podemos definir que la cefuroxima tiene una mayor producción de callos a una concentración menor de 200 ppm, ya que el crecimiento se inhibe al aumentar la concentración. Por otro lado, Honford, P. y Newbury, H., 1992, mencionan que tanto la penicilina, como la carbenicilina son compuestos  $\beta$ -lactámicos, los cuales generaron un aumento en la producción de callos a 250 ppm, incluso mayor que el tratamiento control; así también, analizaron sus estructuras moleculares y definieron que en la descomposición de estos antibióticos, se obtiene PAA de la bencil penicilina y PAA o PMA de la cabenicilina, aumentando la concentración de auxinas en el medio, estimulando el crecimiento celular, ya que las auxinas son consideradas como reguladoras naturales de crecimiento en las plantas, que en conjunto con las citocininas (hormonas naturales en plantas) inducen la elongación de tallos, promueven la división celular y cuando hay una mayor concentración de auxinas que de citocininas en el medio, se promueve la generación de callos; por lo tanto, en el trabajo escrito por Honford, P. y Newbury, H. (1992) se obtuvo una mayor formación de células dediferenciadas en el medio a concentraciones altas de estos antibióticos.

Se requieren más estudios para comprobar si existen otros antibióticos que al descomponer su estructura, forman auxinas o algún otro regulador de crecimiento que justifique que los antibióticos estimulan el crecimiento de células dediferenciadas, sin la necesidad de utilizar hormonas.

## CONCLUSIONES

En la técnica aséptica, los explantes de *Moringa oleífera* no mostraron necrosis. Se utilizó el tratamiento 4 con una concentración al 2% de hipoclorito de sodio, con un tiempo de acción de 10 minutos, el cual ofreció excelentes resultados, ya que los diez tratamientos estuvieron en ausencia de clorosis y necrosis; en cambio, los tratamientos a una concentración del 4% provocaron un mayor daño a los explantes, debido a la presencia de clorosis, siendo el tratamiento 1 el que presentó clorosis en su totalidad.

La adición de antibióticos en el medio de cultivo para la generación de callos en la *Moringa oleífera* mostró que de los tres antibióticos utilizados, la clindamicina produjo una mayor actividad estimulante, aunque se desconoce su mecanismo de acción en el crecimiento de células dediferenciadas, pero se podría deducir que posiblemente brinda una mayor facilidad en la absorción y acción, debido al cloro que contiene en su estructura, ya que es considerable la diferencia en la producción de callos entre la clindamicina y lincomicina. Asimismo, se generó un bajo número de brotes de callos con la cefuroxima, debido a que a concentraciones mayores de 200 ppm se inhibe el crecimiento de las células dediferenciadas de *Moringa oleífera*.



## Fotografías

<https://inci.guide/plant-extracts-derivatives/moringa-oleifera-seed-extract>

<https://pixabay.com/es/photos/planta-moringa-oleifera-2307261/>

<https://www.istockphoto.com/es/foto/sales-de-ba%C3%B1o-gm153502384-17013681>

<https://www.istockphoto.com/es/foto/sales-de-ba%C3%B1o-gm153502384-17013681>

<https://www.istockphoto.com/es/foto/sales-de-ba%C3%B1o-gm153502384-17013681>



## Referencias

- Anwar, F.; Latif, S.; Ashraf, M., y Gilani, A.H. (2007). "Moringa oleifera: A Food Plant with Multiple Medicinal Uses". *Phytotherapy Research*. (21): 17-25. DOI: 10.1002/ptr.2023.
- Barbosa Cepeda, I. D. y Chaparro Giraldo, A. (2011). Concentración mínima inhibitoria de higromicina b en callos embriogénicos de arroz (*Oryza sativa* L.). *Revista Colombiana de Biotecnología* (13)2: 193 - 198.
- Bhau, B.S., Wakhlu, A.K. (2001). "Effect of some antibiotics on the in vitro morphogenetic response from callus cultures of caryophantho elephantidens". *Biología Plantarum*. 44:1:19-24.
- Bonal Ruiz, R.; Rivera Odio, R.M., y Bolívar Carrión, M. E. (2012). "Moringa oleifera: una opción saludable para el bienestar". *Medisan*. 1596-1599.
- Borrelli, G.M.; Difonzo, N. and Lupotto, E. (1992). "Efecto de la cefotaxima sobre el cultivo de callos y la regeneración de plantas en trigo duro". *Revista de Fisiología Vegetal*. 140(3):372-374.
- Calva, G. y Pérez, J. (2005). "Cultivo de células y tejidos vegetales: fuente de alimentos para el futuro". *Revista Digital Universitaria*. 6(11): 2-16.
- Marfori, E.C. (2010). "Clonal Micropropagation of *Moringa Oleifera* L. Philippine". *Agricultural Scientist*. 93(4): 454-457.
- Holford, P. and Newbury, H.J. (1992). "The effects of antibiotics and their breakdown products on the in vitro growth of *Antirrhinum majus*". *Plant Cell Reports*. 11: 93-96.
- Magaña, M. Developing a standardized in vitro sterilization method for field-grown *Moringa Oleifera* explants (Bachelor thesis) (2016) Department of Science Faculty of Science and Technology University of Belize, Belize.
- Muñoz, J. (2015). Desarrollo de un sistema de propagación *in vitro* y transformación genética en plantas de *Moringa (Moringa Oleifera Lam)*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes.
- Nieves, M.C., y Aspuri, E.T. (2011). "Callus Induction in Cotyledons of *Moringa Oleifera Lam*". *Philipp Agric Scientist*. 94:3: 239-247.
- Pérez, A.; Sánchez, T., Armegol, N., y Reyes, F. (2010). "Características y potencialidades de *Moringa Oleifera*. Lamark. Una alternativa para la alimentación animal". *Pastos y Forrajes*. 33:4.
- Posada Pérez, Laisyn; Gómez Kosky, Rafael; Gallardo Colina, Jorge; Reyes Vega, Maritza, y Herrera Ofarril, Idalia. (2004). "Establecimiento *in vitro* de ápices de plantas de campo híbrido cubano de papaya IBP 42-99". *Biología Vegetal*. 4:3:153- 58.
- Rodríguez, N.; Zárate, A., y Nilo, V. (2016). "Desarrollo de un protocolo para la micropropagación clonal de *Moringa (Moringa Oleifera)*". *Memorias Congreso Internacional Agroalimentario*, 1139- 1159.
- Sánchez, L.; Sáenz, E.; Pancorbo, J.; Lanchipa, P., y Zegarra Del Carpio, R. (2004). "Antibióticos sistémicos en dermatología: Segunda parte: Tetraciclinas, lincosaminas, fluoroquinolonas, sulfonamidas, rifamicinas, cloranfenicoles, ácido fusídico, metronidazol y nuevos antibióticos". *Systemic Antibiotics in Dermatology*. 14: 3: 161- 179.
- Swati Gupta, Jain R.; Kachhwaha, S. & Kothari, S. L. (2018). "Nutritional and medicinal applications of *Moringa Oleifera* Lam.—review of current status and future possibilities". *Journal of Herbal Medicine* (11)1-11. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2017.07.003>
- Tabio, D.; Díaz, Y.; Rondón, M., y Fernández, E. (2018). "Proceso de extracción de aceite de semillas de *Moringa Oleifera*". *Investigación y Ciencia*. 26(74) 32-38
- Turrialba, Catie (1987). *Memoria del Curso de Cultivo de Tejidos*. Costa Rica.
- Von Uexkull, H. R. (1991). "El cloro en la nutrición de la palma aceitera". *Informaciones Agronómicas*. No. 24

# Adaptación de un Sistema Anaerobio-Aerobio para el Tratamiento Conjunto de Aguas Residuales y Residuos de Frutas y Hortalizas

Ivonne Abigail Rivera Bueno\*, Alberto Zarate Zamora\*,  
Andrea Guadalupe Popoca Cuestas\*, Miguel Ángel Villalobos Silva\*,  
Sergio Esteban Viguera Carmona\*\*

## Acerca de los autores

\* Egresadas(os) del Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec

\*\* Docente-Investigador del Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.



## Resumen

En materia de gestión, tanto los residuos sólidos urbanos, como el agua residual, representan el principal reto de la administración pública, ya que los volúmenes generados implican el uso de una gran cantidad de recursos financieros para su tratamiento y disposición. Aunque el principal problema en la gestión está en la recolección y confinamiento de los residuos, no es menos importante la etapa de tratamiento, ya que de ésta dependen los costos de disposición final.

El Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE) cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), con capacidad para tratar 3 L/s. La PTAR-TESE consta de dos reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA) y un reactor aerobio de lodos activados (RALA), la configuración del tratamiento anaerobio-aerobio es la misma que la de un sistema a nivel piloto desarrollado en el Laboratorio de Tecnología Anaerobia del TESE; dicho sistema fue diseñado para tratar de manera conjunta agua residual municipal (ARM) y residuos de frutas y hortalizas (RFH). El sistema anaerobio-aerobio a nivel laboratorio, ha demostrado una alta eficiencia en la remoción de demanda química de oxígeno (DQO), más del 90%, y buenas productividades de metano  $3 \text{ L/L}_{\text{reactor}}/\text{d}$  cuando se opera con cargas mayores a  $3 \text{ g DQO/L/d}$  de mezclas de ARM y RFH con tamaño de partículas menores a  $105 \text{ } \mu\text{m}$ . El comportamiento de este sistema anaerobio-aerobio motivó la intención de escalarlo, por lo que se evaluó la conveniencia de modificar la PTAR-TESE para que operara como un sistema de tratamiento conjunto de ARM y RFH. La evaluación se realizó en términos de los costos de reconfiguración de la PTAR al sistema de tratamiento conjunto y del potencial de producción de energía durante el tratamiento.

Primeramente, se realizó un diagnóstico de la PTAR-TESE, en cuanto a instalaciones, configuración, parámetros de operación y uso de energía. Posteriormente se analizó el diseño de la PTAR-TESE respecto a los flujos de agua residual que llegan a ésta y se determinó su eficiencia en función de la remoción de DQO. También, se propusieron las adecuaciones para la



operación e infraestructura de la misma, a fin de incluir una etapa de lixiviación de RFH. Finalmente se determinó el potencial de producción de metano con las mezclas de ARM-RFH para completar el balance de energía.

**Palabras Clave:** Planta de tratamiento de aguas residuales; reactores anaerobios de flujo ascendente; reactor aerobio de lodos activados; agua residual municipal; residuos de frutas y hortalizas; residuos sólidos orgánicos; demanda química de oxígeno.

## Abstract

*In terms of management, both urban solid waste and wastewater represent the main challenge for the public administration, since the volumes generated involve the use of a large amount of financial resources for their treatment and disposal. Although the main problem in management is in the collection and confinement of waste, the treatment stage is no less important, since the costs of final disposal depend on it.*

*The Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE) has a wastewater treatment plant (WWTP), with a capacity to treat 3 L/s. The WWTP-TESE has two anaerobic upflow reactors (RAFA) and an aerobic activated sludge reactor (RALA), the configuration of the anaerobic-aerobic treatment is the same as that of a pilot-level system developed in the Anaerobic Technology Laboratory of TESE, this system was designed to jointly treat municipal wastewater (MRA) and fruit and vegetable waste (RFH). The anaerobic-aerobic system at the laboratory level has demonstrated a high efficiency in the removal of chemical oxygen demand (COD), more than 90%, and good methane productivity:  $3 \text{ L/L}_{\text{reactor}}/\text{d}$  when operating with loads greater than  $3 \text{ g COD/L/d}$  of ARM and RFH mixtures with particle size less than  $105 \text{ } \mu\text{m}$ . The*







behavior of this anaerobic-aerobic system motivated the intention to scale it up, so the convenience of modifying the WWTP-TESE to operate as a joint treatment system of MRA and RFH was evaluated. The evaluation was made in terms of the costs of reconfiguring the WWTP to the joint treatment system and the potential for energy production during treatment.

First, a diagnosis of the WWTP-TESE was carried out, in terms of facilities, configuration, operating parameters and energy use. Subsequently, the design of the WWTP-TESE was analyzed with respect to the

wastewater flows that reach it and its efficiency was determined as a function of COD removal. Also, adaptations for the operation and infrastructure of this were proposed, in order to include an RFH leaching stage. Finally, the methane production potential with the ARM-RFH mixtures was determined to complete the energy balance.

**Keywords:** Wastewater treatment plant; anaerobic upstream reactors; aerobic activated sludge reactor; municipal wastewater; fruit and vegetable waste; organic solid waste; chemical oxygen demand.

## Introducción

El desarrollo tecnológico y económico sin precedentes, ha dado forma a las características de producción y consumo de diversos tipos de materiales. Junto con el crecimiento de la población, el problema de la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) ha crecido. Se estima que en México se generan 120,128 t/día de RSU, de los cuales el 31.57% corresponde a residuos susceptibles de aprovechamiento, el 46.42% a residuos orgánicos y el 22.01% a otros residuos (Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales, 2020). Esto implica que se requiere disponer cerca de 18.7 millones de toneladas anuales de Residuos Sólidos Orgánicos Urbanos (RSOU). Por otro lado, en nuestro país se generan alrededor de 250.5 m<sup>3</sup>/s de agua residual municipal (ARM), lo cual implica que 2.24 millones de toneladas de demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) al año debe ser tratada (CONAGUA, 2022). El ARM tiene una relación DBO<sub>5</sub>/DQO entre 0.5 y 0.9 lo que involucraría una DQO promedio de 2.86 millones de toneladas al año.

## Tratamiento de residuos sólidos orgánicos

Para el tratamiento de los RSOU y las ARM existen diversas tecnologías, todas ellas con ventajas y desventajas al aplicarse; entre las alternativas de tratamiento, se encuentra la digestión anaerobia (DA), esta tecnología es de las llamadas de biorremediación, es decir, se utilizan células para el tratamiento. La DA requiere consorcios microbianos que permiten degradar los residuos sólidos orgánicos (RSO) hasta convertirlos en metano (CH<sub>4</sub>) y bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); el metano es un biocombustible que puede emplearse para la generación de energía eléctrica a través de motores de combustión interna, por lo que la DA se ha implementado a nivel mundial para el tratamiento

tanto de aguas residuales con alta concentración de DQO (mayor a 3 g DQO/L) como de RSO. Si los RSOU y las ARM son tratados por digestión anaerobia estaríamos produciendo cerca de 71,467 de GW h anuales de energía [(considerando un rendimiento de 750 m<sup>3</sup> biogás/t RSOU y 539 m<sup>3</sup> biogás/t DQO, con un 65 % de metano en el biogás (Montalvo y Guerrero, 2003) y que se generan 5.0 kW·h/m<sup>3</sup> de biogás (Drofenik *et al.*, 2023)]. Este balance energético es alentador, si consideramos a la DA como tecnología de tratamiento.



La revalorización energética de los RSO puede darse si son tratados por digestión anaerobia, ya que se genera biogás con alto contenido de metano y digestatos sólidos y líquidos con características de fertilizantes, recuperador de suelos y té agrícola. Sin embargo, uno de los problemas asociados a la DA de RSO es la alta concentración de sólidos suspendidos (sólidos con tamaños de partícula mayor a 1.5 Qm) lo que impide el uso de reactores anaerobios de alta tasa, tipo RAFA y reactores anaerobios de lecho fluidizado (UASB y EGSB por sus siglas en inglés, respectivamente), esta implicación reduce el uso de la DA para el tratamiento de RSO a reactores anaerobios de baja tasa, limitando a su vez la energía producida (Jiang *et al.*, 2023) Con la intención de aprovechar las virtudes de la DA de alta tasa, se han desarrollado diferentes pretratamientos para acondicionar a los RSO a fin de poder tratarlos en reactores anaerobios de alta tasa, pero la mayoría de estos pretratamientos incrementan los costos de operación (Segura *et al.*, 2023; Mancera-Sandoval *et al.*, 2023).

Un pretratamiento de bajo costo, consiste en la extracción de sólidos de la matriz de RFH mediante agua (lixiviación); este contacto agua-RSO permite incrementar la demanda química de oxígeno en el agua, hasta concentraciones de 60 g/L, con baja concentración de sólidos suspendidos y tamaños de partículas de los SS menor a 105 Qm (Zárate, 2020, Vian *et al.*, 2020). Esa etapa permite generar un efluente con condiciones adecuadas para alimentarse a un reactor de alta tasa. Una eficiente productividad de metano para la generación de energía se obtiene cuando los reactores anaerobios son operados a altas cargas orgánicas, mayores a 4 g DQO/L/d.

## Tratamiento de aguas residuales municipales

La configuración estándar de las plantas de tratamiento de aguas residuales consta de cinco etapas principales: un sistema de acondicionamiento del agua residual, un reactor aerobio de lodos activados, un sedimentador secundario, un reactor anaerobio para la estabilización de lodos residuales, un sistema de pos tratamiento del agua tratada y una etapa de secado y acondicionamiento de biosólidos. En México, un 52.9% de la infraestructura de tratamiento son sistemas que tienen tanques de lodos activados (CONAGUA, 2021). Un sistema de tratamiento con estas características en general, tiene un balance de energía positivo, es decir, que por cada 100 kg de carbono procesado se producen 19 kW·h de energía. Sin embargo, en México una gran proporción de plantas de este tipo carecen del reactor anaerobio, lo que provoca que

el déficit de energía en estas instalaciones esté en el orden de 44 kW·h por cada 100 kg de carbono alimentado, lo que hace inviable el proceso de tratamiento y provoca que las plantas se abandonen y la infraestructura se deteriore o se pierda.

Algunos desarrolladores de instalaciones de plantas de tratamiento sustentan la ausencia del reactor anaerobio por la baja producción de lodo residual secundario al tratar efluentes domésticos (concentraciones promedio menores a 1.5 g DQO/L), sin embargo, esta omisión provoca que las plantas de tratamiento así diseñadas no sean energéticamente autosuficientes, lo que implica altos costos de operación, por la nula producción de energía.

Una configuración que daría mejores balances energéticos, sería plantas con un reactor anaerobio, seguido de uno aerobio; esta configuración primero transforma el carbono alimentado en energía (biogás) y posteriormente pule el efluente (logrando DQO menores a 0.5 kg/m<sup>3</sup>) con un menor gasto energético en el reactor aerobio, obteniendo un balance energético positivo de 122 kW·h por cada 100 kg de carbono alimentado. Sin embargo, este tipo de instalaciones son más eficientes cuando las cargas orgánicas son mayores a 3 kg DQO/m<sup>3</sup>/d, que las limita cuando se trata únicamente agua residual doméstica con concentraciones de DQO promedio de 1.0 kg/m<sup>3</sup> pero en temporada de estiaje este valor puede bajar a menos de 0.1 kg DQO/m<sup>3</sup>, lo que deteriora la eficiencia global de energía producida. Para conservar una eficiencia energética rentable es necesario mantener durante todo el año al menos una carga orgánica de tratamiento de 3 kg/m<sup>3</sup>/d. Para lograr esto, se pueden utilizar otros sustratos para mantener cargas orgánicas homogéneas durante todo el año; una alternativa viable de sustratos añadidos, son los residuos sólidos orgánicos, RSO, que una vez acondicionados, sirven para el propósito ya expuesto.

### Sistema anaerobio-aerobio para el tratamiento conjunto de residuos sólidos orgánicos y agua residual municipal.

El contexto arriba descrito nos sirvió para proponer el diseño del sistema anaerobio-aerobio a nivel laboratorio para el tratamiento conjunto de ARM y residuos de frutas y hortalizas (como RSO). El sistema anaerobio-aerobio consta de un tanque de lixiviación, un reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA), un reactor aerobio de lodos activados (RALA) y un sedimentador de lodos (Ver Figura 1.) Primeramente, en un tanque sin agitación se ponen en contacto los residuos de frutas y hortalizas (RFH) y el agua tratada, Figura 1(a), con un tiempo de retención de 24 h, los sólidos de los RFH que migran a la fracción líquida son separados por tamizado, Figura 4(c), de aquellos con tamaño de partícula (Dp) mayor a 105 Qm. Posteriormente, a la fracción líquida se le ajusta la concentración de DQO a 3 g/L mezclándola con agua residual municipal en un tanque de homogenización, Figura 1(f); a la mezcla se le ajusta el pH utilizando HCl/NaOH. Esta mezcla fue alimentada al RAFA, Figura 1(i), operado con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 12 h a 35 °C. Con el efluente que abandona el RAFA se alimenta al reactor aerobio de lodos activados, Figura 1(p), al que se le estableció un tiempo de retención hidráulica de 6 h. La relación DQO/SS en el reactor fue de 0.3 kg DQO/kg SSLM (sólidos suspendidos en el licor mezclado). La aeración fue de 20 L/min utilizando dispersores de vidrio sinterizado para disminuir el tamaño de la burbuja de aire.

Durante la operación del sistema, la mayor producción volumétrica de metano producida fue de 3.0 L CH<sub>4</sub>/L/d, lo cual se logró con una carga orgánica de

8 g DQO/L/d, valor similar al obtenido por Saidi *et al.* (2023), 2.92 L CH<sub>4</sub>/L/d, al tratar por DA residuos de frutas en reactores de baja tasa con una carga orgánica de aproximadamente 8.41 g DQO/L/d y un tiempo de retención hidráulica de ocho días; sin embargo, el tiempo de retención es mayor que el utilizado en este estudio (1.6 d, incluyendo el tiempo de contacto de los FFH con el agua tratada). Con la salida de RAFA se alimentó al RALA, para mejorar la calidad del efluente, la eficiencia de remoción del reactor de lodos activados es en promedio del 60%, manteniendo las concentraciones de DQO a la salida del sistema siempre por debajo de 0.1 g DQO/L; la eliminación general de DQO del sistema anaeróbico-aeróbico fue superior al 90% para todas las cargas probadas.

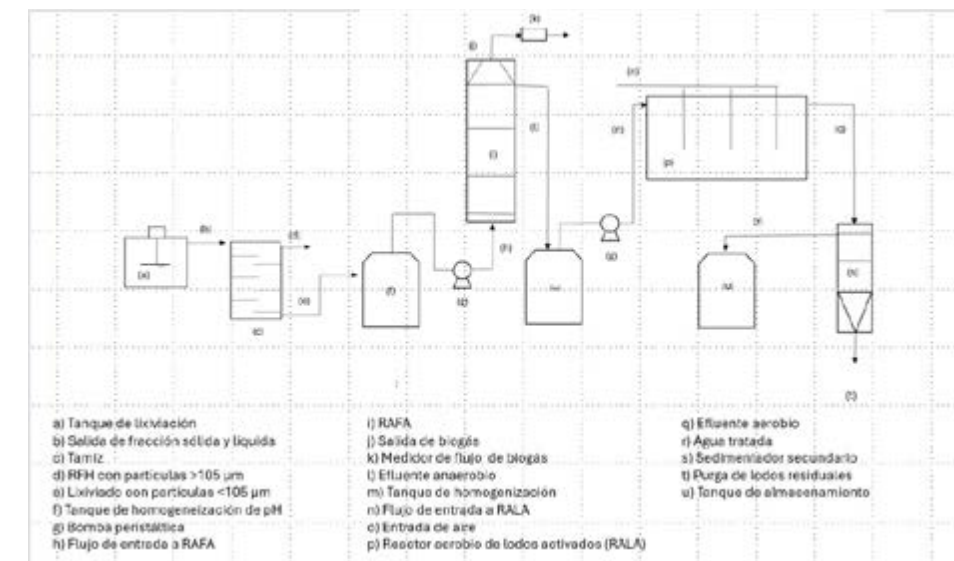


Figura 1

Sistema anaerobio-aerobio para el tratamiento conjunto de RFH y ARM.

Los resultados obtenidos en el sistema anaerobio-aerobio ya expuestos, nos alentaron a comenzar estudios para realizar un escalamiento del proceso, pensando inicialmente en aprovechar las instalaciones de la PTAR-TESE para este cometido.

### Diseño experimental

Se realizaron simulaciones del sistema anaerobio-aerobio a diferentes condiciones de operación, considerando el cambio de escala. Aquí se estableció cuál sería la mejor forma de operar el tanque de lixiviación de RSO, tomando en cuenta que se desean ensayar cargas orgánicas de 3, 6, 9 y 12 g DQO/L/d.

Una vez determinado la anterior, se procedió a la adaptación de cada una de las unidades de proceso del tratamiento, así como a la implementación de la instrumentación requerida para el monitoreo y operación del sistema de tratamiento anaerobio-aerobio.

Ya con las condiciones de operación de la PTAR-TESE para tratar RSO y ARM, se procedió a realizar el diagnóstico de la misma, para conocer su infraestructura y manera de operar, así como establecer las modificaciones necesarias para implementar lo planeado en la simulación.



Las pruebas de puesta en marcha se realizaron tomando como base el tanque de solubilización (lixiviación) y a partir de éste se generaron las nuevas condiciones de operación para las otras etapas.

Una vez incluida la etapa de lixiviación, se inició con una carga orgánica de 3 g DQO/L/d monitoreando la remoción de DQO. La estabilidad del sistema se evaluó en términos de la relación de alcalinidad total y parcial. También se realizó un balance energético en términos de uso de la energía para la aireación y del potencial de energía que puede producirse por el biogás.

## Diagnóstico de la planta de tratamiento de aguas residuales.

### Drenaje y aforo

El Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE) es una institución de educación superior, que cuenta con 11 programas de licenciatura, seis de maestría y uno de doctorado, con una matrícula promedio de 7,500 alumnos y 500 trabajadores, con una población flotante de alrededor de 100 personas. Considerando que el consumo *per cápita* de agua en actividades escolares y de trabajo está entre 20 L/hab/d y 56 L/hab/d, en el TESE se generan un mínimo de 1.9 L/s y máximo de 5.3 L/s de aguas residuales, que podrían ser tratadas en la PTAR que está a cargo del Departamento de Servicios Generales de la Institución.

El TESE cuenta con un drenaje mixto, es decir, ahí se recuperan aguas negras, aguas grises y pluviales. El drenaje está dividido en cuatro secciones, la lumbrera 1 dirige el drenaje hacia Av. Central Carlos Hank González, la lumbrera 2 dirige el drenaje hacia Av. Tecnológico, la lumbrera 4 es una fosa séptica que está conectada a la lumbrera 3 y es desalojada por bombeo; las lumbreras 4 y 5 dirigen el agua hacia la PTAR-TESE. Debido a que no es posible determinar qué porcentaje de agua llega a cada sección del drenaje, el flujo fue medido a la entrada de la PTAR-TESE, cuyos valores promedio fueron de 0.473 L/s y 0.152 L/s. Las horas de mayor aforo de agua residual son las 9:00, 12:00, 18:00 y 20:00 horas del día.

### Condiciones de operación de la PTAR-TESE

La PTAR-TESE operaba de manera discontinua, con tiempos de retención mayores a las 48 h. Debido a los gastos otorgados por el TESE, la planta solo operaba alrededor de 20 minutos en tres periodos de tiempo: 9:00, 13:00 y 17:00 hrs. Esta forma de operar y las características del agua residual de entrada (tipo doméstica, en promedio 500 mg DQO/L) provocaban que la PTAR-TESE tuviera una eficiencia de remoción de apenas el 30%.

Con la intención de operar el sistema de manera continua durante la jornada de trabajo, se propuso



agregar un tanque de recirculación de agua tratada, haciéndolo pasar por un lecho de residuos de frutas y hortalizas para aumentar la carga orgánica a la entrada del proceso y así mantener un flujo constante de entrada a la PTAR-TESE durante 10 h.

Para diseñar el proceso propuesto, se obtuvieron las dimensiones de las instalaciones de la PTAR-TESE, mismas que se describen a continuación.

### Modificaciones a la operación de la PTAR-TESE

El RAFA de la PTAR-TESE es un reactor compartimentado de 165 m<sup>3</sup>, donde cada una de las secciones son iguales en dimensiones y volumen. Este tipo de reactores están diseñados para tratar cargas orgánicas (Bv) entre 10 y 40 g DQO/L/d con tiempos de retención hidráulica (TRH) mayores a seis horas.

Para imponer las condiciones de operación del RAFA de la PTAR-TESE, se tomaron como base las condiciones establecidas en el proceso anaerobio-aerobio a nivel laboratorio (TRH de 12 h, carga orgánica de 3 g DQO/L/d); con esta consideración, se pudo determinar la DQO del efluente con la ecuación 1.

$$DQO = Bv \cdot TRH$$

Ecuación 1

En donde la concentración de DQO está en g/L, la Bv en g DQO/L/d y el TRH en d.

Entonces, la concentración de DQO en el efluente deberá ser de 1.5 g/L. Debido a que la concentración promedio del agua residual que llega a la PTAR-TESE es de 0.461 g/L se requiere incrementarla, y para ello se debe mezclar con otro efluente con mayor concentración de DQO. Además, debido a que el flujo promedio de llegada es de 0.626 L/s, este flujo también debe ser incrementado. El flujo requerido se determina con la Ecuación 2.

$$Q = (V/TRH)(1000/3600)$$

Ecuación 2

En donde Q está en L/s, V en m<sup>3</sup> y TRH en h. Las constantes 1000 y 3600 son el factor de conversión de m<sup>3</sup> a L y de horas a segundos, respectivamente, por lo que el flujo requerido es de 3.8 L/s para lograr el TRH de 12 h.

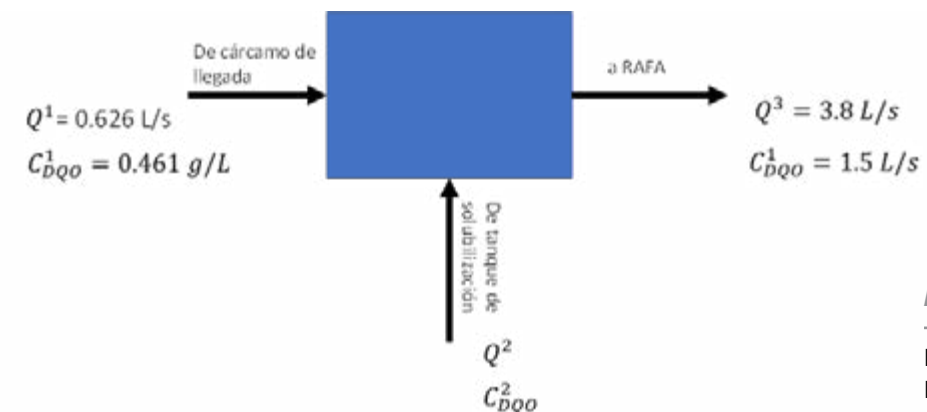


Figura 2

Balance de DQO para la entrada al RAFA

Para determinar la concentración del efluente adicional requerida para tener una DQO de 1.5 g/L se realiza un balance entre los flujos volumétricos (Q) y la concentración de los efluentes de entrada y salida (Figura 2).

El balance queda entonces:

$$Q^1 + Q^2 = Q^3 \quad \text{Ecuación 3}$$

$$Q^1 C_{DQO}^1 + Q^2 C_{DQO}^2 = Q^3 C_{DQO}^3 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$Q^2 = 3.8 \frac{L}{s} - 0.626 \frac{L}{s} = 3.17 \frac{L}{s} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$C_{DQO}^2 = \frac{Q^3 C_{DQO}^3 - Q^1 C_{DQO}^1}{Q^2} = \frac{5.41 \frac{g}{s}}{3.17 \frac{L}{s}} = 1.71 \frac{g}{L} \quad \text{Ecuación 6}$$

A partir de esta información, se diseñó un tanque de solubilización para la PTAR-TESE. Primeramente, se realizó una caracterización fisicoquímica de los RFH obtenidos de una coctelería del Municipio de Ecatepec de Morelos en el Estado de México y posteriormente se diseñó un tanque para proveer de la DQO requerida en la Ecuación 5 y 6.

### Diseño del tanque de solubilización de RFH

Estudios previos han determinado que la solubilización de RFH depende de si el proceso se da con agitación o sin ella (Carrera y Mascota, 2022) y que la fracción de sólidos que migra a la fracción soluble, depende de la relación RFH: agua (Zarate *et al.*, 2020). También se ha definido que la solubilización de RFH en agua puede modelarse con una cinética de primer orden, estableciendo que la constante de velocidad de solubilización de primer orden es de 0.252 h<sup>-1</sup> (Sarmiento, 2023). Además, se ha establecido que cuando se hace pasar una corriente ascendente de agua a través de un empaque de RFH a una velocidad ascensional de 1 m/h se puede solubilizar el RFH en un 95%, manteniendo un tiempo de retención de sólidos (TRS) de cuatro días (Vian *et al.*, 2020).

En la PTAR-TESE existe un tanque en desuso, por lo cual, con la intención de aprovechar toda su infraestructura, se ajustaron las condiciones de operación para que ese tanque se pueda usar para la solubilización de los RFH. El tanque es de 4.12 m<sup>3</sup> (Figura 3), cuenta con un vertedero y una fosa de desagüe que llega al cárcamo de bombeo y se le adaptó un desvase para nivelar el límite del agua y poder alimentar los RFH.

Al tanque se le implementó un sistema de distribución de agua de flujo ascendente, para que al pasar ésta por el empaque de RFH, transporte los compuestos solubles al cárcamo de bombeo y se mezcle con el agua residual otorgada por las instalaciones del TESE.

La determinación de las condiciones de operación del tanque se realizó mediante una simulación, considerando un tanque agitado de alimentación continua (Figura 4) y la dinámica de solubilización descrita en el párrafo superior.

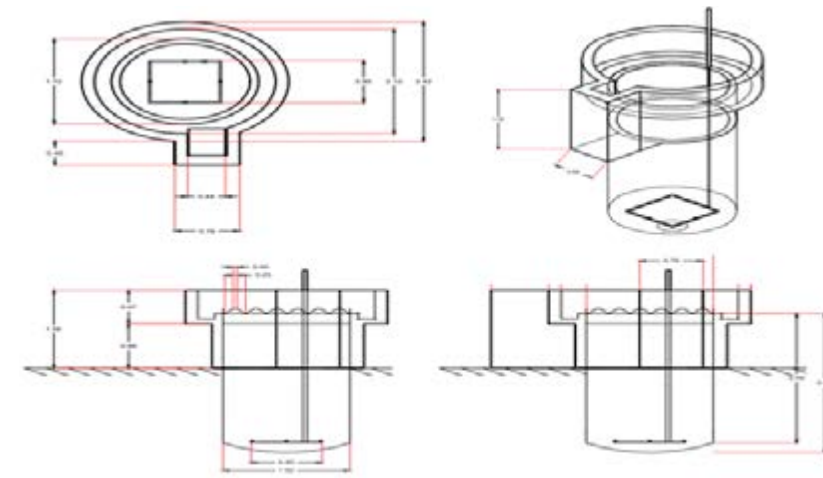


Figura 3

Tanque de solubilización.

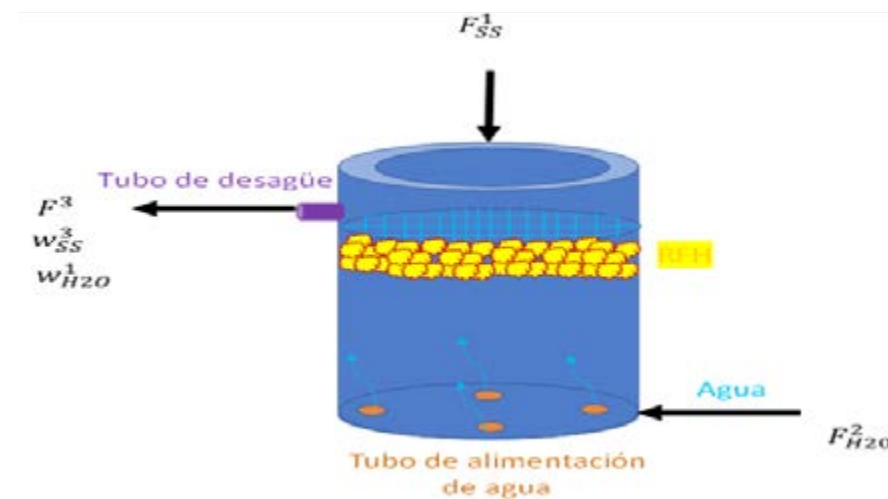


Figura 4

Balance en el tanque de solubilización.

El balance de sólidos en el tanque es:

$$\frac{dSS}{dt} = D(SS_o - SS) - r_{SS} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\frac{dSD}{dt} = r_{SS} - (D * SD) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$r_{SS} = k * SS \quad \text{Ecuación 9}$$



En donde SSo es la concentración de sólidos suspendidos totales ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) en los RFH, SS es la concentración de sólidos suspendidos totales ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) en los RFH gastados, Q es el flujo volumétrico ( $\text{m}^3/\text{h}$ ),  $r_{\text{SS}}$  es la velocidad de solubilización de SS ( $\text{kg}/\text{m}^3/\text{h}$ ),  $k$  es la constante de velocidad de primer orden ( $\text{h}^{-1}$ ). La simulación nos indicó que la DQO<sub>s</sub> consigna 1.7 g/L se alcanza en 1 hora, por lo que las condiciones de operación para este tanque de solubilización deberán ser: Q = 11.4  $\text{m}^3/\text{h}$  de agua y un flujo másico de sólidos de 5.55  $\text{kg-SS}/\text{h}$ , es decir, 55.5  $\text{kg RFH}/\text{h}$ .

Con esta información se determinó que era factible utilizar el tanque de 4.12  $\text{m}^3$  y se procedió a su adaptación para usarlo como tanque de solubilización (lixiviación), que se muestra en la Figura 5.

Una vez terminados los trabajos de adaptación del tanque, éste se operó discontinuamente agregando 100 kg de RFH al día, con un tiempo de retención de sólidos de siete días (los RFH gastados se retiraron hasta pasado ese tiempo) y luego se enviaron a composteo.

La concentración a la salida del tanque de lixiviados en un intervalo de 2000 a 5000 mg DQO/L, las concentraciones más altas de DQO deben estar asociadas a la mayor proporción (75%) de frutas ricas en azúcares, como papaya, melón, sandía, mango y manzana, en la mezcla de RFH alimentada al tanque; en tanto que las concentraciones más bajas se dan cuando la proporción de vegetales es mayor al 50%.

El lixiviado fue enviado al cárcamo de bombeo, en donde se mezcla con el agua residual doméstica para su posterior alimentación al RAFA. La mezcla lixiviado-ARM, permitió alimentar al RAFA con una carga orgánica entre 0.6 y 1.2  $\text{g}/\text{L}/\text{d}$  (Figura 3) que es tres veces menor a la carga mínima esperada (4  $\text{g DQO}/\text{L}/\text{d}$ ), por lo que será necesario optimizar las condiciones de operación del tanque de lixiviación, para obtener el resultado deseado.

En general, se logró que la PTAR-TESE llegara a tener una eficiencia de remoción global del 78%, manteniendo su operación durante 12 horas continuas. Sin embargo, para aumentar la eficiencia de tratamiento, es necesario redirigir todas las corrientes de agua residual del TESE a la PTAR-TESE.

En tanto, el potencial de biogás estimado a partir de la eficiencia de remoción de DQO en el RAFA fue de alrededor de 0.9  $\text{L}_{\text{CH}_4}/\text{L}_R/\text{d}$ . La productividad de metano resultó dos veces menor que la esperada para sistemas de este tipo; Montes *et al.*, (2019) reportan productividades de metano de hasta 1.8  $\text{LCH}_4/\text{LR}/\text{d}$ . Tal diferencia está directamente relacionada con la carga orgánica tratada, ya que ésta es también cinco veces menor a la reportada en ese estudio. Es importante resaltar, que la temperatura de operación fluctuó entre los 20 y 25 °C lo que afecta la productividad de metano, ya que se reportan como temperaturas óptimas 35 °C y 55 °C (Montalvo y Guerrero, 2003).

## Conclusión

Son todavía muchos los trabajos pendientes para que la PTAR-TESE opere a su máxima capacidad y mejore su eficiencia de tratamiento; no obstante, la estrategia de tratamiento conjunto de RFH y ARM es alentadora.

Esta primera experiencia nos permite integrar información para trazar la ruta de optimización del proceso, maximizar la concentración de DQO a la salida



Figura 5

Trabajos de adaptación del tanque de lixiviación de la PTAR-TESE.

del tanque de lixiviación; generar las condiciones de operación de la PTAR-TESE para mejorar las eficiencias de remoción, llegar a valores por arriba del 90%; redireccionar los drenajes del TESE, para que todos confluyan al cárcamo de llegada de la PTAR-TESE; instrumentar la planta para un mejor control del proceso, entre otros más.

El camino es todavía largo y arduo, pero los primeros resultados nos motivan para continuar trabajando, hasta lograr el objetivo final: tener una PTAR-TESE eficiente, que sea un modelo para otros operadores de PTAR municipales.





### El equipo de trabajo

### Agradecimientos

Los autores agracen el financiamiento otorgado por el Tecnológico Nacional de México: Proyecto 14744.22-PD, y por al COMECyT, Proyecto FICDTEM-2023-144.

También agradecemos encarecidamente al C. Jesús Guerra Ramírez operador de la PTAR-TESE, por todo el apoyo otorgado durante el desarrollo de este proyecto, por mantener siempre una actitud de colaboración en el trabajo y de entusiasmo permanente.





## Referencias

Carrera Maldonado, María Elena; Mascota Álvarez, Jessica Paola (2022) Tratamiento anaerobio-aerobio de residuos de frutas y hortalizas. Tesis de Ingeniería Bioquímica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. Ecatepec de Morelos, Estado de México.

Comisión Nacional del Agua (2021). *Estadísticas del agua en México*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Ciudad de México, Mexico.

Drofenik J., Urbanc D., Goričanec D., Kravanja Z., Novak Pintarič Z. "Food Waste to Energy through Innovative Coupling of CHP and Heat Pump". *Energies* 2023, 16, 3344.

Jiang, W.; Tao, J.; Luo, J.; Xie, W.; Zhou, X.; Cheng B.; Guo G.; Hao, H. N.; Guo, W.; Cai, H.; Ye, Y.; Chen, Y.; Pozdnyakov, I.P. "Pilot-scale two-phase anaerobic digestion of deoiled food waste and waste activated sludge: Effects of mixing ratios and functional analysis." *Chemosphere*, 2023, 329, 138653.

Montes, M. M., Viguera, S. E., Pérez, V. J., Zafra, G. J., Velasco, A. P., & Chang, C. K. (21 de enero de 2019). "Two-stage anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes." *Journal of Biotech Research*, 10, 29-37

Mancera-Sandoval, R., Loera, O.; Ramírez-Vives, F. "Fungal pretreatment of citrus waste improves the hydrolysis and acidogenesis of the organic fraction of urban solids wastes." *Rev. Int. Contam. Ambie.* 2023, 39, 47-58

Saidi R., Hamdi M., Bouallagui H. "Enhanced hydrogen and methane production from date fruit wastes using semi continuous two-stage anaerobic digestion process with increasing organic loading rates." *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 174: 267-275

Sarmiento García Elizabeth (2023). Diseño y simulación de un sistema Anaerobio-aerobio para el co-tratamiento de aguas residuales domésticas y residuos de frutas y hortalizas. Tesis de Maestría en Productos Biológicos. Universidad Mexiquense del Bicentenario. Unidad de Estudios Superiores Tultitlán.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2020). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos*. Ciudad de México

Segura, Y.; Molina, R.; Rodríguez, I.; Hülsen T.; Batstone, D.; Monsalvo, V.; Martínez, F.; Melero, J. A.; Puyol, D. "Improvement of biogas production and nitrogen recovery in anaerobic digestion of purple phototrophic bacteria by thermal hydrolysis." *Bioresource Technology*, 2023, 367, 128250

Vian J., Viguera-Carmona S. E., Velasco Pérez A. y Puebla H. (22 de Enero 2020). "A Novel Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket Solid-State Reactor for the Treatment of Fruit and Vegetable Waste." *Environmental Engineering Science*, 373-381

Zárate, C. O., Montes, M. M., y Viguera-Carmona, S. E., (2020). Producción de digestato anaerobio a partir de residuos de frutas y verduras. Coloquio de Investigación Multidisciplinaria, CIM2020.

## Fotografías

Unidad de Relaciones Públicas y Difusión del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec

Sergio Esteban Viguera Carmona  
Docente-Investigador del Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

# Alternativa Electroquímica para el Tratamiento de Aguas con Cromo Hexavalente

Juan Antonio Yáñez Varela <sup>a</sup>, Sergio Alejandro Martínez Delgadillo <sup>b</sup>, Jesús Eduardo Lugo Hinojosa <sup>c</sup>



## Acerca de los autores

<sup>a</sup> Unidad de Estudios Superiores Tultitlán de la Universidad Mexiquense del Bicentenario, Tultitlán Estado de México, México, [juan.varela@umb.mx](mailto:juan.varela@umb.mx)

<sup>b</sup> Departamento de Ciencias Básicas, Unidad Azcapotzalco, Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México, [samd@azc.uam.mx](mailto:samd@azc.uam.mx)

<sup>c</sup> Posgrado en Ingeniería de Procesos, Unidad Azcapotzalco, Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México, [jesedulugo@yahoo.com.mx](mailto:jesedulugo@yahoo.com.mx)

## Resumen

La presencia de cromo hexavalente, Cr(VI), en efluentes industriales, es una preocupación ambiental significativa, debido a su alta toxicidad y persistencia. Este artículo revisa diversas técnicas desarrolladas para la remoción eficiente de Cr(VI) de medios acuosos, con un enfoque particular en los métodos electroquímicos. Entre las tecnologías examinadas, el proceso de electro-reducción indirecta usando electrodos de hierro, destaca por su

flexibilidad, facilidad de instalación y bajo consumo energético. A través de una serie de estudios de caso, se demostró que esta técnica es eficaz en el tratamiento de aguas altamente contaminadas, tanto en entornos de laboratorio como a escala industrial. Además, se exploraron desafíos operativos como la pasivación del electrodo y se discutieron estrategias para mitigarlos, mejorando así la eficiencia del proceso. Finalmente, se recomienda la continuación de la investigación para optimizar aún más estas tecnologías y explorar su integración con fuentes de energía renovable, lo que podría ofrecer soluciones más sostenibles y económicamente viables para el tratamiento de efluentes industriales.

### Palabras Clave

Cromo hexavalente, Reactores electroquímicos, Tanque de agitación, Reactor tubular, Electrodo de hierro.

### Abstract

*The presence of hexavalent chromium, Cr(VI), in industrial effluents poses a significant environmental concern due to its high toxicity and persistence. This article, reviews various techniques developed for the efficient removal of Cr(VI) from aqueous environments, with a particular focus on electrochemical methods. Among the technologies examined, the process of indirect electro-reduction using iron electrodes stands out for its flexibility, ease of installation, and low energy consumption. Through a series of case studies, this technique has been demonstrated to be effective in treating highly contaminated waters, both in laboratory settings and on an industrial scale. In addition, operational challenges such as electrode passivation were explored, and strategies to mitigate them were discussed, thereby improving the process efficiency. Finally, continued research is recommended to further optimize these technologies and explore their integration with renewable energy sources, which could offer more sustainable and economically viable solutions for industrial effluent treatment.*



### Keywords

*Hexavalent chromium, electrochemical reactors, stirred tank, tubular reactor, iron electrodes.*

### Introducción

El cromo hexavalente, Cr(VI), es un compuesto ampliamente utilizado en la industria para la manufactura de una gran variedad de productos químicos, textiles, metalúrgicos y en procesos galvanicos (Sharma *et al.*, 2022). A diferencia de las presentaciones más comunes y menos tóxicas del metal, como el cromo en su estado elemental (Cr) y el cromo trivalente, Cr(III), el Cr(VI) no se encuentra de manera natural en el ambiente. Su presencia es indicativa de fuentes antropogénicas, es decir, originadas por actividades humanas. Cabe destacar que el Cr(VI) es aproximadamente 1,000 veces más tóxico para los sistemas bioquímicos que el Cr(III) (Ruotolo & Liao, 2004). En la industria, las sales de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) son utilizadas para obtener Cr(VI) al ser solubilizadas en medios acuosos. Sin embargo, la eficiencia de estos procesos industriales a menudo resulta en la generación de residuos líquidos que contienen concentraciones de Cr(VI) que exceden los límites establecidos por la normativa mexicana actual, especificados en 0.5 mg/L por la NOM-001-SEMARNAT-2021 (SEMARNAT, 2021). Un caso particular de esta situación, se observa en la industria de cromado, donde se recubren piezas metálicas mediante la técnica de electrodeposición. Este método implica sumergir las piezas en soluciones altamente concentradas de Cr(VI) dentro de celdas galvanicas, con el objetivo de depositar electroquímicamente el cromo en las superficies metálicas. Después de este proceso, las piezas se enjuagan en tinas para remover el exceso de cromo, resultando en un arrastre de residuos que contiene altas concentraciones de este metal, superando los estándares permitidos.

Debido a la alta toxicidad del cromo hexavalente y a las estrictas normativas que regulan su disposición, es imprescindible que los residuos líquidos derivados de estos procesos industriales sean tratados antes de ser vertidos al alcantarillado municipal. Dada la relevancia de este compuesto en la industria y de su impacto negativo sobre el medio ambiente y los organismos vivos, se han desarrollado diversas tecnologías para el tratamiento de estos efluentes. En la Tabla 1 se enumeran algunas de estas alternativas, destacando tanto las ventajas como las desventajas de cada método de tratamiento.



**TABLA 1**

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TIPOS DE TRATAMIENTO PARA LA REMOCIÓN DE CROMO HEXAVALENTE EN RESIDUOS LÍQUIDOS.

Tipo de Tratamiento	Principales Agentes	Ventajas	Desventajas
<b>Coagulación Química</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compuestos Sulfurados</li> <li>• Sales de Hierro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo de inversión</li> <li>• Fácil de implementar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No efectivo en efluentes con concentraciones bajas (&lt;100 mg L<sup>-1</sup>)</li> <li>• Produce grandes cantidades de residuos sólidos.</li> </ul>
<b>Adsorción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carbón Activado</li> <li>• Bio-adsorbente</li> <li>• Desechos agroindustriales</li> <li>• Quitosano</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo de inversión</li> <li>• Viabilidad y factibilidad</li> <li>• Operación sencilla y eficiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil recuperación del empaque adsorbente.</li> <li>• Para incrementar eficiencia, algunos adsorbentes requieren modificaciones químicas.</li> </ul>
<b>Filtración con Membranas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Membrana Inorgánica</li> <li>• Membrana Polimérica</li> <li>• Membrana Líquida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requieren poco espacio</li> <li>• Bajo consumo energético</li> <li>• No genera residuo sólido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poca estabilidad térmica y química.</li> <li>• Control de pH para evitar rechazo de compuestos de Cr(VI).</li> <li>• Alto costo de inversión y mantenimiento.</li> </ul>
<b>Intercambio Iónico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resinas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta selectividad</li> <li>• Bajo consumo energético</li> <li>• Posible recuperación del Cr</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control riguroso de la concentración de Cr(VI) a la entrada.</li> <li>• La alimentación debe ser calentada para mejorar la eficiencia.</li> <li>• Diferentes etapas deben ser empleadas.</li> </ul>

El primer método de tratamiento listado en la Tabla 1 es la coagulación química, ampliamente adoptada en la industria para subsanar este problema. El proceso se basa en el uso de sales que, al reducir y coagular las especies de Cr(VI), facilitan su remoción de soluciones acuosas mediante la formación de un precipitado fácilmente separable por medios mecánicos. La implementación de este tratamiento fisicoquímico es relativamente sencilla, ya que únicamente

requiere un tanque y agitación suave para que el proceso ocurra de manera eficaz (El Gaayda *et al.*, 2023). El segundo método, la adsorción, ha ganado importancia debido a la diversidad de materiales adsorbentes estudiados específicamente para este contexto. Aunque la operación e instalación de este proceso son simples, su principal desafío radica en la necesidad de reemplazar periódicamente el material adsorbente para mantener la eficiencia de remoción, complicándose por la dificultad de recuperar el adsorbente sin contaminación (Owlad *et al.*, 2009). Los últimos tratamientos mencionados en la Tabla 1, son la filtración con membranas y el intercambio iónico, ambos destacados por su alta selectividad hacia compuestos específicos. Sin embargo, su aplicabilidad se reduce cuando los efluentes contienen diversos contaminantes, ya que la rápida saturación de los medios reduce significativamente la eficacia del proceso.

Mientras que los métodos mencionados en la Tabla 1 han mostrado ser efectivos bajo ciertas condiciones, las tecnologías electroquímicas representan una alternativa prometedora, ofreciendo soluciones específicas a las limitaciones de los procesos anteriores. Estas tecnologías serán exploradas con mayor detalle en la siguiente sección.

### 1. Métodos electroquímicos

Aunque los métodos electroquímicos se han utilizado desde 1889, su aplicación ha ganado un renovado interés en las últimas décadas, especialmente en la resolución de problemas ambientales (Chen, 2004). Destacados por el uso del “reactivo limpio”, el electrón, que puede ser generado a partir de fuentes de energía renovables, estos procesos son particularmente valiosos en el tratamiento de aguas con altas concentraciones de cromo hexavalente (Jin *et al.*, 2016). Se han desarrollado diversas tecnologías electroquímicas que se detallan en la Tabla 2, donde además se describen sus ventajas y desventajas, así como los materiales utilizados para los electrodos en las celdas electroquímicas.

**TABLA 2**

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TIPOS DE TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICOS PARA LA REMOCIÓN CROMO HEXAVALENTE DE RESIDUOS LÍQUIDOS.

Tecnología Electroquímica	Ventajas	Desventaja	Material de los Electroodos
<b>Electrodiálisis</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta efectividad para efluentes con baja concentración</li> <li>• Unidades pequeñas</li> <li>• Posibilidad de recuperar el Cr</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los costos de mantenimiento e inversión son altos.</li> <li>• Poca estabilidad térmica y química de las membranas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acero</li> <li>• Cobre</li> </ul>

<b>Electrocoagulación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta eficiencia</li> <li>Fácil operación</li> <li>Flexibilidad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cambio del ánodo de sacrificio por el desgaste.</li> <li>No se asegura reducción al 100%.</li> <li>Producción de lodo residual.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hierro</li> <li>Aluminio</li> <li>Acero</li> </ul>
<b>Electro-reducción</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducción directa</li> <li>Fácil implementación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alto costo de inversión.</li> <li>Se requiere una segunda etapa para la precipitación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acero</li> <li>Oro</li> <li>Cobre</li> <li>Diamante</li> <li>Carbón y grafito</li> <li>Polímero conductor</li> </ul>

La electrodiálisis, el primer proceso mencionado en la Tabla 2, utiliza membranas selectivas para atraer específicamente iones o cationes, aprovechando las cargas generadas por los electrodos para impulsar este movimiento. Esta capacidad selectiva, hace que la electrodiálisis sea particularmente adecuada para la recuperación de Cr(VI). En segundo lugar, la electrocoagulación, ampliamente aplicada en el tratamiento de aguas residuales, se destaca por su flexibilidad operativa y fácil implementación. En este proceso, se genera *in situ* el agente coagulante, generalmente un ion metálico proveniente de hierro o aluminio, que actúa desestabilizando las cargas del Cr(VI) para flocularlo y precipitarlo. A diferencia de la electrodiálisis, la electrocoagulación requiere menores costos de inversión, aunque produce una cantidad considerable de residuos sólidos. Finalmente, el último es el proceso de electro-reducción, que puede ocurrir directamente en el cátodo o de manera indirecta, es decir, a través de un agente reductor metálico liberado por el ánodo que induce la reducción dentro de la solución. Aunque la reducción directa es energéticamente demandante, se han desarrollado alternativas para mejorar su eficiencia, como el uso de corriente alterna o la operación de las celdas electroquímicas con pulsos de corriente. Sin embargo, la reducción indirecta se ha revelado como una opción energéticamente más eficiente, especialmente cuando se utilizan electrodos de hierro. Esta técnica será analizada en detalle en las siguientes secciones para explorar su fundamento teórico y revisar experiencias prácticas de su aplicación.

## 2. Electroreducción indirecta de Cr(VI) con electrodos de Fe

El proceso de electro-reducción empleando electrodos de hierro, ha demostrado ser especialmente eficaz en el tratamiento de aguas de enjuague en la industria galvanoplástica, donde dichas aguas presentan altas concentraciones de Cr(VI) y bajas de otros contaminantes. Esta técnica representa una opción viable para pequeñas y medianas empresas galvanoplásticas que buscan soluciones de tratamiento costeables, dada su incapacidad para realizar grandes inversiones en sistemas de tratamiento avanzados.

La eficacia de la remoción de Cr(VI) mediante este proceso, depende fuertemente de condiciones operativas, como el material de los electrodos y el pH del medio. Utilizar electrodos de hierro, como el acero al carbón, es una estrategia que reduce significativamente los costos de inversión, gracias a la economía de estos materiales. Sin embargo, es crucial mantener un control riguroso del pH de la solución, para asegurar que la remoción del Cr(VI) se lleve a cabo a través de la electro-reducción y no mediante electrocoagulación.

Es importante destacar que las especies de Cr(VI) permanecen solubles en todo el rango de pH, mientras que el Cr(III) comienza a ser insoluble, formando  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  a partir de un pH de 4. Esto subraya la importancia de la reducción de Cr(VI) en cualquier tecnología orientada a remover compuestos de cromo de medios acuosos, ya que en condiciones naturales el pH suele ser neutro, lo que provoca la precipitación de Cr(III). En el proceso de electro-reducción esquematizado en la Figura 1 A, el uso de electrodos de hierro conduce a la disolución de Fe(II) en la solución debido al paso de la corriente eléctrica. Este Fe(II) se oxida a Fe(III), actuando como un agente reductor de las especies de Cr(VI). Si el pH se mantiene por debajo de 2.4 unidades, el Fe(III) permanece soluble durante el proceso, permitiendo su contacto continuo con el cátodo para regenerar Fe(II). En contraste, si el pH no se controla adecuadamente, la ionización catódica del agua genera iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), lo que provoca el aumento del pH del medio, a medida que avanza el tiempo de electrólisis. Esto favorece la continua formación de hidróxidos metálicos y su posterior precipitación, desviando el proceso de electro-reducción hacia la electrocoagulación (Barrera-Díaz *et al.*, 2012), tal como se muestra en la Figura 1 B.

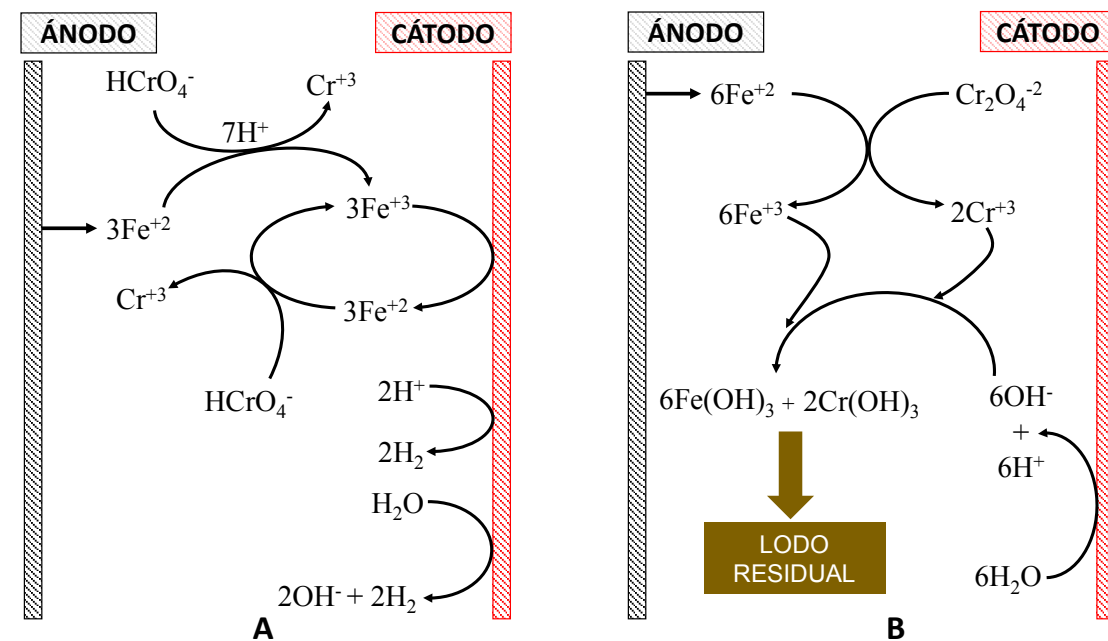


Figura 1

Esquemas de reacción para (A) Electro-reducción y (B)



Por lo tanto, cuando el pH se controla en condiciones ácidas (<2.4 unidades) durante todo el tiempo de electrólisis, el proceso es denominado electro-reducción (o reducción electroquímica). Sin embargo, cuando el pH no es controlado adecuadamente, el proceso se conoce como electrocoagulación. Aunque la electro-reducción con electrodos de hierro en condiciones ácidas requiere una operación adicional para lograr la precipitación de las especies, esta técnica tiene la ventaja de un menor consumo energético, lo que puede resultar en costos de operación más bajos.

### 3. Experiencias en la implementación de sistemas de reacción

#### 3.1 Reactor de baño y placas

La aplicación de este proceso comenzó a explorarse en un sistema de celda electroquímica de baño con placas de 2 L de capacidad, como el que se muestra en la Figura 2. El agua que trató este sistema, provenía de una industria metalúrgica que contenía una concentración de 1000 mg/L. En este

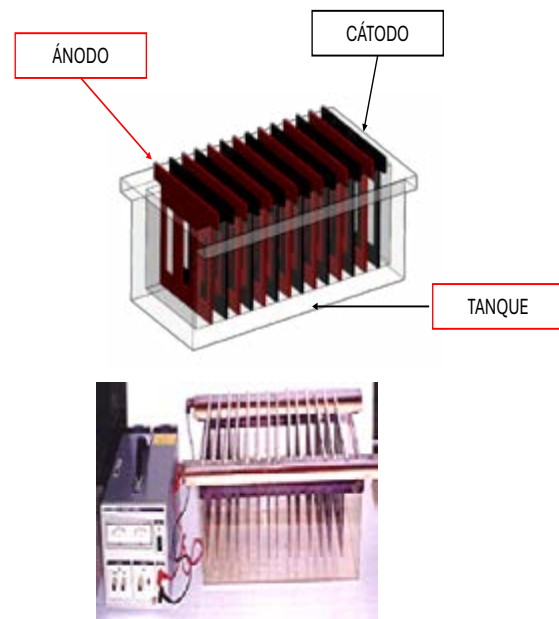


Figura 2

Celda electroquímica de baño con electrodos en placas.

reactor a escala laboratorio, se logró demostrar que la velocidad de reacción es adecuadamente descrita por una cinética de orden variable. Además, se observó que, tras periodos prolongados de operación, los electrodos se recubrían con una capa de óxidos. Este fenómeno, conocido como pasivación de los electrodos, genera la necesidad de incrementar el voltaje para mantener una intensidad de corriente constante durante el proceso (Martínez *et al.*, 2000).

Este diseño fue suficientemente bien estudiado para ser aplicado a nivel industrial, teniendo como resultado el desarrollo de un reactor para tratar las aguas de enjuague en la empresa Cromatos, S.A. de C.V. Esta industria enfrentaba el problema de que sus aguas de enjuague de procesos de

cromado contenían concentraciones de aproximadamente 200 mg/L de Cr(VI), superando los límites establecidos por la regulación ambiental. Por lo tanto, el reactor fue escalado del modelo de laboratorio que se muestra en la Figura 2, a un volumen operativo de 120 L. Este reactor industrial utilizó 15 electrodos, distribuidos entre 7 ánodos y 8 cátodos (como se aprecia en la Figura 3 B), y operó con intensidades de corriente que variaron de 100 a 1000 A. El reactor instalado en esta empresa se presenta en la Figura 3 A. Dado que la operación en la empresa se realizaba en lotes, el reactor fue adaptado para manejar el volumen requerido diariamente. Este reactor demostró ser capaz de reducir la concentración de Cr(VI) en la solución a menos de 0.5 mg/L en 200 minutos, con una intensidad de corriente de 100 A. Un aspecto interesante de este sistema, es que el tiempo de reacción disminuía conforme se operaba el reactor con mayor intensidad de corriente; sin embargo, esto implicaba un mayor consumo energético.

Al igual que el reactor a escala de laboratorio, el sistema industrial también experimentaba el problema de la pasivación, un fenómeno que se intensificaba con el tiempo de uso. Esta situación reducía el interés de los industriales en utilizar este sistema, debido al alto costo asociado con el aumento en el consumo energético. Para contrarrestar este problema, se implementaron algunas estrategias, como limpiar los electrodos lijándolos u operar el reactor con una solución concentrada de cloruro de sodio para promover el "pitting", término que describe la corrosión que se produce en los electrodos debido a la generación de cloro gaseoso. De esta forma, se lograba disminuir periódicamente la pasivación de los electrodos.

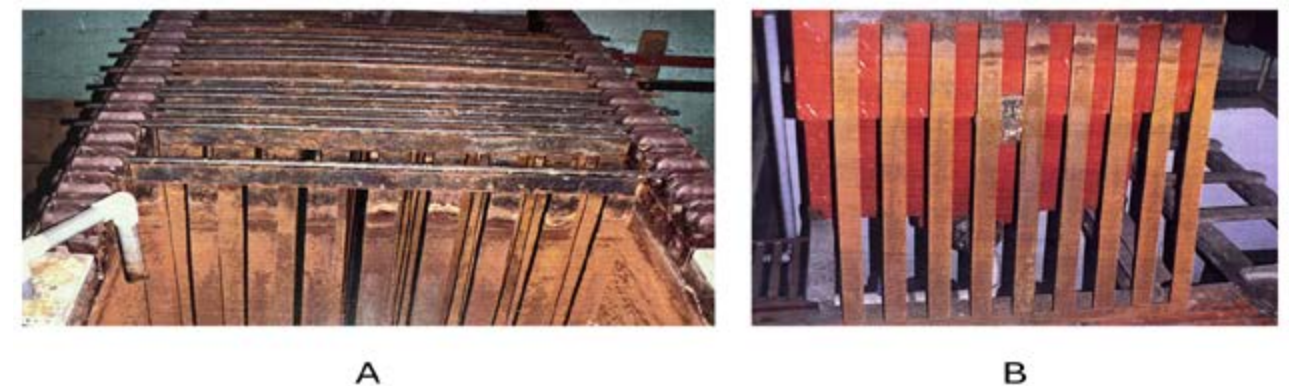


Figura 3

(A) Reactor industrial.  
(B) Placa de electrodo.

#### 3.2 Reactores tubulares

La configuración de reactores tubulares también se evaluó para la remoción de Cr(VI), como se muestra en la Figura 4. Este diseño incorpora un cátodo central de hierro rodeado por un ánodo en forma de espiral, ambos distribuidos a lo largo del reactor tubular. La alimentación del reactor se introduce por la parte inferior, mientras que la salida de flujo se sitúa en la parte superior, equipada con un rebosadero (Rodríguez & Martínez, 2005).

En este reactor, la importancia del pH en la operación fue evidente, tal como se abordó en la sección anterior. Además, se investigaron distintas ubicaciones para la alimentación del reactor, con el objetivo de determinar cuál de ellas provocaba la menor dispersión axial, buscando establecer la configuración óptima. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos por optimizar este reactor y reducir su dispersión axial, se observó que disminuir la dispersión no mejoraba la eficiencia de remoción de Cr(VI). Esto llevó a la conclusión de que este proceso se beneficia de una amplia dispersión para facilitar las reacciones electroquímicas y químicas necesarias. Por lo tanto, el siguiente paso fue explorar sistemas con mezcla completa.

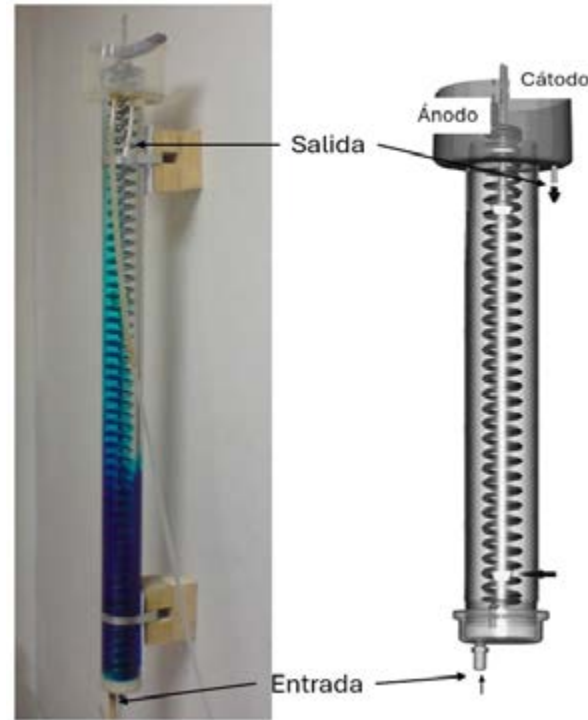


Figura 4

Reactor electroquímico tubular con ánodo espiral.

### 3.3 Reactores de mezcla completa

El primer reactor de mezcla completa propuesto para la remoción de cromo hexavalente, fue el reactor electroquímico con anillos rotatorios de 12 L. Este reactor fue denominado así debido a que su electrodo consistía en anillos, que se muestran en la Figura 5, alternando posiciones entre un ánodo (anillos cafés) y un cátodo (anillos plateados). Debido a que los anillos rotaban y proporcionaban la agitación a la solución electrolítica que contiene el reactor electroquímico, esta configuración requería una conexión especial en el eje del motor de agitación para conectar el electrodo a la fuente de energía. Además, el reactor estaba equipado con cuatro deflectores convencionales para prevenir la formación de un vórtice concéntrico. En este reactor se trataron aguas de industrias cromadoras con concentraciones de hasta 1000 mg/L. Sin embargo, uno de los hallazgos más relevantes fue la gran dependencia entre la velocidad de agitación del reactor y el tiempo de reacción; al operar el reactor a una mayor velocidad de agitación, se reducía significativamente el tiempo necesario para alcanzar las concentraciones permisibles de Cr(VI) en el líquido (Rodríguez R. *et al.*, 2009).

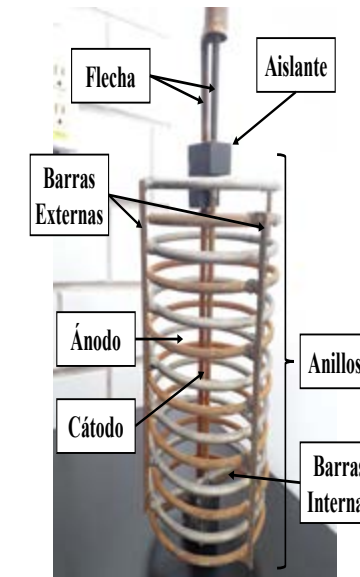


Figura 5

Electrodo de anillos rotatorios.

Gracias a la reducción en la pasivación del electrodo, facilitada por el incremento en la velocidad de agitación y los esfuerzos constantes ejercidos por el fluido de operación, este sistema logró registrar los consumos energéticos más bajos para el tratamiento electroquímico de aguas contaminadas con Cr(VI). Esto motivó el escalamiento del reactor a un nivel semiindustrial, implementando un sistema de tres reactores en cascada, cada uno con un volumen de operación de 170 L. Este sistema de reactores en cascada se puede observar en la Figura 6. Con este arreglo, se alcanzaron consumos energéticos de hasta 4 kW-h/kg-Cr(VI), demostrando la versatilidad del sistema para operar tanto de manera continua como en lotes. Sin embargo, se enfrentaron algunas dificultades operativas, como el sobrecalentamiento de la conexión en el eje del motor al operar el sistema por largos períodos y a altas velocidades de reacción. El más reciente reactor propuesto para el tratamiento de efluentes

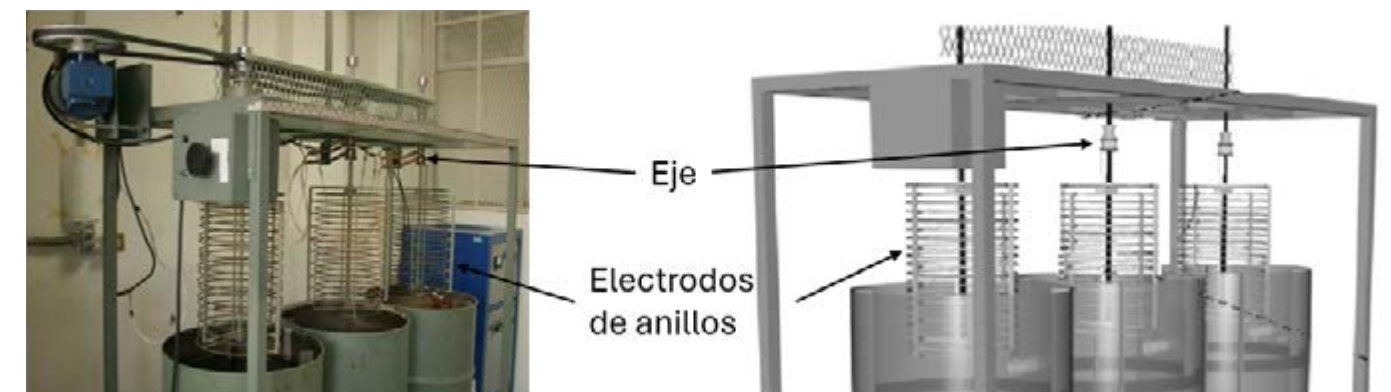


Figura 6

Sistema de reactores de mezcla completa en cascada.



contaminados con Cr(VI), es el reactor electroquímico de 19 L, equipado con electro-deflectores, mostrado en la Figura 7. Estos dispositivos tienen la función dual de desviar el flujo tangencial generado por los agitadores axiales, situados en el centro del tanque, y actuar como electrodos. Cada electro-deflector está compuesto por dos varillas, una que funciona como cátodo (negra) y la otra como ánodo (roja). Se colocan ocho electro-deflectores de manera simétrica en el tanque, y la agitación se logra mediante dos impulsores axiales que promueven la dispersión de los componentes. Este diseño ha incrementado el área de contacto en un 25% con respecto al reactor de anillos rotatorios. En pruebas de laboratorio con agua contaminada que presentaba una concentración de 130 mg/L de Cr(VI), el sistema logró alcanzar consumos energéticos de hasta 1.5 kW-h/kg-Cr(VI). Además, este diseño presenta la ventaja de no tener conexiones que estén expuestas a partes móviles, evitando el sobrecalentamiento que se observó en el electrodo de anillos rotatorios (Yáñez-Varela *et al.*, 2024).



Figura 7

Reactor electroquímico equipado con electro-deflectores.

de electro-reducción indirecta utilizando electrodos de hierro. Este método no solo es eficiente para tratar aguas con altas concentraciones de Cr(VI), sino que también se destaca por su bajo consumo energético.

Además, se realizó una revisión de experiencias con distintos sistemas de reacción que han aplicado esta técnica a nivel de laboratorio e industrial, resaltando hallazgos relevantes que han mejorado la operación y aplicación de estos sistemas. Entre estos avances, se incluyen la optimización de la agitación y la gestión de la pasivación del electrodo, aspectos que han probado ser fundamentales para la eficacia del tratamiento. A partir de estos estudios, se concluye que la adaptación y mejora continua de las tecnologías electroquímicas podrían ofrecer soluciones aún más eficientes y sostenibles para el tratamiento de efluentes contaminados por metales pesados. Se recomienda realizar más investigaciones que exploren la integración de estas técnicas con otras tecnologías emergentes, como el uso de energías renovables para minimizar aún más el impacto ambiental y económico asociado con la purificación de agua contaminada.



## Conclusiones

En este artículo se ha discutido la importancia crítica de remover el cromo hexavalente (Cr(VI)) de medios acuosos, destacando su relevancia tanto para la industria como para la protección ambiental. Se presentaron diversas técnicas desarrolladas para tratar efluentes contaminados con Cr(VI), subrayando que cada técnica posee ventajas y limitaciones específicas. Dentro de este espectro, las técnicas electroquímicas emergen como opciones particularmente flexibles y fáciles de instalar, con especial énfasis en el proceso



## Fotografías

<https://www.hannacolombia.com/aqua/blog/item/reduciendo-cromo-en-aguas-residuales-de-galvanizado>

<https://institutodelagua.es/aguas-residuales/carbono-organico-total-en-aguas-residualesaguas-residuales-2/>

<https://jom.es/procesos-industriales-el-tratamiento-de-aguas-residuales/>

<https://aconsa-lab.com/metales-pesados-en-el-agua-potable/>

## Referencias

Barrera-Díaz, C. E., Lugo-Lugo, V., & Bilyeu, B. (2012). "A review of chemical, electrochemical and biological methods for aqueous Cr(VI) reduction". *Journal of Hazardous Materials*, 223-224, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.054>

Chen, G. (2004). "Electrochemical technologies in wastewater treatment". *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11-41. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>

El Gaayda, J., Rachid, Y., Titchou, F. E., Barra, I., Hsini, A., Yap, P.-S., Oh, W.-D., Swanson, C., Hamdani, M., & Akbour, R. A. (2023). "Optimizing removal of chromium (VI) ions from water by coagulation process using central composite design: Effectiveness of grape seed as a green coagulant". *Separation and Purification Technology*, 307(122805), 122805. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122805>

Jin, W., Du, H., Zheng, S., & Zhang, Y. (2016). "Electrochemical processes for the environmental remediation of toxic Cr(VI): A review". *Electrochimica Acta*, 191, 1044-1055. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.01.130>

Martínez, S. A., Rodríguez, M. G., & Barrera, C. (2000). "A kinetic model that describes removal of chromium VI from rinsing waters of the metal finishing industry by electrochemical processes". *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 42(5-6), 55-61. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0495>

Owlad, M., Aroua, M. K., Daud, W. A. W., & Baroutian, S. (2009). "Removal of hexavalent chromium-contaminated water and wastewater: A review". *Water, Air, and Soil Pollution*, 200(1-4), 59-77. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9893-7>

Rodríguez, M. G., & Martínez, S. A. D. (2005). "Removal of Cr(VI) from wastewaters in a tubular electrochemical reactor. Journal of Environmental Science and Health". Part A, *Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 40(12), 2215-2225. <https://doi.org/10.1080/10934520500234742>

Rodríguez R., M. G., Mendoza, V., Puebla, H., & Martínez D., S. A. (2009). "Removal of Cr(VI) from wastewaters at semi-industrial electrochemical reactors with rotating ring electrodes". *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3), 1221-1229. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.114>

Ruotolo, L. A. M., & Liao, A. A. (2004). "Reaction rate and electrochemical stability of conducting polymer films used for the reduction of hexavalent chromium". *Journal of Applied Electrochemistry*, 34(12), 1259-1263. <https://doi.org/10.1007/s10800-004-1700-6>

SEMARNAT. (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la Nación.

Sharma, P., Singh, S. P., Parakh, S. K., & Tong, Y. W. (2022). "Health hazards of hexavalent chromium (Cr (VI)) and its microbial reduction". *Bioengineered*, 13(3), 4923-4938. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2037273>

Yáñez-Varela, J. A., Martínez-Delgadillo, S. A., Lugo-Hinojosa, J. E., González-Neria, I., Alonzo-García, A., & Mendoza-Escamilla, V. X. (2024). "Effect of the electrode geometry on the performance of a batch electrochemical reactor used for Cr(VI) removal". *Journal of Water Process Engineering*, 57(104671), 104671. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104671>

# EL TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC CUENTA CON UN LABORATORIO NACIONAL CONAHCYT EN INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y CIENCIA DE DATOS (LNC-IACD)







**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO







GOBIERNO DEL  
ESTADO DE  
MÉXICO

**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN, CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN



    [seduc.edomex.gob.mx](https://educ.edomex.gob.mx)

    [teseeducativo](https://teseeducativo)