



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Potencial de la biomasa microalgal producida a partir del tratamiento de aguas residuales y su aplicación en el sector agropecuario

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Ambiental

P R E S E N T A

Denisse Hernández Herrera

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025

Le agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por mi formación académica, por guiarme, instruirme, además de brindarme grandes oportunidades a lo largo de mi carrera universitaria.

- Al M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose por darme la oportunidad de realizar mi tesis, le agradezco la confianza depositada en mí, además de brindarme su valiosa asesoría, su apoyo durante mi formación profesional, le agradezco de todo corazón apoyar mi tema de tesis, así como a desarrollar y sustentar mi investigación en todo momento.
- M.I. Marisol Alfonso Romero le agradezco su apoyo a lo largo de mi carrera profesional, debido a que en todo momento me ayudó a resolver mis inquietudes académicas, además de apoyarme a solucionar mis problemas de inscripción, semestre a semestre, le agradezco su comprensión y confianza en todo momento.

DEDICATORIA

A mi familia materna y paterna por su apoyo, así como su entera confianza en todo momento sobre mi, por confiar en mis conocimientos, capacidades y habilidades para finalizar mis estudios.

A mis abuelos, paternos y maternos, por ser mis primeros padres, las personas que me educaron como a una de sus hijas, que estuvieron conmigo en mi infancia, adolescencia y adultez, que me han llevado de la mano paso a paso conmigo en cada uno de los momentos importantes en mi vida, les agradezco por enseñarme tantas cosas importantes de la vida, gracias a ustedes tengo recuerdos que guardo cual tesoros, ahora entiendo que mi niñez y mi adolescencia fue tan hermosa gracias a ustedes, les debo tanto que no me va a dar la vida para regresarles todo lo que me han dado. Siempre he sido tan afortunada por contar con mis cuatro abuelos y aunque ahora no están todos conmigo, les agradezco cada momento a mi lado.

A mis padres y mi hermana pequeña, por todo el apoyo, amor y cariño incondicional que he recibido no solo durante esta etapa, sino también durante toda mi vida, les agradezco su confianza en mí, sus consejos, palabras de aliento en cada paso que doy, por siempre alentarme a ser la mejor versión de mí misma, les agradezco por todos los bellos momentos, así como recuerdos de mi infancia, adolescencia, incluso cada momento de mi adultez es valioso al lado de cada uno de ustedes. Hermana Valery Hernández y prima Ameyali Hernández, gracias por ser mis mejores amigas, confidentes en todo momento, además de un apoyo incondicional, el mejor regalo que me pudo haber dado la vida fue tenerlas a ustedes a mi lado.

Angel Farid Diaz Valdovinos, te agradezco por ser mi soporte, mi fiel amigo, confidente y pareja incondicional, estos casi 9 años a tu lado han sido invaluable y espero permanecer a tu lado por el resto de mi vida, eres una parte indispensable de mi vida, así como de mi día a día, te quiero, amo y admiro mucho.

A mis tíos, tías, primos y primas por todo su apoyo incondicional, por la confianza depositada en mí durante toda mi vida, confiaron en mí y lo logre, gracias por su cariño y amor incondicional.

A mis amigos y colegas Omar Albarrán, Jazmín Romero y Andrea Urco, les agradezco su apoyo y cariño, en todo momento. Poder disfrutar de esta etapa con ustedes ha sido maravilloso, espero contar con ustedes siempre, así como encontrarnos pronto en el campo laboral.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.....	4
RESUMEN.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
ANTECEDENTES.....	10
Interconexiones ambientales y sus factores.....	14
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	17
Objetivo general	17
Objetivos específicos.....	17
Hipótesis.....	17
PANORAMA GENERAL DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	18
MICROALGAS Y SUS APLICACIONES.....	25
Microalgas como parte del tratamiento biológico	28
Mecanismos microalgales para la eliminación de contaminantes	35
Biorremediación de metales pesados mediante microalgas	40
Nutrientes requeridos para el crecimiento de microalgas.....	45
Parámetros de cultivo	49
Cultivo, cosecha y secado de microalgas	53
Microalgas de interés económico	55
Biocompuestos y subproductos de las microalgas: aplicaciones industriales futuras	57
Contaminación en los cultivos.....	66
SECTOR AGROPECUARIO	68
Sector Ganadero	70
Consumo de recursos de este sector	72
Estrategias para la mitigación de impactos.....	75
Sector Agrícola.....	83
Consumo de recursos de este sector	87
Estrategias para la mitigación de impactos.....	93
Implementación de modelos circulares en el sector agrícola, del residuo al recurso	102
CAMPOS AGRÍCOLAS REGADOS CON AGUAS RESIDUALES	106

Afectación a la salud pública debido al riego agrícola con aguas residuales	110
Mitigación de riesgos a la salud debido al riego agrícola con aguas residuales sin tratamiento	114
Impactos al suelo debido al riego de aguas residuales	118
Beneficios del reuso de agua tratada en el sector agrícola	122
Condiciones necesarias para el reuso de aguas residuales tratadas en el riego agrícola	123
Selección de cultivos	126
Medidas para elevar la calidad del agua tratada	128
ESTUDIOS DE CASO.....	131
Aprovechamiento de aguas residuales tratadas en España.....	138
Aplicaciones en trenes de tratamiento	141
PROPUESTAS Y DISCUSIÓN.....	149
Propuesta del sistema integrado de tratamiento con microalgas y su implementación en el sector agropecuario	152
CONCLUSIONES.....	159
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	161
GLOSARIOS DE TÉRMINOS.....	166
ANEXOS.....	171

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Relación de los componentes ambientales, autoría propia	15
Figura 2. Planteamiento de problemática, autoría propia	16
Figura 3. Aguas residuales en el ciclo de agua, (Jhadyn, 2019)	22
Figura 4. Clasificación y características de las algas. Editada a partir de la imagen de los autores (Alemán Ramírez et al., 2013)	27
Figura 5. Biosíntesis de la microalga y algunos metabolitos primarios y secundarios, (Johanna et al., 2015)	27
Figura 6. Esquema del almacenamiento de energía en las microalgas, (Carmona et al., 2013).	28
Figura 7. Mecanismos de asimilación de contaminantes, también aplica para antibióticos, (Amaro et al., 2023).	38
Figura 8. Esquema del proceso de fotosíntesis de las microalgas y sus compuestos bioactivos, (Alemán R. et al., 2013)	49
Figura 9. Proceso de cultivo de microalgas, (Álvarez et al., 2023)	55

Figura 10. Aplicación de las microalgas en la producción de biocombustibles, (Alemán R. et al., 2013)	64
Figura 11. Procesos generales para cultivar microalgas y fabricar biomateriales, (Cognita, 2023)	65
Figura 12. Mano de obra del sector agropecuario, (INEGI, 2022)	69
Figura 13. Cría de animales en unidades de producción y viviendas, existencias (cabezas), (INEGI, 2022)	70
Figura 14. Distribución de la ganadería bovina en México, (<i>Mapa Digital De México En Línea</i> , n.d.)	71
Figura 15. Unidades de producción y superficie agrícola, (INEGI, 2022)	84
Figura 16. Porcentaje de contribución al PIB Mundial de cada sector, (Banco Mundial, 2011)	84
Figura 17. Financiamiento rural desde 2003 hasta 2013, (Financiera Nacional, 2013)	86
Figura 18. Distribución de los principales cultivos en agricultura a cielo abierto en México, (<i>Mapa Digital De México En Línea</i> , n.d.)	90
Figura 19. Reporte de los principales problemas en la actividad agropecuaria, (INEGI, 2022)	92
Figura 20. Porcentaje de unidades de producción agropecuaria que realizan acciones para protección del ambiente, (INEGI, 2022)	97
Figura 21. Bases generales para proyectos de reúso en la agricultura, (Cisneros Estrada, 2016).	105
Figura 22. Percepción de los productores sobre los efectos al suelo debido al uso de aguas residuales en el riego, (Pérez et al., 2023)	120
Figura 23. Miles de hectáreas de reúso en agricultura por países, (Jimenez & Asano, 2008).	132
Figura 24. Distribución del reúso en Andalucía en 2007, (Cisneros Estrada, 2016)	139
Figura 25. Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales empleando consorcios de microalgas y bacterias, (Comunicado de FCC Aqualia, 2017)	140
Figura 26. Producción anual de biomasa microalgal en toneladas/año, (García, C, 2013)	141
Figura 27. Cultivo de microalgas incorporado a una planta genérica de tratamiento de efluentes, (Codina, MF, García, CB, Barón, JH, Da Silva, SM y Bosch, JP., 2014)	143
Figura 28. Purificación de biogás mediante captura en agua para cultivo de microalgas, (Codina, MF, García, CB, Barón, JH, Da Silva, SM y Bosch, JP., 2014)	143
Figura 29. Diagramas de flujo del proyecto INCOVER, caso A y B, (Amaro et al., 2023).	145
Figura 30. Diagramas de flujo del proyecto INCOVER, (Proyecto INCOVER, 2025).	146
Figura 31. Diagramas de flujo del proyecto SaltGae caso A y B, (Amaro et al., 2023).	148
Figura 32. Diagrama de flujo del tren de tratamiento propuesto a gran escala, autoría propia	156
Figura 33. Diagrama de flujo del tren de tratamiento propuesto a escala pequeña, autoría propia	157
Tabla 1. Microalgas comúnmente usadas en lagunas de estabilización, (Salazar, 2005)	34
Tabla 2. Empleo de microalgas producidas en el tratamiento de aguas residuales, (Salazar, 2005).	34

Tabla 3. Métodos y porcentaje de remoción de los principales contaminantes utilizando en la bioremediación con microalgas, (Guerra & Torres, 2025).	41
Tabla 4. Funciones de los nutrientes en el medio de cultivo, (Johanna et al., 2015).....	46
Tabla 5. Microalgas potenciales como fuentes primarias de PUFAs, (Brennan & Owende, 2010)	61
Tabla 6. Especies de microalgas y zooplancton de mayor uso en la acuicultura, (Franco Acosta, 2008).....	62
Tabla 7. Principios de la ganadería regenerativa, (Villavicencio Gutiérrez, 2022)	76
Tabla 8. Empresas con aplicaciones de economía circular, (Villavicencio Gutiérrez, 2022).....	77
Tabla 9. Comparación de la composición bioquímica de fuentes nutricionales convencionales humanas, de algunas microalgas comestibles marinas y de agua dulce en porcentaje en peso seco, (García, C, 2013; Spolaore et al., 2006; Becker, 2007 y Gouveia et al., 2008).....	80
Tabla 10. Composición química (en % del peso seco total) de diferentes microalgas, (Rendón Castrillón, L. J., 2017).....	80
Tabla 11. Perfil de aminoácidos de diferentes algas en comparación con las fuentes convencionales de proteína y el patrón de referencia de la OMS / FAO (por cada 100 g de proteína), (Becker, 2007).....	81
Tabla 12. Perfil bioquímico de las cepas marinas destinadas a acuicultura, (Richmond et al., 2010)	82
Tabla 13. Posibles co-beneficios y trade-offs de algunas actividades de mitigación en la agricultura y ganadería, (Martínez Rodríguez, B. V. M. R., & Viguera, M. R.,2017).....	98
Tabla 14. Aprovechamiento de aguas residuales por distritos de riego en México 2013-2014, (CONAGUA, 2015)	108
Tabla 15. Enfermedades relacionadas a las aguas residuales, (Jaramillo, M. F., & Restrepo, I., 2024).....	111
Tabla 16. Riesgos químicos y biológicos asociados al reúso de agua residual en agricultura, (OMS, 2006).....	112
Tabla 17. Límites máximos permisibles de contaminantes patógenos, Adaptado de NOM-003-SEMARNAT-1997.....	113
Tabla 18 Tiempo en días de supervivencia de patógenos en suelo, agua y cultivos, Elaborado con datos de Orta (1985), Shuval et al., (1986) y D'itri et al. (1981)	115
Tabla 19. Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en la agricultura, (Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, 2002)	125
Tabla 20. Recomendaciones de la OMS para reutilizar las aguas residuales en riego agrícola. Adaptación de la (OMS, 2006)	125
Tabla 21. Tolerancia relativa de algunos cultivos al sodio intercambiable, (Ayers y Westcot, 1987)	127
Tabla 22. Tolerancia relativa al boro de algunos cultivos, (Ayers y Westcot, 1987)	127
Tabla 23. Registros documentados del reúso de agua residual por países. Adaptado de (Metcalf & Eddy,1994)	131

Tabla 24. Sistemas de tratamiento y disposición final de las aguas residuales en los casos estudiados, (Veliz Lorenzo et al., 2009).....	133
Tabla 25. Calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas para riego en los casos estudiados, (Veliz Lorenzo et al., 2009).....	134
Tabla 26. Normativa de la Agencia de Protección Ambiental (EE. UU) sobre la reutilización de aguas residuales para uso agrícola, (Veliz Lorenzo et al., 2009).....	137
Tabla 27. Microalgas Cianofíceas / Cyanophyta (Algas verde-azuladas), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011).....	173
Tabla 28. Microalgas Clorofíceas / Chlorophyta (Algas verdes), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)	175
Tabla 29. Microalgas Criptofíceas / Cryptophyta (Algas pardas), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)	176
Tabla 30. Microalgas Crisofíceas / Chrysophyta (Algas doradas), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)	176
Tabla 31. Microalgas Dinofíceas / Dinophyceae, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)	177
Tabla 32. Microalgas Diatomeas / Diatoms, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011).....	178
Tabla 33. Microalgas Euglenofíceas / Euglenophyta, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011).....	178
Tabla 34. Microalgas Xantofíceas / Xantophyta, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)	178

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo analizar la viabilidad del uso de microalgas en el tratamiento secundario de aguas residuales municipales, de forma que el efluente tratado pueda reutilizarse en la agricultura y al mismo tiempo, se genere y obtenga biomasa, ésta será valorizada en el sector agropecuario. La investigación siguió un enfoque documental–propositivo, basado en la revisión de literatura científica, normatividad mexicana, además de directrices internacionales (OMS) y estudios de caso como los proyectos europeos INCOVER y SaltGae, con lo cual se diseñó un tren de tratamiento conceptual.

Los resultados más relevantes muestran que los sistemas microalgales logran altas eficiencias de remoción de nutrientes como el N y P, reduce a los patógenos hasta cumplir con los límites sanitarios para riego y la producción de una biomasa rica en compuestos de valor, diversas aplicaciones

En conclusión, la biomasa microalgal cultivada en aguas residuales representa una alternativa sostenible y viable para países en desarrollo, siendo México uno de ellos, al permitir simultáneamente la obtención de agua tratada segura para riego agrícola y la generación de bioproductos de valor agregado, fortaleciendo la seguridad hídrica y alimentaria bajo los lineamientos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en especial el número 6 y 2.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, diversos factores como el crecimiento demográfico, la contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, además de cambios en los patrones climáticos han causado que la sociedad busque maximizar el aprovechamiento de los recursos hídricos disponibles, así como también la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento, con un enfoque de economía circular en donde se le da un tratamiento al agua residual para darle un segundo uso.

Por ello en México, como en diversos países en desarrollo, se ha buscado la reutilización de las aguas residuales crudas o tratadas, que se generan en las ciudades o grandes metrópolis, buscando que estas sean de utilidad para el riego agrícola, es en este punto en donde la presente investigación busca implementar métodos sostenibles y eficaces para asegurar la productividad de los campos, así como procurar mantener la salud de los ecosistemas y de la salud pública.

La presente investigación tiene como finalidad explorar el empleo de las microalgas en el tratamiento secundario o terciario de aguas residuales para ser usado como agua de riego en el sector agrícola, al mismo tiempo obtener biomasa que puede tener diversas aplicaciones en el sector agropecuario. Estas microalgas han mostrado un potencial como mejorador de suelo, fungicidas naturales y fertilizantes, lo cual resulta de importancia económica en el sector agrícola, al mismo tiempo en el sector ganadero y acuícola posee aplicaciones debido a su potencial nutricional, fungiendo como alimento de los animales.

Este enfoque busca aprovechar, valorizar e intensificar la obtención de biocompuestos a partir del agua residual tratada, promoviendo un ciclo del uso de recursos cerrado y eficiente. Ofreciendo una solución sostenible a diversas problemáticas ligadas al sector agropecuario.

En este contexto, es fundamental reconocer la importancia del agua en diversas actividades económicas. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), "el agua es una componente esencial de las economías nacionales y locales, y es necesaria para crear y mantener los puestos de trabajo en todos los sectores de la economía. La mitad de la mano de obra mundial está empleada en ocho sectores que dependen del agua y de los recursos naturales: agricultura, bosques, pesca, energía, producción con uso intensivo de recursos, reciclaje, construcción y transportes" (Unesco Physical Document, 2016).

Es esencial considerar todos los factores relacionados a la extracción, así como al uso de este recurso, por lo cual la misma UNESCO menciona que "la gestión sostenible del agua, las infraestructuras del agua y el acceso a un suministro seguro, fiable y asequible de agua y servicios de saneamiento adecuados mejoran el nivel de vida, expanden las economías locales y promueven la creación de puestos de trabajo más dignos y a una mayor inclusión social. La gestión sostenible del agua es también un motor esencial para el crecimiento verde y el desarrollo sostenible" (Unesco Physical Document, 2016).

Como se mencionó anteriormente, un factor esencial es la sostenibilidad, lo cual permite tomar en cuenta los aspectos sociales, económicos y ecológicos de forma equitativa, considerando a cada uno con igual importancia que el siguiente, por ello contemplar los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible en los que este trabajo contribuye es esencial, como lo menciona la Organización de las Naciones Unidas (ONU) "el sector alimentario y el sector agrícola ofrecen soluciones claves para el desarrollo y son vitales para la eliminación del hambre y la pobreza" (United Nations, n.d.).

Por lo anterior, esta investigación contribuye soluciones a dos de los desafíos más importantes de la humanidad, como lo son el agua limpia y saneamiento, además del hambre cero, de forma que los ODS fungan como una guía clara hacia la sostenibilidad y equidad, debido a que estos buscan la colaboración global.

De esta forma se analizan ambos objetivos, el primero es el objetivo 6 Agua limpia y saneamiento, en donde según la ONU "el agua libre de impurezas y accesible para todos es parte esencial del mundo en que queremos vivir. Hay suficiente agua dulce en el planeta para lograr este sueño" (United Nations, n.d.). Sin embargo, debemos tener en cuenta que las actividades antropogénicas desarrolladas a lo largo del tiempo han interferido y por ello en la actualidad la propia ONU menciona que "la escasez de recursos hídricos, la mala calidad del agua y el saneamiento inadecuado influyen negativamente en la seguridad alimentaria, las opciones de medios de subsistencia y las oportunidades de educación para las familias pobres en todo el mundo. La sequía afecta a algunos de los países más pobres del mundo, recrudece el hambre y la desnutrición. Para 2050, al menos una de cada cuatro personas probablemente vivirá en un país afectado por escasez crónica y reiterada de agua dulce" (United Nations, n.d.).

El segundo objetivo para tomar en cuenta es el número 2 en la lista de los ODS, debido a su importancia, el hambre cero como la propia ONU menciona, "necesitamos una profunda reforma del sistema mundial de agricultura y alimentación si queremos nutrir a los 925 millones de hambrientos que existen actualmente y los dos mil millones adicionales de personas que vivirán en el año 2050" (United Nations, n.d.). lo cual es posible según la ONU "si se hace bien, la agricultura, la silvicultura y las piscifactorías pueden suministrarnos comida nutritiva para todos y generar ingresos decentes, mientras se apoya el desarrollo de las gentes del campo y la protección del medio ambiente" (United Nations, n.d.).

Sin embargo, además de considerar los diversos factores en torno al sector alimentario, también es necesario considerar las condiciones de contaminación, como la ONU menciona, "ahora mismo, nuestros suelos, agua, océanos, bosques y nuestra biodiversidad están siendo rápidamente degradados. El cambio climático está poniendo mayor presión sobre los recursos de los que dependemos y aumentan los riesgos asociados a desastres tales como sequías e inundaciones. Muchas campesinas y campesinos ya no pueden ganarse la vida en sus tierras, lo que les obliga a emigrar a las ciudades en busca de oportunidades"(United Nations, n.d.).

ANTECEDENTES

Este apartado presenta los antecedentes que explican dicha relación y su papel dentro del paradigma de la sostenibilidad, a lo largo de la historia de la humanidad, el concepto de sostenibilidad no siempre ha formado parte de las prácticas ni de la conciencia colectiva. Sin embargo, en las últimas décadas, su importancia ha cobrado relevancia frente a los desafíos ambientales asociados con la generación de aguas residuales y la creciente demanda de alimentos, en este contexto, las microalgas surgen como una alternativa biotecnológica que permite vincular ambos aspectos: contribuyen al tratamiento sostenible de aguas residuales y, al mismo tiempo, ofrecen un potencial recurso para la producción de biomasa con aplicaciones alimentarias y energéticas.

Se han podido observar numerosos problemas de salud y ambientales a lo largo de la historia derivados de la contaminación del agua. Desde el tiempo del Imperio Romano, se desarrollaron conceptos como la higiene, el cual evolucionó para establecer normas sobre el manejo de aguas residuales, incluyendo la construcción de alcantarillas en las calles. Asimismo, la letrina evolucionó al introducir el diseño de asiento, dejando atrás el sistema anterior (We Are Water, 2024).

En 1830, Londres tuvo un problema de calidad del agua denominado “Great Stink”, en donde las personas asociaban a las enfermedades con el hedor que emanaba de la ciudad, desconociendo que la mortandad era realmente por los agentes patógenos que existían en el agua de consumo diario. Aunado a lo anterior, en el año de 1854 el inglés llamado John Snow probó que la epidemia de cólera era el resultado de la contaminación del agua potable que contenía materia fecal proveniente de las aguas negras. Asimismo, logró que la epidemia cesara en las zonas afectadas y se cerraron los pozos de bombeo, dedicó su vida al estudio de las epidemias.

Posteriormente, el investigador Louis Pasteur comprobó científicamente la hipótesis de John Snow, demostrando que los microorganismos presentes en la materia fecal del agua negra generan enfermedades infecciosas como el cólera, la fiebre tifoidea, entre otras (We Are Water, 2024). Para entender mejor cómo se relaciona el tema de tratamiento de aguas con las microalgas, es necesario comprender el surgimiento de los primeros estudios y el cómo fueron introducidas las algas.

El estudio de microalgas y como paulatinamente son incorporadas al tratamiento de aguas residuales es importante para dicha investigación, en 1890 comenzó el estudio científico de las microalgas por medio del microbiólogo holandés Beijerinck, realiza investigaciones de la microalga: *Chlorella vulgaris* y establece cultivos puros de esta microalga de agua dulce. Más tarde en 1919, Otto Warburg introduce la idea de utilizar los cultivos densos que consigue aislar en laboratorio como una herramienta de trabajo para el estudio de la fotosíntesis, la especie empleada es *Chlorella*. A raíz de esto se desarrollaron numerosas investigaciones de estos cultivos y cultivos de otras especies, enfocándose en las condiciones de cultivo adecuadas, de entre las cuales especialmente se observó la intensidad de luz en las plantas superiores o las células fotoautótrofas, así como la relación entre la saturación y la productividad (Soeder, 1980).

Durante la Segunda Guerra Mundial en Alemania nace el concepto de producción masiva de microalgas, enfocados a la producción de lípidos, se utilizaron las microalgas *Chlorella pyrenoidosa* y *Nitzschia palea* (Harder & Von Witsch, 1942). Al término de esta guerra se comenzó el estudio de biomasa microalgal como un suplemento importante, acortando la ineficiente cadena alimenticia proteica, siendo las microalgas capaces de reemplazar a las proteínas animales o vegetales, convencionalmente usadas para el consumo del ganado o de los humanos (Abalde et al., 1995).

Por otro lado, en la década de los cuarenta, México estaba sentando las bases del desarrollo capitalista, el cual se caracteriza por su acelerado crecimiento, acompañado del crecimiento demográfico y de la mancha urbana. Con ello se observa una relación entre la agricultura y la industria, en donde el sector productivo fundamental es el medio urbano e industrial (Romero Sánchez, s.f.). Lo anterior es esencial para comprender la relación existente entre el crecimiento demográfico, el aumento de la demanda de recursos naturales y la industrialización del país, al mismo tiempo como estas condiciones afectan al sector agropecuario.

En 1948, un grupo de investigadores de la Carnegie Institution en Washington sentó las bases científicas para el cultivo masivo de microalgas, lo cual fue documentado en el célebre estudio de Burlew en 1953. El propósito de este proyecto era emplear el alga verde *Chlorella* para la producción de alimentos a gran escala. Además, un trabajo realizado en 1949 por Spoehr y Milner, en el mismo instituto, demostraron que la composición de *Chlorella*, especialmente su contenido de grasas y proteínas podría ser modificada al alterar las condiciones del medio (Abalde et al., 1995).

Spoehr y Milner también indican que el uso de proteínas de microalgas podría contribuir a reducir, al menos en parte, la deficiencia global de proteínas. Las microalgas contienen aproximadamente un 50% de proteína bruta y tienen una productividad cercana a 25 toneladas por hectárea por año y desde entonces, diversas microalgas de agua dulce, como *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Coelastrum* y *Spirulina*, entre otras, han sido consideradas como potenciales fuentes de proteína (Abalde et al., 1995). A inicios de la década de 1950 en Alemania Occidental se iniciaron investigaciones sobre el cultivo de *Scenedesmus acutus* (Gummert et al., 1953), en las que se proponía aprovechar el CO₂ generado en la zona industrial del Ruhr. Estas investigaciones fueron continuadas por Soeder y su equipo, hicieron contribuciones significativas al cultivo masivo de microalgas (Soeder, 1986).

También en la década de 1950, Oswald y su equipo de la Universidad de California, Berkeley, propusieron el uso de cultivos masivos de microalgas tanto para el tratamiento de aguas residuales como para la producción de proteínas de manera simultánea en 1975. Además, Oswald y Golueke en 1960 crearon sistemas para la producción en masa de algas con el objetivo de llevar a cabo la bioconversión de energía solar en metano (Abalde et al., 1995).

En cuanto a la situación en México, los presidentes Ávila Camacho, Miguel Alemán y Adolfo Ruiz Cortines, promovieron un desarrollo basado en la propiedad privada, invirtieron en infraestructura

de riego, disponibilidad de nuevos terrenos para el cultivo, así como créditos y financiamiento productivos, con la finalidad de modernizar la agricultura mexicana para finales de este periodo.

En el periodo de 1940 a 1965 la agricultura mexicana tuvo un papel crucial durante la fase de desarrollo extensivo y el crecimiento de la producción agropecuaria fue del 6 % anual, lo que permitió asegurar una oferta abundante, puntual de alimentos y materias primas, logrando un suministro adecuado que contribuye el avance del progreso, se puede afirmar que México contaba con autosuficiencia agrícola. El desarrollo industrial y capitalista impulsó a la agricultura hacia una etapa intensiva, este proceso estuvo estrechamente ligado a la reforma agraria, y esa conexión estableció las bases para el progreso agrícola nacional, evidenciando una clara expansión de las relaciones capitalistas de producción (Romero Sánchez, s.f.).

La revolución industrial ocasionó un problema en la calidad del agua debido a la contaminación química, además de la materia fecal presente en las aguas negras. De modo que paradójicamente mientras se avanzaba sobre el tratamiento de la contaminación orgánica, al mismo tiempo se realizan descargas industriales en cuerpos de agua como ríos y mares, algunas veces de forma inconsciente debido a la escasa investigación y posterior conocimiento de la toxicidad o nocividad de algunos compuestos, como por ejemplo metales pesados, pesticidas, DDT, nitratos (We Are Water, 2024).

Posteriormente, a nivel mundial en los años 70, la crisis del petróleo impulsó la búsqueda de fuentes de energía alternativas, lo que llevó a un creciente interés mundial en la utilización biológica de la energía solar. Las algas, al ser un sistema eficaz para aprovechar esta energía, han mantenido el interés en la producción de microalgas (Benemann et al., 1977). Además, diversas investigaciones muestran que las microalgas pueden desempeñar un papel crucial en la transformación de residuos, aguas residuales en biomasa y agua tratada, lo cual se ha relacionado con la creciente preocupación por la contaminación ambiental y el reciclaje eficiente de residuos (Shelef et al., 1978).

En la década de 1970 surge una preocupación internacional y comienza una búsqueda por parte de los países desarrollados para evitar la contaminación del agua, debido a las enfermedades que puede ocasionar la materia fecal en las aguas residuales, en contraste en los países en vías de desarrollo, actualmente se calcula que el 90 % de las aguas residuales se descargan sin tratamiento, por ello la Organización Mundial de la Salud (OMS), menciona que cada año fallecen 1,8 millones de niños menores a cinco años, uno cada 20 segundos, por lo que continuamos en una batalla que inició desde hace más de 10.000 años en cuanto a la calidad del agua (We Are Water, 2024).

En 1975, Ryther y su equipo en el Instituto Oceanográfico de Woods Hole, Massachusetts, crearon sistemas para el tratamiento de aguas residuales y propusieron el uso de cultivos de microalgas en agua marina, la biomasa utilizada como alimento para moluscos, estas investigaciones impulsaron los sistemas para el cultivo masivo de microalgas marinas (Goldman, 1979). Como anteriormente se mencionó, las microalgas más utilizadas son *Chlorella* y *Scenedesmus*, que se han aplicado en el tratamiento de aguas residuales provenientes de plantas convencionales, así como en aguas

residuales industriales y desechos de origen animal. Estas especies también se emplean en la producción masiva de biomasa con fines comerciales (Andrade et al., 2009).

En cuanto al sector ganadero implícito en el sector agropecuario, hasta 1992, en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo de Río de Janeiro, analizan el vínculo entre ganadería y el ambiente. A partir de ello surgió la iniciativa Livestock, Environment and Development (LEAD) en coordinación con la División de Producción y Salud Animal de la FAO, se publican continuamente documentos cuyo centro de atención son las relaciones de la ganadería y el ambiente, proponiendo un conjunto de acciones y de proyectos específicos en países como Tailandia, Vietnam, China y México (Rosario, 2008).

Históricamente, el sector agroalimentario y el desarrollo rural han sido áreas prioritarias en la formulación de políticas públicas a nivel local, nacional e internacional, debido a su importancia económica y estratégica (Programa Institucional Financiero Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2018). En este punto es esencial integrar y considerar al ambiente de donde se extraen los recursos, la materia prima y el primer eslabón en la cadena de producción.

El aporte del sector primario es inferior al de otras actividades económicas, como la industria y los servicios; sin embargo, la producción y el suministro oportuno de alimentos son esenciales para alcanzar la estabilidad y el desarrollo óptimo de cualquier sociedad, además de impulsar el crecimiento económico en ciertas regiones de un país. A nivel global, el sector agropecuario representa el 3.1 % de la producción total, con un valor de 2.2 billones de dólares, y proporciona alimentos a más de 7 mil millones de personas en todo el mundo, lo cual evidencia la importancia del sector agropecuario para la sociedad (Programa Institucional Financiero Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2018).

Debido al aumento de la población humana, es requerido incrementar la producción de alimentos; sin embargo, las prácticas agrícolas actuales no son las óptimas, entre ellas se encuentran el uso de pesticidas químicos, los cuales tienen efectos negativos en los ecosistemas y generan una creciente preocupación pública (Morales et al., 2019), actualmente el uso de estos insumos químicos está siendo limitado por un marco legal cada vez más estricto (Dewi et al., 2018). Al mismo tiempo se investigan alternativas a los pesticidas sintéticos, los cuales se busca que sean sostenibles, al ser seguros para la salud humana, el medio ambiente y asequibles (Morales et al., 2019).

La optimización de recursos es vital para la sostenibilidad, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el estrés hídrico global en 2018 fluctuó entre el 18 % y el 25 % o más, dependiendo de la región específica. En México, el estrés hídrico era del 25 % en el año 2000, aumentó al 30 % en 2010 y alcanzó el 45 % en 2020. La principal causa de esta presión sobre los recursos hídricos proviene del sector primario, que representó porcentajes del 22 % en el año 2000, 23 % en el 2010 y 34 % en el 2020 (Sánchez Gasca M., 2024). Uno de los acontecimientos más recientes y de vital importancia es la pandemia de 2019, la cual es conocida

como COVID-19, una enfermedad causada por el SARS-CoV-2, la cual transformó todos los esquemas de producción que se tenían en ese momento, así como las cadenas de suministro en todos los ámbitos de la economía mundial. En México, el sector agrícola no fue la excepción, durante la pandemia el crecimiento de este sector superó al de otros sectores de la economía mexicana y se destacó como proveedor de alimentos a nivel mundial en 2020 (Rivas-Valencia et al., 2021). Al mismo tiempo debemos tener en cuenta los impactos positivos que trajo la pandemia para el ambiente, como la reducción de emisiones de efecto invernadero, mejorando de esta forma la calidad del aire, recuperación de ecosistemas, disminución de descargas industriales, además de un cambio de conciencia social sobre buenas prácticas para el ambiente aplicadas en el hogar; es importante señalar que muchos de estos efectos fueron temporales y con ciertas restricciones.

En los últimos años, ha habido avances tecnológicos significativos a nivel mundial en la producción masiva de microalgas. Inicialmente, la producción de biomasa microalgal se centró en especies de agua dulce que podían utilizarse como suplemento dietético o para el tratamiento de aguas residuales. Con el tiempo, también se empezó a considerar el cultivo masivo de microalgas marinas y de estuarios como alimento para especies animales de gran valor (Ukeles, 1980), convirtiéndose en esenciales en la acuicultura marina, ya que alimentan a larvas de crustáceos, moluscos y algunos peces (Soeder, 1976; Persoone y Claus, 1980; Ukeles, 1980; De Pauw y Persoone, 1988).

Lo anteriormente descrito permite analizar detalladamente la toma de decisiones realizadas en México y a nivel mundial, brindando la oportunidad de visualizar aspectos de mejora tanto para el sector agropecuario como para el tratamiento de las aguas residuales, como ambas se pueden beneficiar de la integración de la biomasa de microalgas, al mismo tiempo que se continúa con investigación sobre los potenciales usos de esta biotecnología, además de inspirar cambios de comportamiento que contemplen un enfoque sostenible y sustentable, de tal forma en que se satisfacen las necesidades actuales sin afectar a las generaciones futuras.

Interconexiones ambientales y sus factores

Conforme a lo anteriormente mencionado, se observa que es necesario un cambio para obtener estrategias sostenibles, buscando el aprovechamiento óptimo de los recursos y por ende que el proceso productivo de la sociedad llegue a convertirse en una economía circular.

Mediante la figura 1, se muestra de forma gráfica la relación de los factores de interés para esta investigación, en donde del lado izquierdo se plantea un esquema de la sostenibilidad, así como los factores relacionados a ella, entre los que se encuentran la sociedad, economía y el ambiente, en donde los tres tienen la misma importancia, mientras que del lado derecho se plantea un proceso de economía circular, en donde los factores guardan una estrecha relación, partiendo de la generación de las aguas residuales, posteriormente se les da un tratamiento y finalmente son usadas en el sector agropecuario, la integración de las microalgas al esquema, son una solución sostenible frente a diversos desafíos ambientales y agrícolas, como se observa a continuación.

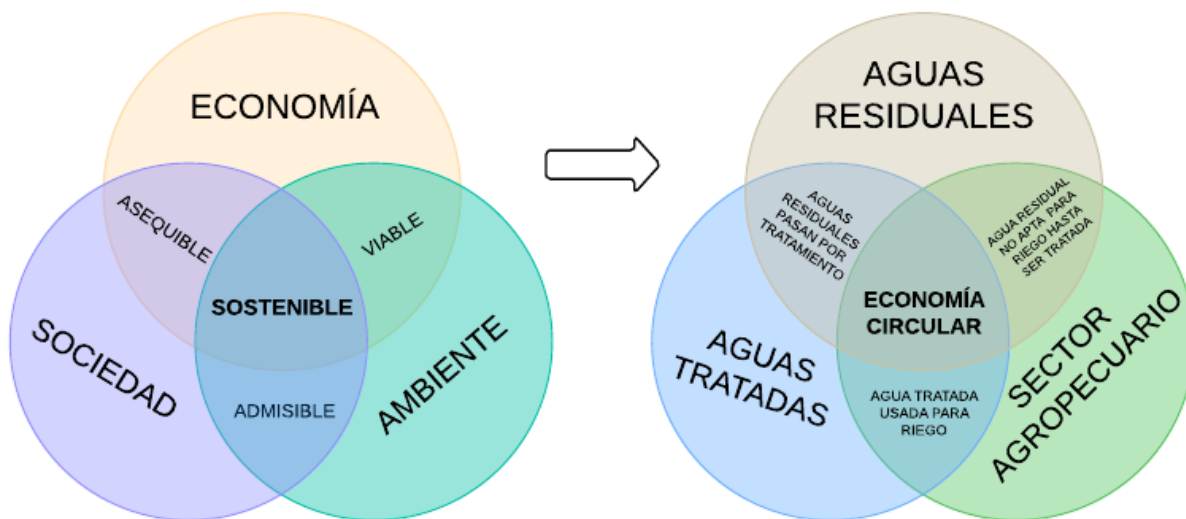


Figura 2. Relación de los componentes ambientales, autoría propia

El cultivo de las microalgas ha resultado en una estrategia sostenible en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria, domiciliario y de la agricultura en biorreactores, lo que facilita la eliminación de contaminantes durante la producción de biomasa microalgal. De este modo, las microalgas pueden contribuir a reducir los desechos perjudiciales para el medio ambiente, ya que permiten la reutilización de nutrientes y productos, además de valorizar residuos de diversas fuentes, incluidas las agrícolas (Dewi et al., 2018).

En el quinto apartado de esta investigación, se detalla la potencialidad de las microalgas para la producción de gran variedad de sustancias, algunas de ellas de elevado precio, como ácidos grasos, pigmentos, vitaminas, antibióticos, productos farmacéuticos y otros productos químicos de interés, así como hidrógeno, hidrocarburos y otros combustibles biológicos (Cohen, 1986; Arad, 1988; Borowizka 1988). El avance industrial en la biotecnología de microalgas ha sido limitado, principalmente por los altos costos de producción, para que la tecnología relacionada con las microalgas logre aprovechar todo su potencial, es necesario reducir significativamente estos costos y mejorar los rendimientos para aumentar la rentabilidad (Richmond, 1990).

Con base en los antecedentes se plantea la problemática, en donde actualmente en algunas regiones de México, así como también en algunos países en vías de desarrollo, se emplean las aguas residuales sin tratar como agua de riego para campos agrícolas, este proceso no es lo óptimo debido a los riesgos ambientales y de salud que pueden generar, como se especifica en el séptimo apartado de esta investigación. Por otro lado, se plantea que mediante la integración de las microalgas, las cuales se han estudiado ampliamente por sus aplicaciones en biotecnología, y bioenergía, se emplearán en el tratamiento de aguas residuales de forma que obtenemos dos productos, el primero será el agua tratada, la cual debe de cumplir con la normatividad respectiva, de forma que se pueda reusar en el sector agrícola, mientras que el segundo producto es la biomasa, la cual se puede emplear en el

sector ganadero y/o agrícola. En este contexto, las microalgas cultivadas en aguas residuales no solo contribuyen a la remoción de contaminantes, sino que también generan subproductos de interés para el sector agropecuario como se muestra en la figura 2.

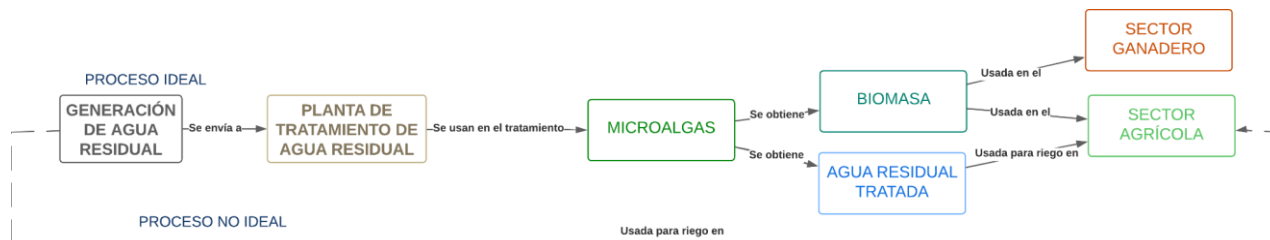


Figura 3. Planteamiento de problemática, autoría propia

Enfocándonos en las aplicaciones de la biomasa en los sectores, como lo muestra la figura 2, es esencial establecer que los productos derivados de microalgas tienen propiedades multifuncionales en la agricultura, ya que mejoran la absorción de nutrientes, incrementan el rendimiento de los cultivos y favorecen el estado fisiológico de las plantas, así como su tolerancia al estrés abiótico (Renuka et al., 2018). Además, diversos estudios sobre diferentes aspectos de las microalgas han demostrado que la biomasa de microalgas puede utilizarse en múltiples aplicaciones, incluyendo biofertilizantes, tratamiento de aguas residuales, mejoradores de suelo y como alimento para la acuicultura (Abeliovich, 1986; Venkataraman, 1986; Boussiba, 1988).

La aplicación de las microalgas en el sector ganadero se detalla en los apartados cuarto y quinto de la presente investigación, sin embargo, es importante mencionar que la integración de la biomasa microalgal en el sector ganadero se realizará como suplemento alimenticio de los animales debido a su valor nutricional. La introducción de la biomasa microalgal en el sector ganadero es viable, e incluso es posible integrarlos en la acuicultura, sin embargo, en esta investigación no se ahonda en profundidad sobre las aplicaciones de esta biotecnología en este último sector.

Finalmente, conjuntando los procesos de depuración hídrica, así como la producción de biomasa microalgal, el apartado titulado "propuestas del sistema integrado de tratamiento con microalgas y su implementación en el sector agropecuario", se detalla a fondo una propuesta sobre el tren de tratamiento, basado en la figura 2, lo cual se junta con la figura 1, en donde se muestra como una alternativa biotecnológica capaz de generar beneficios ambientales, sociales y económicos bajo un enfoque circular.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivo general

Investigar sobre la viabilidad de la biomasa microalgal, cultivada a partir de aguas residuales y su implementación como alternativa sostenible para la producción de insumos agrícolas que generen un impacto positivo en la calidad del suelo, además de su valorización para el sector agropecuario.

Objetivos específicos

- Identificar y sintetizar las investigaciones sobre el uso de microalgas, para su aprovechamiento en diversas aplicaciones del sector agropecuario, de forma que se maximice su valorización en este y en otros sectores.
- Diseñar un modelo conceptual de economía circular que integre el tratamiento de aguas residuales mediante el cultivo de microalgas y su interacción con el sector agropecuario, de forma que se aprovechen los recursos de forma sostenible.
- Analizar las necesidades del sector agropecuario mediante un estudio individual del sector ganadero y del agrícola, identificando los recursos requeridos por cada uno y proponiendo estrategias específicas para mitigar los impactos negativos en ambos sectores.
- Evaluar los impactos positivos del uso de agua residual tratada en la calidad del suelo agrícola y determinar las condiciones necesarias para generar cultivos en óptimo estado. Además, proponer medidas para mejorar la calidad del agua y metodologías de riego, así como estrategias sostenibles de implementación.
- Investigar los riesgos a la salud pública y al suelo agrícola asociados al uso de agua residual sin tratar, identificando los efectos potenciales y proponiendo recomendaciones para su manejo seguro.
- Realizar un análisis del panorama global sobre el tratamiento de aguas residuales, la aplicación de microalgas en este proceso y el desarrollo de estrategias de bioeconomía que promuevan prácticas sostenibles en la gestión de recursos hídricos.

Hipótesis

La biomasa microalgal cultivada a partir de aguas residuales es una alternativa sostenible que no solo mejora la calidad del suelo agrícola y proporciona insumos valiosos para el sector agropecuario, sino que también, dentro de un modelo de economía circular, maximiza la valorización de recursos. Esto se traduce en una reducción de la demanda de agua dulce para riego y del estrés hídrico, mientras que la biomasa microalgal genera bioproductos de valor comercial, lo que promueve la sostenibilidad, observados en casos de aplicación en México y a nivel mundial.

PANORAMA GENERAL DE LAS AGUAS RESIDUALES

El agua es el pilar central para lograr un desarrollo sostenible y es esencial para el desarrollo de la humanidad, en diversos aspectos como el social, economía, energía, la producción de alimentos, los ecosistemas. Además, el agua es una cuestión de derechos, debido a que a medida en que la población mundial crece, se genera una necesidad creciente de conciliar la competencia de demandas por los recursos hídricos para que las comunidades tengan lo suficiente para satisfacer sus necesidades (United Nations, n.d.).

La Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció el derecho humano al agua y al saneamiento en julio de 2010. Por tanto, es el derecho de todos los seres humanos a tener acceso a una cantidad de agua suficiente para uso doméstico y personal, un aproximado de entre 50 y 100 litros de agua por persona y día, esta agua debe ser segura, aceptable y asequible, de forma que el coste del agua no debería superar el 3 % de los ingresos del hogar, y accesible físicamente, por tanto, la fuente debe estar a menos de 1.000 metros del hogar y su recogida no debería superar los 30 minutos (United Nations, n.d.).

Como se mencionó anteriormente la contribución a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) es parte central de este trabajo de investigación, por ello detallando las metas del objetivo 6, se consideran tanto los aspectos del ciclo del agua como los sistemas de saneamiento, ambos son vitales para disminuir las enfermedades y para mejorar la salud. Debido a que el agua es un elemento vital para la vida humana, la contribución a este objetivo implica contribuir al progreso de otros objetivos de desarrollo sostenible ODS, principalmente relacionados con la salud, la educación, el crecimiento económico y el ambiente (United Nations, n.d.).

El paradigma del nuevo milenio a nivel mundial en torno al tema del agua y las soluciones a sus respectivas problemáticas requiere involucrar la gestión para eficientizar los volúmenes disponibles, al mismo tiempo la utilización de fuentes alternas, de forma que permitan disminuir la demanda por el uso del agua limpia (Cisneros Estrada, 2016). La rápida urbanización, junto con el incremento del nivel de vida y la creciente demanda de agua, alimentos (especialmente carne) y energía por parte de una población mundial en constante aumento, conducirá inevitablemente a la creación de empleos en ciertos sectores, como el tratamiento de aguas residuales municipales y a la desaparición de otros (Unesco Physical Document, n.d.).

En áreas donde el recurso hídrico es escaso o compite fuertemente por su uso, surge la necesidad de recurrir a fuentes no tradicionales, como pozos y manantiales de bajo rendimiento, agua de lluvia, aguas residuales recicladas y aguas pluviales, tanto para satisfacer esta demanda (Unesco Physical Document, n.d.). Otras de las fuentes alternas, son las aguas residuales, estas son la fuente inmediata de aprovechamiento en dos vertientes: las aguas crudas o sin tratamiento y las aguas tratadas, existen distintos niveles de tratamiento dependiendo del uso deseado (Cisneros Estrada, 2016).

Actualmente, la humanidad enfrenta diversos retos, algunos de origen natural y otros de origen antropogénico, uno de los principales retos es el cambio climático, debido a los impactos que genera, como la desaparición de biodiversidad, nuevas enfermedades, escasez y contaminación de los recursos naturales finitos, como la del agua dulce, la cual afecta a todos los seres vivos (Sotelo & Sotelo, 2017). El cambio climático forma parte crucial de la adaptación en el uso del agua, el cual es un decisivo vínculo entre la sociedad y el ambiente (United Nations, n.d.).

El cambio climático tiene repercusiones en diversos sistemas, uno de estos es la hidrósfera y en el ciclo hidrológico, debido a que provoca alteraciones en la precipitación pluvial, derretimiento de la nieve y el hielo, aumenta la evaporación, disminuye la humedad del suelo y la escorrentía (Bates, Kundzewicz, Wu, & Palutikof, 2008). Los efectos de este fenómeno sobre el agua son heterogéneos, ya que dependen de las condiciones geográficas, se estima que en latitudes altas se incrementen las precipitaciones, por otro lado, en las latitudes medias ocurrirá lo contrario. México pertenece al segundo caso, en donde la disminución de la precipitación provocará escasez y estrés hídrico (Martínez-Austria & Patiño-Góme, 2010). Actualmente los efectos de la escasez de agua ya son observables en el país, una parte debido al cambio climático y otra parte debido al crecimiento demográfico, concentración urbana en zonas específicas, la contaminación y la sobreexplotación de los mantos acuíferos (Martínez-Austria & Patiño-Góme, 2010).

Por tanto, la generación de aguas residuales es un fenómeno relacionado al crecimiento poblacional y al desarrollo de actividades económicas, debido a que en su mayoría desechan agua como resultado de procesos productivos. Estas aguas requieren ser recolectadas en el sistema de alcantarillado, conducidas a plantas de tratamiento, para mejorar su calidad y posibilitar su reúso (Cisneros Estrada, 2016). Aunado a esto, el saneamiento también conlleva un costo y a la búsqueda de tecnologías cada vez más eficientes (Fernández et al., 2018).

Entonces se establece que las aguas denominadas residuales, son aquellas cuyas características originales han sido alteradas durante algún uso en la actividad antropogénica y por ello requieren de un tratamiento antes de ser descargadas nuevamente a un cuerpo de agua (OEFA, 2014). Pueden representar un peligro debido al uso antropogénico que tuvieron previamente y requieren ser tratadas en busca de una disminución de la alta carga de sustancias contaminantes y/o microorganismos (Espigares & Pérez, 2009). Se observa que el saneamiento de las aguas residuales representa un gran desafío para la sostenibilidad de la actividad humana. De esta forma, la generación de aguas residuales está continuamente incrementando al mismo ritmo que la población (Fernández et al., 2018).

Se estima que, en México el total de aguas residuales de tipo municipal anualmente generado es de 228.7 m³/s, de las cuales, el caudal tratado es de 111.3m³/s, lo que representa que solo el 48.66 % recibe un tratamiento para mejorar su calidad, con respecto al total generado (CONAGUA, 2015).

Es evidente que faltan muchas condiciones para que el total de las aguas residuales generadas pasen por un tratamiento y se potencie su reúso (Cisneros Estrada, 2016).

Es esencial entender que las aguas residuales contienen material suspendido y disuelto, este material puede ser orgánico y/o inorgánico. La composición convencional de las aguas residuales domésticas es: sólidos suspendidos, coloidales, materia orgánica e inorgánica, ellos son medidos como demanda química (DQO) y bioquímica de oxígeno (DBO), carbono orgánico total (COT), nitrógeno en forma (amoniacal, orgánico, nitritos y nitratos), fósforo, bacterias, protozoarios y virus (Metcalf y Eddy, 2003). La cuantificación de estos componentes es necesaria para definir un tren de tratamiento eficiente que garantice la calidad del agua residual tratada, de forma que se minimice el riesgo potencial para la salud pública y el ambiente, además sea adecuada para su posterior uso (Silva et al., n.d.).

Otros contaminantes presentes en los efluentes domésticos e industriales que son importantes de considerar son elementos altamente tóxicos como los metales pesados, además de los altos niveles de materia orgánica e inorgánica que contiene un agua residual (Salazar, 2005), estos metales son persistentes debido a que no son creados mediante procesos biológicos, por lo que degradan ecosistemas acuáticos e impactan la cadena trófica (Jos et al, 2010; Reyes et al, 2016).

Además, los metales pesados pueden causar alteraciones en los seres vivos y generar problemas graves, debido a que ocurre una acumulación de ellos, en órganos y tejidos como la sangre, el sistema nervioso, etc. (Salazar, 2005). Por tanto, representan un peligro latente a la salud humana y ambiental, debido a la acumulación de metales en el agua (Khan et al., 2010; Suresh et al., 2015). La acumulación de estos metales en suelos afecta los alimentos producidos y pone en riesgo la producción agrícola (Simate, G.S. 2014; Smith, D.P. 1997).

La remoción de metales pesados en aguas contaminadas principalmente consiste en métodos físicos, químicos y biológicos (Volesky, B. 2001) "los métodos convencionales para remover los iones metálicos del agua son la precipitación química, la filtración, el intercambio iónico, tratamiento electroquímico, tecnologías de membrana, adsorción en carbón activo, evaporación, etc." (Barakat, M.A. 2011; Lesmana, S.O. 2009; Wang, J. 2009; Santos Yabe, M .J. 2003). Sin embargo, estos métodos conllevan un costo elevado debido al consumo eléctrico o al empleo de agentes químicos (Volesky, B. 2001).

Por tal motivo, las investigaciones científicas se han centrado en bioadsorbentes como las microalgas debido la abundancia y disponibilidad de las diferentes especies, así como su variabilidad, capacidad eficiente para absorber iones metálicos (Yin et al., 2019; Gutiérrez Benítez et al., 2014), costos bajos, alta eficiencia de remoción e inocuo ambientalmente (Yin et al., 2019; Vitola et al., 2018). Esta captación de metales pesados es posible debido a que poseen varios mecanismos bioquímicos (Lee & Fisher, 2017).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se diseñan con el fin de producir efluentes que cumplan con los estándares de calidad, cumpliendo con la regulación correspondiente y buscando el potencial aprovechamiento del efluente y minimizando los problemas de salud pública. (Silva et al., n.d.) Sin embargo, debido a diversos factores las aguas residuales no siempre se tratan adecuadamente, lo que ocasiona que en el mundo mueran más personas por enfermedades relacionadas a la contaminación del agua que, a todas las formas de violencia existentes, incluyendo guerras. Además, la descarga de aguas residuales sin tratamiento al ambiente ocasiona problemas de eutrofización, el cual daña seriamente los ecosistemas y también a las reservas de agua dulce para consumo humano (Fernández et al., 2018).

Otro problema predominante, es la mezcla de aguas residuales domésticas con aguas pluviales en los sistemas de alcantarillado, además de las descargas de aguas residuales industriales, esto ocasiona que contaminantes no convencionales lleguen a la planta de tratamiento, como compuestos orgánicos resistentes, volátiles, surfactantes, metales y sólidos disueltos o contaminantes emergentes, como medicamentos, detergentes sintéticos, antibióticos, hormonas y esteroides. Estas sustancias representan un riesgo para la salud pública a largo plazo y son más difíciles de remover, debido al diseño convencional de la PTAR (Metcalf y Eddy, 2003; Mara y Carnicross, 1990).

En México, las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales, las cuales son generadas debido al abastecimiento público y urbano rural, y las descargas no municipales, las cuales involucran otros usos, como industria autoabastecida. Con base en las proyecciones, en 2030 habrá 9.2 mil millones de metros cúbicos de aguas residuales que, de ser tratadas en su totalidad y reusadas, reducirían la demanda en un 40 % (Agua.org.mx., 2018).

Con ello se observa que, aunque existen avances, resultan insuficientes, debido a que no el 100 % de las aguas residuales son colectadas, se genera una pérdida en las redes de desagüe o descargas ilegales directamente al medio. En 2015, se calculó el costo económico de la contaminación causada por aguas residuales no tratadas, esta fue de 57,403 millones de pesos, lo equivalente a 0.3 % del producto interno bruto. Mientras que, en el mismo año en México murieron 3,754 personas debido a enfermedades infecciosas intestinales, por ende, el saneamiento del agua requiere una fuerte inversión en infraestructura para el tratamiento de las aguas residuales, el cual de realizarse representaría un ahorro en la atención médica debido a enfermedades diarreicas causadas por agua y productos agrícolas contaminados (Agua.org.mx., 2018).

El tratar las aguas residuales permite ahorrar recursos al reutilizar el agua inicialmente destinada a actividades como limpieza y riego, reduciendo la demanda de agua, evita la sobreexplotación de los acuíferos, disminuye el riesgo de contaminación de ríos, además de prevenir enfermedades diarreicas, todo esto contribuye a mejorar el ambiente y la salud (Agua.org.mx., 2018).

Para entender de forma gráfica lo anteriormente mencionado, se muestra la figura 3, en donde se detalla la complejidad y el dinamismo de los sistemas de la hidrósfera, debido a que existe un ciclo

natural del agua como se muestra en la parte superior, mientras que en la parte inferior se observan tres fuentes de abastecimiento, la superficial, subterránea, además del océano, estas fuentes requieren una planta de tratamiento o una desalinizadora según sea el caso, después de este paso, obtendrán las condiciones necesarias para ser consideradas aptas para uso o consumo humano, esta agua se destina a usos residenciales, comerciales e industriales, en caso de consumo se requiere además de una planta potabilizadora para elevar la calidad del agua. Finalmente, de estas actividades obtenemos aguas residuales, las cuales deben ser tratadas mediante una planta de aguas residuales para que vuelvan a considerarse aptas para uso humano, pero sin contacto directo y ser destinadas a actividades, recreativas, riego de áreas verdes o recarga de los mantos acuíferos.

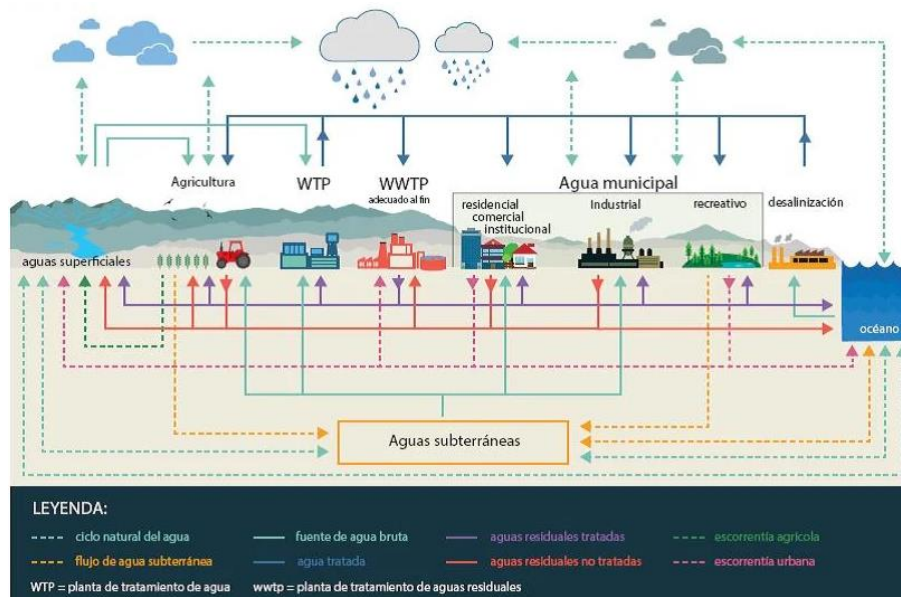


Figura 4. Aguas residuales en el ciclo de agua, (Jhadyn, 2019)

La adopción de métodos tanto tradicionales como innovadores para tratar las aguas residuales, junto con la exploración de su reutilización para actividades como el riego y la acuicultura, debe garantizar siempre la protección de la salud (OMS, 2006). Además, es fundamental monitorear y evaluar la calidad del agua para comprender la magnitud del problema global de contaminación hídrica y aplicar medidas correctivas que protejan los ecosistemas.

Entender que el agua es un recurso natural esencial de la Tierra y su escasez es uno de los principales retos a enfrentar a nivel mundial, es esencial para buscar soluciones, si bien millones de personas no cuentan con acceso al agua dulce, algunos sectores industriales, por ejemplo, la agricultura consume grandes cantidades de agua disponible (Kesari et al., 2021). Lo cual es contradictorio debido a que la agricultura al igual que el agua son vitales para la vida humana.

Por ello, el sector más afectado por las sequías y la escasez de agua es el agropecuario, se estima que, en México en 2012, las sequías produjeron pérdidas de nueve mil millones de pesos en los

cultivos de maíz y seis mil millones asociados al frijol, las consecuencias a corto plazo fueron un aumento en los precios de los productos afectados, en el mediano y largo plazo la falta de agua para la agricultura podría desencadenar hambrunas (Esparza, 2014). Además, se debe considerar el estrés hídrico, el cual es un indicador que muestra la presión social sobre la demanda de los recursos hídricos disponibles. Este se expresa como un porcentaje, se calcula como el cociente entre el total de agua dulce extraída para diversas actividades y los recursos hídricos renovables (FAO, s.f.). Un aumento en el estrés hídrico representa que hay una mayor demanda de agua, una menor disponibilidad de agua o ambas situaciones a la vez (Sánchez Gasca M., 2024).

Según la UNESCO en 2016, entre los contaminantes del agua de origen antropogénico se encuentran patógenos, metales pesados, materia orgánica. Así mismo indica que más del 80% de aguas residuales en países en desarrollo son descargadas a cuerpos de agua sin tratamiento. Se ha comprobado que, en zonas rurales y comunidades indígenas, las principales fuentes de abastecimiento del agua tienen presencia de metales pesados, por ende, también los cultivos de consumo directo (Internacional, 2017). Se puede afirmar que los tratamientos convencionales para descargas domésticas e industriales son efectivos para mejorar la calidad microbiológica y física, sin embargo, son ineficientes en cuanto metales pesados, debido a que su tratamiento requiere de procesos como la adsorción por carbón activado para remover los metales pesados, pero estos son costosos, por ello se buscan alternativas de mayor factibilidad (Chojnacka, 2010).

Cuando el agua residual sin algún tratamiento es reutilizada directamente por los agricultores para el riego de sus cultivos. Existe un riesgo debido al contacto directo con el agua, la cual afecta a los agricultores y jornaleros, además de los consumidores, sin embargo, estas prácticas se realizan para cubrir las necesidades de agua para todos los sectores. Esta necesidad aumenta a nivel mundial debido a las consecuencias de la contaminación y la escasez de las aguas dulces que se aceleran a nivel local, la contaminación del agua causada en gran medida por la agricultura industrializada ocasiona una crisis mundial cada vez más grave que afecta directamente la calidad de los alimentos, la salud, el desarrollo económico y la seguridad alimentaria (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2021).

Debemos recordar que en todo el mundo, el 80 % de las aguas residuales no reciben tratamiento alguno, en donde el saneamiento universal se plantea como un creciente reto planetario y conforme nos acercamos al 2030 el cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad parecen aún más lejanos, para llegar al aproximarnos al mínimo porcentaje posible, el desarrollo sostenible debe contemplar la parte tecnológica, económicamente viable, y socialmente aceptable, especialmente para países con menos recursos ya que son los que más carencias tienen. Por lo que las microalgas pueden ayudar a conseguirlo en un futuro próximo (We Are Water, 2024).

Debido a la escasez global, además del elevado costo de operación y mantenimiento en las plantas de tratamiento de aguas residuales, se han llevado a cabo diversas investigaciones que emplean

sistemas de microalgas para el saneamiento del agua, con el objetivo de aprovechar la biomasa producida. Estos sistemas juegan un papel esencial en modificar la visión tradicional de las aguas residuales como un desecho, para considerarlas un recurso valioso del cual se pueden obtener productos con valor añadido y ser utilizados de manera eficiente. Además, su uso presenta un gran potencial ambiental, económico y social, apoyando una economía circular, de esta forma, se ha explorado especialmente cómo las microalgas pueden eliminar contaminantes convencionales y compuestos emergentes, como antibióticos y bacterias peligrosas, no obstante, su potencial completo debe evaluarse en un enfoque integral, en el que puedan eliminar simultáneamente contaminantes biológicos e inorgánicos (Amaro et al., 2023).

En las plantas de tratamiento de agua residual, los procesos de depuración de aguas residuales requieren de mucha energía y generan residuos, se ha avanzado en el uso de energías renovables y en el aprovechamiento de los residuos; sin embargo, lograr que los sistemas de depuración sean sostenibles e integrables a la economía circular es uno de los retos más grandes a nivel mundial, al mismo tiempo que se crean productos de valor a partir de los residuos, así como la reducción de la huella de carbono de cada proceso, las microalgas están en la etapa de investigación como una biotecnología prometedora ya que podrían contribuir a la expansión del empleo de microalgas en el saneamiento, ofreciendo una opción diferente a los métodos bioquímicos que dependen únicamente de bacterias para limpiar el agua de la materia orgánica. (We Are Water, 2024).

En un proceso integral, considerando un ahorro de energía, capturar CO₂, al mismo tiempo que se remueven los contaminantes del agua y se generan bioproductos de valor añadido. Es una alternativa para los sistemas de depuración convencionales, lo que mejora notablemente la sostenibilidad de la depuración del agua residual, al mismo tiempo que se acerca a la estrategia de la economía circular (We Are Water, 2024).

Finalmente, uno de los principales problemas que enfrenta México, es la desigual en cuanto a la distribución de los recursos hídricos a lo largo del territorio, las zonas norte y centro tienen un clima desértico, así como semiárido, lo cual ocasiona un escenario de escasez debido al recurso, ya que la época de lluvias es escasa y tiene una duración promedio de cuatro meses, generando una escasa duración. Siendo que el promedio anual de precipitación es menor a 500 mm anuales, lo cual representa aproximadamente el 52 % del territorio, lo que es mayor a 2,000 mm anuales en el 7 % del territorio, lo cual sobrepasa a los 3,200 mm al año en la zona sureste del país (CNA, 2010).

Las estadísticas hídricas de México, han generado que en los últimos años, se ha incrementado la cobertura de agua potable, así como del alcantarillado que conduce a centros urbanos, sin embargo la población no ha aumentado en la misma proporción que el tratamiento de las aguas tratadas, así que, mientras se cubren las necesidades de agua potable en el país, cerca del 90.3 %, además se cubre aproximadamente el 86.4 % del alcantarillado, siendo que tan sólo el 52.6 % de las aguas residuales son tratadas. Por tanto, México debe preservar la calidad del agua, proteger la salud pública y garantizar el desarrollo sustentable del recurso hídrico (Marina de la Vega et al., 2012).

MICROALGAS Y SUS APLICACIONES

Las microalgas se encuentran presentes en todos los ecosistemas de la tierra, tanto acuáticos como terrestres, por lo cual existe una gran variedad de especies, las cuales son capaces de vivir en diferentes condiciones ambientales, estos microorganismos fotosintéticos pueden ser procariotas o eucariotas y crecen rápidamente debido a su estructura multicelular, unicelulares o simples. Se estima que existen más de 50,000 especies de microalgas, sin embargo, se estima que solo se ha estudiado y analizado un número limitado, aproximadamente 30,000 especies (Mata, Martins, & Caetano, 2010).

Debido a esta diversidad de especies, estos organismos presentan diferentes estructuras, de la misma forma, la composición química de sus paredes celulares varía, estas estructuras están conformadas por una multicapa de celulosa cristalina, generalmente intercalada con otros compuestos (Brock & Madigan, 1993). En los anexos del presente documento, desde la tabla 27 hasta la 34 se muestran diversas especies de microalgas, cada tabla presenta una breve descripción de la microalga, una ilustración, además del nombre la respectiva especie.

Se puede definir a las microalgas como son microorganismos microscópicos y fotosintéticos que son análogos a las plantas, las cuales son responsables del 32 % de la fotosíntesis a nivel mundial, por tanto, forman parte de los sistemas naturales de agua, tanto dulce como salada, por tanto, fungen como la principal fuente de alimento pues forman parte de la cadena trófica en los sistemas acuáticos (Priyadarshani, Sahu, & Rath, 2011). Aunado a la fotosíntesis, las microalgas y cianobacterias también son los mayores responsables en la producción de oxígeno, de la captura de energía proveniente del sol a nivel global y de la misma forma también son responsables de la transformación de dióxido de carbono en biomasa, de forma que contribuyen de forma positiva al calentamiento global (Benemann, 2003).

Entonces, la clasificación de esta diversidad es compleja, y la taxonomía está sujeta a frecuentes trastornos debido a las técnicas de filogenia molecular, las algas son un conjunto de organismos acuáticos que reducen el CO₂ y producen O₂ mediante la fotosíntesis, la clorofila es responsable del 50% de la actividad fotosintética en la Tierra. Los organismos de este grupo varían en tamaño, desde micrómetros hasta varios metros, también algunos taxónomos contradicen la clasificación de las cianobacterias como microalgas o bacterias (Hachicha et al., 2022).

Por su parte las microalgas nombradas "verde-azules" se sitúan en una posición intermedia entre las bacterias fotosintéticas y las algas eucariotas, debido a que este grupo no posee bacterioclorofila, en su lugar presentan clorofila α y realizan fotosíntesis oxigénica. No obstante, desde el punto de vista biotecnológico y en un sentido amplio, se puede definir a las microalgas como aquellos microorganismos que contienen clorofila α y otros pigmentos fotosintéticos, las cuales son capaces de realizar fotosíntesis oxigénica, por tanto, a las cianobacterias o algas verde-azules, procariotas, también se les ha considerado microalgas (Rodríguez y Guerrero, 1992).

Por tanto, taxonómicamente el término microalgas no tiene un sentido específico, pues dentro de este se incluyen organismos como cianobacterias que tienen estructura celular procariota, y al mismo tiempo se incorporan las microalgas restantes de célula eucariota (Abalde et al., 1995). Algunas cianobacterias son las principales contribuciones en cuanto a la biotecnología microalgal, por ejemplo, la especie *Spirulina* (Rodríguez y Guerrero, 1992). Algunas especies son capaces de fijar el nitrógeno atmosférico (N₂) y usarlo como fuente de nitrógeno (José et al., 2022).

Las microalgas eucariotas, se caracterizan por ser microorganismos unicelulares que poseen además de núcleo, otros orgánulos propios de las células eucariotas, sin importar la variedad de formas, organización y tamaño (Dodge, 1973; Berner, 1993). Las microalgas pueden ser autótrofas o heterótrofas, sin embargo, comúnmente estos microorganismos tienen un crecimiento autótrofo debido a que en algunas especies el proceso de fotosíntesis es más eficiente (Renuka et al., 2018).

La reproducción de las microalgas mayoritariamente es de tipo asexual, generalmente por división binaria aún que también es posible una reproducción sexual con una frecuencia variable. En el caso de la duplicación por división binaria esta suele durar de 1 hora o menos para cianobacterias o células procariotas, en el caso de las eucariotas el tiempo suele ser de 8 a 24 horas (Taylor, 1980). Algunas microalgas tienden a dividirse durante el ciclo día-noche (Sournia, 1974). En cuanto a su período de reproducción, es variable sin embargo en algunos grupos es muy notorio, las diatomeas por ejemplo suelen reproducirse durante el periodo diurno o nocturno lo que depende de la temperatura (Smayda, 1975).

En el caso de las especies que llevan a cabo reacciones relacionadas con la división celular durante la oscuridad, estas sintetizan el material celular durante el periodo luminoso. La reproducción de las algas verdes y diatomeas es ampliamente estudiada, sin embargo, esto no aplica para todas las especies (Abalde et al., 1995).

Estos microorganismos poseen características además de su su alta eficiencia fotosintética, lo cual las convierten en una excelente opción para ser utilizadas en procesos de biorremediación y en aguas residuales debido a que son capaces de desarrollarse bajo condiciones adversas, como lo son condiciones de estrés por escasez de nutrientes, soportan variaciones de temperatura, en presencia de altas concentraciones de sales y contaminantes (Leong & Chang, 2020).

Debido a diversas investigaciones alrededor de las microalgas de agua dulce, la Universidad de Coimbra en Portugal cuenta con una de las colecciones más grandes de entre 4,000 cepas y 1,000 especies, lo cual demuestra una amplia diversidad de aplicaciones, tales como productos de valor agregado para uso farmacéutico, cultivos de alimentos para el consumo humano y fuente de energía, entre otras (Mata, Martins, & Caetano, 2010).

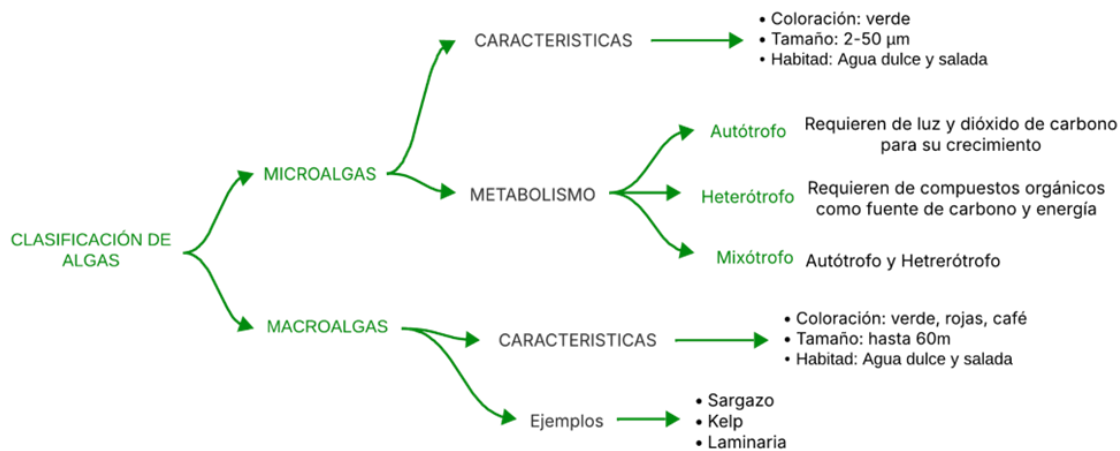


Figura 5. Clasificación y características de las algas. Editada a partir de la imagen de los autores (Alemán Ramírez et al., 2013)

El proceso de metabolismo se puede definir como el conjunto de reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en el interior de un organismo, de entre estos procesos se distinguen dos conjuntos acoplados, el catabolismo y anabolismo. Las reacciones que forman parte del catabolismo son aquellas en las que el microorganismo utiliza el sustrato para obtener energía (José et al., 2022). El metabolismo de las microalgas y la biosíntesis de algunos metabolitos se detallan en la figura 5.

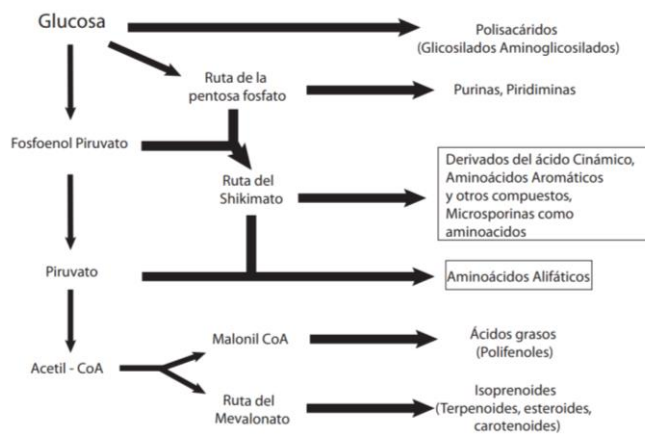


Figura 6. Biosíntesis de la microalga y algunos metabolitos primarios y secundarios, (Johanna et al., 2015)

Las microalgas son organismos considerados como un modelo fotosintético, debido a que la energía solar es vital durante su desarrollo (Johanna et al., 2015). Son capaces de transformar la materia inorgánica en orgánica mediante el proceso de fotosíntesis (Barraza & et al., 2009). En la figura 6 y 7 se muestra la luz solar como fuente de energía de las microalgas, las reacciones fotoquímicas, se llevan a cabo en los complejos de cloroplastos, los cuales han evolucionado para absorber más luz de la que necesitan para su fotosíntesis (Zeng & et al., 2001).

La intensidad de luz necesaria en las células de microalgas típicamente es relativamente baja en comparación con los requeridos por plantas superiores, las tasas de actividad metabólica generalmente aumentan conforme la intensidad de luz aumenta hasta $400 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Zeng & et al., 2011). En las reacciones que forman parte del anabolismo de estos microorganismos la energía generada es utilizada para la síntesis de tejido celular, además de una fuente de carbono y diversos nutrientes (José et al., 2022).

De forma resumida, durante el proceso de fotosíntesis, al emplear la energía del sol, junto con el CO_2 atmosférico y agua como productos se obtiene oxígeno, el cual se libera nuevamente a la atmósfera, los azúcares, carbohidratos, lípidos entre otros compuestos que la microalga los emplea para producir distintas sustancias, además las microalgas presentan una alta tasa de reproducción, por lo que son capaces de absorber, almacenar y sintetizar la energía del sol (Los biocombustibles a partir de microalgas, 2011). Como se detalla a lo largo del capítulo, estos microorganismos conforman un pilar fundamental para alcanzar la sostenibilidad (Fernández et al., 2018).

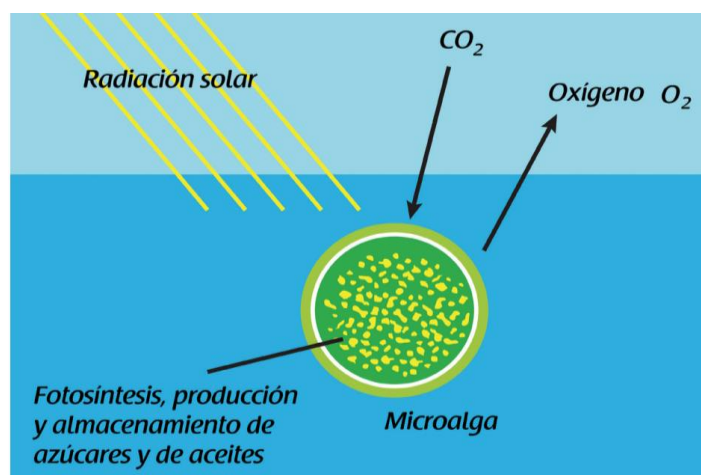


Figura 7. Esquema del almacenamiento de energía en las microalgas, (Carmona et al., 2013).

Microalgas como parte del tratamiento biológico

Como se mencionó en los antecedentes, la incorporación de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales tiene sus raíces en los estudios de Caldwell en 1940, quien fue pionero en la exploración de la viabilidad de usar microalgas como saneamiento del agua, ya que estas pueden aprovechar los nutrientes inorgánicos presentes en ella para promover su propio crecimiento, funcionando, así como un medio de cultivo. Más tarde, en 1957, Oswald propuso una nueva visión para la producción en masa de microalgas, llevando a cabo el tratamiento de aguas residuales para obtener biomasa rica en proteínas, lo que se interpretó como una valorización de las aguas residuales mediante el cultivo de microalgas (Insuasty Manrique, MJ, 2017).

Posteriormente en 1960, Richmond en California, construyó el sistema de cultivo de microalgas más grande de Estados Unidos, logrando una significativa producción de biomasa, este cultivo a gran escala impulsó a varios países a desarrollar sistemas de cultivo masivo, tanto en ambientes cerrados como abiertos, con distintos fines. Debido a esto, el cultivo de microalgas se presenta como una de las mejores alternativas para tratar aguas residuales, funcionando como un sistema biológico de tratamiento terciario, el cual es económico ya que facilita la remoción de nutrientes, metales pesados, ofrece una solución efectiva para combatir la contaminación y la eutrofización causadas por las descargas (Insuasty Manrique, MJ, 2017).

En años recientes, diversos autores han estudiado el tratamiento de aguas residuales usando microalgas de diferentes especies en aguas residuales municipales (Tran et al., 2020; Zhong et al., 2021), agrícolas (Chen et al., 2020; Ganeshkumara et al., 2018), así como en aguas residuales industriales y de procesamiento de alimentos (Behl et al., 2020; Silva et al., 2021). En general, estas especies de microalgas lograron crecer con éxito en aguas residuales, alcanzando productividades de biomasa satisfactorias y logrando altas tasas de remoción de nitrógeno total de hasta 99 %, fósforo total del 99 % y carbono orgánico del 90 % (Amaro et al., 2023).

Chlorella y *Scenedesmus* son las microalgas más comúnmente utilizadas en el tratamiento de aguas residuales provenientes de plantas de tratamientos convencionales, industriales y residuos animales, al mismo tiempo se enfocan en la producción masiva de biomasa para fines comerciales, las aguas residuales sin importar su origen, poseen un alto contenido de nutrientes, el nitrógeno y fósforo constituyen un medio apropiado para el crecimiento de microalgas y al mismo tiempo han demostrado una capacidad de remoción de cantidades apreciables de nitrógeno y fósforo (Andrade et al, 2009). Los sistemas de microalgas pueden considerarse una comunidad de células, estas comunidades pueden estar compuestas por una sola especie de microalga nombrado monocultivo, varias especies de microalgas nombrado como policultivo, o consorcios de microalgas-bacterias. Se han estudiado varias composiciones diferentes considerando diferentes escenarios, utilizando aguas residuales reales, sintéticas o esterilizadas, a escala de laboratorio o piloto, como se presentará en los siguientes apartados (Mandal et al., 2018; Ray et al., 2022; Singh y Singh, 2022; Stockenreiter y Litchman, 2019; Tran et al., 2020; Vargas-Estrada et al., 2021).

En la práctica, es poco probable mantener un monocultivo de microalgas para tratar aguas residuales, ya que estas aguas suelen contener diversas especies de microalgas, bacterias y otros microorganismos no deseados. Los policultivos de microalgas, ya sea en combinación con bacterias o no, son los sistemas más utilizados y estudiados para su aplicación a mayor escala. Además, los policultivos ofrecen ventajas como una mayor eficiencia en la absorción de nutrientes, mayor producción de biomasa, resistencia, escalabilidad, autosuficiencia y viabilidad en procesos de biorremediación, debido a la variedad de necesidades nutricionales y a la capacidad de adaptación de las condiciones ambientales (Mandal et al., 2018; Ray et al., 2022; Singh y Singh, 2022; Stockenreiter y Litchman, 2019; Tran et al., 2020; Vargas-Estrada et al., 2021).

Debemos tomar en cuenta que la selección de las especies de microalgas es un punto crítico para la interacción entre diferentes especies de microalgas ya que se puede generar competencia por nutrientes y la excreción de aleloquímicos que pueden bloquear su crecimiento, la carencia de nutrientes, la baja intensidad de la luz, la temperatura, y los altos valores de pH. Además, comprender la composición y concentración de contaminantes en cada tipo de aguas residuales, así como sus características bióticas y abióticas, son consideraciones importantes para establecer un sistema de microalgas eficiente que remueven los contaminantes convencionales, antibióticos y patógenos (Cembella, 2003; Gonçalves et al., 2017; Subashchandrabose et al., 2011).

Desde el punto de vista de la depuración del agua, las clasificaciones más importantes se realizan en función de los compuestos que los microorganismos necesitan para crecer y de las condiciones ambientales en las que pueden desarrollarse. Los microorganismos para su crecimiento necesitan una fuente de carbono, nutrientes como nitrógeno, fósforo y otros elementos en menor medida para la síntesis celular y energía. Las condiciones ambientales que más afectan al desarrollo de los microorganismos son la temperatura y el pH principalmente (José et al., 2022).

Las microalgas forman parte del tratamiento secundario y terciario, debido a que son capaces de capturar carbono, reducir el gasto energético y convertir los contaminantes en compuestos de valor, siendo una opción sostenible (We Are Water, 2024). En estos procesos, los microorganismos crecen usando los contaminantes del agua como fuente de carbono y energía, transformándolos en biomasa, dióxido de carbono y compuestos inocuos. La fuente de carbono y energía se llama sustrato, y la eliminación de contaminantes se conoce como consumo de sustrato, el crecimiento de la biomasa y el consumo de sustrato están relacionados, por lo que el rendimiento se define como la cantidad de biomasa producida por unidad de sustrato consumido (José et al., 2022).

Las microalgas son organismos principalmente fotoautótrofos que utilizan la luz solar como fuente de energía y el dióxido de carbono (CO_2) presente en el aire o los bicarbonatos (HCO_3^-) del medio de cultivo son transformados en moléculas de almacenamiento energético como los carbohidratos a través de la fotosíntesis y fijación de CO_2 (Singh y Dhar, 2019; Su, 2021; Umdu y Univ, 2020).

Los mecanismos de concentración de carbono, la mayoría de las especies de microalgas han desarrollado estos sistemas, que facilitan la conversión reversible entre HCO_3^- y CO_2 , tanto dentro como fuera de la célula. Estos mecanismos permiten una captura eficiente del CO_2 mediante la obtención de carbono inorgánico, incluso cuando la concentración atmosférica de CO_2 es baja (Singh y Dhar, 2019; Umetani et al., 2021). El crecimiento óptimo de las microalgas ocurre en un rango de pH entre 7.0 y 8.4, condiciones en las cuales el HCO_3^- representa la mayor proporción del carbono inorgánico disponible en el medio de cultivo (Onyeaka et al., 2021).

Los procesos de incorporación del carbono inorgánico en el interior de la célula microalgal, mediante tres procesos principales (Prasad et al., 2021; Singh et al., 2016): difusión pasiva directa del CO_2 , la transformación catalítica de HCO_3^- a CO_2 realizada por una enzima anhidrasa carbónica

extracelular, seguida de la difusión pasiva del CO_2 y transporte activo directo de HCO_3^- mediante transportadores especializados de captación de carbono inorgánico. Durante estos procesos, se pueden producir radicales hidroxilo debido a la conversión de HCO_3^- en CO_2 , lo que puede contribuir al aumento del pH del cultivo (Whitton et al., 2015). Dentro de la célula, el CO_2 se fija en una reacción que inicia el ciclo de Calvin-Benson, catalizado por la ribulosa bifosfato carboxilasa/oxigenasa (Rubisco), produciendo finalmente carbohidratos (Yang et al., 2017).

El metabolismo alternativo del CO_2 , aunque comúnmente es la fuente de carbono preferida, en presencia de ciertas moléculas orgánicas como azúcares, acetato y alcoholes, y en ausencia de luz, algunas microalgas como la *Chlorella sp.*, pueden adoptar un metabolismo heterotrófico, utilizando estas moléculas orgánicas como fuente de carbono (Siqueira et al., 2018; Su, 2021). Además, el metabolismo mixotrófico es común en algunos microorganismos, donde la fijación de CO_2 ocurre simultáneamente con la fotosíntesis, utilizando los compuestos orgánicos como fuente adicional de energía para la respiración (Prasad et al., 2021; Siqueira et al., 2018).

Los tratamientos biológicos en un principio buscaban la eliminación de la materia orgánica de las aguas residuales, posteriormente han surgido otros usos como: la oxidación del nitrógeno amoniacal (nitrificación), la eliminación del nitrógeno del agua residuales mediante la conversión de las formas oxidadas en nitrógeno (desnitrificación), la eliminación de fósforo y la estabilización de lodos (José et al., 2022). La remoción de materia orgánica, nitrógeno y fósforo generalmente se lleva a cabo mediante sistemas de lodos activados, aunque estos métodos suelen ser ineficaces y no siempre logran eliminar de manera efectiva el nitrógeno y el fósforo, lo cual incrementa el riesgo de eutrofización y sus efectos dañinos en el agua (Fan et al., 2020).

Las microalgas pueden asimilar el nitrógeno presente en las aguas residuales para asimilarlo, en forma de nitrógeno inorgánico como NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- y nitrógeno orgánico como urea, purinas, aminoácidos y pirimidinas. El nitrógeno es un nutriente esencial para las microalgas, ya que forma parte de péptidos, proteínas, enzimas, clorofilas y ácidos nucleicos, siendo fundamental para el crecimiento algal y la regulación metabólica. (Cai et al., 2013; Chen y Wang, 2020; Kumar y Bera, 2020). Las especies de nitrógeno inorgánico requieren transportadores activos específicos para ingresar a la célula microalgal, y el NH_4^+ se puede incorporar directamente al metabolismo celular para producir glutamato y en consecuencia sintetizar los aminoácidos a través del ciclo glutamina sintetasa/glutamato sintasa (Vega, 2020).

El nitrito y nitrato deben reducirse a NH_4^+ antes de su asimilación, NO_3^- se convierte principalmente a NO_2^- en el citosol por la acción del nitrato reductasa, y NO_2^- se reduce a NH_4^+ en el cloroplasto, en una reacción catalizada por nitrito reductasa (Chai et al., 2021; Sanz-Luque et al., 2015). En consecuencia, NH_4^+ es la forma más fácilmente absorbida de nitrógeno por la mayoría de las microalgas, ya que no implica reacciones redox implica una menor demanda de energía que otras fuentes de nitrógeno (Wang et al., 2017). Además, algunas cianobacterias, anteriormente descritas como algas verdeazuladas, también pueden fijar nitrógeno molecular del aire, convirtiéndolo en NH_3

mediante una reacción catalizada por un complejo enzimático nitrogenasa, que puede transformarse en NH_4^+ para su asimilación (Kumar y Bera, 2020).

Un aumento de pH del medio puede deberse a la captación positiva de H^+ mediante el cotransporte de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo a través de la membrana celular de las microalgas y a la producción de radicales hidroxilo (Whitton et al., 2015). Como resultado de este aumento del pH o debido a las altas temperaturas, puede producir una eliminación indirecta del NH_4^+ de las microalgas mediante su conversión en NH_3 gaseoso y la consiguiente volatilización del agua (Wang et al., 2017; Whitton et al., 2015). Sin embargo, cabe señalar que este no es un proceso deseable, ya que el NH_3 es un precursor del N_2O , un gas de efecto invernadero.

En las aguas residuales, el fósforo puede existir en forma de compuestos orgánicos o inorgánicos, de entre ellos, la principal fuente de fósforo para las microalgas son los fosfatos inorgánicos en forma de H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} o PO_4^{3-} (Su, 2021; Whitton et al., 2015). Estos se transfieren a través de la membrana celular mediante transporte activo utilizando transportadores de fósforo inorgánico ya dentro de la célula, se pueden utilizar directamente para sintetizar ácidos nucleicos, fosfolípidos y trifosfato de adenosina (ATP) mediante fosforilación (Su, 2021; Whitton et al., 2015). En presencia de luz solar, los fosfatos pueden convertirse en polifosfatos solubles en ácido en una reacción catalizada por la polifosfato quinasa y es utilizada para la síntesis de proteínas y ácido desoxirribonucleico (ADN) (Su, 2021; Whitton et al., 2015).

Cuando las microalgas se ven privadas de fósforo y luego se realimentan, se produce la captación por inanición o, cuando se exponen a un exceso de fósforo (captación de lujo), consumen más de lo que requieren para su crecimiento, algunas microalgas también pueden convertir los fosfatos y polifosfatos insolubles en ácido y almacenarlos como gránulos dentro de la vacuola (Singh et al., 2018; Zafar et al., 2021). Por el contrario, en condiciones de escasa disponibilidad de fósforo inorgánico, algunas microalgas tienen fosfatasa para consumir el fósforo orgánico externo que se encuentra en compuestos, como los ésteres de fosfato, para apoyar los procesos celulares esenciales (Cai et al., 2013; Mühlroth et al., 2017). Además de los procesos de asimilación y el almacenamiento de microalgas, el fósforo puede eliminarse indirectamente de las aguas residuales a través de la precipitación por complejación con Ca, Mg y Fe, debido al alto $\text{pH} > 8$ producido como consecuencia del crecimiento de las microalgas (Wang et al., 2014; Whitton et al., 2015)

Existen dos tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales sustentados en procesos biológicos: aerobios y anaerobios. Los primeros proporcionan un medio de alto contenido de oxígeno para que las bacterias puedan degradar la materia orgánica de los desechos, son altamente demandantes de energía, generan muchos lodos y pocos gases resultantes. Los segundos utilizan bacterias que, al descomponer la materia orgánica en ausencia de oxígeno, producen menos lodos y liberan más gases (metano, dióxido de carbono, amoníaco y ácido sulfúrico) que, en el marco de un aprovechamiento integral, pueden usarse como combustible (Agua.org., 2018).

Los tratamientos terciarios biológicos se consideran una alternativa respetuosa con el ambiente, las microalgas han sido ampliamente estudiadas para ser implementados en el tratamiento terciario de aguas residuales, la eliminación de contaminantes convencionales como el nitrógeno y fósforo, la eliminación de antibióticos, la eliminación de patógenos como los coliformes. La biomasa obtenida al final del tratamiento puede convertirse en productos de valor comercial como biocombustibles o biofertilizantes, compensando los costos de implementación. La biomasa puede implementarse dentro o cerca de la generación de aguas residuales, por ejemplo, en la acuicultura, ganadería porcina, zonas de producción agrícola, según sea el propósito (Amaro et al., 2023).

Se detallan los tipos de sistemas de tratamiento con potencial de emplear microalgas, así como sus ventajas y desventajas (Insuasty Manrique, MJ, 2017).

- Tanque no aireado: Es un sistema simple, poco profundo, que combina el tratamiento secundario y terciario. Sin embargo, la recuperación de microalgas en este sistema resulta difícil, lo que limita su eficiencia (Salazar, 2005).
- Tanque aireado: Es un sistema completo que incorpora oxigenación, elevando las concentraciones de oxígeno y logrando una mayor eficiencia en el tratamiento. Además, permite recuperar la biomasa mediante filtración en grava (Salazar, 2005).
- Lagunas de oxidación: Son estanques poco profundos, con una profundidad de 30 a 60 cm, que cuentan con mecanismos para airear y agitar, favoreciendo el crecimiento de microalgas. Este incremento en la oxigenación mejora la degradación bacteriana, promoviendo el crecimiento algal y, en consecuencia, fortaleciendo la eficiencia global en el tratamiento de aguas residuales (Salazar, 2005).
- Lagunas de alta tasa de oxidación: Son similares a las lagunas de oxidación, pero se usan en el tratamiento secundario de aguas residuales, inoculadas con altas concentraciones de microalgas. Esto resulta en una biomasa mixta que aumenta la velocidad de oxidación y remoción, mejorando la eficiencia total del sistema (Salazar, 2005).
- Lagunas de oxidación de algas: Tienen un diseño parecido al de las lagunas de alta tasa, pero en este caso, su objetivo es producir biomasa con fines alimenticios o para obtener metabolitos de valor comercial, como pigmentos (Salazar, 2005).

Las microalgas utilizadas en el tratamiento de aguas residuales son capaces de soportar altas concentraciones de nutrientes presentes en dichas aguas, los cuales son esenciales para su crecimiento y proliferación, por lo tanto, estos microorganismos han desarrollado adaptaciones que les permiten sobrevivir en ambientes con abundantes nutrientes inorgánicos, además presentan una actividad metabólica intensa, resistencia a cambios ambientales y un crecimiento en fase exponencial. Existen grupos y géneros específicos que se emplean en el tratamiento biológico terciario de aguas residuales, como se detalla en la tabla 1 (Insuasty Manrique, MJ, 2017).

Tabla 1. Microalgas comúnmente usadas en lagunas de estabilización, (Salazar, 2005)

Grupo	Género representativos	% de aplicación en lagunas de estabilización
Diatomeas	<i>Cyclotella, Gomphonema, Nitzschia</i>	10
Flageladas	<i>Chlamydomonas, Euglena, Cryptomonas</i>	25
Algas Verdes	<i>Ankistrodesmus, Chlorella, Scenedesmus</i>	50
Algas Verdes-azules	<i>Anacystis, Anabaena, Oscillatoria</i>	15

El tratamiento de aguas residuales usando cultivos de microalgas, mejora la calidad del efluente, a bajos costos energéticos, aprovechando los nutrientes, estos beneficios pueden ser incorporados en este y otros sectores, por lo tanto, la biomasa presenta un alto valor comercial.

La biomasa de microalgas puede considerarse un subproducto generado por el sistema de tratamiento de aguas residuales. Esta biomasa tiene una aplicación en diferentes áreas, como suplemento o complemento en la alimentación animal, así como en la fabricación de fertilizante, lo que permite valorar y aumentar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales mediante cultivos de microalgas (Salazar, 2005). Esta biomasa según su composición química puede convertirse en fertilizantes, alimentos animales para la avicultura, ganado porcino, ganado vacuno y acuicultura, además de otras aplicaciones en la industria química, biomedicina y farmacología, etc; como se muestra en la tabla 2 (Andrade et al, 2009).

Tabla 2. Empleo de microalgas producidas en el tratamiento de aguas residuales, (Salazar, 2005).

Géneros de Microalgas	Empleo
<i>Chaetoceros, Chlamydomonas, Chlorella, Chlorococcum, Cyclotella, Dunaliella, Rhodomonas.</i>	Acuicultura Moluscos, bivalvos, crustáceos, rotíferos, cladóceros, copépodos y peces.
Otros géneros	Alimentación animal Avicultura, ganado porcino, ganado vacuno
	Fertilizantes diversos
Cianobacterias (Fijación de nitrógeno)	Arrozales, y cultivos diversos
Diversos géneros	Productos químicos y energía Producción de hidrógeno, metanización y ácidos orgánicos.

Sin embargo, el principal desafío para emplear la biotecnología de microalgas en la depuración masiva de agua es que, al menos por ahora, no es viable para grandes volúmenes de agua residual. Esto se debe, en parte, a la fotosíntesis, las algas requieren luz solar pero su coloración intensa y opacidad dificultan que la luz llegue de forma uniforme a todas ellas, ya que se bloquean unas a otras y por esta razón, el agua a tratar requiere estar en tanques poco profundos en lugar de los tanques tradicionales, lo que implica ampliar el área superficial para lograr mayores volúmenes de depuración. Actualmente, esta tecnología se limita a tratar aguas de comunidades pequeñas, sin embargo, se está avanzando significativamente para permitir el tratamiento de mayores volúmenes en instalaciones más compactas (We Are Water, 2024).

Los ingenieros aseguran que la menor cantidad de agua tratada se compensa con la significativa reducción de costos operativos de los sistemas de microalgas, lo que podría traducirse en una mayor rentabilidad económica (We Are Water, 2024). Esto permite crear puestos de trabajo debido al desarrollo tecnológico que busca generar una alta rentabilidad para el funcionamiento y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales (Unesco Physical Document, n.d.).

Mecanismos microalgales para la eliminación de contaminantes

En este apartado se detalla cada mecanismo mediante el cual, las microalgas pueden contribuir con la remoción de los contaminantes, algunos son la bioadsorción, bio-captación y biodegradación. Las microalgas poseen mecanismos especializados que les permiten eliminar diversos contaminantes del agua residual, estos microorganismos pueden absorber los contaminantes como nutrientes para incorporarlos en su biomasa o transformarlos en moléculas esenciales que favorecen su crecimiento. (Singh y Dhar, 2019; Su, 2021; Umdu y Univ, 2020). En el citoplasma celular, las especies metálicas son retenidas al interactuar con fosfatos, proteínas y lípidos, compitiendo con iones como el sodio, potasio y calcio en los mecanismos biológicos, la capacidad de absorción depende de cada microorganismo y de su etapa de crecimiento (Soto et al, 2010).

Entonces, comencemos por definir que la bioadsorción es un proceso que ocurre mediante la interacción del contaminante con los diferentes grupos funcionales presentes en los componentes que conforman la pared celular, así como también en otras sustancias producidas por estos microorganismos, como los polisacáridos extracelulares, sin embargo, el proceso es completamente independiente al metabolismo de las microalgas. Una gran ventaja es que como el proceso no es metabólico, la bioadsorción puede llevarse a cabo tanto en células vivas como en muertas, lo cual permite reducir costos en su implementación debido a que no es necesario tener que controlar de forma estricta parámetros como temperatura, pH, iluminación o la cantidad de nutrientes disponibles (Guerra & Torres, 2025).

La adsorción del contaminante dependerá de la concentración, del área superficial y la naturaleza de los componentes disponibles en la pared celular de la microalga, por tanto, el proceso es más eficiente para compuestos hidrofóbicos que para los hidrofílicos. Estos componentes presentan mayor afinidad y especificidad por ciertos compuestos a causa de las interacciones químicas involucradas, también dependen de las condiciones en las que se encuentren, como el pH, la temperatura y condiciones de óxido-reducción (Sutherland & Ralph, 2019).

A diferencia de la bioadsorción, en la bio-captación los contaminantes son asimilados o incorporados al interior de la microalga mediante proteínas intracelulares y otros compuestos. Existen tres principales formas de bio-captación, éstas son mediante difusión pasiva, difusión facilitada y absorción activa dependiente de energía. La primera de ellas, al ser pasiva no requiere de energía ya que se realiza mediante gradientes de concentración, lo cual se refiere a que inicialmente se cuenta con una concentración de contaminante alta al exterior de la célula, esta se

dirigirá hacia una concentración baja al interior de la célula (Guerra & Torres, 2025). Lo anterior con la finalidad de equilibrar las concentraciones y ello representa la base del proceso de difusión.

Este proceso permite el paso de moléculas que no son polares, son solubles en lípidos y de bajo peso molecular. Por otro lado, la difusión facilitada requiere la ayuda de proteínas específicas que facilitan la entrada del contaminante al interior de la célula. Finalmente, la absorción activa requiere que la célula use energía para mover las sustancias, en contra del gradiente de concentración, de forma general, la eficacia de la bio-captación depende tanto de las condiciones del medio externo, como de la capacidad del microorganismo para absorber el contaminante sin que resulte tóxico para el mismo (Sutherland & Ralph, 2019). La biodegradación o biotransformación es considerada como la tecnología de biorremediación más prometedora porque las microalgas pueden convertir o transformar contaminantes de moléculas complejas en moléculas más simples y se puede aplicar en dos vías: (Guerra & Torres, 2025).

La primera, es la degradación metabólica, en donde el contaminante puede aceptar-donar protones fungiendo como fuente de carbono, contribuyendo al crecimiento de la biomasa. Mientras que la segunda, es denominada co-metabolismo, consiste en que el contaminante sea degradado mediante enzimas para la generación de nutrientes. La biotransformación puede ocurrir fuera de la célula mediante una degradación inicial enzimática, para luego descomponer las moléculas simplificadas en el interior, mediante el proceso de bio-captación (Sutherland & Ralph, 2019).

Los dos mecanismos identificados para la captación de los metales pesados por parte de la biomasa son la biosorción y la bioacumulación, el mecanismo de remoción para cada caso es distinto, la biosorción es principalmente una adsorción superficial, por tanto, el proceso no es controlado por el metabolismo, en cambio la bioacumulación es un proceso de remoción de metales que requiere de la actividad metabólica del organismo vivo. Son tecnologías reversibles, económicas y efectivas, en contraste con los métodos tradicionales como la precipitación química y la ósmosis inversa, que remueven los metales pesados de las corrientes acuosas, estos metales pesados pueden llegar a tener efectos letales en la biomasa, esta tiene mecanismos que contrarrestan los efectos tóxicos (Serrano Enríquez, MA 2022).

El término biosorción, se utiliza para referirse a la captación de metales que realiza una biomasa (viva o muerta), a través de o por medio de la captación fisicoquímica, por vías metabólicas o no, como la adsorción o el intercambio iónico, cuando se utiliza biomasa viva, los mecanismos metabólicos contribuyen al proceso de captación, la biosorción requiere de una fase sólida (sorbente) y una fase líquida (solvente) comúnmente suele ser el agua y contiene las especies disueltas que van a ser absorbidas (sorbato) pueden ser iones metálicos. La gran afinidad del sorbente por las especies del sorbato, ocasiona que este último sea atraído hacia el sólido y enlazado por diferentes mecanismos. El proceso continúa hasta alcanzar una concentración final o en equilibrio, entre el sorbato disuelto y el sorbato enlazado al sólido, la calidad del sorbente está dada por la cantidad del

sorbato que puede atraer y retener en forma inmovilizada (Cañizares-Villanueva, R. O. 2000). Esta estrategia puede ser empleada usando biomasa generalmente inactivada de bacterias, algas, hongos y levaduras (Vasudevan et al, 2001).

En la biosorción pasiva la retención del metal se da mediante una interacción fisicoquímica del metal con grupos funcionales presentes en la superficie celular, pertenecen a componentes de las paredes celulares, como el carboxilo, amino, hidroxilo, fosfato y sulfhidrilo, por tanto, se puede implementar el uso de materiales biológicos no vivos o no activos metabólicamente, esto implica la retención pasiva de los metales presentes en soluciones acuosas. Mientras que en la biosorción activa se requiere de la participación en el ciclo metabólico del microorganismo y consiste en la incorporación de iones metálicos a través de la membrana celular (Serrano Enríquez, MA 2022).

La bioacumulación es un proceso metabólico activo en el que las microalgas absorben sustancias nocivas, las cuales se acumulan o metabolizan progresivamente, es esencialmente como un sistema de autolimpieza biológica ocurrida en el interior de los microorganismos a lo largo del tiempo, debido a que las tasas de ingreso superan a las de eliminación, las microalgas pueden resistir contaminantes en bajas concentraciones debido a diversas adaptaciones, sin embargo, no todos los contaminantes pueden bioacumularse en la misma medida ya que la temperatura, el tiempo de contacto y la concentración de contaminantes son factores que influyen en la bioacumulación, este proceso es fundamental para la desintoxicación y eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos. La bioacumulación se cuantifica mediante un factor de bioconcentración que compara la concentración de contaminantes en las microalgas con la del medio. (Cognita, 2023.) Sin embargo, debido a que el transporte se da a través de la pared y de las membranas celulares, es difícil evaluar cuantitativamente la bioacumulación (Serrano Enríquez, MA 2022).

La bioacumulación se refiere a un transporte activo y de la deposición de las especies químicas, puede operarse hacia el interior y el exterior de las células, cuando los metales se unen a la superficie celular pueden bioacumularse, este proceso está relacionado con la actividad biológica de las células vivas (Serrano Enríquez, MA 2022). La figura 7 muestra algunos de estos procesos.

La biolixiviación es un método de extracción de metales ampliamente investigado, ya que es menos contaminante y consume menos energía en comparación con los métodos tradicionales, además, evita el uso de reactivos químicos tóxicos, por ende, es una opción con impactos bajos a largo plazo. Este proceso consiste en que microorganismos, ya sea actuando directamente o mediante sustancias que producen, disuelven los metales presentes en los minerales, convirtiéndolos en una forma soluble, lo cual permite que los metales puedan ser posteriormente recuperados de manera sencilla a partir de la solución (Manuel Cristóbal, D. R, 2016).

Sin embargo, su aplicación también involucra factores desfavorables, requiere de un periodo largo y se clasifica como un proceso lento en comparación con técnicas tradicionales, requiere de condiciones específicas, no todos los minerales o metales son aptos para el uso de este método, se

requiere de inversión para el control de condiciones requeridas y en la producción de microorganismos efectivos, por dichos motivos la eficiencia puede variar (Lopez Lopez, 2012).

Estos sistemas representan una herramienta tecnológica prometedora para desarrollar estrategias innovadoras de desinfección de aguas residuales mediante la reducción de microorganismos patógenos, incluyendo indicadores de contaminación fecal como los coliformes (Bouki et al., 2013; Ruas et al., 2022). La implementación exitosa de esta tecnología requiere encontrar el equilibrio óptimo entre la máxima absorción de contaminantes convencionales y farmacéuticos, y las altas tasas de eliminación de patógenos. Una ventaja significativa de este enfoque es la posibilidad de utilizar biomasa de microalgas que ya no se encuentren activas, como promotor de la bioadsorción, pues se eliminan los problemas de toxicidad, aumenta la sostenibilidad y aceptabilidad ecológica cuando se utiliza biomasa residual, y reducción considerable de los costos operativos (Amaro et al., 2023).

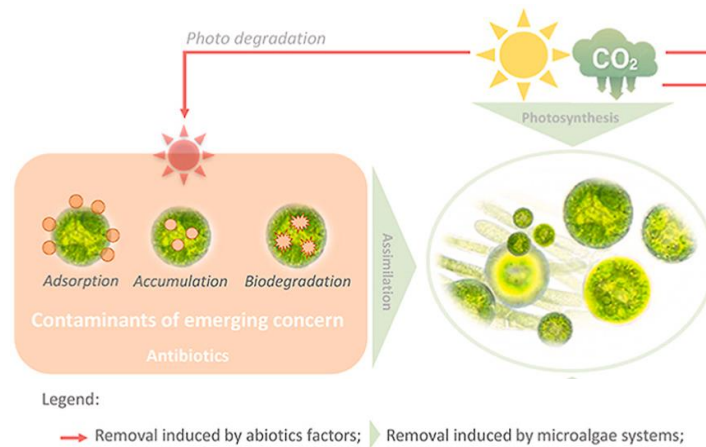


Figura 8. Mecanismos de asimilación de contaminantes, también aplica para antibióticos, (Amaro et al., 2023).

Como se mencionó anteriormente, todos estos mecanismos de remoción han despertado el interés debido al potencial de aplicación de esta tecnología para el tratamiento de aguas residuales, estos sistemas de tratamiento basados en microalgas también pueden remover contaminantes farmacéuticos como los antibióticos, esta aplicación ha ganado relevancia debido a la creciente preocupación por la presencia de estos compuestos en el ambiente acuático (Bai y Acharya, 2019; Villar-Navarro et al., 2018; Xiong et al., 2017). Sin embargo, la eficiencia de remoción de antibióticos mediante microalgas está influenciada por múltiples variables, incluyendo la especie algal utilizada, las condiciones ambientales de crecimiento y los mecanismos específicos de degradación de cada tipo de antibiótico (Amaro et al., 2023).

La interacción entre los antibióticos y las paredes celulares de las microalgas se caracteriza por un mecanismo no metabólico y pasivo, que involucra principalmente reacciones de adsorción física, formación de complejos superficiales, intercambio iónico, microprecipitación y quelación. Los antibióticos con propiedades hidrófobas pueden ser adsorbidos tanto por las paredes celulares de las microalgas como por las moléculas orgánicas liberadas por estos microorganismos en su entorno, tales como las sustancias poliméricas extracelulares (EPS) (Sutherland y Ralph, 2019).

Para la eliminación de antibióticos del medio acuático, las microalgas emplean tres mecanismos principales: la bioadsorción, bioacumulación y biodegradación. El primer mecanismo, la bioadsorción, es un proceso extracelular cuya efectividad depende de factores como la estructura molecular, la hidrofobicidad y los grupos funcionales específicos de cada antibiótico y consiste en la adhesión pasiva y rápida de los antibióticos a la superficie celular debido a las propiedades fisicoquímicas tanto de la célula como de los contaminantes, seguida por una transferencia de masa más lenta a través de la membrana celular, culminando finalmente en bioacumulación, biodegradación o ambos procesos simultáneamente. (Xiong et al., 2019, 2021).

El metabolismo de degradación de antibióticos para las algas se puede clasificar como en patrones de degradación cometabólica y en degradación metabólica (Leng et al., 2020). En la degradación metabólica, requiere de una acción enzimática altamente especializada, los antibióticos actúan como la única fuente de carbono y de energía para las microalgas. Por el contrario, en la degradación cometabólica, las microalgas requieren una fuente adicional de carbono y energía, ya que utilizan enzimas no específicas para procesar los antibióticos, necesitando un aporte suplementario de carbono y energía externa (Amaro et al., 2023).

El proceso de biodegradación puede ocurrir tanto de forma intracelular como extracelularmente. En la degradación intracelular, el antibiótico es inicialmente adsorbido por las microalgas, posteriormente se transporta gradualmente a través de las paredes celulares y finalmente es fragmentado por las enzimas celulares internas (Yu et al., 2017). En contraste, en los procesos de degradación extracelular, la fragmentación del antibiótico ocurre debido a la acción de enzimas liberadas al medio extracelular, y los productos intermedios o finales resultantes son posteriormente metabolizados dentro de las células algales (Leng et al., 2020).

La eficiencia de eliminación de antibióticos mediante microalgas está significativamente influenciada por diversos factores abióticos y bióticos, las condiciones ambientales que favorecen el crecimiento óptimo de las microalgas son generalmente las mismas que promueven una mayor eficiencia en la eliminación de antibióticos. Entre los parámetros abióticos más relevantes se encuentran el pH, la salinidad, la intensidad lumínica y la temperatura, todos los cuales desempeñan un papel crucial en la eficacia del proceso de remoción (Norvill et al., 2017).

Es importante considerar que, aunque la absorción de contaminantes depende del crecimiento óptimo de las microalgas (que requiere condiciones bióticas y abióticas favorables como pH entre

7-8, intensidad lumínica adecuada según los requerimientos de cada especie, y disponibilidad suficiente de CO₂), la eficiencia de eliminación de contaminantes está más estrechamente relacionada con condiciones alcalinas extremas (pH 9-11), altas intensidades lumínicas y elevadas concentraciones de CO₂ u oxígeno disuelto. Considerando todos estos factores, para aplicaciones en aguas residuales de origen agrícola y municipal, se recomienda la implementación de sistemas de cultivo de dos etapas en futuras investigaciones, utilizando consorcios de microalgas con bacterias, específicamente combinaciones de microalgas con bacterias de los géneros *Chlorella* y *Bacillus* respectivamente, en una proporción de 3:1 (Huo et al., 2020; Ji et al., 2018).

Biorremediación de metales pesados mediante microalgas

Para comprender la importancia de este apartado, es esencial recordar lo mencionado anteriormente, se observa que en el modelo convencional del tratamiento de aguas residuales, la remoción es ineficiente si a metales pesados se refiere, para que exista un tratamiento adecuado de ellos se requiere de procesos especializados y costosos, por ello constantemente se buscan alternativas sostenibles, por lo que detallaremos la viabilidad de utilizar microalgas para este contaminante específico y a la remoción que pueden generar.

Por lo que, la presencia de nuevos contaminantes y la ineficiencia de los métodos actuales de tratamiento de aguas residuales hacen necesaria la búsqueda de nuevas estrategias con un bajo impacto ambiental (Adams, Fufeyin, Okoro, & Ehinomen, 2015). Diversas investigaciones muestran que la biorremediación mediante microalgas es una opción viable para la remoción de estos metales, debido a que poseen mecanismos adaptativos, los cuales les permiten realizar procesos de adsorción, absorción y desorción a través de la membrana celular. Los metales con mayor relevancia debido a su toxicidad en este contexto incluyen al cadmio (Cd), zinc (Zn), cobre (Cu), plata (Ag), plomo (Pb), mercurio (Hg), níquel (Ni) y cromo (Cr). Los géneros de microalgas que han demostrado tener una mayor capacidad para remover estos metales en los sistemas biológicos, son *Chlorella* y *Scenedesmus* (Salazar, 2005).

Diversos reportes muestran el uso de microalgas para la eliminación de distintos tipos de contaminantes: (Guerra & Torres, 2025). A continuación, se detalla el problema ambiental que cada contaminante puede ocasionar.

- Metales pesados: Conforman una de las principales fuentes de contaminación en aguas residuales y en cuerpos de agua naturales. Proceden principalmente de residuos industriales y actividades mineras, estos metales son tóxicos y tienden a acumularse en plantas y animales, incrementando el riesgo de que se transmitan al ser humano a través del agua y/o alimentos (Priyadarshani, Sahu, & Rath, 2011).
- Hidrocarburos: Estos contaminantes ingresan al agua por derrames en refinerías, fugas de aceite y combustible en barcos, así como por descargas continuas de la industria, compuestos como la gasolina, el diésel y el petróleo representan aproximadamente el 48 % de la

contaminación en los océanos, mientras que el petróleo crudo aporta un 29 % (Priyadarshani, Sahu, & Rath, 2011).

- **Pesticidas:** Son introducidos en el ambiente a través de aguas residuales, a causa de las descargas industriales, filtraciones o mediante su uso directo en la agricultura. Las microalgas han demostrado ser capaces de bioacumular estos productos y también de transformarlos, de forma que facilite la remoción (Priyadarshani, Sahu, & Rath, 2011).
- **Fármacos:** Estos compuestos ocasionan daños en organismos acuáticos, causando alteraciones en su forma, función hormonal y comportamiento. Además, contribuyen a la resistencia a antibióticos, la cual puede transmitirse a los seres humanos, dificultando el tratamiento de enfermedades (Sandoval, Morales, & Rubio, 2020).
- **Contaminantes emergentes:** Estas sustancias químicas no se encuentran reguladas y su impacto es aún desconocido. Sin embargo, incluyen productos de higiene personal como protectores solares y cosméticos, hormonas, drogas ilícitas y compuestos perfluorados. En ocasiones las descargas no son completamente tratadas antes de ser emitidas, debido a la falta de regulación y a la escasa comprensión de sus efectos. Algunas especies de microalgas como *Chlorella spp.*, *Scenedesmus* y *Chlamydomonas sp.* han demostrado la capacidad de realizar biorremediación de estos contaminantes, según lo reportado en la tabla 3 (Sandoval, Morales, & Rubio, 2020).

Tabla 3. Métodos y porcentaje de remoción de los principales contaminantes utilizando en la biorremediación con microalgas, (Guerra & Torres, 2025).

Contaminante	Especie	Porcentaje de remoción (%)	Método de biorremediación
Tramadol	<i>Scenedesmus obliquus</i>	0.9	Bioadsorción
Ácido 7-aminocefalosporánico	<i>Chlorella sp.</i> , <i>Chlamydomonas sp.</i>	100	Bioadsorción
Carbamazepina	<i>Chlorella sp.</i> , <i>Consortios de microalgas</i>	>70	Bioadsorción y Biodegradación
Tramadol			
Fluconazol			
Bisfenol A	<i>Chlamydomonas mexicana</i> , <i>Chlorella vulgaris</i>	0.24	Biocaptación
Cafeína	<i>Consortio de microalgas</i>	0.99	Biodegradación
Ciprofloxacina	<i>Chlamydomonas mexicana</i>	0.56	Biodegradación
Ibuprofeno	<i>Chlorella sp.</i> , <i>Consortios de microalgas</i>	98-100	Biodegradación y Biocaptación
Arsenico	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	38.6	Bioadsorción
	<i>Chlorella vulgaris</i>	32.4	Bioadsorción
	<i>Scenedesmus almeriensis</i>	41.7	Bioadsorción
Cadmio	<i>Chlorella sp.</i>	92.5	Bioadsorción
	<i>Scenedesmus sp.</i>	60.5	Bioadsorción
Cromo	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	100	Bioadsorción
	<i>Chlorella minutissima</i>	99.7	Bioadsorción
Plomo	<i>Chlorella sp.</i>	78	Bioadsorción
Mercurio	<i>Chlorella vulgaris</i>	72.9	Bioadsorción
	<i>Spyrogira sp.</i>	76	Bioadsorción

La biorremediación se define, como todo aquel proceso que emplea organismos biológicos, pueden ser microalgas, plantas, bacterias, hongos, etcétera, para la remoción, degradación o transformación de contaminantes, aplicable para el agua y para el suelo, estos procesos pueden llevarse a cabo de forma *in situ*, es decir, en el mismo lugar donde se encuentra el problema de contaminación, o *ex situ*, en donde el material contaminado es traslado para tener condiciones de laboratorio necesarias para ser remediado, en donde se emplean herramientas como biopilas o biorreactores, entre otros (Adams, Fufeyin, Okoro, & Ehinomen, 2015). La biosorción es el mecanismo específico mediante el cual, las microalgas realizan la biorremediación.

La biosorción de metales pesados es un proceso efectivo para la remoción y recuperación de metales de una solución acuosa. Se les considera biosorbentes a los microorganismos utilizados para esta finalidad, como biomaterial para la eliminación de metales diversos estudios muestran la viabilidad del uso de biomasa viva y muerta. Esta tecnología, está basada en la habilidad que poseen ciertas especies de microorganismos para capturar metales en soluciones acuosas, la biomasa puede ser de especies de bacterias, hongos, levaduras y algas, los cuales concentran en su estructura iones metálicos y poseen potencial para la destoxificación y recuperación de metales pesados de aguas residuales. El uso de este tipo de biomasa en combinación de la bioprecipitación, bioadsorción y bioacumulación asegura retirar el metal, debido a una continua entrada de los metales al interior de la célula, la acumulación del metal en el interior del microorganismo supone un riesgo menor en comparación de liberar el metal al ambiente (Serrano Enríquez, MA 2022).

Las microalgas han requerido realizar adaptaciones para remover los metales pesados de las aguas residuales, estas adaptaciones pueden ser genéticas y variar según el género a utilizar, resultando en cambios tanto a nivel genético como fisiológico debido a la exposición a los metales, lo que aumenta su tolerancia a ciertos metales específicos. Las microalgas poseen la capacidad de sobrevivir y reproducirse en ambientes contaminados con metales pesados, algunas muestran tolerancia a metales como el cadmio y el zinc, acumulándolos en vacuolas sin que esto les genere daño, esta resistencia surge de la respuesta de las microalgas frente al medio externo el cual tiene presencia de metales pesados (Insuasty Manrique, MJ, 2017).

Dentro de estas adaptaciones que han desarrollado las microalgas, se diferencian mecanismos intracelulares y extracelulares para que el microorganismo soporte la toxicidad de estos metales pesados (Suresh Kumar, K. 2015). Se ha reportado que el consumo de metales pesados por las microalgas supera a los procesos fisicoquímicos convencionales (Narula, P. 2015; Perales-Vela, H.V. 2006; Suresh Kumar, K. 2015; Vílchez, C. 1997). Además, dependiendo de la capacidad metabólica de cada especie biorremediadora y del tipo de metal será la adquisición y remoción de los metales pesados (Zenhg et al, 2008).

Los mecanismos que causan la unión de a los metales a la superficie celular es a través de interacciones electrostáticas, fuerzas de Van der Waals, unión covalente, interacciones redox, precipitación extracelular o mediante la combinación de esos procesos; además, las microalgas

presentan mecanismos de tolerancia a efluentes con metales, como la detoxificación interna, esta consiste en el depósito de los metales dentro de varios organelos celulares, como las mitocondrias, vacuolas, núcleo, cloroplastos, cuerpos de inclusión (como los polifosfatos) y la pared celular, para reducir su toxicidad. Otro mecanismo es la captación extracelular, esta depende de la composición de la biomasa total y de ciertos parámetros fisicoquímicos que favorecen la absorción y precipitación de los metales. Finalmente, la impermeabilidad y exclusión son un proceso de detoxificación en el cual los iones metálicos no atraviesan la membrana celular, evitando que los metales ingresen a la célula (Salazar, 2005).

Entre los beneficios del uso de microalgas en biorremediación, destacan los bajos costos, la mayor eficiencia y la capacidad de remover contaminantes en concentraciones que en comparación con métodos tradicionales son difíciles de tratar, esto depende del contaminante, además la biomasa generada puede reutilizarse en productos como biofertilizantes, bioplásticos, biofibras, o incluso como alimento para ganado, el cuál es alto en proteínas (Sutherland & Ralph, 2019). En muchas ocasiones, las plantas de tratamiento de aguas residuales también emiten contaminantes en concentraciones altas para el ambiente, pero no son tratadas debido a que son mínimas; por tanto, las microalgas son capaces de removerlos con mayor efectividad (Guerra & Torres, 2025). Las microalgas son capaces de reducir la concentración de ppm a ppb, siendo adecuados para el tratamiento de grandes caudales de agua contaminada con bajas concentraciones (Wang, J. 2006).

Después de una revisión literaria exhaustiva, se puede afirmar la efectividad de remoción de la microalga *Chlorella vulgaris* para los metales pesados está influida directamente por parámetros fisicoquímicos, además, es una gran alternativa amigable con el medio y viable económicamente frente a otros tratamientos convencionales de remoción de metales, es importante considerar que la adsorción de metales presentes en las aguas residuales industriales, varía debido a factores que influyen en la efectividad de adsorción y por ello, es necesario mantener las condiciones adecuadas de pH, temperatura, luz, concentración de metales, nutrientes siendo que estos influyen en su productividad. Se propone la evaluación de alternativas de disposición de microalgas empleadas para la adsorción de metales, a fin de no exponerlos a la intemperie puesto que podría convertirse en un problema ambiental. (Jhadyn, 2019)

Este método se considera viable económicamente, debido a que presenta un 99% de efectividad en el tratamiento de efluentes mineros, siendo que la microalga *Chlorella vulgaris* se adapta fisiológicamente por el estrés de la contaminación y tiene gran afinidad de adsorción de iones de metales pesados debido a la carga negativa (Jhadyn, 2019). Esta microalga habita en condiciones de pH 2-8.2 y temperatura de entre 20 °C - 50 °C, además, tiene gran capacidad en eliminación de Cd (Doshi, Ray, & Kothari, 2007).

Diversas industrias producen y descargan residuos contaminados con estos metales, al ambiente tales como la minería, la industria metalúrgica, la industria energética y producción de combustibles, la industria de fertilizantes y pesticidas, la metalurgia y acero, etc. debido al agua de proceso y

lavado de mineral requerido durante el proceso, como minas inundadas y abandonadas que deben ser bombeadas para garantizar la seguridad de la mina y su entorno (Serrano Enríquez, MA 2022). La normatividad ambiental no siempre toma en cuenta la concentración de metales pesados presentes en el agua, a pesar de que dicho parámetro está considerado dentro de la misma normatividad por ello se exige su cumplimiento, por parte de las industrias de forma que se aplican tratamientos convencionales para mejorar la calidad física y microbiológica del agua antes de ser descargadas a un cuerpo de agua receptor (Jhadyn, 2019). En México la normatividad aplicable es la NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, la cual establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación, en la tabla 2 se establecen los límites permisibles para metales y cianuros.

Con base en lo anterior, se plantea que las microalgas tienen potencial para ser utilizadas en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), generando dos enfoques: En el primer caso, que es el principal enfoque de esta investigación, la PTAR debe incorporar a su tren de tratamiento a las microalgas, considerando que se deben realizar muestreos periódicos del influente. Si en estos muestreos no se detecta presencia de metales pesados, el tratamiento continuará principalmente con la remoción de contaminantes convencionales y algunos emergentes.

En el segundo caso, si al realizar un muestreo o mediante análisis previo se identifica la presencia de metales pesados en el agua residual a tratar por la planta, se puede considerar el uso de microalgas específicamente para la remoción de dichos metales, considerando sus limitaciones y beneficios. Una vez que las microalgas hayan removido los metales pesados del agua, se deberá proceder a su disposición final adecuada o explorar posibles vías de aprovechamiento.

Por tanto, las microalgas pueden ser de utilidad al remover los metales pesados del agua, sin embargo se considerará que posterior a cualquiera de estos procesos o mecanismos no significa que el metal sea inocuo o inactivo de manera irreversible como se detalla en el apartado titulado "mecanismos microalgales para la eliminación de contaminantes", por lo tanto, la biomasa debe ser considerada como contaminada, con metales pesados y por lo cual se debe buscar su respectivo aprovechamiento y/ o disposición final según sea el caso.

Algunos estudios en donde se evaluó la técnica de compostaje como alternativa para el manejo de biomasa contaminada con mercurio procedentes de cuerpos de agua y suelos contaminados, se identificó que el porcentaje de mercurio contenido en el compostaje se perdió o fue liberado al ambiente y con relación a su biodisponibilidad, se encontró en fracciones menos biodisponibles, indicando que no está fácilmente accesible para la biota (José C., 2023).

En caso de que su aprovechamiento no sea posible debido a que la biomasa microalgal contenga metales peligrosos en cantidades o concentraciones que excedan los límites establecidos en la legislación mexicana, en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2019, en la sección sexta establece específicamente en el apartado 6.4.1 "Si el generador sabe que su residuo tiene

alguna de las características de peligrosidad establecidas en esta norma" y en el 6.4.2.2 "Si el generador conoce que el residuo contiene un constituyente tóxico que lo hace peligroso", por lo tanto, en este caso la biomasa debe ser considerada como un residuo peligroso, requiriendo un manejo especializado, incluyendo un tratamiento y disposición final adecuados, que puede incluir incineración o encapsulamiento, según las características peligrosas encontradas en la biomasa y las cuales son establecidas por la propia norma. Es fundamental evitar que esta biomasa contaminada sea usada en la agricultura, ni como alimento para ganado, o en general en el sector agropecuario, asegurando que los metales pesados no se liberen nuevamente al ambiente.

Nutrientes requeridos para el crecimiento de microalgas

Un factor vital para considerar que incide directamente en la velocidad de crecimiento y en la composición bioquímica del cultivo, son los nutrientes (Abalde et al., 1995), la biomasa de microalgas se compone esencialmente de carbono, aproximadamente en un 45 %, posteriormente el nitrógeno representa un 7 % y finalmente el fósforo representando un 1 %, elementos como el oxígeno e hidrógeno son obtenidos directamente del agua (Fernández et al., 2018).

El carbono, nitrógeno y fósforo son elementos esenciales para la microalga, deben ser aportados de forma externa, estableciendo una relación de proporcionalidad, en donde el aporte necesario de estos nutrientes es directamente proporcional a la capacidad de producción de biomasa producida. En cuanto a la subministración de carbono, esta puede ser como carbonato o bicarbonato, sin embargo, es ampliamente recomendado utilizar CO₂ debido a que permite controlar el pH de los cultivos y contribuye a la secuestación de CO₂ atmosférico (Fernández et al., 2018).

En cuestión de la proporción requerida de nutrientes, estos se pueden dividir entre macronutrientes y micronutrientes, los macronutrientes son aquellos que forman parte estructural de las moléculas que integran las microalgas y por ello requieren de elementos como C, N, O, H y P, además de Ca, Mg, S y K. Por otro lado, los micronutrientes son aquellos que forman parte de moléculas esenciales como enzimas o factores de crecimiento, son necesarios para la activación de ciertas enzimas y por ende se requieren en cantidades mínimas, algunos de estos micronutrientes son el Fe, Mn, Cu, Mo y Co, también a veces son requeridas algunas vitaminas en bajas concentraciones como la tiamina, biotina y B12, algunos grupos pueden tener requerimientos específicos, como es el caso de las diatomeas con el silicio (Abalde et al., 1995).

Para mantener un medio de cultivo con los nutrientes suficientes para el crecimiento de las microalgas como lo son los fundamentales, siendo el carbono, nitrógeno, fósforo y azufre, además de otros minerales esenciales como el hierro, magnesio, oligoelementos y, en casos específicos el silicio (Zeng & et al., 2011). En la tabla 4 se muestra la función de cada uno y el rango recomendado.

Para comprender mejor la función de cada nutriente, nos enfocaremos en aquellos esenciales de los cuales se compone la biomasa. Como ya se mencionó anteriormente existe un orden en cuanto a los

elementos que conforman la biomasa de mayor a menor porcentaje, siendo que el carbono constituye cerca del 50 %, por ello se inicia con el estudio de este macronutriente.

Tabla 4. Funciones de los nutrientes en el medio de cultivo, (Johanna et al., 2015)

Nutrientes	Ingredientes principales	Función	Rango conveniente
Fuente de Carbono	CO ₂ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻	Proporcionar Carbono a la célula	1 – 10 g/L
Fuente de Nitrógeno	NO ₃ ⁻ , Urea, N ₂	Proporcionar Nitrógeno a la célula	10 – 2000 mg/L
Fósforo	Hidrofosfato y fosfato	Proporcionar Fosforo a la célula	10 – 500 mg/L
Sulfuros	Sulfato	Proporcionar Azufre a las proteínas y las reacciones	1 – 200 mg/L
Sales inorgánicas	K, Ca, Na y Mg.	Mantener la estructura y actividad celular	0.1 – 100 mg/L
Elementos trazas	Fe, Zn, Mn, Pb, Cd.	Factores coenzima	0.01–10 mg/L
Vitaminas	B, C, E	Ayuda a la división celular	0.01–1000 g/L

La fuente de carbono funge como un limitante, pues proporciona la energía necesaria para el crecimiento microalgal, tanto el orgánico como el inorgánico, la principal fuente es el CO₂, aunque algunos cultivos microalgales heterótrofos y mixotrófos pueden utilizar compuestos orgánicos. Durante el crecimiento fotoautotrófico, el CO₂ también es la fuente de carbono celular y es el único compuesto de carbono que se puede utilizar para el crecimiento (Kaplan et al., 1986; Quevedo, 2006). Como se muestra en la figura 8.

Los cultivos de microalgas heterotróficas son capaces de desarrollarse en la oscuridad, por ello, requieren obtener energía de alguna fuente de carbono orgánico, como acetato o de otras formas como mono, di y polisacáridos de fructosa, sacarosa, lactosa y almidón (Wen & Chen, 2003).

Las técnicas para el suministro de CO₂ son importantes para el cultivo a gran escala, es recomendable la inyección, para contribuir a procesos fotosintéticos (Franco Acosta, 2008). Generalmente se suministra mezclado con aire, el cual produce burbujeo y también funciona para la agitación, existen pérdidas a la atmósfera que son difíciles de controlar, debido a la escasa profundidad de los reactores, las burbujas de CO₂ no permanecen lo suficiente en fase líquida durante el tiempo suficiente para que se disuelva (Becker, 1994). Es la fuente preferida por las microalgas, debido a que se utiliza directamente en los procesos de fijación, además difunde rápidamente el agua al interior de la célula (Franco Acosta, 2008).

Existe una relación entre el carbono y el nitrógeno, la cual afecta la composición de ácidos grasos insaturados, también puede influir el contenido de lípidos y proteínas, en donde una relación baja de C/N favorece el porcentaje de ácidos grasos. Una relación alta de C/N favorece la acumulación de lípidos, causando agotamiento de nitrógeno en el cultivo (Wen & Chen, 2003).

El nitrógeno, después del carbono, es cuantitativamente es el segundo elemento que tiene una mayor contribución a la materia seca de las células microalgas, (Quevedo, 2006; Vaccaro, 1965). La fuente de nitrógeno inorgánico son principalmente nitratos, nitritos y amonio, aunque también se puede utilizar nitrógeno orgánico y en este caso el compuesto más común es urea (Quevedo, 2006; Antia et al., 1985; Fisher y Cowdell, 1982; Kaplan et al., 1986; Neilson y Larson, 1980). Cuando el nitrógeno se incorpora de forma oxidada al medio de cultivo, como nitrato o nitrito, estos deben de ser reducidos antes de incorporarse a la materia orgánica, la reducción del nitrito requiere de ser catalizado mediante el nitrato reductasa (NR) y posteriormente en nitrito reductasa (NiR), una buena fuente de nitrógeno para casi todas las especies de microalgas es la urea (Quevedo, 2006; Syrett, 1987), y el crecimiento es similar al que se obtiene con fuentes inorgánicas, que de aquellas especies de microalgas que utilizan la urea (Kaplan et al., 1986; Vieira y Klaveness, 1986).

De forma general, varias especies de microalgas tienen la capacidad de utilizar nitrógeno orgánico, como lo pueden ser las amidas, urea, glutamina y asparagina, que son considerados una fuente eficaz, así como diversos aminoácidos, entre los cuales se encuentran la glicina, serina, alanina, lisina, arginina, ácido glutámico o ácido aspártico, que también pueden ser utilizados como fuente de nitrógeno (Mora & et al., 2002).

Generalmente, la urea es hidrolizada antes de que su nitrógeno se incorpore a las células microalgales, mediante dos enzimas capaces de metabolizar la urea: la ureasa y la urea amidoliasa, por tanto, las microalgas que metabolizan la urea tienen alguna de las dos enzimas, pero no ambas (Leftley y Syrett, 1973; Syrett, 1987). Uno de los elementos con más influencia en la composición bioquímica es el nitrógeno (Boussiba y Richmond, 1980; Shifrim y Chisholm, 1980; Rajasekaran et al., 1981; Utting, 1985; Cohen, 1986; Vieira y Klaveness, 1986).

De la luz solar, depende fuertemente la asimilación del nitrógeno inorgánico, tanto la intensidad de la luz como de su calidad y puede controlar la asimilación de NO^{-3} mediante la síntesis y la actividad enzimática del nitrato reductasa (NR) (Mora & et al., 2002). Cuando el amonio es la única fuente de nitrógeno, a causa de la asimilación de este compuesto, el pH del medio tiende a fluctuar notablemente y en consecuencia esto puede ocasionar una inhibición del crecimiento y de la producción de algunos ácidos. Algunas fuentes complejas de nitrógeno que también promueven el crecimiento de la mayoría de las especies algales, pueden ser el extracto de levadura, el licor de macerado de maíz y la triptona (Wen & Chen, 2003).

Finalmente, la importancia del fósforo se encuentra en la transferencia de energía de las células, la síntesis de fosfolípidos y ácidos nucleicos (Wen & Chen, 2003; Boney, 1989). Fundamentalmente el fosfato inorgánico es utilizado como fuente de fósforo, cuando existe una deficiencia de esta macronutriente se genera una disminución en la síntesis de ácidos nucleicos, ATP y clorofila, también algo importante a considerar es la relación N/P (Boney, 1989; Quevedo, 2006)

La cantidad requerida de los siguientes nutrientes es variable pero cada uno tiene una utilidad esencial, por lo que se detalla de la siguiente manera. Algunos elementos universalmente necesarios para las microalgas son el sodio, potasio y cloro, debido a que el sodio y el potasio actúan como activadores de enzimas, mientras que el cloro es fundamental durante el proceso de la fotosíntesis, durante el proceso de división celular, el azufre se toma como sulfato inorgánico y es fundamental para efectuar el proceso. El magnesio es parte de la molécula de clorofila y determina la agregación de ribosoma, por otro lado, la cantidad requerida de calcio varía entre las especies, sin embargo, está relacionada con el tipo de pared celular (Kaplan et al., 1986).

Pasando a micronutrientes, estos son requeridos en mínima concentración debido a que si se encuentran en exceso pueden resultar tóxicos (Abalde et al., 1995). Para que el crecimiento sea óptimo, se deben suministrar al cultivo en las cantidades adecuadas, sin embargo, existen variaciones en las cantidades y en los requerimientos nutritivos dependiendo de la especie de microalga e incluso dentro de cada especie existen variaciones en función de las diversas condiciones ambientales y factores como la luz, temperatura, pH, etc. Existe una relación de proporcionalidad, en donde si las condiciones del cultivo permiten una tasa de crecimiento alta de las microalgas, entonces los requerimientos nutritivos aumentan. (Abalde et al., 1995)

De entre estos micronutrientes, el primero de ellos es el hierro ya que es necesario para todas las especies de microalgas, es vital para el metabolismo del nitrógeno, el proceso de fotosíntesis y la síntesis de citocromos, el molibdeno también es necesario para la asimilación del nitrógeno, otros micronutrientes importantes son el manganeso y el cobre ya que forman parte de la cadena de transporte electrónico y son cofactores de muchos enzimas (Abalde et al., 1995).

El cobalto es indispensable para aquellas microalgas que sintetizan la vitamina B12, sin embargo, si la microalga no sintetiza la vitamina, entonces no requiere cobalto, pero sí requiere la vitamina, también a veces, se requieren de bajas concentraciones de tiamina y biotina. Además, se rectifica que los requerimientos de tipo general para las microalgas son variables, debido a que ciertos grupos pueden tener requerimientos específicos, como las diatomeas con el silicio (Abalde et al., 1995).

Con base en lo anterior, se detecta que la incorporación de nutrientes y el crecimiento microalgal no siguen una relación simple pues, si bien dependen la una de la otra, también dependen de otros factores tales como las concentraciones internas y externas del cultivo, tasas de difusión, de la especie, etc, debido a esta variabilidad de factores, las concentraciones de nutrientes requeridas para el crecimiento y desarrollo microalgal, resulta vital conocer los requerimientos específicos del cultivo de interés, para alcanzar una productividad óptima en cultivos masivos se sugieren concentraciones de entre 2 y 619 mg de N por litro (Eyster, 1967; Shelef et al., 1980).

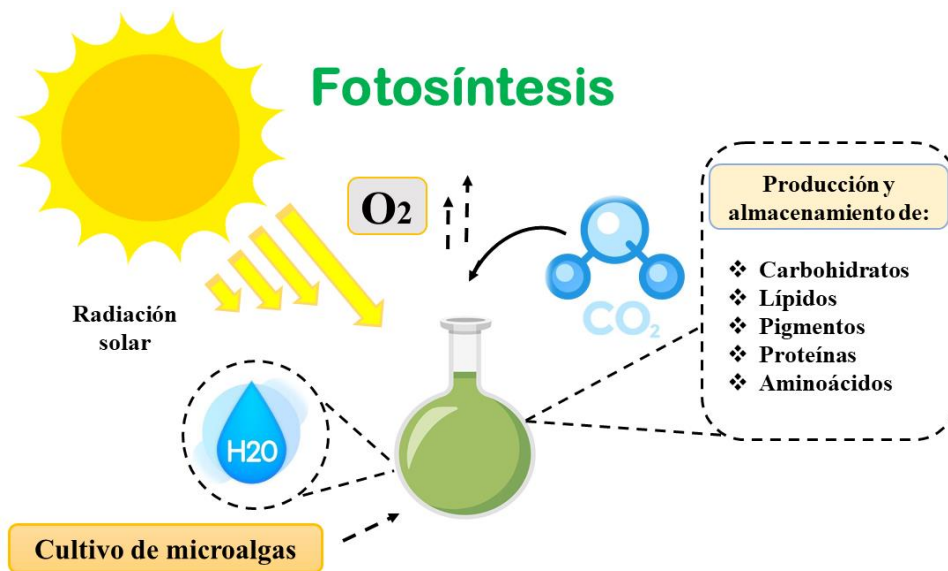


Figura 9. Esquema del proceso de fotosíntesis de las microalgas y sus compuestos bioactivos, (Alemán R. et al., 2013)

Parámetros de cultivo

El científico Justus von Liebig, formuló la ley del mínimo, el concepto de factor limitante sólo se aplica a deficiencias en nutrientes químico, sin embargo, el concepto se ha ido ampliando hasta incluir parámetros físicos, para entender la relación con el crecimiento de las microalgas, de esta forma, el factor que limita el crecimiento no es necesariamente el más presente, sino aquel que se encuentra en condiciones más cercanas al mínimo necesario para que la microalga pueda crecer. Es decir, si alguna de las condiciones externas o internas o recursos esenciales como nutrientes, luz, agua o gases se encuentran en una cantidad escasa y se acerca a ese mínimo crítico, este será el factor que determinará cuánto puede crecer la microalga. El concepto se amplió nuevamente cuando se reconoció que los parámetros ambientales podrían limitar el crecimiento por exceso (Abalde et al., 1995).

A continuación, se describe cada uno de estos parámetros debido a que afectan directamente el crecimiento de las microalgas y el efecto que tienen sobre el cultivo masivo de estos microorganismos. Entre estos parámetros, se encuentran, la distribución e intensidad de la luz dentro del reactor, la temperatura, el tiempo de retención, mezcla de los medios de cultivo o la agitación, el intercambio gaseoso, el pH, entre otros (Johanna et al., 2015).

Es esencial tomar en cuenta que cada especie cuenta con condiciones óptimas de salinidad, temperatura o pH, y los sistemas de producción deben diseñarse y operarse, como cualquier otro microorganismo, si las microalgas se mantienen en un rango óptimo de cultivo entonces se puede maximizar su rendimiento (Fernández et al., 2018). En sistemas naturales, cuando una microalga tiene éxito en su adaptación a un ecosistema, normalmente significa que es flexible en sus

requerimientos e interacciones al menos lo suficiente para sobrevivir (Darley, 1987). Esta flexibilidad es conveniente en sistemas de cultivo microalgales con condiciones controladas (Vonshak, 1986).

Es vital conocer las condiciones óptimas y los límites de tolerancia de la microalga de interés, para cada uno de los parámetros o en su caso el de la mayoría de ellos debido a que las condiciones óptimas o los límites máximos o mínimos de un parámetro dependen de la situación de otros parámetros, lo cual causa fluctuaciones (Darley, 1987). Cuando los límites mínimos y máximos de tolerancia por parte de estos microorganismos son excedido para cualquier parámetro de cultivo, puede ocasionar diversas afectaciones a la microalga o causar directamente su muerte.

Al abordar un cultivo de microalgas, en los momentos iniciales y un factor esencial a considerar es la concentración inicial óptima o tamaño del inóculo, debido a que, en la etapas o procesos posteriores del cultivo, dependen en parte de este factor. Por tanto, la calidad del inóculo debe comprobarse a cada paso de las distintas etapas del cultivo, tomando en cuenta que el inóculo inicial debe estar constituido por células de una sola especie (monocultivo) para considerarse en buen estado y no contaminado. Existe una concentración óptima de inóculo, de forma que se maximice la eficiencia sin encarecer demasiado el proceso (Abalde et al., 1995).

Debido a que, aunque parecería que tener más microorganismos podrían acelerar el proceso, en realidad no resulta rentable económicamente porque los costos adicionales no se compensan con los beneficios obtenidos, al mismo tiempo que si la concentración inicial es alta, se produce un efecto de competencia, en donde los microorganismos no obtienen la energía de manera suficiente debido al efecto del ensombrecimiento, causando que entre ellos tapan la luz disponible para todos, disminuyendo la eficiencia. Por otro lado, si la concentración inicial es baja, estos pueden tener afectaciones por efecto de la fotooxidación en donde pueden existir daños en las células o a los microorganismos debido a la exposición excesiva a la luz, así como otras causas, lo que ocasiona que no se aproveche correctamente la luz, la energía, reduciendo la productividad (Abalde et al., 1995).

Generalmente los cultivos se desarrollan en foto o bioreactores de alta eficiencia, manteniendo condiciones controladas de temperatura, pH, nutrientes, entre otros parámetros para asegurar la pureza del monocultivo, independientemente de las condiciones y de requerimientos de cada especie de microalga, de forma general, estas se reproducen con gran rapidez, aproximadamente una generación cada 20 o 30 minutos, por lo que al ser cultivadas en un ambiente adecuado pueden generar una gran cantidad de biomasa en pocas horas (Bahadar A, BilalKhan M, 2013).

Por tanto, la luz constituye un factor fundamental en todo cultivo de microalgas debido a que también interrelaciona con otros parámetros, además es la fuente de energía para realizar el proceso de fotosíntesis, por lo que, tanto la intensidad luminosa como la longitud de onda y el fotoperíodo, marcan el mecanismo para muchos ritmos circadianos, afectan al crecimiento y metabolismo

microalgal. El rango del espectro de la radiación utilizable fotosintéticamente se encuentra dentro del espectro visible 400 - 700 nm (Lips y Avissar, 1986).

Las microalgas son organismos fotoautótrofos que, en términos generales, utilizan la energía radiante durante la fotosíntesis. La velocidad de la fotosíntesis celular (F) la cual refleja la capacidad de captar fotones, depende de la cantidad de luz que reciben las células. De forma que cuando la intensidad luminosa es baja, la tasa de fotosíntesis aumenta conforme aumenta la luz. Sin embargo, cuando la intensidad excede un nivel específico de la especie, denotado como E_k , la constante de saturación el cual indica el nivel de energía luminosa en el que la fotosíntesis comienza a saturarse, sólo se producen pequeños cambios en F. Además, un excedente en la intensidad lumínica puede inhibir los fotosistemas celulares, dañando los cultivos y en casos extremos causa daños irreversibles (Johanna et al., 2015).

La temperatura es otro parámetro fundamental para el crecimiento de las microalgas, ya que la biomasa microalgal responde continuamente a la temperatura ambiental, de forma que la temperatura celular se iguala a la temperatura del medio de cultivo, además afecta las reacciones celulares, así como la naturaleza del metabolismo, los requerimientos nutricionales y la composición de la biomasa, cuando este parámetro se encuentra dentro de los rangos óptimos tiene poca influencia sobre la concentración final de biomasa, así como sobre la producción y la composición bioquímica de las microalgas, existe una relación entre la actividad biológica y la temperatura, por tanto influye en la tasa de crecimiento (Abalde et al., 1995). La mayoría de las especies de microalgas muestra un crecimiento óptimo dentro del rango de 20 a 30 °C, algunas cepas pueden alcanzar crecimientos por encima de los 30 °C, como es el caso de *Scenedesmus* y la cianobacteria *Anabaena* (Clares et al., 2014; Sánchez et al., 2008).

El pH es otro de los factores más importantes en el cultivo microalgal, debido a que estos microorganismos muestran una clara dependencia al pH del medio de cultivo y su tolerancia, así como respuesta a la fluctuación de este parámetro, para cada especie varían ampliamente debido a que un descenso de pH suele ser letal, en cambio si no se excede el límite, de forma general suelen soportar mejor los aumentos de pH, cada especie presenta un pH óptimo para su cultivo, normalmente se encuentra entre 7 y 8 (Richmond, 1986). Este parámetro determina la solubilidad de CO₂ y minerales, así como la manera en que están distribuidas las diferentes formas inorgánicas de carbono, influyendo en el metabolismo de las microalgas (Richmond & Grobbelaar, 1986).

El pH influye en la solubilidad de diversos compuestos metálicos, y un aumento en el pH puede ocasionar que algunos elementos trazan se vuelvan deficientes. El pH del medio puede variar durante el crecimiento fotosintético de las microalgas, si este llega a alcanzar un valor de 9, el carbonato puede precipitarse, lo que significa que los nutrientes dejan de estar disponibles para las microalgas (Richmond & Grobbelaar, 1986).

En cuanto a la concentración de sales inorgánicas disueltas, este parámetro puede potencialmente afectar al crecimiento de las microalgas en función de su actividad osmótica, esto se aplica tanto en microalgas de agua dulce como de agua marina, nuevamente este parámetro varía según las especie debido a que algunas pueden tolerar concentraciones en milimolares de sal mientras que otras sobreviven en soluciones saturadas, lo que supone un estrés salino letal para un grupo de microalgas, es fácilmente tolerado por otro grupo, respecto a la adaptación de la salinidad, las algas pueden dividirse en halotolerantes y halofílicas (Abalde et al., 1995). Cepas comúnmente utilizadas de agua dulce son *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Spirulina*, algunas cepas de agua salada o marina son la *Nannochloropsis*, *T-ISO*, *Tetraselmis* (Fernández et al., 2018). Un ejemplo de cepas tolerantes a medios hipersalinos, es la *Dunaliella*, la tolerancia a estas condiciones reduce la probabilidad de contaminación por otras cepas. (Clares et al., 2014; Sánchez et al., 2008).

El mezclado o agitación, puede inducirse mediante diversas formas, se emplean comúnmente debido a su sencillez y porque puede diseñarse para inducir un esfuerzo mínimo, que no ocasione daño mecánico en las células, son los sistemas basados en la aireación, aire comprimido en columnas burbujeadas o airlift (Sánchez & et al., 2000). Cuando los requerimientos y las condiciones ambientales son satisfactorias, la agitación constituye un requisito importante para obtener un alto rendimiento de biomasa microalgal (Richmond y Becker, 1986).

El mezclado de un cultivo incide de forma directa en la incidencia de la luz, un mejor régimen de iluminación, sin embargo, esto puede ocasionar daño en las células. Existen parámetros que varían y dependen de cada especie cultivada, como la fragilidad celular, las características fotosintéticas entre otros factores, por tanto, la fragilidad celular frecuentemente es un factor limitante en la intensidad de mezclado que puede emplearse en un medio de cultivo (Gudin & Chaumont, 1983).

Asimismo, la agitación mejora el intercambio de gases, previene que las células se depositen en el fondo, y evita la formación de gradientes en las condiciones ambientales y de nutrientes, la principal función es garantizar que todas las células tengan acceso a las áreas iluminadas dentro de un foto o biorreactor (Ugwu, Ogbonna, & Tanaka, 2002).

Un factor estrechamente relacionado con la agitación es la velocidad del medio de cultivo, pues se requiere asegurar un flujo turbulento, que evite el crecimiento en la pared del reactor y que evite la sedimentación de las células en la parte inferior, también que considere un régimen de iluminación favorable para realizar la fotosíntesis (Molina & et al., 1999). De forma general, una disminución de velocidad en la circulación del líquido de <math><15\text{cm/s}</math>, casi siempre produce crecimiento en la pared y ocasiona una inhibición del crecimiento por altas concentraciones de oxígeno disuelto. En la mayoría de los casos, la velocidad de líquido apropiada es de 30–50 cm/s (Johanna et al., 2015).

Cuando el oxígeno disuelto generado por las microalgas durante la fotosíntesis alcanza una concentración alta, puede ocasionar que se inhiba el proceso, lo que se conoce como efecto Warburg (inhibición por producto final), esto puede disminuir la producción del cultivo. Para reducir este

riesgo, es recomendable emplear la agitación, esto causa que el oxígeno pase a ser atmosférico y se de esta manera se disminuye su acumulación en el medio (Johanna et al., 2015).

El metabolismo, el medio de cultivo y la especie de microalgas también están relacionados por el tiempo de retención, según (Droop, 1983). El tiempo de retención, en este contexto, se refiere al período que transcurre entre cada renovación del medio, siempre que el sistema esté en equilibrio dinámico, idealmente dicho intervalo debe coincidir con el tiempo que las microalgas requieren para consumir eficientemente los nutrientes suministrados. Si el período es demasiado corto, se puede retirar a microalgas que aún están en crecimiento, si es demasiado largo, puede generar deficiencias de nutrientes y causar malformaciones en las microalgas (Oron & Sfielee, 1981).

Vinculado al tiempo de retención está la densidad del cultivo, pues cuando la densidad es muy alta, la luz que recibe cada microalga se reduce, convirtiéndose en una limitación para la producción en masa. Por ello, es importante regular la densidad celular en el cultivo y evitar el auto sombreado, se puede lograr ajustando el tiempo de retención (Hartig y col., 1988) o reduciendo el diámetro de los reactores, de modo que se aumente el área superficial expuesta a la luz (Johanna et al., 2015).

El desarrollo de esta tecnología continúa en años recientes, aplicando métodos avanzados de control para la producción industrial de microalgas, reduciendo los costos, mejorando el rendimiento de procesos microalgales (Pawlowski et al., 2014). Mediante un profundo análisis de las variables de cultivo y su continuo control a lo largo de las diferentes etapas se puede maximizar el rendimiento de producción de microalgas a gran escala. (Fernández et al., 2018)

Finalmente, en cuanto al control de los sistemas de producción de microalgas se debe considerar que existen variaciones en los parámetros de cultivo bien diferenciadas, estas son generadas por la ubicación seleccionada, las variaciones se presentan a lo largo del año y también afectan las variaciones diarias, debido a las condiciones climáticas en especial las relacionadas a la radiación solar, por último es importante considerar el tiempo requerido para mezclar completamente el sistema, esto influye en el gradiente de luz y nutrientes dentro del reactor. (Fernández et al., 2018)

Cultivo, cosecha y secado de microalgas

Entonces, como ya se mencionó el sistema de cultivo básico consiste en tanques abiertos utilizados para la producción de microalgas, con una productividad muy variable dependiendo de la especie, condiciones externas e internas, (Dewi et al., 2018) como nutrientes, entre otros parámetros, dentro de la productivo de biomasa en las etapas finales, la cosecha resulta crítica para la viabilidad del sistema, debido al alto consumo energético que requiere el proceso de separar la biomasa del medio de cultivo (Sander and Murthy 2010; Campbell et al. 2009; Oilgae 2009; Li et al. 2008).

Este proceso de cultivo es necesario debido a que, la biomasa húmeda obtenida al final es inestable y tiende a degradarse rápidamente, perdiendo calidad. Con la finalidad, de evitar la degradación de la biomasa húmeda, se deben aplicar métodos de procesamiento, se recomienda el uso de extracción

con soluciones acuosas o la hidrólisis enzimática, filtros, membranas o centrifugación, de forma que se produzca un lodo o pasta final, posteriormente se procede a su deshidratación final (Romero García et al., 2012, Xu et al., 2011). Como se muestra en la figura 9

Existen diferentes tecnologías para el secado de biomasa (Manubhai Patel et al., 2013; Acién et al., 2012), de entre los métodos más utilizados son el secado al sol, el secado por aspersión, tambor de secado, entre otros (Jaramillo, 2011), la liofilización es la más común, sin embargo, es un proceso costoso que resulta adecuado sólo para aplicaciones a gran escala, debido a que requiere de una inversión considerable, consumo de electricidad y tiempo (Manubhai Patel et al., 2013; Acién et al., 2012). Se proponen secadores por aspersión como una alternativa, ya que esta tecnología pulveriza la biomasa, el material seco se convierte en partículas casi al instante y debido a su bajo costo, gradualmente se ha convertido en el método más utilizado (Ortiz et al., 2020; Vázquez-Romero et al., 2022; Vilatte et al., 2023). La utilización de este tipo de secadores genera una buena calidad de la biomasa al término del secado, sin embargo, el inconveniente de este método es que demanda una cantidad considerable de energía, la cual generalmente es proporcionada mediante combustibles fósiles (Yang et al., 2017).

Otras tecnologías alternativas son los secadores rotatorios o de lecho fluidizado, ya que también son adecuadas, pero no son comúnmente utilizados con microalgas debido que al igual que los secadores por aspersión y atomización, se fuente de energía implica el consumo de grandes cantidades de combustibles fósiles (Bennamoun et al., 2013; Leach et al., 1998).

Como alternativa a este consumo, se propone la utilización de tecnologías híbridas, que integran activamente la radiación solar como fuente de energía, diseñado equipos que reduzcan el consumo de combustible para el proceso de secado, la viabilidad teórica de este sistema depende de la aplicación activa de la energía solar en el proceso de microalgas, en múltiples procesos de secado e incluso a procesos industriales que también pueden ser adaptados (Pastor et al., 2023)

Incorporar la energía térmica proveniente del sol al proceso de secado de biomasa, puede sustituir en su totalidad a los combustibles fósiles y al mismo tiempo reduce el costo de esta etapa al 49 % en comparación con el costo requerido por los secadores convencionales (Pastor et al., 2023). Asimismo, debido a la naturaleza pasiva de la energía solar, su capacidad de producción es limitada y reduce así la calidad de la biomasa, (Belessiotis y Delyannis, 2011; Pinna-Hernández et al., Silva et al., 2021). Alternativamente, la biomasa cosechada puede congelarse o estabilizarse a baja temperatura, aunque para aplicaciones a gran escala el secado es el procedimiento más adecuado (Xu et al., 2011; Nireesha et al., 2013; Chen et al., 2015; Foo et al., 2023).

Por lo tanto, el sistema propuesto ofrece ventajas significativas y tiene potencial para aplicaciones futuras, sin embargo, es necesaria la validación de un prototipo industrial que verifique los diversos resultados obtenidos por investigaciones (Pastor et al., 2023). Es esencial considerar que existen

fluctuaciones de la energía solar a lo largo del día debido a condiciones climáticas y que un aumento en la intensidad solar también puede afectar negativamente la calidad de la biomasa.

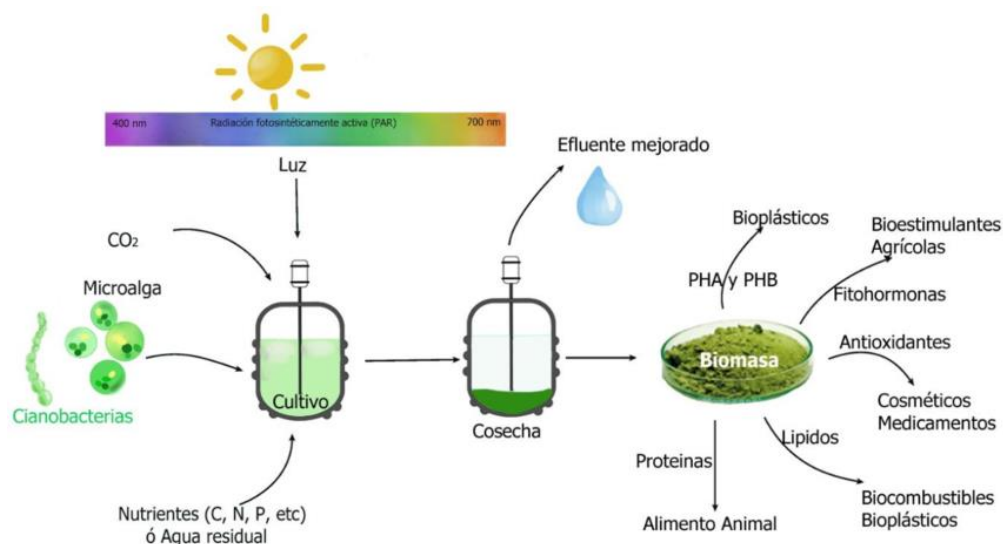


Figura 10. Proceso de cultivo de microalgas, (Álvarez et al., 2023)

Microalgas de interés económico

A lo largo de la investigación, se muestra que diversas cepas y especies de microalgas se han estudiado y usado para diversos fines, pero de forma general se tiene la finalidad de cultivarlas masivamente para obtener cantidades de biomasa elevadas y producir diferentes productos de interés o valor agregado. A continuación, se citan algunas de las especies más utilizadas conforme a su uso. (Abalde et al., 1995)

- "Como fuente de EPA: *Heteromastix* (Prasinoficea), *Phaeodactylum*, *Nitzschia*, *Amphora*, *Naucula*, *Thalassiosira*, *Biddulphia*, *Ditylum*, *Lauderia*, *Asterionella* (Diatomeas), *Emiliana*, *Pseudopedinella*, *Cricosphaera*, *Isochrysis* (Haptoficeas), *Prorocentrum*, *Peridinium*, *Gonyaulax*, *Amphidinium* (Pirrófitas)" (Abalde et al., 1995).
- "Como fuente de antibióticos: *Gomphosphaeria*, *Scytonema* (cianobacterias), *Stichococcus mirabilis*, *Chlorella*, *Ochromonas danica*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Asterionella japonica*. Antivírico y antifúngico en *A. notata* " (Abalde et al., 1995).
- "Como fertilizantes agrícolas: *Nostoc* y *Tolypothrix* (cianobacterias)" (Abalde et al., 1995).
- "Como fuente de ácido linoleico y linoléico: *Chlamydomonas*, *Dunaliella*, *Chlorella*, *Prymnesium*, *Isochrysis*, *Dicrateria* " (Abalde et al., 1995).
- "Como fuente de enzimas de restricción: varias especies de *Anabaena*, *Matigocladus laminosus* y *Microcoleus*" (Abalde et al., 1995).
- "Como productoras de metano: *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Euglena*, *Melosira*, *Oscillatoria*, *Synechocystis*, *Oscillatoria*, *Anabaena*" (Abalde et al., 1995). Diferentes cepas de

Scenedesmus con bacterias o cultivos mixtos de *Scenedesmus* y *Chlorella*, se han usado como sustrato en la digestión anaeróbica para producir metano (Eisenberg et al., 1979).

A continuación, se enlistan las especies de microalgas y se especificarán sus diversas aplicaciones.

1. *Chlorella*: La biomasa de esta microalga se produce autotrófica y heterotróficamente (Oh-Hama y Myachi, 1988). Su producción a escala comercial está relativamente extendida en el sureste asiático, mientras que en otros lugares existe una variedad de especies (Soong, 1980). El producto de *Chlorella* se distribuye como píldoras o polvo en el mercado alimenticio, de esta especie se extrae el Factor de Crecimiento de *Chlorella* (*Chlorella* Growth Factor, CGF), el cual mejora el crecimiento de las bacterias lácticas. (Abalde et al., 1995). Algunas cepas termofílicas obtenidas a través de procesos mutagénicos presentan una producción de luteína elevada, pigmento utilizado en la industria alimenticia (Cohen, 1986), y también se ha propuesto como productora de almidón a nivel comercial (Pint y Pint, 1977).
2. Spirulina: La producción comercial de Spirulina se realiza en países como México, Taiwán, Tailandia, California, Japón, Israel y en la India, dentro de sistemas agrícolas integrados. La pared celular, formada por mucoproteínas, es más fácil de digerir en comparación con otras especies, además de ser rica en vitaminas del grupo B (B12, B1, B2 y B3) y minerales como el hierro, también se emplea como alimento para peces ornamentales para mejorar su color, otros compuestos presentes en esta especie incluyen el caroteno, aunque generalmente no se aíslan para su venta, y los ácidos grasos insaturados esenciales, siendo *S. platensis* el organismo fotoautotrófico que contiene la mayor cantidad de ácido linoleico. En el lago Texcoco se cultiva *S. máxima*, cuya biomasa ha sido utilizada como complemento alimenticio en la dieta humana desde tiempos antiguos debido a su alto contenido proteico y su bajo porcentaje de ácidos nucleicos (alrededor del 4 %). (Richmond, 1986, 1990)
3. *Dunaliella*: Las especies más importantes son *D. salina* (bardawil), *D. parva* y *D. viridis*, de ellas se extrae principalmente el p-caroteno, glicerol y proteína, la *D. salina*, posee mayor contenido en P-caroteno. Diferentes compuestos bioquímicos que incluyen: enzimas, vitaminas, ácidos grasos y reguladores del crecimiento, se comercializa la dihidroxiacetona reductasa o glicerol deshidrogenasa (Ben-Amotz & Avron, 1989).
4. *Scenedesmus*: *S. acutus* es la especie más comercializada de esta microalga debido a que se utiliza como complemento dietético para humanos y animales monogátricos por su contenido proteico (SCP) y por su patrón de ácidos grasos (Becker, 1994), esta microalga se ha utilizado también en dietas de adelgazamiento debido a que su ingestión media hora antes de las comidas reduce el apetito. También en la industria del perfume se han aislado algunos componentes bioquímicos menores de interés, en Checoslovaquia se utilizan ungüentos para el tratamiento de personas con úlceras en la piel, quemaduras, heridas, que contienen un 20% del extracto alcohólico de *Scenedesmus acutus* (Abalde et al., 1995).

5. *Phaeodactylum*: la especie *P. tricornutum* en condiciones de limitación de nitrógeno, es capaz de producir y acumular altos niveles de lípidos (>34 % de su peso seco), puede desarrollarse en cultivos densos, con tasas de producción muy altas y contiene grandes cantidades de palmítico y hexadecanoico, ácidos poliénoicos y en menor cantidad ácido linoléico (Thomas et al. , 1984).
6. *Porphyridium*: Durante su fase de crecimiento, estas especies *P. cruentum* y *P. aeruginosum* (esta última patentada) producen grandes cantidades de un exopolisacárido soluble en agua, que tiene interés comercial por sus propiedades gelificantes. El polisacárido de *P. aeruginosum* se usa para ayudar a extraer petróleo en zonas arenosas, separando el petróleo mediante un líquido acuoso que contiene este polisacárido (Savins, 1978; Percival y Foyle, 1979). Una fuente comercial de ácido araquidónico es *P. cruentum*, un precursor de las prostaglandinas, y en sus cultivos puede contener hasta un 36 % de este ácido en relación al total de ácidos grasos (Ahern et al., 1983). Además, se extraen pigmentos como la ficocianina y la ficoeritrina, siendo esta última el pigmento principal y responsable del característico color rojo de la microalga. También se obtiene de esta especie una enzima llamada superóxido dismutasa (SOD), que se usa comercialmente como un agente terapéutico para tratar varias enfermedades (Cohen, 1986; Abalde et al., 1995).
7. *Botryococcus braunii*: Acumula grandes cantidades de hidrocarburos, especialmente de cadena larga como C27 y C31 y principalmente C34 que ha sido propuesto como como fuente de combustibles renovables y lubricante, ya que estos compuestos son similares a la composición del petróleo crudo (Bachofen, 1982).
8. *Chlamydomonas*: Se cultiva a pequeña escala de forma comercial y se utiliza como mejorador de algunos tipos de suelos, ya que aumenta la concentración de carbohidratos de los suelos, así como su capacidad de retención de agua (Metting y Rayburn, 1983).

Biocompuestos y subproductos de las microalgas: aplicaciones industriales futuras

Las microalgas poseen un gran potencial de aplicación en diversas industrias, sin embargo, pocas son explotadas a nivel comercial en la actualidad, el resto se encuentran en etapa de desarrollo e investigación para buscar el máximo aprovechamiento de este tipo de microorganismos (Voort et al., 2015). Aunque, la mayoría de los estudios y revisiones existentes se enfocan en el uso de sistemas de microalgas para eliminar uno o dos tipos de contaminantes (Amaro et al., 2023). Diversas áreas han optado por aprovechar la biomasa de microalgas que generan para elaborar y fabricar diferentes productos en los sectores de alimentos y farmacéutico, utilizando esta biomasa para desarrollar suplementos nutricionales y terapias biomédicas. Por otro lado, la bioenergía ha decidido emplear los carbohidratos y lípidos presentes en las microalgas para producir biocombustibles, tanto gaseosos como líquidos, como el biohidrógeno, biogás, bioetanol y biodiésel,

estos combustibles pueden reemplazar a los derivados del petróleo, que emiten contaminantes y contribuyen al calentamiento global (Alemán R. et al., 2013),

Las aplicaciones de las microalgas se pueden clasificar en cinco principales grupos, en función de los requerimientos de seguridad de los mercados (Voort et al., 2015) y se detalla cada aplicación.

- Obtención de productos de consumo humano, principalmente alimentos y nutraceuticos (Voort et al., 2015)

Las microalgas tienen aplicaciones de gran valor y se les considera como un alimento súper nutritivo principalmente para el consumo humano, productos cosméticos, incluyendo alimentos, farmacéuticos y nutraceuticos (Borowitzka, 2013), debido al alto contenido de compuestos bioactivos (Silva et al., 2019). La biomasa es rica en proteínas, lípidos y carbohidratos de alta calidad, además de contener aminoácidos esenciales y ácidos grasos poliinsaturados, esteroides y carotenoides con propiedades antioxidantes (Vigani et al., 2015), aun considerando que existe una variabilidad en la producción de estos compuestos, debido a que la composición bioquímica de la biomasa, se ve afectada por la versatilidad metabólica de cada especie y, a modificaciones de las condiciones físico-químicas del cultivo (Maldonado, Morales y Romero, 2014).

Sin embargo, la biomasa microalgal es perecedera, degradando rápidamente los compuestos de interés debido a su alto contenido de humedad (Silva et al., 2019). Para evitar y prevenir este problema, se deben utilizar técnicas de preservación como el secado, para facilitar el transporte y traslado por más tiempo, considerando que el producto debe durar desde la producción de microalgas en las plantas de procesamiento hasta llegar al consumidor final (Costa et al., 2016).

Este grupo se subdivide en tres grupos, los cuales son industria farmacéutica, cosmética y productos para consumo humano, sus respectivas aplicaciones se explican a detalle a continuación.

Industria farmacéutica: ha enfocado su atención hacia los microorganismos fototróficos acuáticos debido a que representan un vasto recurso biológico marino que permanece en gran medida inexplorado, como una fuente prometedora de compuestos bioactivos con propiedades antiproliferativas, antivirales y antibacterianas (Dewi et al., 2018). Estos microorganismos poseen un notable potencial para la producción de productos farmacéuticos, incluyendo aminoácidos esenciales, carotenoides, ácidos grasos poliinsaturados, vitaminas y compuestos antioxidantes. Particularmente, las especies *S. limacinum* y *Cryptocodinium cohnii* destacan por su elevado contenido de ácidos grasos omega-3, específicamente ácido docosahexaenoico (DHA) y ácido eicosapentaenoico (EPA), componentes fundamentales en la prevención de patologías cardiovasculares (Suali & Sarbatly, 2012).

Las microalgas del género *Arthrospira* se caracterizan por su excepcional contenido proteico y valor nutricional, además posee propiedades terapéuticas, estas especies contribuyen al manejo de la hiperlipidemia mediante la reducción de las concentraciones lipídicas sanguíneas, favorecen la

disminución de la presión arterial, ejercen efectos protectores contra el daño renal y estimulan el crecimiento de *Lactobacillus* beneficiosos en el microbiota intestinal (Johanna et al., 2015).

Las microalgas de especie *Chlorella*, destacan comercialmente por más de 70 empresas a nivel mundial, debido a el β -1,3-glucan, que constituye el componente bioactivo más relevante en esta especie, este polisacárido funciona como un inmuno estabilizador activo y agente reductor de radicales libres, contribuyendo a la disminución de los lípidos sanguíneos. Adicionalmente, se han documentado sus efectos terapéuticos en el tratamiento de úlceras gástricas, la prevención de arteriosclerosis y su actividad antitumoral (Toledo, 2010).

La producción de pigmento luteína, previene la formación de cataratas o diversos tipos de cánceres, por ello especies como *Scenedesmus*, *Muriellopsis* o *Chlorella* atraen interés y especies como *Chlorella sp.*, *Chlamydomonas reinhardtii* o *Stichococcus mirabilis* producen antibióticos y ciertos ácidos grasos, como el ácido eicosapentaenoico (EPA), tienen la capacidad de actuar como antiinflamatorios. Una microalga utilizada como preparado terapéutico, es la *Porphyridium*, de la cual se extrae la enzima superóxido dismutasa (SOD) (Granado et al., 2003; Krinsky et al., 2003).

Las propiedades antioxidantes de las microalgas representan un área de interés terapéutico para el tratamiento de enfermedades asociadas con el estrés oxidativo, como la degeneración macular y diversos procesos inflamatorios. Estas propiedades también resultan valiosas en la prevención de desarrollos tumorales, incluyendo cánceres de piel, mama y colon, lo que posiciona a estos compuestos como aditivos alimentarios de alto valor funcional (Gómez & et al., 2009).

Pigmentos Carotenoides: Estos pigmentos se emplean en diversos ámbitos, incluyendo suplementos nutricionales, tintes, productos farmacéuticos, cosméticos y alimentos para animales, estudios recientes han evidenciado que los carotenoides tienen la capacidad de reducir riesgos asociados a varias enfermedades degenerativas, como el cáncer, problemas cardiovasculares, cataratas y la degeneración macular (Valduga & et al., 2009). Además, los carotenoides son pigmentos de gran interés comercial por su función como pigmentos fotoprotectores en la fotosíntesis, algunas especies pueden acumular altas concentraciones de beta-caroteno, como la astaxantina y la cantaxantina, que se utilizan ampliamente como colorantes naturales y antioxidantes en diferentes industrias (Johanna et al., 2015).

Los carotenoides son compuestos lipofílicos derivados del isopreno, que producen todos los organismos fotosintéticos, como plantas, algas y cianobacterias, en la naturaleza principalmente dos tipos de carotenoides: carotenoides, como el β -caroteno, que son hidrocarburos lineales que pueden cerrarse en uno o ambos extremos formando anillos; y los derivados oxigenados de carotenoides, conocidos como xantofilas, que incluyen compuestos como la luteína, la violaxantina, la neoxantina y la zeaxantina (Valduga & et al., 2009).

Astaxantina: Es una molécula de origen natural que despierta el interés científico y comercial, debido a su alto valor agregado y a sus amplias posibilidades de aplicación.

En la industria farmacéutica, se utiliza como marcador para el seguimiento de células, además de sus propiedades antioxidantes y antitumorales, en cosmética, actúa como colorante y antioxidante en diversos productos, en la industria alimentaria, se emplea como suplemento y aditivo para la coloración de distintos productos, además de ser añadido en la dieta de aves de corral para intensificar el color de las yemas de los huevos y también en la acuicultura, se utiliza como fuente de pigmentación en la alimentación de crustáceos como camarones y langostas (Salazar, 2000).

Industria cosmética: En Francia se sitúan los primeros laboratorios especializados en la investigación y comercialización de cosméticos que incorporan a su composición algas marinas, produciendo productos como jabones, cremas de afeitar, champús, tintes, lápices de labios, tónicos, productos de maquillaje, espumas o productos de baño (Viscasillas & Del Pozo, 2005).

Las algas tienen la capacidad de absorber y concentrar compuestos importantes para la salud humana, algunos de estos compuestos son vitaminas, minerales, oligoelementos, aminoácidos, entre otros, los cuales ayudan a mantener el buen aspecto de la piel (Viscasillas & Del Pozo, 2005), es por ello que los extractos de microalgas pueden ser encontrados en productos para la cara y piel, como cremas, protector solar, productos refrescantes y regenerativos, además del cuidado del cabello. (Spolaroe & et al., 2006) y (Toledo, 2010).

La especie *Arthrospira spp.* es utilizada para reparar los signos tempranos del envejecimiento y prevención de la aparición de estrías, los productos comerciales que la contienen son extractos ricos en proteína, otro extracto usado para estimular la síntesis de colágeno en la piel y la regeneración celular es la especie *Chlorella vulgaris* (Spolaroe & et al., 2006) y (Toledo, 2010).

Alimentación Humana: Debido a las diversas propiedades químicas de las microalgas estas pueden utilizarse como suplementos alimenticios o representar una fuente natural de colorante para alimentos, actualmente es posible encontrar en el mercado las microalgas en forma de tabletas, cápsulas y líquidos para nutrición humana, también pueden ser incorporadas en pastas, bocadillos y barras de dulces o incluso en goma de mascar (Toledo, 2010). Se espera que mantengan un mercado estable (Brennan & Owende, 2010).

Las microalgas dominantes del mercado en este sector son: *Chlorella*, *Spirulina* y *Dunaliella*, sin embargo, es esencial tomar en cuenta que el consumo de biomasa microalgal por humanos se limita a pocas especies, debido a que deben cumplir normas estrictas de seguridad alimentaria, factores comerciales y la preparación específica de estos productos (Brennan & Owende, 2010).

Al consumir productos sintetizados por las microalgas, los consumidores pueden controlar enfermedades del corazón, colesterol, osteoporosis y cáncer (Mata, Martins, & Caetano, 2010). La

Chlorella es una especie con un valor medicinal, empleada como protección contra la insuficiencia renal y las infecciones intestinales, causadas por lactobacilos (Brennan & Owende, 2010).

Las investigaciones de las microalgas han causado que se les reconozca como suplementos nutricionales, debido a que tienen una proteína de mayor calidad que otras fuentes vegetales, por ejemplo, el trigo, arroz y legumbres, aunque el mercado tradicionalmente ha estado dominado por suplementos nutricionales derivados de las plantas, las microalgas poseen un gran potencial (Mata, Martins, & Caetano, 2010). En el 2003 la producción registrada de *Chlorella*, fue de 2000 toneladas por año, debido a su valor nutricional y contenido proteico (Brennan & Owende, 2010). Por último, los ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs) son esenciales para el consumo humano y el desarrollo fisiológico, demostrando que estos ácidos grasos reducen el riesgo de enfermedades cardiovasculares (Brennan & Owende, 2010).

Los ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs) influyen en el metabolismo de los tejidos entre otras funciones de la célula, pocas microalgas presentan potencial para su producción industrial debido a que presentan un nivel bajo de crecimiento (Cardozo & et al., 2007). Por ello, en la tabla 13, se presentan los ácidos grasos de microalgas, como fuente de PUFAs (Brennan & Owende, 2010).

Tabla 5. Microalgas potenciales como fuentes primarias de PUFAs, (Brennan & Owende, 2010)

AGPI	Aplicación potencial	Microorganismo productor
Ácido Araquidónico (AA)	Preparados infantiles para lactantes	<i>Porphyridium</i>
	Suplementos nutricionales	
AGPI	Aplicación potencial	Microorganismo productor
Ácido Docosahexaenóico (DHA)	Preparados infantiles para lactantes	<i>Crypthecodinium, Schizochytrium</i>
	Suplementos nutricionales	
	Acuicultura	
Ácido Eicosapentanoénico (EPA)	Suplementos nutricionales	<i>Nannochloropsis, Phaeodactylum, Nitzschia Pavlova</i>
	Acuicultura	
g-Ácido Linoléico (GLA)	Suplementos nutricionales	<i>Spirulina</i>
	Acuicultura	

- Obtención de bioplásticos y productos para la agricultura, como bioestimulantes y bioplaguicidas (Voort et al., 2015)

El sector agrícola de forma global requiere implementación constante de sistemas sostenibles y ecológicos que reduzcan el uso de compuestos químicos de síntesis y el impacto ambiental derivado de la producción y uso de dichos compuestos en la producción de alimentos, por lo que una aplicación más realista para las microalgas en comparación con otras es la producción de biofertilizantes y bioestimulantes de uso agrícola (Fernández et al., 2018).

Siguiendo con esta visión, la producción de la biomasa se vuelve en un proceso más sostenible si se incorpora en el tratamiento de aguas residuales, ya que se aprovecha la capacidad de estos microorganismos para fijar el nitrógeno y fósforo presente en dichas aguas (Fernández et al., 2018), debido a esto, las microalgas son ricas en nitrógeno y fósforo como biofertilizantes, además contienen aminoácidos y fitohormonas que contribuyen a la producción de cultivos agrícolas, reduciendo la necesidad del aporte de fertilizantes químicos (Lu and Xu, 2015). La biomasa de microalgas requiere ser producida y procesada adecuadamente, para obtener biofertilizantes con actividad biológica, se recomienda el uso de métodos enzimáticos (Romero García et al., 2012).

Los compuestos con actividad antibiótica y antifúngica derivados de algas constituyen otra categoría de productos con considerable potencial económico, especies como *Chaetocerus lauderi*, *Chaetocerus socialis* y *Fragilaria pinnata* han mostrado actividad antifúngica notable. Paralelamente, los extractos de microalgas incluyendo *Chlorella*, *Stichococcus mirabilis* y *C. reinhardtii* han demostrado poseer propiedades antivirales significativas, *Scenedesmus oblicuo* ha demostrado utilidad en aplicaciones de cuidado postoperatorio, mientras que los extractos de *Asterionella* han exhibido efectos antivirales y antimicóticos. (Vilchez & et al., 1997).

- Producción de piensos para acuicultura y animales (Voort et al., 2015)

Las microalgas se encuentran entre los productores tróficos primarios más importantes de cualquier ecosistema acuático (Sharma y Rai, 2011), debido a su aportación de oxígeno durante el día, además de sus importantes contenidos nutritivos, como polisacáridos, aminoácidos, enzimas y otras proteínas (Castro & al., 2003).

Industria de la acuicultura o maricultura: debido a que las microalgas son el punto de partida biológico para la cadena alimenticia acuática, por ello la acuicultura es una de las áreas con mayor desarrollo en el campo de la producción alimenticia para su utilización como alimento vivo para animales acuáticos comerciales, a pesar de los esfuerzos realizados para reemplazar las microalgas por dietas inertes, aún se depende de su producción en la acuicultura (Franco Acosta, 2008). Por tanto, la aplicación más relevante de las microalgas es la producción de alimento primario para los sistemas acuáticos en donde de millones toneladas de peces y moluscos dependen del fitoplancton que se genera de forma natural en aguas continentales y océanos (Muller-Feuga, 2013).

Las microalgas más utilizadas son las diatomeas de los géneros *Chaetoceros* e *Isochrysis*, así como las algas flageladas como *Dunaliella* sp. (Castro & al., 2003). Además, las especies de microalgas y zooplancton más usadas en esta industria se muestran en la tabla 14 (Guillar, 1973; Hirata, 1974; Watanabe et al., 1978), estas especies han sido seleccionadas en base a su aporte nutricional y la factibilidad para producirlas de forma masiva (Franco Acosta, 2008).

Tabla 6. Especies de microalgas y zooplancton de mayor uso en la acuicultura, (Franco Acosta, 2008)

Tipo	Algas de uso común
<i>Bacillariophyceae</i>	<i>Skeletonema costatum, Thalassiosira, pseudonana, Chaetoceros calcitrans</i>
<i>Haptophyceae</i>	<i>Isochrysis galbana, Isochrysis sp., Pavlova lutheri</i>
<i>Chrysophyceae</i>	<i>Tetraselmis suecica, Tetraselmis chuii</i>
<i>Chlorophyceae</i>	<i>Chlorella autotrophica, Chlorella saccharophila</i>
<i>Chryptophyceae</i>	<i>Chroomonas salina</i>
<i>Cyanophyceae</i>	<i>Spirulina sp., Spirulina máxima</i>
<i>Rotífera</i>	<i>Brachionus plicatilis</i>

Alimento para animales: Especies específicas de algas como *Chlorella*, *Scenedesmus* y *Spirulina* son adecuadas para su uso como suplementos para animales, ya que mejoran la respuesta inmunológica, mejora la fertilidad, mejora el control de peso, y proporciona una piel más sana y brillante (Brennan & Owende, 2010). En el apartado titulado "Microalgas como insumo alimenticio" se detalla sobre los beneficios de esta aplicación.

- Agentes de biorremediación para el tratamiento de aguas residuales (Law et al., 2022).

Han sido ampliamente estudiadas para la remoción de contaminantes convencionales como nitrógeno y fósforo, así como de antibióticos y, en menor medida, de patógenos como los coliformes. Además de no producir subproductos tóxicos, el uso de estos organismos ofrece ventajas económicas adicionales, ya que la biomasa obtenida tras el proceso puede transformarse en productos de valor comercial, como biocombustibles o biofertilizantes, la biomasa microalgal puede convertirse en biocarbón, una alternativa ecológica en los procesos de tratamiento de aguas residuales en lugar del carbón convencional, lo que compensa los costos de implementación y son insumo económico adicional. Se recomienda que las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas y rurales estén cerca a sitios agrícolas, cría de cerdos o a la acuicultura, en el caso de que el uso destinado para la biomasa sea como alimento animal (Amaro et al., 2023).

- Producción de energía, principalmente biocombustibles. (Voort et al., 2015)

Las microalgas han captado la atención como fuente de energía renovable para la producción de biocombustibles y para la biorremediación de aguas residuales domésticas e industriales (Spolaore y otros, 2006; Chiaiese et al., 2011; Renuka et al., 2018). En la producción de biocombustibles como el biodiésel a partir de microalgas, se ha estudiado e identificado que estos microorganismos pueden llegar a acumular hasta el 70 % de su peso en lípidos, los cuales son susceptibles a ser transformados en biodiésel mediante transesterificación directa, en contraste con un proceso análogo para la producción de biodiésel a partir de aceites usados o vegetales (Chisti, 2007).

La elevada capacidad de producción de biomasa puede llegar a ser hasta cien veces superior a los cultivos energéticos actuales como colza o palma lo cual es su principal ventaja (Chisti, 2007). Se considera una alternativa viable, una fuente prometedora de producción de energía debido al gran

potencial que presentan para ser utilizadas para la producción de biocombustibles como el biodiesel, biometano y bioetanol (Bermeo, 2011; Von Albensleben, Magnusson y Heimann, 2015).

Al comparar la demanda del mercado de biocombustibles, se observa que se requiere de enormes producciones, superiores a 10^7 t/año, las cuales distan de la actual capacidad de producción mundial de biomasa de microalgas, la cual es de 10^4 t/año, Actualmente la mayor parte de la producción mundial de microalgas se destina al consumo humano, a la agricultura y la producción de piensos tanto para granjas como para acuicultura, el requerimiento de cada una es: alrededor de 10^4 t/año, hasta 10^5 t/año y 10^6 t/año en el respectivo orden mencionado (Fernández et al., 2018). Por ello, la capacidad de producción actual de aceites de microalgas es limitada, si se desea competir en este mercado es necesario aumentar la actual capacidad de producción en varios órdenes de magnitud y reducir los costos de producción, por ende, no se excluye como una posible solución al abastecimiento de combustibles líquidos a largo plazo. Actualmente una mejor alternativa es la producción de biometano como biocombustible mediante digestión anaerobia de la biomasa de microalgas producida en el tratamiento de aguas residuales (Cabanelas et al., 2013), el proceso simplificado para la producción de biocombustibles se explica en la figura 10.



Figura 11. Aplicación de las microalgas en la producción de biocombustibles, (Alemán R. et al., 2013)

- Otras aplicaciones encontradas a lo largo de la investigación:

Clorofila: La clorofila es un ingrediente para la manufactura de pastas dentales, enjuagues bucales, detergentes, pastillas para combatir la halitosis, además algunas evidencias sugieren que puede ser

un buen desodorante, antiséptico y anticancerígeno, usualmente el contenido de clorofila en las células microalgales es cercana al 0.5-1.5 % del peso seco (Becker, 1994; Mora & et al., 2002).

Ficocoloides: Son polisacáridos de alto peso molecular compuesto de polímeros de azúcares, que son el principal componente estructural de las paredes celulares de las algas, algunos de estos polisacáridos se consideran antioxidantes, antivirales, antitumorales y anticoagulante, debido a su amplio uso en la industria alimentaria y cosmética, los polisacáridos extraídos de algas marinas son el agar, el carragenano y el alginato, (Cardozo & et al., 2007).

Captura de CO₂: Este compuesto se considera un factor limitante de la productividad y el crecimiento de las microalgas, estas al ser fotosintéticas utilizan el CO₂ como fuente de carbono, según su composición química, se requiere de 1.8 toneladas de CO₂ para producir una tonelada de biomasa (García, 2010). Este tema se detalla en el apartado titulado "Nutrientes requeridos para el crecimiento de microalgas".

El potencial de las microalgas está enfocado en la producción de compuestos capaces de sintetizar químicos complejos o transferirlos a otros organismos de manera efectiva, es necesario aumentar la investigación de nuevas cepas de microalgas que tengan un crecimiento óptimo y puedan acumular altas concentraciones de los compuestos deseados (Olaizola, 2003). Aún existe potencial por parte de estos microorganismos por descubrir, es necesario continuar con el avance científico.

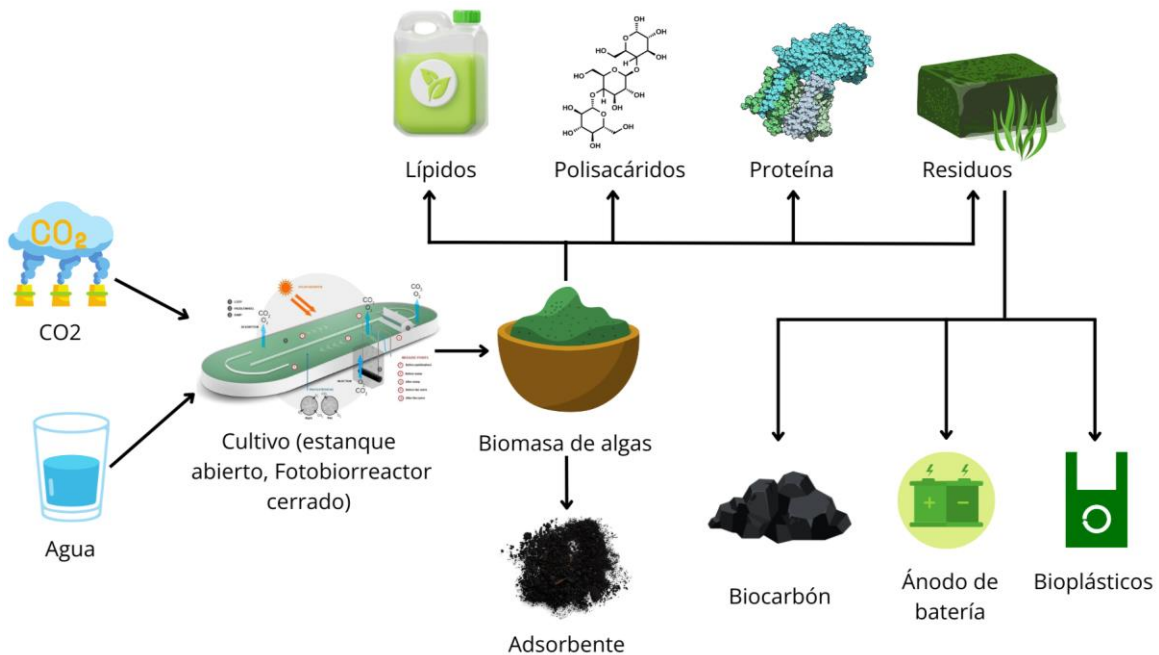


Figura 12. Procesos generales para cultivar microalgas y fabricar biomateriales, (Cognita, 2023)

Contaminación en los cultivos

Debido a que la mayoría de estos sistemas son abiertos, puede ser inevitable una contaminación, debido a las condiciones no asépticas, pues ni el medio del cultivo, ni el ambiente son estériles, por lo que es necesario monitorizar y controlar tales contaminantes dentro de unos límites tolerables, con el fin de obtener una biomasa microalgal de buena calidad (Abalde et al., 1995). La mayoría de estos contaminantes son bacterias, otras formas algales, zooplancton, virus, hongos e insectos, las cuales dependen de diversos factores (Richmond, 1986; Becker, 1986).

Algas indeseables: Es el problema más común en los cultivos masivos en el exterior, en el sistema se cultivan distintas especies (policultivos), este tipo de contaminación reduce el rendimiento del cultivo e incluso el alga contaminante puede desplazar el cultivo original (Abalde et al., 1995).

Uno de los principales inconvenientes de los cultivos masivos en sistemas abiertos es la presencia de contaminaciones, resultan inevitables en cierta medida, ya que las condiciones de cultivo no están restringidas a una sola especie, la contaminación disminuye la productividad en situaciones críticas, la especie invasora puede llegar a reemplazar al cultivo inicial (Abalde et al., 1995).

La presencia de estos organismos en cultivos de *Scenedesmus* ha sido detectada en países como Alemania, Tailandia, Israel, Sudáfrica y Perú, el avance de la infección causa que el cultivo se torne color marrón, además muestran una disminución en la producción de oxígeno, incluso cuando la tasa fotosintética debe alcanzar su máximo. En cuanto aparecen estos síntomas, el cultivo generalmente ya es irrecuperable y por eso se recomienda realizar un análisis microscópico diario del cultivo (Abalde et al., 1995).

Hongos, levaduras y mohos: Aunque no causa problemas serios para el comportamiento de las algas ni para el consumidor, esta contaminación se produce con cierta frecuencia en las lagunas de cultivo (Abalde et al., 1995). El hongo más perjudicial para los cultivos de *clorofíceas* (exceptuando los de *Spirulina*) es *Chytridium sp.*, que frecuentemente aparece acompañado del flagelado *Aphelidium sp.* que ha provocado infecciones en cultivos de *Scenedesmus* en varios países (Abalde et al., 1995).

La contaminación por levaduras y hongos es común en lagunas de cultivo de algas, aunque generalmente no afecta su inocuidad para el consumo, estas infecciones generan floculación intensa, cambio de coloración del medio a marrón y disminución de la fotosíntesis, volviendo los cultivos irrecuperables. Por ello, se recomienda un monitoreo microscópico diario, aunque reducen el rendimiento, no implican riesgos sanitarios en la biomasa destinada a la alimentación.

Bacterias: Es vital realizar controles sanitarios de la biomasa como prerrequisito para la utilización de esta, la contaminación por bacterias heterótrofas pueden encontrarse en los cultivos de microalgas debido a que las algas exudan diferentes compuestos orgánicos al medio que inducen el crecimiento bacteriano, el grado de contaminación es bastante elevado cuando se adicionan nutrientes orgánicos o de desecho.

Aún no existen suficientes investigaciones acerca de contaminaciones microbianas para conocer las afectaciones en la calidad y seguridad del cultivo, en caso de que se utilice como alimento (Abalde et al., 1995). Las condiciones de cultivo como altos niveles de materia orgánica disuelta y elevada temperatura, favorecen el crecimiento microbiano, y existen temporadas estacionales que presentan mayores niveles de bacterias (Abalde et al., 1995).

Las condiciones del cultivo, como por ejemplo los altos niveles de materia orgánica disuelta y temperaturas elevadas, favorecen la proliferación microbiana, con variaciones estacionales, con lo cual las bacterias heterótrofas suelen proliferar en cultivos de microalgas debido a la liberación de compuestos orgánicos por parte de las algas, aumentando su presencia cuando se añaden nutrientes o desechos, lo cual obliga a realizar controles sanitarios de la biomasa antes de su uso como alimento. Para reducir este problema, la mejor estrategia es mantener el cultivo en crecimiento óptimo, en condiciones de sanidad, actualmente no existen fármacos específicos para tratar infecciones en cultivos algales, aunque algunos pesticidas se han probado experimentalmente, como en el control de *Aphelidium* en *Scenedesmus obliquus* (Abalde et al., 1995).

Zooplankton: Esta contaminación es ocasional, en cultivos de algas verdes, no tiene grandes afectaciones sobre el crecimiento algal y las especies más comunes son *Lycrymanis sp.*, *Colpidium sp.* y *Vorticella sp.* (Abalde et al., 1995)

Otros contaminantes: Pueden ser generados por fauna como aves, insectos, roedores, etc, principalmente cuando las aguas están estancadas y aunque la presencia de parásitos reduce el rendimiento de las algas, no ocasionan un riesgo sanitario cuando la biomasa es destinada para consumo alimentario (Abalde et al., 1995).

Para prevenir la contaminación en cultivos, el mejor método es mantener el cultivo de microalgas en óptimas condiciones de crecimiento y se ha demostrado que en esas circunstancias los niveles de contaminación son mínimas, otras excelentes estrategias son: elevadas concentraciones de inóculo, limpiezas periódicas de las lagunas, control de las condiciones ambientales específicas que favorezcan el crecimiento de las microalgas deseadas. (Abalde et al., 1995)

Actualmente, no existen fármacos específicos para tratar las infecciones en cultivos microalgales, algunos pesticidas podrían ofrecer una opción potencial de control, se han evaluado diversos pesticidas para combatir el parásito *Aphelidium* en cultivos de *Scenedesmus obliquus*, los cuales son empleados en medicina, veterinaria y como fungicidas en la agricultura. Hasta ahora, no se ha observado resistencia de los parásitos a estos fungicidas, los ingredientes activos en estos productos son tiocarbamatos, poco tóxicos. En ciertos casos, también puede realizarse una remoción mecánica de los contaminantes sólidos de mayor tamaño (Abalde et al., 1995).

SECTOR AGROPECUARIO

A nivel mundial, la producción total del sector agropecuario produce un valor de 2.2 trillones de dólares y representa 3.1 % de las actividades productivas, el sector produce alimento para más de 7 mil millones de personas en todo el mundo, estos datos muestran la importancia que tiene este sector, para el sector público y los organismos internacionales, además se conoce que aproximadamente el 47.5 % de la población mundial radica en localidades rurales. La relevancia de este sector incorpora consideraciones sociales, políticas y económicas, debido a que el sector agroalimentario y el desarrollo rural históricamente se han considerado un área prioritaria para el desarrollo de políticas públicas a nivel local, nacional e internacional (Programa Institucional de la Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2014).

Dentro de la producción total, la aportación del sector primario es menor frente a otras actividades económicas, sin embargo, su importancia radica en que la producción y el abasto de los alimentos sea oportuno, pues son elementos indispensables para alcanzar la estabilidad y un desarrollo armónico de cualquier sociedad (Programa Institucional de la Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2014). El crecimiento poblacional a lo largo del tiempo ha generado que las fuentes convencionales de alimentación como la agricultura, ganadería y pesca no logran satisfacer la demanda en su totalidad, se estima que, entre 1980 y 2015, la cantidad total producida en la agricultura sería similar a toda la producción acumulada a lo largo de la historia, según estudios de (Giraldo & López, 2008) y (Sánchez M & et al., 2003).

El sector agropecuario cuenta con aproximadamente 1.4 millones de establecimientos, como ranchos, corrales de engorde, parcelas, empresas e industrias y otras unidades económicas relacionadas con la producción alimentos. Este sector genera cerca de 4.2 millones de empleos directos y 12.6 millones de empleos indirectos, además de contribuir al Producto Interno Bruto (PIB) mediante sus exportaciones (Durán et al., 2001).

Para desarrollar un sector primario sustentable, uno de los elementos claves es el financiamiento, en México el plan nacional de desarrollo 2013-2018 (PND) y en otros programas sectoriales, establecen los objetivos e inversiones que otorgan acceso a créditos para impulsar el crecimiento en las actividades agrícolas, ganaderas, pesqueras, forestales y rurales (Programa Institucional de la Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2014). En México el producto interno bruto (PIB) del sector primario, el cual está compuesto por agricultura, ganadería, silvicultura y pesquerías, creció a un ritmo menor que el PIB total del país durante los años noventa. Entre 1993 y 1996, las actividades agrícolas tuvieron un crecimiento sostenido (CEA, 1999), en contraste con las actividades pecuarias, las cuales, de 1997 a 1999, mostraron un crecimiento superior al agrícola (CEA, 2000; INEGI, 2000).

En México se registraron 9,912 unidades económicas producidas por la agricultura, cría y la explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza, de entre los estados con mayores

porcentajes unidades económicas relacionadas a este sector en el país fueron: Tabasco (1,386), Veracruz de Ignacio de la Llave (1,070) y Oaxaca (1,046), según datos de DENUE en 2024. Mientras que datos del Censo Económico en 2019, muestran que la producción bruta total fue de \$44,564M MX y los estados con mayor producción, fueron Sonora con \$10,615M MX y Sinaloa con \$8,341M MX, en el segundo trimestre de 2024 se registró un producto interno bruto de \$1.33BMX, evidenciando un alza de 19.4 % con respecto al anterior trimestre (Data México, n.d.).

Durante el desarrollo de la humanidad, el sector agroalimentario ha experimentado enormes cambios, estos cambios en su mayoría se deben a factores externos como: la transición demográfica, la cual ha surgido como consecuencia del crecimiento de la población, en la tasa de urbanización y debido a cambios en la composición por edades, además del crecimiento económico, lo cual a generado un incremento del ingreso per cápita y las fluctuaciones en los precios de productos de origen animal y vegetal. Aunado a esto, existe una transición nutricional debido al mismo desarrollo, generando dietas más variadas y ricas, estos alimentos incluyen, más productos de origen animal, azúcares, grasas, más alcohol y alimentos procesados, cuyo efecto han derivado en enfermedades debido a la sobrealimentación, problemas de sobrepeso y la obesidad, finalmente las mejoras en la genética y el cambio tecnológico corresponden a cambios internos en el sector, lo que genera mayores la composición de nutrientes en el alimento y el rendimientos, facilitando la distribución y el mercadeo de productos agropecuarios. (Data México, n.d.)

Durante el tercer trimestre de 2024, la población ocupada para la agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza, fue 1.85 millones de personas, del cual, el 83.8 % hombres y 16.2 % mujeres, las entidades federativas con mayor aporte en este sector fueron; Veracruz de Ignacio de la Llave, Jalisco y Tabasco (Data México, n.d.) Sin embargo, se ha observado una disminución en la participación de las mujeres en las labores agropecuarias y del campo, en los últimos quince años, como se muestra en la figura 12 (INEGI, 2022).



Figura 13. Mano de obra del sector agropecuario, (INEGI, 2022)

Sector Ganadero

México es el séptimo mayor productor de proteína animal a nivel mundial, el sector ganadero es fundamental para lograr la seguridad alimentaria, debido a que se trata de la principal fuente de proteína, por lo que la ganadería requiere de implementar acciones para mitigar su contribución al cambio climático e implementar prácticas sostenibles, que impulsen la productividad, además de ser el principal sustento y patrimonio de muchas familias que viven en el campo (IICA, 2021). En el país, en la ganadería se destinan 109.7 millones de hectáreas, lo que representa 56 % del territorio nacional (COTECOCA, 1996; Villegas, 1999). El sector ganadero genera 4.2 millones de empleos directos y 12.6 millones de indirectos; además aporta divisas al PIB a través de sus exportaciones, está conformado por 1.4 millones de ranchos, corrales de engorda, empresas integrales y unidades económicas que se dedican a la producción de ganado (AMEG, 1999).

El sector ganadero es clave para garantizar la seguridad alimentaria de la población mundial ya que contribuye a la disminución de la pobreza, mejorando la nutrición humana y por ende, al desarrollo económico. Además, posee un amplio potencial para contribuir en la conservación de los ecosistemas y mitigar impactos ambientales, mediante la implementación de prácticas y manejo sustentable (Villavicencio Gutiérrez, 2022). La ganadería es importante dentro de las actividades primarias a nivel mundial, contribuye con 40 % de la producción agrícola en los países desarrollados y 20 % en los países en desarrollo, es una actividad económica estratégica para el desarrollo sustentable, por su contribución económica, social y ambiental (FAO, 2021).

Es una de las actividades económicas más importantes en México y el mundo (FIRCO, 2017), la ganadería consiste en la crianza y la reproducción de los animales domésticos, para la producción de alimentos como los cárnicos o los lácteos, destinados al consumo humano, dentro de los animales domésticos para consumo se engloba al ganado bovino, porcino, ovino, caprino y aviar (SIAP, 2020). En la figura 13 se muestran la cantidad de animales domésticos registrados en México en el año 2022. Según cifras del Statista Research Department, el subsector agropecuario tuvo un crecimiento de casi 3 % en el primer trimestre de 2022, en comparación con el mismo período del 2021, cuando su valor fue de 182,000 mdp (Consejo mexicano de la carne, n.d.).



Figura 14. Cría de animales en unidades de producción y viviendas, existencias (cabezas), (INEGI, 2022)

El mapa digital de México en línea, como se muestra en la figura 14 la distribución de la ganadería dentro del país, además de datos sobre la distribución de la agricultura, agricultura a cielo abierto, agricultura protegida, ganadería, aprovechamiento forestal y unidades de producción agropecuaria.



Figura 15. Distribución de la ganadería bovina en México, (*Mapa Digital De México En Línea*, n.d.)

Es común que la actividad ganadera se asocie a otras formas de producción como la agricultura, la fruticultura y la silvicultura, debido a que los terrenos son agrícolas hasta la cosecha, para después ser ganaderos de forma que los animales aprovechan los millones de toneladas de esquilmos producidos, ya que la ganadería depende principalmente del suministro cultivos de granos, forrajes, los residuos agrícolas, que en su mayoría provienen de agostaderos, praderas y los concentrados alimenticios producidos por la industria. Asimismo, conocer las acciones llevadas a cabo para mantener la salud del ganado y prevenir la entrada de enfermedades ha sido fundamental para el desarrollo de la ganadería en el país, lo que representa un esfuerzo conjunto de los productores pecuarios y las autoridades correspondientes a nivel nacional (Durán et al., 2001).

México se ha caracterizado por mantenerse libre de una gran variedad de enfermedades y plagas que diezman las economías pecuarias de muchos países del mundo, por lo que el país posee una situación privilegiada en el campo de la salud animal, esto le ha permitido negociar en condiciones igualitarias en el comercio internacional, desde el punto de vista sanitario. (Durán et al., 2001)

Debido a la importancia sanitaria de este sector, en México la regulación sobre la salud animal, se rige por la ley federal de sanidad animal publicada en el Diario Oficial de la Federación (SARH, 1993). Esta ley busca modernizar y mejorar las actividades relacionadas con la salud de los animales en México, mediante la aplicación de Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que incorporen la realización de campañas zoonosanitarias, las condiciones necesarias para tener zonas libres de enfermedades y plagas, la inspección sanitaria y de higiene de la carne, así como el funcionamiento de establecimientos TIF. Además de la inspección sanitaria de animales y productos importados y la garantía de un trato humanitario hacia los animales, entre otros temas (Durán et al., 2001).

Consumo de recursos de este sector

En general, los recursos naturales son vitales para la actividad económica, ya que mientras existan una buena calidad y disponibilidad permiten pueden satisfacer las necesidades humanas y se considera importante para el patrimonio social (Aguilera Klink, 1994). Las principales fuentes de contaminación debido a este sector se deben, a la emisión de gases invernadero debido a las excretas de los animales, erosión del suelo, contaminación del agua debido a materia orgánica, patógenos y residuos de medicamentos, además puede amenazar o causar pérdidas de biodiversidad. La ganadería modifica el paisaje a gran escala y disminuye el hábitat natural, según la Real Academia Española, requiere de grandes extensiones de tierra para producir pastos, forrajes, granos y otros insumos necesarios para alimentar al ganado (Rosario, 2008).

Los impactos de la ganadería sobre este elemento son sustanciales y se deben considerar en toda la cadena productiva, desde la producción de insumos y pastos para alimentar a los animales, hasta el proceso de transformación de los productos animales, además de considerar impactos en el ciclo del agua debido al pastoreo intensivo y al cambio del uso del suelo (Rosario, 2008). Se identificaron los siguientes impactos en diversos entornos naturales, generados por este sector:

Impactos a la atmósfera: De entre los cinco sectores reportados: energía, industria, residuos, cambio del uso del suelo y la agricultura, las actividades ganaderas contribuyen con emisiones antropogénicas de gases invernadero con 18% al total (FAO, 2006). Se reconoce que las actividades ganaderas contaminan el aire, debido a que se emiten cantidades considerables de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono CO_2 , metano CH_4 y óxido nitroso N_2O , contribuyen de manera significativa al cambio climático. Como parte de su proceso digestivo, los rumiantes y algunos monogástricos, emiten metano debido a la fermentación microbiana de alimentos fibrosos, las excretas animales también emiten amoníaco NH_3 y el cómo se manejan las excretas en las instalaciones, dependen de si son sólidas o líquidas, recibirán un proceso de recolección, almacenamiento y aplicación en la agricultura diferente (Rosario, 2008).

La ganadería afecta el balance de carbono de la tierra destinada a la producción de alimento para animales y de forma indirecta, libera grandes cantidades de carbono a la atmósfera, este mismo efecto se genera cuando se deforestan los bosques para crear pastizales. Otros efectos indirectos que son difíciles de cuantificar durante los procesos productivos de la ganadería son las emisiones generadas desde la producción de alimento animal hasta la comercialización de los productos. La contribución de la ganadería a la emisión de cada uno de los tres principales gases de efecto invernadero se detalla a continuación (Rosario, 2008).

Dióxido de carbono CO_2 : las emisiones de la ganadería son del 9 % del total global, debido a la deforestación para establecer pastizales y la degradación de estos (Rosario, 2008).

Metano CH_4 : las excretas representan 80% de las emisiones agrícolas y alrededor de 35-40 % del total de origen antropogénico, la emisión se debe a la fermentación entérica (Rosario, 2008).

Óxido nitroso N_2O : en términos de potencial de calentamiento global (PCG), es considerado el más contaminante, se genera durante el manejo aeróbico de residuos ganaderos, representan casi dos tercios del total global de emisiones antropogénicas y el 75-80 % de las agrícolas (Rosario, 2008).

Amoniaco NH_3 : se estima que 47 millones de toneladas de las emisiones globales de este gas son de origen antropogénico, un 94 % es producido por la agricultura y la participación de la ganadería es de un 68 %, se produce por las excretas almacenadas y aplicadas a la agricultura (Rosario, 2008)

Impactos a la hidrosfera: El agua es considerada como un factor de cohesión social, económica y ambiental que es esencial para la supervivencia y el desarrollo de la humanidad (Aguilera Klink, 1994). Los principales contaminantes generados por excretas, son los nutrientes N y P, además de materia orgánica, las bacterias, patógenos, residuos de medicamentos y los metales pesados, los cuales por un incorrecto manejo pueden llegar al agua o al suelo por fuentes puntuales y difusas, además de los residuos generados a partir del procesamiento de productos ganaderos, como los rastros, los cuales son la mayor fuente de contaminación local y las curtidurías, las cuales emiten diversos contaminantes orgánicos y químicos. (Rosario, 2008)

Se entiende que el agua es un elemento esencial para que los animales puedan vivir y que no puede reemplazarse, también influye en la cantidad de producción que se logra (Rosario, 2008). Por ello es necesario tratar el efluente de las aguas residuales generados por este sector.

Impactos al suelo: La ganadería es la principal usuaria de la tierra, desde el punto de vista de la transición geográfica, ya que ocupa el 78 % de la tierra agrícola y cerca de 33 % de la tierra cultivada, por tanto ocupa más de 3,900 millones de hectáreas que representan casi 30 % de la superficie terrestre, de los cuales 500 mil millones son cultivadas de forma intensiva, 1,400 millones son pastizales de productividad parcialmente alta y los 2,000 millones restantes de hectáreas son pastizales de productividad parcialmente baja (Rosario, 2008). En México, de acuerdo con Villegas (1999), la superficie ganadera es de 109.8 millones de hectáreas, aproximadamente el 56 % de la superficie nacional, de las cuales la mayor superficie es cultivada en forma extensiva (Durán et al., 2001).

Conforme el sector ganadero se desarrolla, sus requerimientos de tierra aumentan generando cambios en la intensidad y el uso de suelo, además de los patrones de distribución geográfica, por lo que la conversión de bosques en áreas de pastizales es un proceso de pérdida de biodiversidad en América Latina, mientras que en el ámbito mundial se considera como una situación atípica. (Rosario, 2008) La superficie de agostaderos se utiliza para alimentar a diversas especies de ganado cuyo hábito de alimentación es el apacentamiento, lo cual casi no varía a lo largo del tiempo (Durán et al., 2001).

Contaminación por producción de alimento animal: Es común y económico, que el ganadero espere al crecimiento de las plantas en los agostaderos para que los animales consuman, sin necesidad de

sembrar, cosechar o gastar dinero en forraje adicional, si se manejan correctamente el potencial de producción puede aumentar, sin embargo en caso contrario, un mal manejo ocasiona una menor cantidad de plantas por metro cuadrado, producciones de forraje por hectárea menores a lo requerido y cultivos con menor vigor. A pesar de estas limitaciones, las praderas producen anualmente 80.6 millones de toneladas de materia seca, lo cual supera a la de los agostaderos en su condición natural (Durán et al., 2001).

Los estados de Chiapas, Veracruz, Oaxaca y Chihuahua destacan por su producción en los agostaderos debido a que, los tres primeros, cuentan con condiciones favorables de clima tropical lo cual genera gran cantidad de materia seca de la vegetación. El 29.3 % de la producción forrajera nacional corresponde a la producida en los agostaderos, el 41.9 % en las praderas, el 4.9% a los cultivos forrajeros y el 23.9 % es obtenido de los esquilmos agrícolas (Durán et al., 2001).

Algunos productores, sin recursos para comprar otros alimentos, llevan a los rebaños a pastar en lugares alejados de las comunidades, terrenos comunales, agrícolas en descanso, baldíos y claro de bosques, pero el uso excesivo de estas áreas ha causado la destrucción del recurso natural, generando falta de pasto cada año, en épocas de escasez la alimentación se complementa con subproductos agrícolas como pajas de avena y trigo, en el Valle de México, durante el período de sequía, se alimenta a los animales con pencas de maguey y salitre (Cuellar, 1989; Becerra, 1980).

Esta información permite suponer que hay suficiente alimento para el ganado en agostaderos y praderas en forma extensiva y semiintensiva, lo cual equivale a unas 35 millones de unidades animales, consumiendo unos 175 millones de toneladas de materia seca al año, sin embargo si los recursos no se aprovechan correctamente se generan problemas de escasez de alimento, especialmente en temporadas de sequía, los subproductos agrícolas a veces se pierden por falta de manejo generando desperdicio, o prácticas como quemarlos para preparar el terreno, lo cual afectando la salud y condición del ganado. Los principales granos forrajeros usados en la alimentación son maíz y sorgo (Durán et al., 2001).

Otras afectaciones al suelo pueden deberse al uso de fertilizantes, pesticidas, sedimentos originados por la erosión y a un exceso de nutrientes debido a las excretas (Rosario, 2008).

Existen factores que han limitado el desarrollo de producción de algunos animales domésticos, por ejemplo, las cabras, debido a condiciones de extrema pobreza en un gran porcentaje de los caprinocultores, además muchos productores son analfabetos, la organización de los productores es poca o nula, existe una escasez de técnicos, así como de personal idóneo en la cría de cabras, y además falta la investigación al nivel de sistemas de producción por regiones. Incide también la problemática la baja eficiencia productiva y reproductiva, debido a problemas de consanguinidad en los ranchos, un alto índice de mortalidad, la falta de tecnología para el sacrificio y la industrialización de la piel, además de la falta de recursos económicos (SBNA, 1971; Arbiza, 1998; Iruegas et al., 1999). Lo cual, no exenta a todo el sector de tener las mismas problemáticas.

Estrategias para la mitigación de impactos

La ganadería sostenible se basa en prácticas correctamente ejecutadas para mejorar la productividad, sin afectar a los demás ecosistemas, preservando las materias primas y los recursos naturales empleados en la producción de la ganadería (CEDRSSA, 2020). Se busca mejorar la productividad y competitividad ganadera al mismo tiempo que se disminuye el impacto a los recursos naturales (CONANP, 2018), y unidades de producción, que aseguren la demanda de alimentos a lo largo de los años (Consejo mexicano de la carne, n.d.).

Para lograr que la ganadería se sostenible, es necesario implementar modificaciones en el sistema de producción y manejo, así como cambios institucionales, políticos, avances científicos y tecnológicos, además de cambios en la percepción de los productores (Rojas-Downing, Harrigan y Woznicki, 2017), existen múltiples opciones para la mitigación de impactos, pero es necesario un fuerte compromiso de política pública para ir más allá del estado actual, la política ganadera debería enfocarse en tres grandes temas: cambio climático, agua y biodiversidad (Rosario, 2008).

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), es una guía útil para el diseño de medidas de adaptación para la ganadería extensiva, este proceso consta de cuatro fases, la primera fase es, la evaluación de la vulnerabilidad actual y futura, posteriormente se requiere diseñar medidas de adaptación, para posteriormente implementar dichas medidas y finalmente se procede a monitorear y evaluar, las medidas deben ser diseñadas según las condiciones locales, socioambientales y financieras (INECC, 2020; Villavicencio Gutiérrez, 2022). El INECC y el FMCN están impulsando la ganadería regenerativa, el manejo integral de paisajes, prácticas sostenibles de producción y cadenas responsables, conectando la salud de las cuencas con la producción ganadera y agroforestal sustentable, a través del proyecto CONECTA para los estados de Chiapas, Chihuahua, Jalisco y Veracruz que busca (FMCN, 2020).

La economía circular ha sido planteada como un innovador modelo económico que, además de crear nuevas oportunidades de negocio, ofrece ventajas tanto sociales como ambientales. (Cerdea y Khalilova, 2016). "La economía circular responde a tres principios: eliminar residuos y contaminación, mantener productos y materiales en uso y regeneración de sistemas naturales, con los cuales se busca tener sistemas productivos sustentables y eficientes" (Núñez, 2000).

Si estos principios se aplican en la ganadería, entonces el primer principio debe considerar disminuir y/o evitar el uso de productos químicos como pesticidas, desparasitantes, insecticidas y herbicidas, en su lugar, usar prácticas agroecológicas, como la composta o la fertilización orgánica, el segundo principio se refiere a valorización de los productos y subproductos en todas las etapas de la cadena de valor para dar una mayor utilidad a los recursos (EMF, 2019).

Un ejemplo de aplicación puede ser el estiércol producido en los sistemas de ganadería bovina, el cual puede ser considerado una buena alternativa ya que es un fertilizante natural para mantener buenos rendimientos de los cultivos forrajeros sin afectar la calidad del suelo (Trejo et al., 2013).

Además, puede ser utilizado para la producción de energías limpias, como el biogás (Gutiérrez, 2018), mientras que en términos económicos reduce los costos de producción y por ende aumentan las ganancias netas, generando mayores ingresos para los productores (Hernández et al., 2016).

El tercer principio aplicado a la ganadería regenerativa busca mejorar la conservación y empoderamiento de los ganaderos, al mismo tiempo que aumenta la rentabilidad ambiental, económica y cultural, se enfoca en la recuperación de la fertilidad de los suelos, la restauración de nutrientes del suelo, de energía y del agua como se muestra en la tabla 7. Algunas prácticas que le permiten a la ganadería tener ecosistemas resilientes y productivos son: restauración de la fauna y prevención de la erosión mediante pastoreo rotacional planeado (Villavicencio Gutiérrez, 2022).

Tabla 7. Principios de la ganadería regenerativa, (Villavicencio Gutiérrez, 2022)

Principios	Descripción
Suelos sanos y fértiles	Mantenimiento y mejora de la salud del suelo
Ecosistemas diversos	Conservación e incremento de la biodiversidad y la resiliencia de los ecosistemas
Menos carbón	Secuestro de carbono de la atmósfera y reducción de las emisiones de CO ₂ .
Buenas prácticas ganaderas	Rotación de potreros Ensilado de pasto Bancos forrajeros Establecimiento de cercas vivas Árboles dispersos Elaboración de bloques nutricionales Construcción de Biodigestores Actualización de los registros de sanidad animal

Mitigación de impactos a la atmósfera: Con la finalidad de que los sistemas ganaderos contribuyan a ofrecer servicios ecosistémicos, se debe tomar en cuenta el mantenimiento de los hábitats naturales, absorción y retención de carbono y la protección de la biodiversidad (Villavicencio Gutiérrez, 2022). Un factor para tomar en cuenta es el poder adquisitivo de los productores, ya que algunos productores obtienen un sustento marginal de los sistemas extensivos, carecen de fondos para invertir y optar por una ganadería sostenible, siendo que son los mayores generadores de las emisiones, por lo que se proponen las siguientes estrategias: (Rosario, 2008).

Mitigación de CO₂: reducir la deforestación mediante el aumento de la producción agrícola y disminuir el espacio requerido, restaurar la materia orgánica de los suelos mediante técnicas como: agricultura orgánica, labranza de conservación, etc; recuperar el carbono orgánico en suelos mediante prácticas de agroforestería, plantando especies forestales en sistemas agrícolas o pastizales que han sido degradados por uso intensivo (Rosario, 2008).

Mitigación de CH₄: debido a que la producción de este gas está relacionado con la gestión del ganado, es necesario mejorar las dietas con ingredientes que reducen la fermentación entérica,

además de optimizar la gestión y el manejo de excretas en los sistemas intensivos, aumentar la producción de biogás para capturar y utilizar el metano en forma de energía (Rosario, 2008).

Mitigación de N₂O y de NH₃: para reducir el N contenido en las excretas, es necesario ajustar las dietas, manteniendo una alimentación más equilibrada y eficiente, al mismo tiempo que se mejora la ventilación y el manejo de las excretas, en realidad gran parte del reto de reducir estas emisiones recae en los agricultores (Rosario, 2008).

Mitigación de impactos al agua: Contar con la infraestructura adecuada permite un suministro suficiente de agua, necesario a lo largo de la cadena productiva, además considerar el tratamiento de esta permite garantizar el uso continuo del líquido, lo que resulta esencial en tiempos de sequía, estas son algunas de las consideraciones para conservar y mejorar la producción de alimentos y transitar a una ganadería sostenible (CEDRSSA, 2020).

Mitigación de impactos al suelo: Se requiere de prácticas encaminadas a la siembra de alimentos para el ganado, que prevengan o eviten la erosión, pérdida de la fertilidad o estructura de los suelos, utilizando fertilizantes sustentables e implementar energías renovables (CEDRSSA, 2020).

Prácticas como controlar la expansión ganadera, limitar la degradación de los pastizales y reducir las descargas de nutrientes al agua y suelo (Rosario, 2008), también, se consideran prácticas para la preservación y restauración de pastizales, mediante modificar la forma en trasladar al ganado para su alimentación, e incluir estrategias como el compostaje para conservar el suelo, y por supuesto, regular la carga animal (CEDRSSA, 2020).

La transición a una ganadería sustentable por parte de los productores a nivel local aún enfrenta limitaciones como: escasez de recursos económicos, una ineficiente organización social para la producción ganadera, desconocimiento técnico sobre el manejo vegetativo de árboles, arbustos forrajeros locales y silvopastoril, además del arraigo de prácticas ganaderas extensivas en el cual se deforesta y se tiene un uso exclusivo para los pastos, entre otras (Apan et al., 2021). Los problemas derivados de las pérdidas agrícolas, la degradación de los recursos productivos como la tierra y el agua, afectan principalmente a las mujeres rurales ya que acceden con dificultad a apoyos financieros y técnicos en comparación con los hombres (FAO, 2017).

Un estudio realizado por Villavicencio Gutiérrez, Salazar Vargas y Meléndez Campillo, analiza cómo la economía circular puede aplicarse en el sector agroalimentario, en especial la ganadería extensiva en México, para reducir su vulnerabilidad frente al cambio climático. Para ello, se seleccionaron 13 empresas, de las cuales cinco tienen relación directa con la ganadería y sus principios de economía circular, además de realizar un análisis de ciclo de vida a lo largo de la cadena de valor para facilitar la transición hacia prácticas más sostenibles del sector (Villavicencio Gutiérrez, 2022). La figura 8, muestra las acciones y principios que realizan dichas empresas.

Tabla 8. Empresas con aplicaciones de economía circular, (Villavicencio Gutiérrez, 2022)

Estudio de caso	Principio (s)	Acciones aplicadas
Grupo Balbo, Brasil	Eliminar residuos y contaminación	Programa de fertilización orgánico en los cultivos
Nestlé, Suiza	Eliminar residuos y contaminación Mantener productos y materiales en uso	Producción de biogás y electricidad a partir de estiércol vacuno
Evian de Danone, Francia	Mantener productos y materiales en uso	Creación de un biodigestor para procesar el estiércol a nivel local e integración de una cooperativa de agricultores para apoyar la implementación de prácticas de fertilización sostenibles Producción de biogás y electricidad a partir de estiércol
Granja Winona, Australia.	Regeneración de sistemas naturales	Empleo de especies de pastos nativos, modificación de métodos tradicionales de cultivo. Pastoreo de control de tiempo a corto plazo
La finca de un acre, Uganda, África Oriental	Eliminar residuos y contaminación Mantener productos y materiales en uso Regeneración de sistemas naturales	Sistema de agricultura mixta que integra ganado y cultivos de plantas en una relación simbiótica. Utilización de hidroponía y acuaponía para la producción de forraje para ganado, altamente nutritivo y utilización de aguas residuales tratadas para cultivos de verduras. Digestión anaeróbica, utilización de los desechos del ganado para la generación de biogás.

Finalmente, la economía circular en la ganadería extensiva engloba estrategias regenerativas y restaurativas, las cuales garantizan el bienestar animal, contribuyen a la adaptación y mitigación al cambio climático (Velasco et al., 2021), contribuyen en la erradicación del hambre, garantizan la seguridad alimentaria, pero requieren implementar nuevas estrategias en el modelo de producción actual, aumentando la eficiencia y rentabilidad (Stoliarchuk, 2021). Este enfoque de desarrollo sostenible contribuye a mitigar los impactos ambientales, sociales de las comunidades y aspectos económicos, pero depende de la interacción positiva de diversos sectores que contribuyen a nuevas formas de producción a través de una postura ética y consciente (Serrano y Ruíz, 2003).

Microalgas como insumo alimenticio

A inicios de los años cincuenta los humanos incorporaron microalgas en sus dietas, como suplementos proteicos y vitamínicos, disponibles en polvo, cápsulas o pastillas (Pulz y Gross 2004). Se estima que el 30 % de las algas conocidas en el mundo, se incorporan en alimentos tales como pasta, galletas, pan, caramelos, yogures o refrescos, debido a su importancia en la nutrición humana y alto contenido de proteínas (García, C, 2013). La producción mundial anual de todas las especies se estima alrededor de 10,000 toneladas/año y actualmente en todo el mundo se emplean diferentes tecnologías para la producción masiva y el procesamiento de microalgas (Becker, 2007).

Diversas problemáticas del sector agropecuario se han intentado resolver mediante una producción agrícola innovadora, como fertilización biológica, capacitación del personal relacionado para que aprovechen de mejor manera los recursos naturales, marinos y terrestres, sin embargo, se ha observado que no es suficiente y por ende es necesario buscar fuentes alternativas de proteína para la alimentación humana y animal (Sánchez & Galán, 2007). Para satisfacer la alta demanda de alimentos es necesaria la formulación de fuentes alternativas e innovadoras de proteínas, en donde la proteína microalgal (Becker, 2007; Bianchini & et al., 2006), puede ser utilizada como suplemento

proteínico sustituyendo fuentes convencionales y costosas como la harina de soya y la harina de pescado (Anupama & Ravindra, 2000).

La especie más empleada para este fin es la cianobacteria *Spirulina*, debido a que cuando es incorporada en los alimentos estimula el tránsito digestivo de diferentes especies lactobacillus (Richmond y Becker, 1986), y también presenta diversas aplicaciones terapéuticas, en México y África Central se usa como alimento de alto valor proteico, en el lago Texcoco en México se encuentra la mayor instalación comercial para la producción de biomasa de *Spirulina* con fines alimenticios. Taiwán, Estados Unidos, Tailandia, Japón e Israel son otros importantes productores, los cuales alcanzan una producción global de 850 toneladas/año (Richmond, 1986).

La especie *Chlorella* se produce a escala comercial de forma relativamente extensa en el sudeste asiático, en Japón y Taiwán como preparado multivitamínico mientras que en otros países occidentales se comercializa como alimento dietético (Granado et al., 2003; Krinsky et al., 2003). Los compuestos nutracéuticos a base de *Spirulina* se comercializan debido a propiedades anticancerígenas por su contenido en β -caroteno (Richmond y Becker, 1986), a prostaglandinas (PGE1), previene enfermedades degenerativas y cicatrizante eficaz (Yoshida, 1977).

El alto contenido de proteínas presente en las especies *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Arthrospira* entre otros, es alrededor del 50 % y por ello se impulsó la elaboración de suplementos alimenticios con microalgas, ya que su valor nutricional es mayor al de productos como cereales y leguminosas, aunque tampoco superan a las fuentes de origen animal (Burja & Radianingtyas, 2008). En comparación con el contenido proteico de las microalgas, el contenido de la proteína de maní es de 50 %, el de la harina de soya es del 75 %, la carne es de 83 % y huevos del 100 % (Embleton, 2007).

Si comparamos la composición bioquímica de los alimentos tradicionales contra la biomasa microalgal, estas tienen la capacidad de aumentar el contenido nutricional de los alimentos, además de beneficiar tanto la salud humana como animal (Spolaore et al., 2006; Becker, 2007 y Gouveia et al., 2008), según los estándares establecidos por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la proteína extraída de microalgas ha demostrado contener una concentración de aminoácidos apta para el consumo (Embleton, 2007). Por tanto, comparado con las fuentes convencionales el perfil de aminoácidos es más favorable en casi todas las algas, mientras que los carbohidratos en las microalgas están disponibles en forma de almidón, glucosa, azúcares u otros polisacáridos (García, C, 2013).

Entonces, aparte de su elevado contenido proteico y el balance de aminoácidos, presentan bajas concentraciones de ácidos nucleicos en comparación con otras fuentes de proteína unicelular (Becker, 2007; Cardozo & et al., 2007), sin embargo, esta proporción de ácidos grasos puede variar debido a, la plasticidad metabólica que puede aumentar considerablemente el contenido de ácidos grasos debido a factores medioambientales y nutricionales (García, C, 2013). Esta información se detalla en el apartado de " Parámetros de cultivo" de la presente tesis.

El valor nutritivo y el contenido de proteínas, se estima que es aproximadamente del 50 %, lo que también representa el porcentaje de su peso seco total, los carbohidratos constituyen hasta el 90 % del peso seco total, el 10 % restante está conformado por minerales, ácidos nucleicos, pigmentos y demás componentes menores, como se presentan en las tablas 9 y 10 (Arredondo Vega & Voltolina, 2007; García, C, 2013). Por otro lado, no existe una limitación al momento de preparar alimentos por lo que su digestibilidad es alta y apta para consumo (García, C, 2013).

Tabla 9. Comparación de la composición bioquímica de fuentes nutricionales convencionales humanas, de algunas microalgas comestibles marinas y de agua dulce en porcentaje en peso seco, (García, C, 2013; Spolaore et al., 2006; Becker, 2007 y Gouveia et al., 2008)

Especies comestibles	Composición Bioquímica		
	Proteínas (%)	Lípidos (%)	Carbohidratos (%)
Levadura de panadería	39	1	38
Carne	43	34	1
Leche	26	28	38
Arroz	8	2	77
Soja	37	20	30
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	14-22	12-17
<i>Haematococcus pluvialis</i>	48	15	27
<i>Dunaliella salina</i>	39-61	14-20	14-18
<i>Spirulina maxima</i>	60-71	4-9	8-14
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	21	17
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	12-14	10-17
<i>Porphyridium cruentum</i>	28-39	9-14	40-57

Tabla 10. Composición química (en % del peso seco total) de diferentes microalgas, (Rendón Castrillón, L. J., 2017)

Especie	Proteína	Carbohidratos	Lípidos
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	10-17	12-14
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	08-18	21-52	16-40
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Spirulina maxima</i>	60-71	13-16	06-07
<i>Dunaliella Salina</i>	57	32	9
<i>Tetraselmis suecica</i>	39	8	7
<i>Isochrysis galbana</i>	41	5	21

Aunque, la mayoría de los resultados obtenidos son prometedores, también existen casos de efectos secundarios y alergias, debido a la estructura tridimensional de las proteínas y otros componentes presentes en la célula, también el procesamiento insuficiente reduce la digestibilidad y causa trastornos intestinales (Rani et al., 2018), esto indica incrementar esfuerzos para aislar las proteínas en su forma nativa y determinar su bioactividad. Las proteínas de las microalgas son sensibles, lo

que dificulta su extracción y aislarlas sin dañarlas, por ello las investigaciones se han enfocado en estudiar los efectos de los péptidos (Ejlke et al., 2017), se observado que la cantidad y el orden de los aminoácidos, las cuales son las unidades más pequeñas que forman la proteína, son muy importantes pues, dependiendo del acomodo y combinación de los aminoácidos, se pueden obtener resultados diferentes, hasta el momento se han agrupado en 4 tipos: antioxidantes, antihipertensivo, hipolipidémicos y antimicrobianos (Yücepe & Özçelik, 2016).

El valor nutricional de una especie de microalga está relacionado con su composición bioquímica. (Gouveia et al., 2008). El análisis de su composición química indica que las microalgas contienen muchas proteínas, azúcares complejos, minerales, vitaminas y otros productos beneficiosos como carotenoides, fitoesteroles y polifenoles, algunas también tienen ácidos grasos omega-3, como EPA y DHA (B et al., 2015). Por lo tanto, la calidad nutricional de una proteína depende de su proporción y disponibilidad de aminoácidos, en la tabla 11, se presenta el perfil de aminoácidos de algunas microalgas y alimentos cotidianos, comparándolo con el estándar proteico recomendado por la OMS/FAO (1973) y la mayoría de las microalgas tienen un perfil de aminoácidos que supera al de las proteínas de referencia y las proteínas de otros alimentos (Becker, 2007).

Tabla 11. Perfil de aminoácidos de diferentes algas en comparación con las fuentes convencionales de proteína y el patrón de referencia de la OMS / FAO (por cada 100 g de proteína), (Becker, 2007).

Fuente	Ile	Leu	Val	Lys	Phe	Tyr	Met	Cys	Try	Thr	Ala	Arg	Asp	Glu	Gly	His	Pro	Ser
OMS/FAO	4.0	7.0	5.0	5.5	6.0	3.5	1.0											
Huevos	6.6	8.8	7.2	5.3	5.8	4.2	3.2	2.3	1.7	5.0		6.2	11.0	12.6	4.2	2.4	4.2	6.9
Soya	5.3	7.7	5.3	6.4	5.0	3.7	1.3	1.9	1.4	4.0	5.0	7.4	1.3	19.0	4.5	2.6	5.3	5.8
<i>Chlorella vulgaris</i>	3.8	8.8	5.5	8.4	5.0	3.4	2.2	1.4	2.1	4.8	7.9	6.4	9.0	11.6	5.8	2.0	4.8	4.1
<i>Dunaliella Salina</i>	4.2	11.0	5.8	7.0	5.8	3.7	2.3	1.2	0.7	5.4	7.3	7.3	10.4	12.7	5.5	1.8	3.3	4.6
<i>Spirulina sp</i>	6.7	9.8	7.1	4.8	5.3	5.3	2.5	0.9	0.3	6.2	9.5	7.3	11.8	10.3	5.7	2.2	4.2	5.1
<i>Scenedesmus obliquus</i>	3.6	7.3	6.0	5.6	4.8	3.2	1.5	0.6	0.3	5.1	9.0	7.1	8.4	10.7	7.1	2.1	3.9	3.8
<i>Arthrospira sp.</i>	6.0	8.0	6.5	4.6	4.9	3.9	1.4	0.4	1.4	4.6	6.8	6.5	8.6	12.6	4.8	1.8	3.9	4.2

En 1960, se evaluó el valor nutricional de microalgas *Chlorella*, *Scenedesmus obliquus* y *S. quadricauda*, cultivadas en agua residual, mostrando que la digestibilidad en las ovejas, de la fracción hidrocarbonada de las microalgas era menor que la del heno, por tanto, la fibra de las algas es más difícil de digerir y se apreció una tendencia similar en las vacas. (Gonzalez, Aguado, & Alvares, 1996). Para el caso de las gallinas alimentadas con *Chlorella* condujo a un aumento del ácido linolénico y DHA en la yema de huevo en un porcentaje de 2 y 10 %, reduciendo el ácido docosaheptaenoico, principalmente cuando la cantidad de algas añadida a la alimentación excede del 10 %, y en el caso de las gallinas ponedoras mejoró el color de la yema de huevo al adicionar *Spirulina* en su dieta (García, C, 2013).

Recientemente a los rumiantes cuya dieta era complementada con algas, se observó que sus productos eran enriquecidos con ácidos grasos poliinsaturados de alto valor nutricional, investigadores han mostrado que la adición de microalgas como *Schizochytrium sp.* en dietas de vacas lecheras o cabras; en las vacas incrementaron los niveles de DHA y ácido linoleico y se reducen los ácidos grasos saturados, en el caso de la adición de esta cepa en el alimento a cabras aumentó los niveles de DHA y EPA en la leche, yogurt o queso (Papadopoulos et al., 2002). Las especies *Phaeodactylum tricornutum* o *Isochrysis galbana*, también acumulan EPA y DHA en la forma de microgotas citoplasmáticas de triglicéridos (B et al., 2015)

En el caso de las dietas de conejos diversos investigadores han mostrado que la incorporación de *Spirulina platensis*, reduce los niveles de colesterol en la sangre e incrementa el colesterol lipoproteico, además se ha estudiado que las algas ricas en ácidos grasos poliinsaturados enriquecen la carne con estos ácidos grasos. Otro estudio encontró que la incorporación de *S. platensis* en la dieta de conejos adultos, incrementó la digestibilidad de la proteína cruda. (García, C, 2013)

Los cerdos son otro grupo de animales que potencialmente pueden consumir microalgas (Gonzalez, Aguado, & Alvares, 1996), las especies que se han utilizado como un suplemento proteico y de DHA, son las microalgas *S. platensis* y *Schizochytrium sp.*, (García, C, 2013). También se ha utilizado una mezcla de *Chlorella* y *Scenedesmus* para sustituir proporciones de harina de soja y de algodón en la alimentación, la especie de *Scenedesmus* se ha utilizado para sustituir la harina de alfalfa en pienso para cerdos en una proporción del 12% de la ración obteniendo resultados favorables (Gonzalez, Aguado, & Alvares, 1996).

El área con mayor crecimiento en los últimos años dentro del campo de la producción de alimentos es la acuicultura ya que diariamente aumenta su producción en variedad de nuevas especies y cantidad (Borowitzka, 1999) debido a que las microalgas pueden usarse como colorantes en la alimentación de peces como carpas, salmones, camarones, etc. (Gouveia et al., 2008). Sin embargo, también existen alternativas a las algas como las levaduras y alimentos microencapsulados empleados en la crianza de muchas especies acuáticas, larvas y rotíferos, crustáceos y peces, aunque existen otras y la industria relacionada con este fin, tiene un alto valor además de un tamaño considerable en el mercado (Borowitzka, 1999).

El uso de las microalgas en la acuicultura facilita la crianza de larvas de peces y moluscos en las piscifactorías, aumentando el índice de supervivencia ya que mejoran la alimentación y condiciones de desarrollo (García, C, 2013). Actualmente, en la acuicultura se utilizan más de 40 especies diferentes, las cuales se seleccionaron según su aporte nutricional y su factibilidad de producción masiva (García, C, 2013). Algunas especies marinas destinadas a la acuicultura se muestran en la tabla 12, así como su respectiva composición de proteínas, carbohidratos y lípidos.

Tabla 12. Perfil bioquímico de las cepas marinas destinadas a acuicultura, (Richmond et al., 2010)

Especie de microalga	Proteínas, % d.w.	Carbohidratos, % d.w.	Lípidos, % d.w.
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	34	6,0	16
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	34	8,8	19
<i>Tetraselmis chui</i>	31	12,1	17
<i>Isochrysis aff. galbana</i> (T-ISO)	23	6,0	20
<i>Nannochloropsis</i> sp.	40	20,0	27
<i>Pavlova lutheri</i>	29	9,0	12

En base a lo expuesto, las microalgas son ideales para suplementar la dieta tanto humana como animal, tiene una buena relación costo-beneficio para mejorar la alimentación, ya que aportan macro y micronutrientes y son una fuente muy buena de ácidos grasos omega-3, especialmente DHA, en la forma de triglicéridos y de fosfolípidos de alta biodisponibilidad que el cuerpo puede aprovechar fácilmente, de manera limpia, eficiente y renovable (B et al., 2015). Sin embargo, aunque las investigaciones sobre el campo de las microalgas aumentan, el enfoque es obtener y producir biocombustibles como el biodiesel y bioalcohol, lo que ralentiza la obtención de otros metabolitos de las microalgas útiles para la alimentación y la medicina. (Olmedo Galarza V., 2019)

Además, las tecnologías actuales aún requieren mejorar para obtener metabolitos asépticos y que conserven de forma óptima sus propiedades, para que la producción de alimentos con características funcionales se ha aceptado de manera masiva por los consumidores, deben también ser accesibles (Olmedo Galarza V., 2019), y cumplir con los estándares de salubridad requeridos.

Sector Agrícola

El territorio nacional mexicano está conformado por 198 millones de hectáreas, de las cuales 145 millones o cerca del 73 % se dedican a la actividad agropecuaria, en donde las tierras de cultivo ocupan cerca de 30 millones de hectáreas, lo que representa alrededor del 16 % del territorio nacional y los agostaderos ocupan 115 millones. El área dedicada a la producción de cultivos de carácter temporal es aproximadamente del 76 %, es decir, que se cultiva por temporadas o campañas cortas, mientras que el 24 % restante corresponde a tierras de riego en donde se cultiva durante todo el año, produciendo el 55 % de toda la producción agrícola total y el 70 % de las exportaciones agrícolas del país en 2022 (Ismael Corona Ramírez, 2016). Información proporcionada por INEGI en el año 2022 nos muestra las unidades de producción agropecuaria activas, en descanso y las forestales activas como se observa en la figura 15.



Figura 16. Unidades de producción y superficie agrícola, (INEGI, 2022)

De la producción total global, la aportación al PIB del sector primario es menor frente a otras actividades económicas como son la industria y los servicios como se observa en la figura 16, sin embargo este sector es responsable del abasto oportuno de los alimentos, productos indispensables para lograr la estabilidad y el desarrollo armónico de cualquier sociedad, además contribuyen a procesos de crecimiento económico en determinadas regiones de un país (Programa Institucional Financiero Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2018).

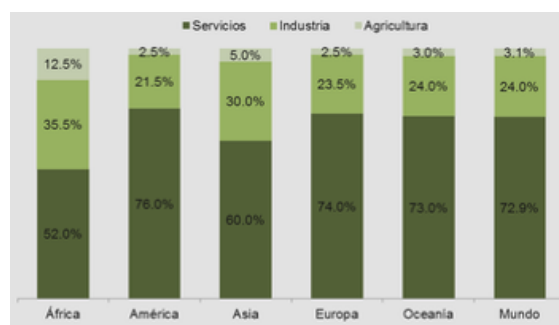


Figura 17. Porcentaje de contribución al PIB Mundial de cada sector, (Banco Mundial, 2011)

Los principales cuatro cultivos a los que se destina la mayor parte de la tierra cultivada anualmente son: maíz, sorgo, frijol y trigo, aunque existe una reducción en el porcentaje de tierra destinada a los cereales en general, el maíz ha mantenido su presencia como principal cultivo. En México, la agricultura es un sector productivo importante, aunque su participación en el PIB nacional es apenas del 3.7 %, su incidencia en el desarrollo económico, social y ambiental es mayor de lo que el indicador considera (Ismael Corona Ramírez, 2016).

Casi la cuarta parte de la población nacional habita en pequeñas localidades rurales, casi 24 millones de mexicanos y de las 199 mil localidades del país, 196 mil corresponden al medio rural, aunque la vida rural en México se extiende más allá de esas pequeñas localidades, la agricultura es una actividad fundamental. Esta actividad proporciona empleo a un 13% de la población total del país,

esto equivale a aproximadamente 3.3 millones de agricultores y 4.6 millones de trabajadores asalariados, así como familiares no remunerados (Ismael Corona Ramírez, 2016).

En lo referente a la población ocupada en actividades propias de la agricultura, ganadería y otras relacionadas, representa el 13.7 % de la población ocupada total del país, de esa población el 65.9 % trabaja en agricultura y el 28.8 % en ganadería, mientras que el resto se dedica a otras actividades, las cifras dejan entrever que existe un reto importante en mejorar la productividad económica del sector (Programa Institucional Financiero Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2018).

En el campo mexicano, existen hay 5.3 millones de unidades económicas rurales, de estas 3.9 millones, lo que representa el 72.6 % corresponden a unidades de subsistencia o autoconsumo, es decir, no tienen una actividad empresarial significativa, mientras que el 8.4% que representa 448 mil unidades, están involucradas en actividades empresariales, lo que indica que un pequeño porcentaje de las unidades rurales están generando negocios con potencial de crecimiento y apenas 18 mil unidades, que equivalen al 0.3 %, forman parte del sector empresarial dinámico, por su mayor innovación, crecimiento e impacto en la economía (Ismael Corona Ramírez, 2016).

Entre los años 1996 y 2006, las importaciones aumentaron un 7.9 % anual, de igual forma las exportaciones en un 9.1 % anual, de dólares nominales, estas tasas de crecimiento han excedido la tasa de crecimiento del PIB por lo que la apertura comercial de México le ha permitido expandirse o integrarse a los mercados extranjeros. Esto se ve reflejado en la balanza comercial de forma que si se aumenta la competitividad y eficiencia en el campo mexicano también aumentan las exportaciones de productos agrícolas hacia otros países, generando un impacto directamente proporcional a las finanzas públicas del país de origen. (Ismael Corona Ramírez, 2016)

Estados Unidos es el principal consumidor de las exportaciones agrícolas y alimenticias de México representando el 86 % de todas las exportaciones agropecuarias de México debido a que el país posee varias ventajas sobre sus competidores, exceptuando a Canadá, pues se ubica cerca de la mayoría de los centros de consumo de alimentos de Estados Unidos. (Ismael Corona Ramírez, 2016)

Según el programa institucional 2013-2018 de la financiera nacional de desarrollo agropecuario, rural, forestal y pesquero, el sector agroalimentario y el desarrollo rural de forma histórica, siempre se le ha considerado a este sector como prioritario para el diseño de políticas públicas a nivel local, nacional e internacional, debido a cuestiones económicas y estratégicas (Programa Institucional Financiero Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2018).

El Plan Nacional de Desarrollo (PND), plantea las características del sector, las metas e inversiones, así como los programas sectoriales, para la construcción de un sector primario eficiente se requiere de financiamiento y créditos de forma que sean palanca real de crecimiento en las actividades agrícolas, ganaderas, pesqueras, forestales y rurales. En particular, el PND establece

consideraciones, el primer elemento establece que es necesario ampliar la inversión y fortalecer la capitalización del sector, ya que un freno a la productividad es el equipamiento e infraestructura, en segundo lugar se señala que solo un bajo porcentaje de las unidades productivas tiene acceso al financiamiento y por último, fomentar la innovación y el desarrollo tecnológico, para lograr un óptimo desarrollo del sector (Programa Institucional Financiero Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2018). La mayoría del sector primario no cuenta con el apoyo financiero adecuado, como se muestra en el histograma de la figura 17.

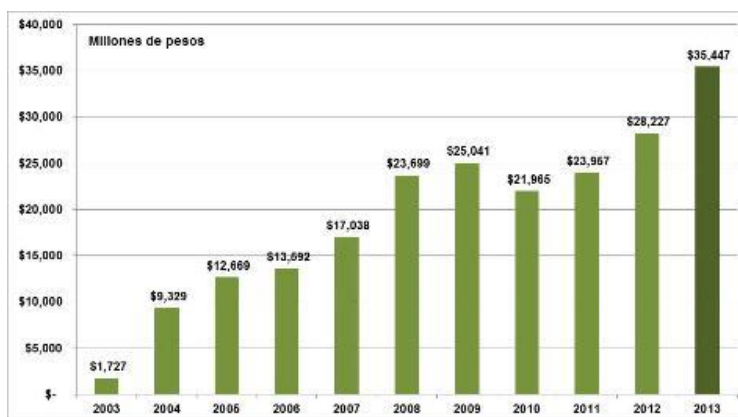


Figura 18. Financiamiento rural desde 2003 hasta 2013, (Financiera Nacional, 2013)

Del dinero que se reparte en toda la economía, solo el 1.5 % se destina al sector rural, además, únicamente el 6 % de las unidades agrícolas y ganaderas pueden acceder a créditos formales, lo que significa que recibe muy poca inversión, limitando su posibilidad de invertir, crecer y mejorar su productividad. Otro enorme obstáculo para el campo mexicano es que la mayoría de los agricultores no cuentan con una capacitación profesional, utilizan métodos empíricos transmitidos de generación en generación dando como resultado conocimientos limitados y para que la agricultura empiece a formar parte del desarrollo económico requiere una constante actualización, además de implementación de métodos y tecnologías innovadoras, pero no existen programas efectivos para lograrlo (Ismael Corona Ramírez, 2016).

Además, las instituciones de investigación no están todas conectadas entre sí y las universidades no tienen programas establecidos para el desarrollo e implementación de tecnología en la agricultura mexicana, dado al aumento poblacional a nivel mundial y a que estos necesitaran de alimentos para su subsistencia, es importante visualizar una oportunidad para convertir al campo mexicano en un sector estratégico de crecimiento económico y sea la principal fuente de ingresos del país debido a que la riqueza natural y la capacidad existe, sólo falta que todos los participantes del sector se unan (Ismael Corona Ramírez, 2016).

Consumo de recursos de este sector

Como se mencionó anteriormente, México enfrenta a diversos retos estructurales, entre los que se encuentran: la certeza jurídica, las hectáreas de tierra requeridas, problemas de financiamiento, debilidades institucionales y cambios en la dinámica demográfica, es necesario promover la responsabilidad social a un enfoque sustentable por parte de los pequeños productores organizados en ejidos que buscan el crecimiento de su producción. Además, es esencial que los productos de exportación y para el mercado doméstico satisfagan las demandas de los consumidores, las medidas sanitarias y fitosanitarias sobre la calidad e inocuidad de los alimentos cumpliendo requisitos de trazabilidad, además de buenas prácticas agrícolas (Ismael Corona Ramírez, 2016).

Estos mayores requerimientos de sanidad pueden generar una mayor polarización de los productores nacionales, de forma que aquellos productores que no tengan la capacidad de cumplir dichos requerimientos quedan rezagados, causando nuevos desafíos que las políticas públicas deben resolver. Un punto relevante al momento de tomar decisiones políticas es la degradación ambiental y los efectos del cambio climático, los cuales representan un enorme reto que requiere de una visión científico-técnico, además de contar con esquemas de participación social a nivel local y regional a gran escala de forma que se integren los agentes sociales, ambientales, económicos e institucionales, en el proceso (Ismael Corona Ramírez, 2016).

El Programa Sectorial identificó diez retos a enfrentar por el sector agroalimentario del país, que requiere de estrategias que permitan estimular el crecimiento sustentable del sector primario, (Programa Institucional Financiero Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2018). Debido a las finalidades de esta investigación las cuestiones sociales serán englobadas al final de los impactos del sector, otorgando prioridad a los recursos naturales:

Impactos a la atmósfera: El sector agrícola está expuesto a múltiples factores externos que pueden afectar la productividad de los campos, particularmente el abasto, la calidad, precio y acceso de la población a los alimentos (Programa Institucional Financiero Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2018). Los fenómenos climáticos afectan la disponibilidad de recursos hídricos para el riego, además alteran los patrones de precipitación y afectan la producción de la agricultura temporal (Cisneros Estrada, 2016).

Dentro de este escenario del cambio climático, este puede causar un aumento en la temperatura y una disminución de lluvias, lo que genera sequía, por tanto, la sequía meteorológica es cuando en un periodo de tiempo, la precipitación es inferior a la media esperada en esa temporada del año (Sánchez Gasca M., 2024). En cuanto a factores en donde la agricultura contribuye al cambio climático, este sector es la principal fuente de emisión de CH₄ y N₂O, en menor medida, aunque también importante el CO₂ que contribuyen al calentamiento global (García et al., 2006).

Dióxido de carbono CO₂: Las tierras agrícolas tienen una alta capacidad para absorber carbono, sin embargo, gran parte de este carbono capturado se libera nuevamente a la atmósfera cuando se

cosechan los productos agrícolas o se dejan residuos en los cultivos, aunque posteriormente se vuelve a capturar ese carbono, muchos suelos agrícolas hoy en día emiten más carbono del que absorben, actuando como fuente de emisión de este gas (IPCC, 2000), otra práctica que ocasiona esto es, la quema agrícola o quema de residuos agrícolas. Caso que no ocurre en la agricultura ecológica ya que este sistema de cultivo reduce las emisiones (ECCP, 2004).

Metano CH₄: Las prácticas agrícolas intensivas y el uso de fertilizantes, son responsables de emitir más del 50 % del metano producido por actividades humanas, lo que también contribuye en gran medida a las emisiones de óxido nitroso (Malhi et al., 2002), sin embargo, este gas se genera principalmente en la ganadería como ya se ha abordado anteriormente.

Óxido nitroso N₂O: Se produce principalmente por el uso de fertilizantes nitrogenados, tanto orgánicos como minerales, y también en suelos ricos en materia orgánica, como en arrozales y turberas (CCP 7 Agriculture, 2001). Por lo tanto, la fertilización nitrogenada y durante su procesamiento el suelo emite N₂O (Bouwman 1990; Houghton et al., 1992).

Además, la agricultura libera otros compuestos como partículas finas resultantes de la erosión del suelo, polen, partículas generadas a partir de actividades de quema de rastrojos, compuestos orgánicos volátiles (COV) debido a la descomposición de materia orgánica y a pesticidas.

Impactos en la hidrosfera: El agua posee un valor casi infinito para la humanidad debido a que es fundamental para la vida, la sociedad y la economía, en contraste, en la actualidad los recursos hídricos sufren una crisis debido a su uso contaminación y uso desmedido, por lo que millones de personas carecen de acceso al agua (HLPW, 2017). La agricultura es la actividad que requiere y consume más agua dentro del sector agropecuario y de forma general entre los demás usos consuntivos, en su mayoría el agua consumida por esta actividad proviene de los acuíferos subterráneos (González Villareal et al., 2022).

Datos de 2019 en México, muestran que el mayor consumo de agua corresponde al agropecuario con un 77 %, seguidos por el abastecimiento público con un 14 %, las termoeléctricas con un 5 % y un 4 % con la que se abastece a la industria, por lo que, en el contexto de cambio climático, el estrés hídrico resulta preocupante la baja eficiencia del uso del agua en dicha actividad (Sánchez Gasca M., 2024; Neme Castillo, Valderrama Santibáñez, & Chiatchoua, 2021).

La ineficiencia en el uso de este recurso genera que el impacto de la producción agropecuaria sea proporcional al incremento de demanda del agua (Galindo, 2010), el rezago en la tecnología y la infraestructura de riego generan que entre el 40 % y el 60 % del agua utilizada no sea aprovechada lo cual es preocupante debido al alto consumo que requiere la agricultura (González Villareal et al., 2022). Del agua que es usada para riego el 74 % de la superficie agrícola es cultivada de forma temporal, por ende, depende de la precipitación, mientras que el 26 % cuenta con sistemas de riego, aumentando cuatro veces su productividad (Programa Institucional Financiero Nacional de

Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2018). Para dar tratamiento a las aguas residuales que genera esta actividad, se requieren 1.58 % de las unidades económicas y esta agua se reúsa para diversos fines, como agua de proceso con un 0.64 %, jardinería y limpieza en un 0.47 % y descarga municipal un 0.42 % (Data México, n.d.). Se puede preservar el recurso al evitar el vertimiento de estas aguas residuales de forma directa, reducir los costos de tratamiento, conservando y recargando los acuíferos de aguas subterráneas (Moscoso, 1993; Cepis, 2004).

Emplear aguas residuales tratadas ofrece beneficios, como mejorar la fertilidad de los suelos agrícolas debido al contenido de materia orgánica, macronutrientes como nitrógeno (N) y fósforo (P), y oligoelementos como sodio (Na) y potasio (K) presentes en dicha agua, lo cual permite en algunos casos reducir o evitar el uso de fertilizantes químicos, lo que también genera beneficios económicos al sector (Hoek et al., 2002, citados por Medeiros et al., 2005). Sin embargo, su uso requiere considerar aspectos relacionados a la calidad, evitando así riesgos a la salud pública, sobre todo por microorganismos patógenos y es la razón principal de establecer regulaciones para el reúso de forma segura de estas aguas en diferentes sectores (Metcalf y Eddy, 2003).

El reúso del agua residual tratada la agricultura permite mantener un suministro constante que compense la escasez del recurso, esta puede ser causada por la estacionalidad o la distribución irregular de otras fuentes de abastecimiento a lo largo del año (Lara y Hernández, 2003), la sequía hidrológica, puede deberse a un mal manejo de los recursos hídricos, ya que las fuentes de agua superficiales y/o subterráneas se encuentran por debajo de sus niveles medios, generalmente también puede ocurrir como consecuencia de la sequía meteorológica (Sánchez Gasca M., 2024).

En 2006, la OMS publicó guías actualizadas sobre el uso de aguas residuales, excretas y aguas grises (WHO, 2006), estas son una herramienta para el manejo de las aguas residuales en la agricultura, de forma que se maximice la seguridad para la salud pública. La recolección de información debe incluir factores como clima, estación, etc. y deben ser medidos constantemente, en el sitio específico, estos varían según la región, en cuanto al agua debe incluir un análisis microbiano, de riesgo sobre los patógenos presentes en aguas residuales, campos y cosechas regados (Silva et al., 2008). Los países que tienen una normatividad sobre este tema toman como referencia a lo establecido por la EPA, así como la clasificación por tipos del reúso de la OMS y de la FAO lo referente a límites máximos permisibles de algunas sustancias, en México es competencia de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) que es quien regula el reúso de aguas residuales para la agricultura (Silva et al., 2008).

Del tipo de cultivo depende la calidad del agua tratada requerida para el riego en la agricultura, si los cultivos se van a consumir sin ningún tipo de cocción y no pasan por un proceso comercial, como es el caso de las hortalizas frescas, el uso del agua está restringido, mientras que, si los cultivos están destinados un procesamiento comercial como productos enlatados, o aquellos que no se consumen, como los pastos, no son tantas las restricciones para el riego (OMS, 1989).

Impactos en el suelo: En algunos casos, los sistemas de producción causan una sobreexplotación de los recursos naturales, deteriorando los ecosistemas (Programa Institucional Financiero Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2018). Esto refleja una distribución desigual de los recursos y de la tierra, pues se detalla más adelante que la cantidad de productores no corresponde proporcionalmente con la superficie que poseen.

La agricultura requiere grandes extensiones de tierra como se estableció anteriormente, sin embargo, la distribución de los recursos agrícolas es extremadamente desigual, en donde los pequeños productores representan el 60 % de las unidades de producción agropecuaria cada productor en promedio tiene apenas 2.5 hectáreas y en conjunto representan un 15 % de toda la superficie cultivable del país, mientras que los grandes productores representan el 40 % restante, cada uno en promedio cuenta con 16 hectáreas, lo que representa 6 veces más que los pequeños y en total concentran el 85 % de la superficie cultivable (Ismael Corona Ramírez, 2016). En la figura 18 se observan los estados donde se concentran los principales cultivos agrícolas medidos en hectáreas de superficie sembrada, pero si se desea conocer la concentración de algún cultivo en específico, mediante el mapa digital de México se puede obtener la información.

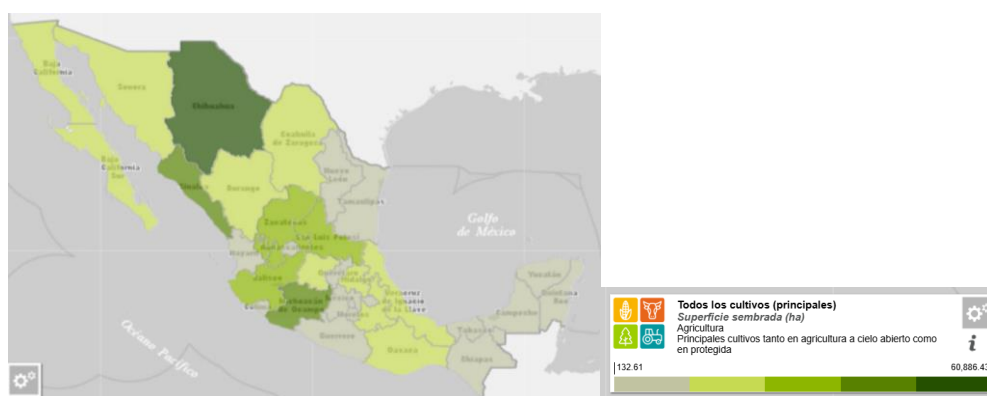


Figura 19. Distribución de los principales cultivos en agricultura a cielo abierto en México, (*Mapa Digital De México En Línea, n.d.*)

De forma global, se estima que cerca del 40 % de la tierra agrícola presenta impactos severos en su productividad, debido a procesos de degradación de suelos, esta cantidad puede elevarse hasta el 75 % en algunas regiones (Scherr y Yadav, 1997). La agricultura puede afectar la calidad de los suelos, mediante la pérdida de fertilidad y la erosión, lo cual puede limitar la autosuficiencia, seguridad y soberanía alimentaria (Adhikari y Hartemink, 2016; Lal, 2009), afecta principalmente a aquellos pequeños agricultores cuya subsistencia depende de los rendimientos de sus cultivos (Vanek, Jones y Drinkwater, 2016). La calidad de los suelos es un factor que influye en la productividad agrícola, y por ende afecta los ingresos familiares (Flores-Sánchez et al., 2015).

La erosión de suelos se puede definir como un proceso dinámico complejo que genera un deterioro de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Lal, 2008), como la pérdida de nutrientes (Herrero

2017), la reducción de la productividad agrícola (Pimentel, 2006; Bullock et al., 2017) y en consecuencia se elevan los costos de producción, ya que se busca restaurar al suelo el máximo de sus condiciones originales (Cotler, López y Martínez Trinidad, 2011), entonces en función de la resiliencia de los suelos, la erosión puede ocasionar impactos por temporadas, efectos acumulativos los cuales causan una menor capacidad de soporte, compactación, pérdida de estructura, nutrientes y disponibilidad de agua hacia las plantas, lo cual afecta significativamente su rendimiento. La intensidad de las afectaciones depende de las condiciones climatológicas, topográficas, del tipo de suelo y el respectivo manejo (Beach et al. 2006; Montgomery, 2007).

En cuanto a impactos químicos, el uso de plaguicidas y fertilizantes químicos pueden ocasionar acidificación y salinización de los suelos, de hecho, esta práctica es algo común en la agricultura utilizando estas sustancias para el control de las enfermedades o para mejorar la productividad de los cultivos. Pese a los beneficios, muchos plaguicidas han demostrado ser perjudiciales para el ambiente y la salud debido a su persistencia y a que son compuestos bioacumulables, algunos pueden permanecer en los suelos durante décadas y por ello se ha prohibido su uso (Dacal, 2022).

Los plaguicidas pueden contaminar los suelos de forma directa al aplicarse en el terreno, o pueden llegar al suelo por vías indirectas, como la deposición atmosférica o el riego de aguas contaminada, estos compuestos pueden transportarse hasta las frutas y hortalizas, entonces el suelo tiene un doble comportamiento, puede almacenar los contaminantes o puede transmitirlos al agua subterránea, aire u organismos vivos. Muchos plaguicidas tienden a acumularse en la materia orgánica del suelo, una parte es transformada por los microorganismos del suelo o por la acción de la radiación UV, otra parte puede ser metabolizada o puede permanecer en el suelo (Dacal, 2022).

Finalmente, el cambio climático es un proceso que puede afectar al suelo agrícola, este fenómeno puede extenderse y agudizarse, debido a los cambios en cantidad e intensidad de precipitación, además de patrones espacio temporales de las lluvias pueden acelerar los procesos de erosión (Li, 2016). Un fenómeno derivado de factores meteorológicos y humanos, que afecta la producción del suelo, es la sequía agrícola, ya que la humedad del suelo es insuficiente para que los cultivos prosperen, este último tipo de sequía es complejo, pues cada tipo de cultivo tiene requerimientos de agua específicos (Landa, Magaña, & Neri, 2008). Entonces, el deterioro de los suelos impacta significativamente la producción agrícola, limitando la adopción de nuevas tecnologías (Barbosa y Carrao, 2017), esto repercute en el valor nutricional de los alimentos (Brevik y Sauer, 2015).

Impactos sociales: Un sector con millones de productores donde la inmensa mayoría cerca del 73 % apenas subsiste, mientras que una fracción mínima de menos del 1 % concentra la capacidad productiva competitiva, generando un círculo vicioso de baja productividad, pobreza y falta de acceso al financiamiento Entre 2000 y 2012 la productividad disminuyó debido a diversas problemáticas y factores que afectan al sector, encontrando que las condiciones rurales de la mayoría de las unidades productivas tienen poco nivel de capitalización, problemas de tenencia de tierra, escaso nivel tecnológico, entre otras, dificultan el otorgamiento de crédito, tanto en tasa, plazos y

garantías, a su vez genera que en el ámbito rural cerca del 40.1 % de la población sufre de pobreza moderada, mientras que el 21.5 % sufre pobreza extrema (Programa Institucional Financiero Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2018).

En estudios recientes se ha observado que existen alrededor de 5.3 millones de unidades económicas rurales en total, de ellos la gran mayoría cerca de un 73 % de productores apenas sobreviven o tienen poca participación comercial, mientras que una fracción mínima, menor al 1 % de productores son realmente competitivos, el 18,000 unidades de empresas agrícolas de escala competitiva, al mismo tiempo más del 70 % de los productores cuentan con extensiones muy pequeñas de menos de 5 hectáreas, lo que limita la productividad y rentabilidad (Programa Institucional Financiero Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero, 2018).

Otro factor a tomar en cuenta es la desigualdad regional entre las regiones norte, centro y sur del país, debido a diferencias en el crecimiento de su economía, el ingreso de sus habitantes y factores ambientales, en cuanto a el marco jurídico-institucional en años recientes, se instrumentaron programas desarticulados, sin embargo presentan problemas para la coordinación entre instituciones, además las reglas de operación son complejas y poco claras, lo cual a su vez implica que el desafío crediticio tenga un fuerte componente estructural, el cual requiere estrategias transversales e interinstitucionales y explica los patrones deficientes de financiamiento actual, sin embargo históricamente el acceso al financiamiento rural ha sido limitado por décadas.

Finalmente, el INEGI reporta los principales problemas para realizarla actividad agrícola, medidos en un porcentaje de unidades de producción agropecuaria como se muestra en la figura 19, existen otras problemáticas relacionadas al sector agrícola que requieren solucionarse.

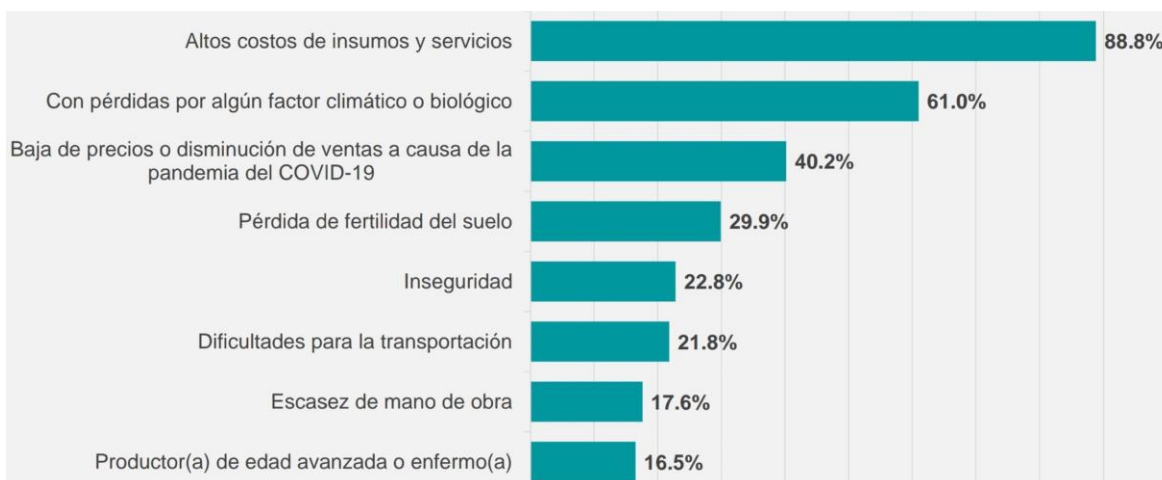


Figura 20. Reporte de los principales problemas en la actividad agropecuaria, (INEGI, 2022)

Estrategias para la mitigación de impactos

Como se mencionó anteriormente, la agricultura se relaciona con el cambio climático pues contribuye como emisor de gases de efecto invernadero (GEI), y también se ve afectada por este fenómeno, se espera que en las próximas décadas los impactos del cambio climático incrementen, por ello es vital optar por estrategias de mitigación y prácticas agrícolas que contribuyan a reducir los impactos del sector agrícola, así como acciones que remedien los impactos que ya se han emitido (Martínez Rodríguez, B. V. M. R., & Viguera, M. R., 2017). Es vital que los gobiernos locales promuevan y regulen acciones para la mitigación en la agricultura por medio de programas de expansión agroforestal y reforestación, agricultura sostenible, uso racional de agroquímicos, incentivos para crear un mercado competitivo, sistemas de pago por servicios ambientales (PSA), entre otros (García A, Laurín M, Llosá MJ, González V, Sanz MJ, Porcuna JL, 2008).

Se toma en cuenta, que las acciones e mitigaciones atañan a un costo, pues requiere de invertir en tecnología de bajas emisiones, o una actividad adicional a la producción, costo que puede ser significativo para el productor, sin embargo, no realizar estas actividades de mitigación también tiene un costo pues equivalente a las pérdidas ocasionadas por el calentamiento global debido a la emisión de GEI. Se estima que a nivel global 3 °C de calentamiento global causa una pérdida de 1.3 % en el Producto Interno Bruto (PIB) a nivel mundial (Tol RSJ, 2012), también se ha estimado que una tonelada de dióxido de carbono sin mitigar en el presente ocasionará daños de alrededor de 37 dólares en el futuro (Revesz RL, Howard PH, Arrow K, Goulder LH, Kopp RE, et al. 2014).

Los costos de mitigación dependen, del potencial de mitigación de la actividad agrícola y el costo asociado a cada actividad, (IPCC, 2014) como se mencionó anteriormente, se toma en cuenta que no todas las estrategias son asequibles para los productores debido a cuestiones económicas, de tiempo, legislativas, etc., sin embargo, el sector agrícola posee un gran potencial para adaptarse y mitigar los impactos negativos, la elección de medidas y estrategias adecuadas dependen de las opciones disponibles, la escala, facilidades que proporciona el gobierno, costos económicos accesibles, así como interés y conocimiento por parte del productor (Burke M, Lobell D, 2010).

Esta adaptación implica un proceso continuo que toma en cuenta impactos actuales y futuros, por tanto, deben ser progresivos, en cuanto a las estrategias de mitigación deben realizarse en función del contexto social, económico y ecológico, considerando los recursos disponibles, pensando siempre en los resultados a largo plazo (Hulme M, 2003; Martínez Rodríguez, B. V. M. R., & Viguera, M. R., 2017). Aunque, los esfuerzos realizados en la actualidad no van a frenar los impactos del cambio climático a corto plazo, estas actividades de mitigación si pueden reducir los impactos a futuro, por tanto, el manejo adecuado de los sistemas agropecuarios por parte de los productores y técnicos son esenciales (Martínez Rodríguez, B. V. M. R., & Viguera, M. R., 2017).

Impactos a la atmósfera: Entre las estrategias que pueden mitigar las emisiones de CO₂, CH₄, N₂O y COVs, son: reducir al mínimo la labranza para procesos de oxidación del suelo que liberan CO₂,

reducir emisiones que genera la maquinaria de labranza, evitar volatilidad o lixiviación de los nutrientes de productos agroquímicos (Martínez Rodríguez, B. V. M. R., & Viguera, M. R., 2017).

Impactos a la hidrosfera: La política hidráulica intenta resolver los problemas de la escasez mediante la asignación de volúmenes de agua a los diversos sectores, sin embargo, no es tarea fácil pues existen sectores prioritarios y la complejidad aumenta al mismo ritmo que la demanda, mientras la disponibilidad del recurso disminuye (Sumpsi et al., 1998), por lo que es necesario implementar una gestión integral de manejo del agua. La agricultura al ser una actividad primaria es una de las más afectadas en condiciones de sequía ocasionando pérdidas económicas, materiales, de orden social y ambiental, si bien la sequía no se puede evitar, sí se pueden mitigar los efectos nocivos mediante una adecuada gestión integral del recurso, invirtiendo en tecnología eficiente empleada para el riego, lo cual resulta insuficiente si no se genera conciencia sobre su valor real, solo de esta forma se encamina a una agricultura sostenible (Velasco, I. V., 2006).

Para ello es necesario conocer detalladamente las demandas sectoriales, además de la vulnerabilidad de cada sector, la elasticidad de esa demanda, así como las alternativas para que cada sector pueda sostenerse o superar la escasez de agua sin generar impactos negativos o una crisis severa (Sumpsi et al., 1998). Garantizar el suministro capaz de satisfacer la demanda del uso agrícola y de los demás sectores por lo general depende de características demográficas, estructurales, sociales y económicas, por ende resulta imposible formular un plan general de gestión para los recursos hídricos que contemple todos los casos y por ello es específico para cada ocasión, se dice que establecer un plan para enfrentar la sequía es como un traje a la medida, el plan debe ser lo suficientemente flexible para que sea adaptable a diversas situaciones que se pueden presentar en una misma cuenca o región (Postel, 1992).

Por tanto, los principios de la gestión integral del agua no sólo implican el aprovechamiento del recurso, sino que también considera factores ambientales, sociales, legales, etc., que inciden en el proceso, aplicando paulatinamente la teoría al realizar adaptaciones prácticas produciendo cambios en la gobernabilidad (Velasco, I. V., 2006). Una de las estrategias más viables y efectivas en la conservación del agua, es establecer y actualizar periódicamente una tarifa al agua de riego y la dotación mediante un esquema de volumen por año. La facturación del agua por volumen consumido engloba además los costos de depuración de los efluentes, lo cual le asigna un costo real al agua por suministro, resultando en un ahorro de agua y una reducción de los costos, la escasez ha fungido como el principal motor de la conciencia ahorradora (Velasco, I. V., 2006).

La tendencia actual a cobrar el servicio de riego por volumen es probablemente la mejor opción debido a que es un sistema equitativo para pequeños o grandes productores, en donde los usuarios del mismo sector según la dotación requerida pagarán la misma cantidad por el volumen consumido, sin embargo, implica una mejora tecnológica para que el sistema sea eficiente por parte del suministrados y del usuario (Sumpsi et al., 1998). Como ya se mencionó, el sector agrícola es el usuario mayoritario del agua, por ende, las transacciones tienen un costo relativamente bajo tanto

para el vendedor como para el comprador (Velasco, I. V., 2006). El reúso de aguas residuales tratadas en la agricultura también implica una inversión y un costo, sin embargo, es una alternativa viable que alivia el estrés hídrico como se detalla más adelante.

Los principios fundamentales para una gestión moderna del agua son los siguientes (Martínez, 2001; Dourojeanni et al., 2002): mantener una visión global e integrada del recurso, clarificar las responsabilidades de los actores, concesionar adecuadamente las grandes cuencas hidrográficas y de los acuíferos, participación directa y activa de las diferentes administraciones y colectividades territoriales, prevenir el despilfarro y la contaminación permanente o accidental, educar respecto a la problemática, aplicar una tarifa justa para el suministro y depuración (Velasco, I. V., 2006).

Al definir y evaluar una política de gestión del agua, es clave considerar si es funcional y ofrece resultados previsible, incluso si parece obsoleta, siempre que la percepción de justicia económica beneficie a todos los actores involucrados (Sumpsi et al., 1998). Los usos no domésticos deben priorizarse según su importancia social, económica y ambiental, considerando la fragilidad de los ecosistemas, los impactos a corto y largo plazo, y la capacidad de resistencia ante crisis hídricas. Es importante recordar que, en situaciones de sequía, la población suele movilizarse en busca de mejores condiciones, en países como México resulta en desplazamientos hacia grandes ciudades o fronteras, sin resolver el problema y generando otros inconvenientes (Velasco I. V., 2006).

Impactos al suelo: Estas actividades en la agricultura involucra la gestión de nutrientes en el suelo, producción de cultivos, disminuir los desechos agrícolas y preservar el agua, además de mejorar la gestión e intensidad de tierras de pastoreo, aumento de la productividad, prevención de incendios e introducción de especies, recuperación de tierras degradadas a través del control de la erosión y mejora del ciclo de nutrientes del suelo (Martínez Rodríguez, B.V.M.R., & Viguera, M. R, 2017).

Algunas estrategias de mitigación de los impactos al suelo son: utilizar insumos agrícolas locales con la finalidad de reducir la huella de carbono, promover el uso de abonos orgánicos y reducir el uso de fertilizantes sintéticos, de la misma forma reducir el uso de la maquinaria y combustibles fósiles, reducir o evitar la frecuencia y la extensión de las quemas, evitar prácticas de cortar y quemar, establecer sistemas agroforestales o silvopastoriles, incorporar los restos de cosecha al suelo para incrementar la materia orgánica y captura o fijar carbono en el suelo, establecer plantaciones forestales, restaurar los suelos degradados, poner en práctica la rotación de cultivos y cultivos intercalados, reducir el uso de fertilizantes y darle a la tierra un periodo de descanso entre cosechas (Martínez Rodríguez, B. V. M. R., & Viguera, M. R., 2017).

En cuanto a los fertilizantes y otros agroquímicos es necesario implementar estrategias que mejoren la eficiencia, calculando la cantidad requerida por el cultivo, utilizar fertilizantes de liberación lenta, implementar prácticas de conservación de suelos reduciendo la erosión, planificar la aplicación de fertilizante en base en el tiempo de acción, utilizar biodigestores para gestión de residuos y generar energía limpia (Martínez Rodríguez, B. V. M. R., & Viguera, M. R., 2017).

Diversos estudios han evaluado estrategias y técnicas efectivas para la conservación del suelo y mantener la capacidad productiva de los sistemas agrícolas, como la rotación de cultivos, labranza mínima, cubiertas vegetales y enmiendas orgánicas para conservar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Montenegro Gómez et al., 2019), las actividades de conservación implementadas en los sitios de estudio resultaron en la mejora de diversos indicadores como la materia orgánica, infiltración, actividad microbiana y reduciendo la erosión (Amores Mena, 2020; Salgado Pérez, 2017). La investigación también incluye factores sociales, culturales y económicos, ya que influyen en que los agricultores adopten estas técnicas, de entre estos factores el económico presenta desafíos en las prácticas de conservación del suelo (Tomasini et al., 2019).

La capacidad del suelo y las técnicas de manejo guardan una relación (Asmarani et al., 2023). Técnicas que reducen la compactación, la erosionabilidad del suelo es, la siembra directa y la labranza de conservación (Gómez Calderón et al., 2018), otra estrategia que reduce la erosión del suelo y la escorrentía es el biocarbón (Gholami et al., 2019). En cuanto a la labranza de conservación es un sistema de laboreo en donde quedan al menos un 30% de residuos de cosecha anterior en el suelo (Mendoza Moreno, 2021), lo cual aumenta la materia orgánica, la actividad microbiana del suelo, reduciendo su erosión y degradación (Cabrera Aguilera, 2022). Mientras que para mejorar el equilibrio de los nutrientes, la materia orgánica del suelo, el uso del agua, además de prevenir diversos patógenos como plagas, malezas y enfermedades, la rotación de cultivos es clave (Colque et al., 2021), la cual consiste en plantar diferentes tipos de cultivos en una secuencia planificada, contrastando con plantaciones en donde todo el campo se destina a uno o dos cultivos o cultivar con una secuencia que no considera factores agronómicos (Schmidt & Amiotti, 2017).

Para este último tipo, es posible cultivar en tiras, las que se alinean a lo largo del relieve, es efectivo en pendientes, protegiendo al suelo de hundimientos por escorrentías debido a la lluvia (Campi, 2023), el cultivo en franjas se refiere a plantar cultivos sistemáticamente a lo largo de una pendiente, lo cual reduce la erosión (Cingolani et al., 2022). Un sistema que protege al suelo y a los cultivos de fuertes ráfagas de viento, factor de degradación que arrastra partículas del suelo, es el cultivo cortavientos (Ortiz et al., 2023), finalmente el cultivo de cobertura es complementario, pues puede combinarse con los anteriores o usarse para cubrir el suelo, con el fin de protegerlo de efectos erosivos del viento, lluvia y cambios de temperatura (Morales et al., 2022), todas requieren de un manejo agroecológico de malezas (Cordeau et al., 2022).

Por tanto, las prácticas agroecológicas incrementan los servicios ecosistémicos y conservan el suelo (Muller et al., 2017). Diversos estudios muestran aumentos en los rendimientos de los cultivos a mediano y largo plazo, por lo que estas estrategias integrales de manejo sostenible son esenciales para mejorar la resiliencia ante el cambio climático y mantener la capacidad productiva de los agroecosistemas (León & Acevedo, 2021; Oñate et al., 2023; Teshome et al., 2022), sin embargo falta investigación comparando diferentes técnicas en un mismo contexto en donde se documenten las mejoras en rendimientos en un mayor tiempo (Carranza Patiño et al., 2024).

Entre otras mitigaciones que se pueden aplicar al sector agrícola, son las mostradas en la figura 20, medidas en unidades de producción agropecuarias facilitando observar su importancia.

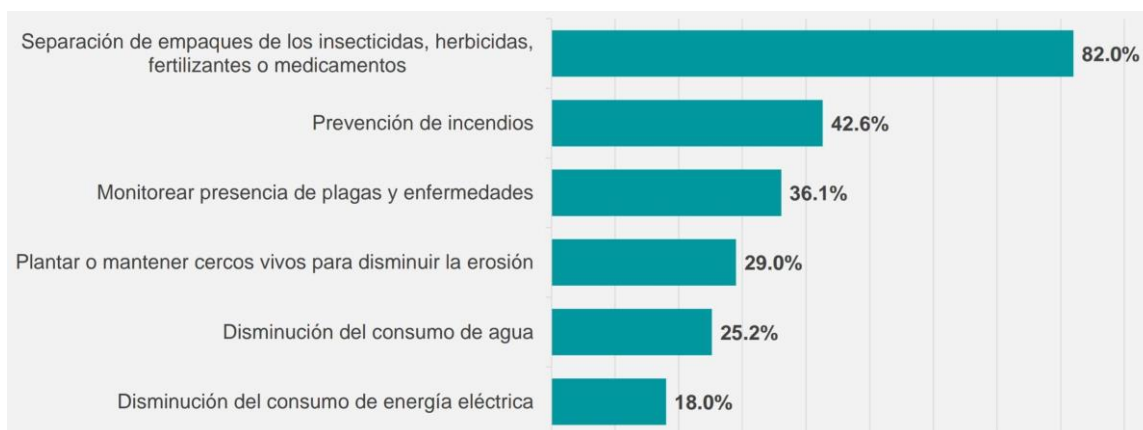


Figura 21. Porcentaje de unidades de producción agropecuaria que realizan acciones para protección del ambiente, (INEGI, 2022)

Si bien adaptar el sector agrícola tiene un costo (IPCC. 2014; CEPAL, CAC, SICA, 2013), que puede ser un esfuerzo extra o mano de obra adicional, cambios de cultivo o variedad, costos sociales como las migraciones en busca de trabajo, o costos económicos, adaptarse es más rentable que enfrentar los costos y consecuencias derivadas del cambio climático en el campo, esta condición es igual para todos los países (Stern N. 2006; Galindo LM, Samaniego J, Alatorre JE, Carbonell JF. 2014), aunque implementar estas técnicas y estrategias tienen un beneficio superior al esperado no pueden eliminar por completo los costos relacionados al cambio climático (Chambwera M, Heal G, Dubeux C, Hallegatte S, Leclerc L, et al. 2014).

Aunque la adaptación resulta rentable a medio y largo plazo, los gastos iniciales asociados a algunas prácticas pueden desalentar a los productores, por ende, que los productores perciban los mayores rendimientos netos, los menores costos de producción o una combinación de estos beneficios relacionados resultan fundamentales para impulsar a los productores a ponerlas en marcha. (Bradshaw B, Dolan H, Smit B., 2004).

El Banco Mundial calcula que los costos totales para adaptar el sector agrícola en Latinoamérica oscilarán entre mil y cuatro mil millones de dólares al año (CEPAL, FAO, IICA, 2014), resultando vital aumentar el apoyo institucional y gubernamental, para transicionar a economías de bajas emisiones e implementar dichas estrategias, resulta clave reformar políticas públicas, la regulación ambiental, educación, investigación y las medidas de financiación (Chambwera M, Heal G, Dubeux C, Hallegatte S, Leclerc L, et al., 2014; ECLAC, 2010).

No hay una estrategia de adaptación más adecuada o universal, sino que para cada contexto, condición y productor requiere de una estrategia que se ajuste mejor a sus posibilidades. (Martínez-

Rodríguez, B. V. M. R., & Viguera, M. R., 2017). Técnicas como la labranza cero, rotación de cultivos y aplicación de abonos orgánicos no solo mejoran la estructura del suelo, también contribuyen significativamente a la mitigación del cambio climático al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y capturar el carbono. Para lograr una agricultura verdaderamente sostenible y resiliente frente al cambio climático, es necesario un enfoque integral que combine aspectos ecológicos, sociales y económicos (Carranza Patiño et al., 2024), en la figura 13 se muestran algunas actividades de mitigación en el sector agropecuario.

Tabla 13. Posibles co-beneficios y trade-offs de algunas actividades de mitigación en la agricultura y ganadería, (Martínez Rodríguez, B. V. M. R., & Viguera, M. R., 2017)

Medida	Ejemplos	Seguridad alimentaria (productividad)	Calidad del agua	Conservación del agua	calidad del suelo	calidad del aire	Biodiversidad	Conservación de energía	Valor estético y de recreación
Manejo de tierras de cultivo	Actividades agronómicas	+	+/-	+/-	+	+/-	+/-	-	+/-
	Manejo de nutrientes	-/+	+		+	+		+	
	Manejo de residuos/labranza	+	+/-	+	+		+	+	
	Manejo del agua (riego, drenaje)	+	+/-	+/-	+/-			-	
	Agroforestería	+/-	+/-	-			+	+	
	Tierras en descanso/charrales	-	+	+	+	+	+	+	+
Manejo de tierras para pastoreo/ mejoramiento de pastos/ uso de sistemas silvopastoriles	Menor intensidad de pastoreo	+/-			+		+		+
	Manejo mejorado de nutrientes	+	+/-	+	+		+	-	+/-
	Manejo mejorado del fuego	+	+/-			-	+/-		+/-
	Mejora de pastos (Introducción de especies, leguminosas, etc.)	+			+			+	
Manejo de suelos orgánicos	Evitar drenaje de /restaurar humedales				+		+	+	+
Restauración de suelos degradados	Control de la erosión, adición de enmiendas orgánicas, enmiendas de nutrientes	+	+		+		+		+
Manejo del ganado	Prácticas de alimentación mejoradas	+			+/-				
	Cambios manejo y estructurales a largo plazo y cría de animales	+							
Manejo de biosólidos/ estiércol	Mejoramiento de manejo y almacenamiento de biosólidos	+	+/-		+	+/-			
	Digestión anaeróbica					+		+	
	Uso más eficiente como fuente de nutrientes	+	+		+	+		+	

Notas: +indica medidas de mitigación con co-beneficios positivos; - indica actividades con trade-offs o relaciones negativas; +/- indica que pueden darse relaciones positivas o negativas entre las medidas de mitigación y los factores considerados.

Microalgas como bioinsumos para la protección y mejora de cultivos agrícolas

La pérdida de cultivos vegetales debido a la presencia de plagas, genera gran preocupación, sin embargo, el uso de pesticidas sintéticos provoca impactos ambientales, de ahí parte la importancia de desarrollar investigaciones en el campo de los biopesticidas (Costa et al., 2019), estas complejas sustancias de origen químico son necesarias para la solución de problemas que presentan los cultivos agrícolas, sin embargo, pueden ocasionar un conjunto de riesgos mayores a los beneficios si no se usan adecuadamente (Campos, M. A. R., 2018), además el continuo aumento demográfico ha

causado una dependencia y aumento en la demanda de alimentos y por ende requieren de mayores usos de productos agroquímicos (Sánchez M.J., 2017).

Se ha manifestado frecuentemente que, gracias al empleo de plaguicidas, herbicidas y fertilizantes, las cosechas y la producción agrícola ha incrementado significativamente, reduciendo las pérdidas en la producción de forma espectacular (Hotchkiss, 1992). Por tanto, es indudable el beneficio generado por los plaguicidas contra la lucha contra enfermedades transmitidas por vectores o con huéspedes intermediarios (Maroni y col., 1993), teniendo en cuenta el riesgo potencial derivado de la exposición continuada a compuestos químicos para la vida animal, humana por lo que es requerido la investigación de biocidas (Longnecker y cols., 1997).

Si bien los agroquímicos son productos comúnmente utilizados en la agricultura, al ser aplicados continuamente y de forma excesiva a los cultivos, impactan al ecosistema, debido a que los componentes tóxicos pueden movilizarse en la atmósfera a grandes distancias como residuos volátiles y mediante la precipitación afectan nuevas áreas (Galindo, L. A. G. et al, 2020), impactan del suelo mediante escorrentía, lixiviación o lavado y contaminan fuentes de agua tanto superficial como subterráneas por medio del agua de riego o precipitación. Estos productos agroquímicos incluyen dos compuestos principales: pesticidas y fertilizantes. (Campos, M. A. R., 2018).

Los primeros son sustancias utilizadas para prevenir, evitar o controlar las plagas en los cultivos, aunque sus efectos inhibidores sobre las plagas dañinas protegiendo a las plantas, los pesticidas también pueden presentar toxicidad para los seres humanos y el ambiente (Costa et al., 2019). Por tanto, esta actividad causa problemas de carácter irreversible en algunos casos, como la pérdida de la fertilidad de los suelos, contaminación en los ecosistemas, aparición de nuevas plagas y resistencia genética de organismos perjudiciales, disminuye la diversidad genética, produce alimentos con residuos tóxicos y disminuye las especies silvestres (Campos, M. A. R., 2018).

Los pesticidas ingresan al cuerpo humano mediante diferentes mecanismos, puede ser a través de las vías respiratorias, la boca o piel, en forma de partículas de polvo, agua o vapor (Campos, M. A. R., 2018). Los organismos internacionales, como la FAO (Organización para la Agricultura y la alimentación) y la OMS (Organización Mundial de la Salud), han establecido niveles máximos permisibles respecto a la ingestión de plaguicidas dependiendo de la toxicidad del producto y a la proporción del alimento en la dieta normal, las autoridades internacionales establecen una legislación apropiada para mantener vigilancia con controles analíticos sobre los residuos de los plaguicidas (Sánchez M.J., 2017; Olea, N., & Fernández, M., 2001).

A estas problemáticas se les suma el carácter farmacológico de algunos principios activos, como la persistencia medioambiental de sustancias no utilizadas en la actualidad, pero empleadas en el pasado, su persistencia causa que se pueda encontrar en cualquier ser vivo en cualquier parte del planeta, incluso aquellos individuos que no se expusieron, si no a través de la cadena trófica. Por ello, la Unión Europea debería intervenir y preservar la salud (Olea, N., & Fernández, M., 2001).

En segundo lugar, actualmente existe una amplia variedad de fertilizantes en el mercado, algunos son amigables con el medio, mientras que otros no se lixivian de forma adecuada, ya que proporciona y estabilizan los índices de nutrientes en el suelo, que requiere la planta, dentro de los fertilizantes de liberación lenta, existen ganancias en costo de producción (Olea, N., & Fernández, M., 2001). Entonces, los fertilizantes nitrogenados son cruciales para la agricultura a nivel mundial, ya que proporciona una liberación gradual de nitrógeno, apoyando a un crecimiento sostenido de los cultivos, reduciendo las pérdidas por lixiviación y volatilización, reduciendo el uso excesivo de los fertilizantes convencionales, mejorando prácticas actuales (Agroptima 2022).

Sin embargo, los fertilizantes convencionales al liberar los nutrientes rápidamente desencadenan la lixiviación de nitrógeno y fósforo representando un riesgo al filtrarse en el suelo llegando a capas más profundas, contaminando aguas subterráneas y superficiales, afectando la calidad de los ecosistemas (Paredes 2014). Es importante señalar que la mayoría de los agricultores pequeños y novatos piensan erróneamente que aplicar una cantidad mayor de fertilizantes nitrogenados, maximizará la producción y contrarrestan las enfermedades o plagas en los cultivos, esta mentalidad desconoce los impactos al suelo, así como en la producción a largo plazo (Páez 2020). La aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados y convencionales además contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero, produciendo de óxido nitroso N_2O , el cual posee un potencial de calentamiento global mayor que el dióxido de carbono CO_2 , contribuyendo al cambio climático, afectando el ambiente y las prácticas agrícolas inadecuadas pueden intensificar este problema, por lo que se requieren métodos sostenibles en el sector agrícola (Gonzales 2019).

Por otro lado, los fungicidas inhiben el crecimiento, interfiriendo en los procesos celulares críticos del hongo, el modo de acción de cada fungicida es particular y se refiere al proceso celular específico que inhibe, como enzimas específicas a las que se unen los fungicidas (FRAC España, 2019). Las pérdidas de cultivos que ocasionan los hongos fitopatógenos ascienden a miles de millones de dólares al año a nivel mundial (National Academy of Sciences 1980), además de generar pérdidas de producción, pérdidas económicas, estas pueden ser cuantitativas o cualitativas en el sabor, textura, color o forma del cultivo, las pérdidas en la producción biológica alteran el crecimiento y desarrollo de las plantas hospedantes (Ashworth et al 1981, Agrios 1988).

Los microorganismos fitopatógenos pueden ser los virus, hongos, bacterias, nematodos fitoplasmas, y viroides, sin embargo, los hongos son el grupo que más enfermedades ocasiona y por ende son los más investigados, se conoce que más de 8,000 especies de hongos ocasionan enfermedades en las plantas (National Academy of Sciences 1980, Agrios 1988). Algunos de los principales hongos fitopatógenos se encuentran: "*Alternaria solani* (Ell.et Mart.), *Alternaria alternata* Nees, *Alternaria spp.*, *Fusarium oxysporum* Schlecht, *Fusarium solani* (Mart), *Fusarium spp.*, *Phoma sp.*, *Rhizoctonia solani* Kühn, *Phytophthora spp.*, *Sclerotinia spp.*, *Pythium spp.* y especies de los géneros *Aspergillus*, *Penicillium* y *Rhizopus*." (Rodríguez, M. G., González, L. C., Fernández, M. R., Pérez, G., Carretera, E. D. C. L. C., 2008).

Estos patógenos pueden afectar la semilla, el exterior e interior, produciendo síntomas como enanismo, exudaciones y disminuyendo su germinación, algunas veces la semilla puede estar infectada sin presentar síntomas. (Rodríguez, M. G., González, L. C., Fernández, M. R., Pérez, G., Carretera, E. D. C. L. C., 2008) La capacidad adaptativa de algunos hongos fitopatógenos les permite distribuirse ampliamente, mientras que las características de adaptación de otros son limitada o sumamente especializados, lo cual restringe su distribución, además estos hongos ocasionan daños en todos los suelos y agroecosistemas del mundo (Cook & Baker 1983).

Dependiendo de los niveles de exposición y de los riesgos asociados a los plaguicidas se identifican dos colectivos humanos expuestos, una parte es la población en general expuesta a niveles mínimos debido a la contaminación de aire, agua y alimentos (Olea, N., & Fernández, M., 2001) entonces, los consumidores sufren de una exposición indirecta, causando daños a largo plazo por ingesta de alimentos contaminados, pero aparentemente inocuos. El segundo colectivo al que se le han realizado más investigaciones de salud ya que se dedican a las actividades agrícolas y por ende esta población está expuesta directamente a los agroquímicos (Campos, M. A. R., 2018). Además de los agricultores que aplican los agroquímicos, los trabajadores de la industria química que los produce, se exponen a niveles relativamente altos y facilitando categorizar la exposición y determinar el riesgo real asociado (Olea, N., & Fernández, M., 2001).

Para aquellos cuya exposición es continua, comúnmente los síntomas inmediatos producto de una intoxicación aguda y pueden ser graves, son náuseas, diarrea, ansiedad, dolores abdominales, confusión y mareos (Campos, M. A. R., 2018), mientras que a largo plazo la exposición de plaguicidas se manifiestan en el desarrollo y la funcionalidad de diferentes órganos y sistemas causando alteraciones neurológicas, reproductivas, endocrinas e inmunológicas y alteraciones en la aparición de tumores (Olea y cols., 1996; Parrón y cols. 1996). Es importante resaltar, que, a pesar de ingerir dosis insignificantes, estos residuos químicos debido a su persistencia se mantienen y acumulan en el cuerpo para después representar un riesgo importante (Campos, M. A. R., 2018).

Según lo mencionado, una legislación de productos químicos promueve el uso racional de los plaguicidas a través de la implementación de controles y análisis sobre los pesticidas (Campos, M. A. R., 2018). Comprender que el uso indiscriminado de estos químicos persistentes y tóxicos, afectan los ecosistemas y la salud humana, resulta crucial desarrollar alternativas menos perjudiciales promoviendo prácticas sostenibles, además resulta esencial que los productores conozcan los riesgos laborales, efectos adversos según el tipo de plaguicida, así como las medidas de protección (Posada C., G. C., Quintero, J. A., Palacios-Arrieta, D., & Páez-Ciro, J. M. (2023)

Se recomiendan las siguientes medidas de bioseguridad para evitar la dispersión del patógeno: desinfectar las herramientas, equipo, maquinaria e implementos utilizados durante las tareas agrícolas con hipoclorito de sodio al 3 %, el personal deberá portar vestimentas, calzado adecuados y limpios, el material vegetal infectado deberá ser eliminado en un área destinada para eso, evitar mover el material vegetal y/o suelo infectado a otras zonas sin infección (Aguaysol et al., 2014).

Implementación de modelos circulares en el sector agrícola, del residuo al recurso

La transición hacia un modelo circular, tiene como objetivo generar un sistema de circuito cerrado en el cual se optimicen los recursos, se promueva la sostenibilidad en el sector agrícola, se reduzca el desperdicio, así como el impacto ambiental, mediante la adaptación de prácticas agrícolas, estrategias y técnicas innovadoras, este enfoque integral considera en su totalidad el ciclo de vida de la producción de alimentos, desde que se cultivan los productos, hasta la gestión de subproductos, así como de los residuos, optando por una agricultura regenerativa (Inneara, 2024).

El concepto de cierre del ciclo de nutrientes es un componente clave en la aplicación del esquema de economía circular en el sector, las prácticas agrícolas regenerativas minimizan la pérdida de materia orgánica, reduciendo la dependencia de insumos externos, minimizando la escorrentía y lixiviación de nutrientes, lo cual resulta beneficioso a largo plazo en los sistemas de producción de alimentos, implementar prácticas como la rotación de cultivos, la siembra de cobertura, agricultura vertical, la acuaponía, además, las enmiendas orgánicas contribuyen al ciclo efectivo de nutrientes del suelo mejorando su fertilidad y resiliencia, además la integración de la ganadería en la producción de cultivos auxilia al cierre del ciclo de nutrientes mediante la utilización del estiércol como un recurso valioso, generando agroecosistemas sostenibles (Inneara, 2024).

La valorización de los subproductos y coproductos generados a partir de las actividades agrícolas, así como del procesamiento de alimentos es un elemento central de los principios de la economía circular que no solo reduce los residuos gracias a la gestión eficiente de los residuos orgánicos, si no que desarrolla productos de valor agregado a partir de subproductos, como biobasados, alimento para animales, bioenergía, nutracéuticos, composta, producción de biogás, entre otras, es indispensable que la industria agrícola transforme los residuos orgánicos en materia prima para el campo ya que puede crear fuentes alternativas de ingresos y reduce el impacto ambiental de la generación de residuos (Inneara, 2024).

El compostaje de residuos orgánicos generados en el mismo campo, entre los que se encuentran los restos de frutas, verduras, plantas o cultivos, son procesados para dar lugar al compost, un abono de origen orgánico que es alto en nutrientes, precisamente por esta característica, el compost es un producto que auxilia como protección frente a la degradación progresiva, a la recuperación del terreno, además de fungir como un fertilizante orgánico de gran calidad (Santander, 2024).

Un aspecto clave de la eficiencia de recursos en el sector agrícola es la gestión responsable de los agroquímicos como fertilizantes, pesticidas, etc., en donde los agricultores pueden minimizar el uso de insumos sintéticos, esto promueve la salud del suelo y es importante priorizar las prácticas agrícolas orgánicas, regenerativas, estrategias de manejo integrado de plagas con enfoques agroecológicos que contribuyan a la producción agrícola generando una mayor productividad, al mismo tiempo que optimiza los recursos y se reducen los residuos (Inneara, 2024).

Dentro de la implementación de los principios de la economía circular en el sector agrícola, el reducir el desperdicio de alimentos y gestionar de forma eficiente los residuos orgánicos es fundamental, esto implica gestionar los residuos a lo largo de la cadena productiva de los alimentos, desde la producción inicial en donde los agricultores pueden optimizar las prácticas de cosecha, lo cual a su vez reduce la pérdida de alimentos, también se pueden emplear técnicas innovadoras de almacenamiento, mejorar procesos de distribución de forma que una mayor proporción de alimentos lleguen al consumidor final (Inneara, 2024).

Otra parte del punto anterior, es generar conciencia y educación en los consumidores sobre el desperdicio de alimentos, en la etapa de consumo, se pueden reducir significativamente dichos residuos a nivel doméstico, mediante los mercados de agricultores, las asociaciones de la granja a la mesa, los consumidores pueden contribuir activamente en el sistema alimentario de forma consciente, impulsando cambios en sus respectivos patrones de consumo, prefiriendo productos cultivados de manera local y sostenible, resultando vitales para concientizar y valorar de los productos locales (Inneara, 2024).

La promoción de los mercados, así como economías locales y temporales están relacionados a los principios de la economía circular ya que la industria agrícola puede reducir sus emisiones al reducir la distancia, las prácticas de agricultura agroecológica impulsan a la adopción generalizada debido al interés que generan para implementar los principios de la economía circular en las prácticas agrícolas, mejoran la calidad de los productos alimentarios, al mismo tiempo que se contribuye a la preservación de la biodiversidad (Inneara, 2024).

La colaboración y las sinergias del sector agroalimentario con otras industrias minimiza la dependencia de materiales vírgenes, reduciendo a su vez la generación de residuos, lo cual genera un proceso industrial más sostenible, un elemento crucial es la investigación y la innovación las cuales facilitan el desarrollo de soluciones innovadoras, las colaboraciones entre el sector agrícola, la industria tecnológica, así como las instituciones académicas y de investigación promueven la economía circular auxiliando a la transición del sector agroalimentario (Inneara, 2024).

El desarrollo y la adopción de tecnologías agrícolas avanzadas resultan ser herramientas para que la agricultura requiere para acelerar la transición hacia un esquema circular, aprovechando datos que generen soluciones digitales, monitoreo en tiempo real, los sistemas inteligentes de cultivo desempeñarán un papel crucial al momento de optimizar recursos, reducir residuos e incrementar la producción agrícola, aunado a la implementación de tecnologías es esencial continuar con la investigación e innovación para desarrollar materiales, así como soluciones biodegradables, empaques sostenibles, tecnologías avanzadas de procesamiento, que promuevan prácticas sostenibles en toda la cadena de valor que contribuyan en el avance de los principios de la economía circular (Inneara, 2024).

La implementación y desarrollo de políticas resulta un factor esencial para que la mayor parte de productores adopten dichas estrategias agroecológicas, establecer marcos regulatorios, así como incentivos financieros, mecanismos de apoyo, generan que los gobiernos alienten las prácticas agrícolas circulares, esto puede incluir programas, subsidios para la agricultura, así como proveer asistencia técnica, capacitación para agricultores y empresas agroalimentarias. Además, promover asociaciones público y privadas, colaboración de las partes interesadas en diferentes niveles de la cadena de suministro agroalimentaria, pueden fomentar iniciativas cohesivas (Inneara, 2024).

Algunos de los aspectos fundamentales que forman parte de los principios de la economía circular aplicado a la agricultura, es preservar el suelo, agua, atmósfera, la energía y otros insumos esenciales en el proceso productivo de alimentos, como la implementación de fuentes de energía renovable o tecnologías energéticamente eficientes, implementando prácticas sostenibles para el manejo del agua, sistemas de precisión de riego, etc. (Inneara, 2024).

Para precisar las estrategias de economía circular aplicadas al agua de riego, se pueden aplicar prácticas como la captación del agua de lluvia mediante sistemas específicos con esta finalidad, esto genera un consumo sostenible del agua, ofreciendo a los agricultores una vía de autoabastecimiento, con lo que en épocas de sequías no sufrirán pérdidas, esta técnica está asociada a la economía circular y genera especial interés en aquellas zonas con escasez de agua, en donde las autoridades se ven obligados a decretar cortes puntuales en el suministro de agua. (Santander, 2024) Sin embargo, existen varios puntos a considerar para su aplicación como las condiciones climáticas del lugar, costos de inversión, instalación en el sistema de riego, por lo que esta estrategia puede no resultar óptima para todos los agricultores.

Por otro lado, la agricultura de precisión es aquella en la que se utiliza la información disponible sobre la zona y se estudian las condiciones climáticas, así como las precipitaciones de los últimos años, con la finalidad de determinar al cultivo óptimo para cultivar en un terreno en específico, considerando sus condiciones, así como las características necesarias para su crecimiento como humedad, nutrientes y localización geográfica. Este sistema también integra tecnología, como sensores de humedad o implementación robótica, con la finalidad de impulsar la eficiencia energética, así como una utilización eficaz de recursos materiales y humanos (Santander, 2024).

Por lo que, la integración de los proyectos de reúso de las aguas residuales tratadas para agricultura debe contener un análisis detallado sobre la ubicación del proyecto, la delimitación de la superficie a irrigar con aguas residuales, la calidad del agua a reusar, nivel e infraestructura de tratamiento, volumen de agua tratada, análisis de suelos, análisis agronómico y económico para seleccionar los cultivos (Cisneros Estrada, 2016) algunas otras bases se muestran en la figura 21. Además, deben considerarse las condiciones existentes para planear y ejecutar el proyecto, así como las inversiones que requerirá, como adquirir equipo para elevar la calidad del agua de reúso, infraestructura que conduzca el agua tratada a las zonas de reúso, o en su defecto adecuar la infraestructura existente

para aprovechar las aguas residuales generadas por las poblaciones aledañas. A fin de solicitar apoyos económicos para ejecutar el proyecto, esta información proveerá el sustento técnico y la justificación para el reúso del agua (Cisneros Estrada, 2016).



Figura 22. Bases generales para proyectos de reúso en la agricultura, (Cisneros Estrada, 2016).

Finalmente, para contribuir a la solución de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que se relacionan con el sector agrario, es posible siempre y cuando, las partes interesadas contribuyan de forma colectiva a iniciativas de comunicación, educación, intercambio de conocimientos, financiamiento para la investigación, innovación y los gobiernos impulsen a desarrollar e implementar de forma general los principios de la economía circular en el sector agrícola, abogando por los beneficios de dichas estrategias, este sector posee un gran potencial de contribuir a la sostenibilidad, pues presenta una fuerte resiliencia a los desafíos generados a partir del crecimiento poblacional mundial, así como a los cambios ambientales, priorizando la preservación y regeneración de los recursos naturales (Inneara, 2024).

CAMPOS AGRÍCOLAS REGADOS CON AGUAS RESIDUALES

Como se mencionó anteriormente, en el apartado titulado "Panorama general de las aguas residuales", se detalla que, debido al aumento de la demanda es necesario emplear fuentes alternativas de agua, como las aguas residuales domésticas, además, la agricultura es el principal consumidor de recursos hídricos. Se utilizan aguas tratadas en menor proporción, aunque no necesariamente se tratan de forma adecuada, además siempre es recomendable tratarla antes de usarla, no obstante, la práctica predominante en los países de América Latina es el empleo de aguas residuales crudas o diluidas (Silva et al., 2008).

En la isla de Creta, Grecia hallazgos arqueológicos que se remontan casi 3.000 años, han revelado que las aguas residuales de los palacios se desalojaban por un sistema primitivo de alcantarillado, transportadas a las afueras de la ciudad y se usaban para el riego de huertas de olivares o en campos agrícolas de cultivos de trigo y cebada. Existen indicios de que en Inglaterra y Alemania en el siglo XVI las aguas residuales se aprovechaban para riego agrícola, conduciéndolas a sembradíos de árboles cuya madera era usada para la construcción (Cisneros Estrada, 2016).

El término "granjas de aguas residuales " se acuñó a mediados del siglo XVII, en donde las aguas residuales que provenían de las ciudades, eran utilizadas para el riego de cultivos agrícolas en muchos países, estas granjas evitaban la contaminación de los ríos, los cuales eran la principal fuente de abastecimiento para la población, esta práctica del reúso era aplicada a pequeña escala en sitios periféricos a las ciudades, los pequeños caudales de aguas residuales eran descargados sobre terrenos agrícolas (Cisneros Estrada, 2016), mientras que el término "campos de aplicación" surgió a principios de 1900, en donde el agua residual era canalizada y distribuida para el riego principalmente de plantaciones forestales, el crecimiento poblacional ocasionó que los volúmenes de aguas residuales aumentaran y a partir de 1910, el reúso del agua se diversificó dentro de las propias ciudades, usadas para el riego de parques, jardines, campos deportivos y diversos servicios al público, algunos sitios únicamente se destinaban para riego agrícola (Cisneros Estrada, 2016).

El uso de agua residual no tratada o diluida en la agricultura es una práctica centenaria que se ha realizado en todo el mundo, sin embargo, son nocivas para la salud humana y para el ambiente, esto a su vez afecta la economía (UNESCO, 2017). Se estima que las condiciones actuales empeoran por el aumento poblacional, principalmente en zonas áridas y corredores periurbanos ocasionando una escasez física y económica del agua, por consiguiente, las aguas residuales que aportan nutrientes al suelo agrícola, además de tener un costo bajo pueden ser una alternativa siempre y cuando se mitiguen los riesgos (Scott et al., 2004).

Entonces, la práctica de utilizar aguas residuales y grises en la agricultura, además de en la acuicultura, buscan la seguridad alimentaria de los hogares más vulnerables, además de mejorar su nutrición (World Health Organization [WHO], 2006).

Actualmente, a nivel mundial se estima que se vierten en el ambiente aproximadamente 2,250 km³ de agua residual al año, de este total, aguas residuales urbanas son 330 km³, 660 km³ son aguas residuales industriales especialmente agua empleada en refrigeración y 1260 km³ provienen del drenaje de tierras agrícolas (FAO, 2021). En América Latina, cerca de 400,000 m³ del agua residual cruda se descarga en cuerpos de agua superficiales y la mayoría de las veces los cultivos son regados con aguas residuales no tratadas, más de la mitad de este volumen de agua se genera en México (Post, 2006). En el sureste asiático, América Latina y África, de forma espontánea y no planificada se generó el riego con aguas residuales por parte de los agricultores más pobres de las áreas urbanas y rurales (Mara y Carnicross, 1990; Bakker et al., 2000), del total de agua residual producido a diario es tratado solamente el 8 % (WSIP et al., 2007).

Esta práctica genera riesgos en la salud pública, en especial cuando se utilizan para el consumo directo, por lo que se debe realizar siempre un tratamiento preliminar, primario y secundario, para remover de manera eficiente la materia orgánica y sólidos suspendidos, siendo esencial tomar en cuenta los requerimientos del cultivo a irrigar, así como el tipo de suelo, debido a los beneficios de su uso, a que no tienen ningún costo estable, además de que son abundantes incluso en época de sequías, muchos agricultores realizan esta práctica de forma oculta especialmente en las áreas urbanas, debido a que es una actividad sancionada en varios países, las aguas residuales a menudo no tratadas, son utilizadas para el riego de 10 % de los cultivos del mundo, desconociendo cómo se han producido los alimentos (Scott et al., 2004), se estima que las aguas residuales insuficientemente tratadas pueden llegar a regar cultivos con extensiones de aproximadamente 36 millones de hectáreas (OMS, 2022).

En México, el aprovechamiento de las aguas residuales surgió debido a la existente necesidad de desalojar aguas pluviales y residuales de la Ciudad de México la cual se encuentra situada en la parte meridional de la meseta central de la cuenca del Valle de México y cuya extensión es de 8,058 km², la ciudad está rodeada de cordilleras entrelazadas, por lo que las aguas pluviales y residuales no tienen una salida directa, entonces con el fin de evitar inundaciones y brotes de enfermedades entre la sociedad capitalina requiriendo un desagüe (Cisneros Estrada, 2016)

A partir de 1886, el agua residual sin ningún tratamiento previo se comenzó a reusar en riego agrícola, el agua residual se transportaba a lo largo de una distancia aproximada de 80 kilómetros, que es la distancia entre la Ciudad de México y la presa Endhó, la cual tiene una capacidad de almacenamiento de alrededor de 202 Hm³, favoreciendo la sedimentación y la aireación, procesos que son parte del tratamiento primario, ocurriendo de manera natural durante el transporte, mejorando la calidad del agua residual antes de su uso en la agricultura (Cisneros Estrada, 2016).

En 1920, las primeras zonas que aprovechaban las aguas residuales en el riego agrícola se situaron en las áreas de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y en el Valle del Mezquital, estas 10,000 hectáreas, pasaron a ser 90,211 hectáreas según el registro oficial de 2012, esta es la superficie regada con aguas

residuales, los primeros cultivos regados con dichas aguas fueron maíz forrajero y maíz para grano, así como alfalfa, cebada y avena (Cisneros Estrada, 2016).

En México, las aguas residuales tratadas o mezcladas para riego agrícola cubren una superficie de aproximadamente 178,952 hectáreas, como se muestra en la tabla 14, de los 86 distritos de riego 14 usan dicha agua, en muchas unidades de riego, el agua residual se diluye con agua de pozos, aumentando la superficie de riego a más de 166,131.2 ha, por ello, en 2016 la superficie agrícola total regada con aguas residuales era alrededor de 345,083 hectáreas (Cisneros Estrada, 2016).

Tabla 14. Aprovechamiento de aguas residuales por distritos de riego en México 2013-2014, (CONAGUA, 2015)

Distrito de Riego	Superficie dominada (ha)	Superficie regada con aguas residuales (ha)	Principales cultivos
D.R.003 Tula, Hgo.	52 270	43 564	De O-I: avena y cebada forrajera y trigo grano; de P-V: maíz grano y frijol, y de perennes: alfalfa y pastos
D.R. 100 Alfajayucan, Hgo.	32 118	21 103	De O-I: avena forrajera; de P-V: maíz grano, calabacita y chile, y de perennes: alfalfa
D.R. 030 Valsequillo, Pue.	33 206	21 000	P-V: maíz y sorgo grano y de perennes: alfalfa
D.R. 009 Valle de Juárez, Chih.	24 492	11 500	De O-I: trigo grano, de P-V: algodón, de perennes: alfalfa, y de segundos cultivos: sorgo forrajero
D.R. 088 Chiconautla, Edo, de Méx.	4 490	1 200	De O-I: avena forrajera; de P-V: maíz grano, y de perennes: alfalfa
D.R. 016 Morelos	33 768	15 000	De O-I: maíz grano, cebolla y calabacita; de P-V: maíz grano, arroz y ejote; de perennes: caña de azúcar y mango, y de segundos cultivos: maíz grano, jícama y arroz
D.R. 020 Morelia-Queréndaro, Mich.	20 665	16 702	De O-I: trigo y avena forrajera; de P-V: maíz y sorgo grano, y de perennes: alfalfa
D.R. 025 Bajo Río Bravo, Tamp.	248 391.48	27 000	De O-I: maíz, de P-V: sorgo grano, y de perennes: zacate buffel
D.R. 001 Pabellón, Ags.	11 800	5 825	De O-I: avena forrajera y pastos; de P-V: maíz grano y hortalizas; de perennes: alfalfa, y de segundos cultivos: maíz grano
D.R. 052 Durango	22 922.6	2 700	De O-I: avena y trigo grano; de P-V: maíz grano y maíz forrajero y de perennes: nogal y alfalfa
D.R. 031 Las Lajas, N.L.	3 693	1 918	De P-V: sorgo grano y de perennes: zacate buffel
D.R. 066 Santo Domingo, BCS	38 101	4 734	De O-I: garbanzo y trigo grano; de P-V: maíz grano y frijol alubia; de perennes: alfalfa, naranja y espárrago
D.R. 085 La Begoña, Gto.	10 823.0	3 874.0	De O-I: zanahoria, cebada y trigo grano; de P-V: sorgo y maíz grano y frijol; de perennes: alfalfa, y de segundos cultivos: sorgo grano
D.R. 112 Ajacuba, Hgo.	4 855.0	2 832.0	De O-I: avena y cebada forrajera; de P-V: maíz grano y de perennes: alfalfa
Total	530 772.08	178 952.00	

Fuente: Elaboración propia con datos de campo, documentos internos de las jefaturas de distritos de riego y complementado con datos de la Estadística agrícola 2013-2014 (CONAGUA (2015)

En México, los efluentes de aguas residuales actualmente se usan para el riego de jardines de forma restringida, en la industria o servicios sanitarios (Teorema ambiental, 2003). Estas aplicaciones se clasifican de acuerdo con el sector que recibe el beneficio, por ejemplo, el urbano, incluye irrigación de parques públicos, campos de atletismo, áreas residenciales y campos de golf, en el industrial el agua con cierto tratamiento se emplea en los sistemas de refrigeración y el principal uso se da en la agricultura para irrigar los cultivos (Gutiérrez, 2003).

Como se mencionó anteriormente, algo esencial a considerar son los contaminantes presentes en el agua residual, así como su concentración los cuales ocasionan riesgos a la salud y ambientales, por ello, en distintos países las normas oficiales vigentes marcan los límites máximos permisibles para descargar en cuerpos receptores de agua y/o suelos, o para fines productivos como la agricultura, acuicultura, ganadería, etc., o se reúsen en servicios al público (Cisneros Estrada, 2016). A escala mundial esta agua se recarga en el subsuelo, pasados 6 meses ó 2 años se extrae, según su nivel de tratamiento terciario y se usa para el abastecimiento de agua potable (Teorema ambiental, 2003), considerando a las aguas residuales como una fuente alternativa de abastecimiento de agua, necesaria para satisfacer la demanda del recurso (Silva et al., 2008).

En cuanto a los microorganismos patógenos, el tratamiento convencional de aguas residuales no es capaz de producir un efluente que cumpla con las recomendaciones de la OMS (1989), siendo ineficaces para remover los huevos de helmintos por lo que se requiere de tratamientos específicos de nivel terciario (Silva et al., 2008), sobre todo si el reúso está definido a la agricultura.

Otros compuestos presentes en las aguas residuales para riego que pueden originar riesgos en la salud humana son los contaminantes emergentes (CE), estas sustancias son complejas, debido a su composición variada y, a que existe un desconocimiento sobre sus efectos adversos en los suelos, agua, aire, tejidos vegetales y tejidos animales (C. Jiménez, 2011).

Países como España, Italia, Alemania, Canadá, Brasil, Grecia y Francia estiman que aproximadamente que 500 toneladas de analgésicos se vierten anualmente en fuentes hídricas superficiales, con concentraciones de ácido salicílico y diclofenaco de 0,22 µg/L y 3,02 µg/L, respectivamente (Heberer, 2002), los fármacos ingresan al medio acuático por fuentes antropogénicas, generando toxicidades y efectos adversos en organismos acuáticos y humanos (Kasprzyk-Hordern, Dinsdale, & Guwy, 2009).

La descargas y vertimientos directos de las aguas residuales no suelen considerar las condiciones del medio y de los cuerpos receptores, esta práctica es común en la mayoría de las ciudades de los países pobres debido a los beneficios, sin embargo, no respeta las regulaciones municipales o los estándares de calidad para el agua de riego, lo que representa problemas ambientales y riesgos a la salud (Von Sperling, 1996).

Para que el reúso de aguas residuales sea seguro y se emplee en actividades agrícolas se requiere de un tratamiento y manejo apropiados, aunque esta práctica se recomienda principalmente para aquellos cultivos a los cuales se les dará una transformación industrial, sin embargo, en América Latina mayoritariamente se usa en cultivos de consumo directo, como hortalizas, lo cual representa riesgos para la salud pública que deben ser considerados (Silva et al., 2008), aspecto que se detallan a continuación, así como algunas medidas para prevenir o mitigar dichos riesgos.

Afectación a la salud pública debido al riego agrícola con aguas residuales

Con base a lo anterior, es evidente que uno de los principales problemas de que el agua residual con o sin tratamiento sean usadas para el riego de cultivos agrícolas, es la presencia de virus, parásitos, bacterias, protozoarios y helmintos, los cuales representan un peligro para la salud humana, por ello, en este apartado se abordarán con mayor detalle los riesgos sanitarios que implica esta práctica, en los apartados titulados "consumo de recursos de este sector" de los sectores agrícola y ganadero, se evidencia que existen dos mecanismos de contaminación puntuales y no puntuales en el sector agropecuario.

Entonces las fuentes puntuales incluyen corrales de engorda, plantas procesadoras de alimentos y de agroquímicos, además de la descarga directa de estos residuos a cuerpos de agua, por otro lado, las fuentes no puntuales corresponden a la utilización de aguas residuales en la agricultura, además de los accidentes y derrames que ocurren en las lagunas de oxidación, situación que es especialmente frecuente en la región porcina (Rosario, 2008).

Es necesario recordar que la composición y concentraciones de las sustancias químicas y tipos de patógenos presentes en las aguas residuales varían de una región a otra, además de que también se ve influenciada por condiciones sanitarias y socioeconómicas del lugar de generación (Gerba & Rose, 2003). En cuanto al riesgo biológico en el agua residual puede ser de 10 a 1000 veces mayor en países en vía de desarrollo que en países industrializados, este riesgo depende de la concentración de parásitos, virus, protozoarios, helmintos, bacterias y schistosomas, los principales tipos de patógenos entéricos y sustancias de interés sanitario presentes en el agua residual empleada para riego agrícola se encuentran en la tabla 16 (Jaramillo, M. F., & Restrepo, I., 2024).

Entonces, el agua residual transmite enfermedades y estas pueden ser de carácter agudo o crónico (Craun et al., 1994). El riesgo agudo es la posibilidad de enfermarse a corto plazo por dosis infecciosas bajas y el riesgo crónico se refiere a contaminantes de naturaleza química que afectan la salud del ser humano por largos períodos de exposición (Guerra de Macedo, 1993), estas enfermedades a nivel mundial contribuyen significativamente en los índices de mortalidad prematura, principalmente en países en vía de desarrollo (Craun et al., 1994). Por otra parte, las enfermedades de origen microbiano pueden ser transmitidas de forma directa o indirecta por el agua, como lo indica la tabla 15, en donde se muestra la enfermedad y que patógeno la causa.

Algunos efectos en la salud humana son aún desconocidos o incomprendidos en su totalidad debido a que son emergentes (Alcalde Sanz, 2012), por ejemplo, los fármacos son disruptores endocrinos (DE) difíciles de remover en las plantas de tratamiento de agua residuales, por lo que pueden terminar nuevamente en fuentes de agua potable, causando una exposición crónica (Ternes, Bonerz, & Schmidt, 2001). Se ha demostrado que estos compuestos afectan el sistema endocrino y son denominados como disruptores endocrinos, además, están relacionados a cambios hormonales en

algunas especies de peces y en anfibios (Hutchinson, Ankley, Segner, & Tyler, 2006), además de afectar el sistema inmunológico de los organismos acuáticos (Fent, Weston, & Caminada, 2006)

Estos contaminantes emergentes, pueden contribuir a la formación de microorganismos resistentes, debido al amplio uso de antibióticos en el mundo aumenta su producción y consumo, generando resistencia microbiana, para los sistemas de tratamiento la presencia de estos microorganismos resistentes en el agua es un tema de gran importancia en el reúso de agua residual (C. Jiménez, 2011). Los microorganismos destacados que han reportado resistencia son: *Staphylococcus*, *Pseudomonas*, *Salmonellas*, *Escherichia* y *Aeromonas* (Baquero, Martínez, & Cantón, 2008).

Tabla 15. Enfermedades relacionadas a las aguas residuales, (Jaramillo, M. F., & Restrepo, I., 2024)

Enfermedad	Causa
Fiebre tifoidea*	<i>Salmonella typhi</i>
Fiebre paratifoidea*	<i>Salmonella paratyphi</i>
Gastroenteritis**	<i>Salmonella typhimurium</i>
Cólera*	<i>Vibrio cholerae</i>
Disentería bacilar*	<i>Shigella dysenteriae</i>
Amebiasis *	<i>Entamoeba histolytica</i>
Giardiasis**	<i>Giardia lamblia</i>
Criptosporidiosis**	<i>Cryptosporidium</i>
Cyclosporiasis*	<i>Cyclospora cayetanensis</i>
Hepatitis infecciosa**	Hepatitis A
Gastroenteritis*	Enterovirus, parvovirus, rotavirus
Parálisis infantil*	Poliovirus
Leptospirosis***	<i>Leptospira icterohaemorrhagiae</i>
Infecciones del oído	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
Escabiosis	<i>Sarcoptes scabiei</i>
Tracoma	<i>Chlamydia trachomatis</i>
Esquistosomiasis*	<i>Schistosoma</i>
Malaria	<i>Plasmodium</i>
Fiebre amarilla	Flavivirus
Dengue	Flavivirus

Notas: **Excrementos humanos y/o animales - *Excrementos humanos.

Fuentes: Romero (1996), von Sperling (1996), Jiménez y Rose (2009), Evans y Mara (2011).

Tabla 16. Riesgos químicos y biológicos asociados al reúso de agua residual en agricultura, (OMS, 2006).

Tipo de riesgo	Agente patógeno	
Biológico	Bacterias**	<i>E. Coli, Vibrio cholera, Salmonella spp, Shigella spp</i>
	Helmintos**	<i>Ascaris, Anquilostoma, Tenia spp</i>
	Protozoos**	<i>Giardia intestinal, Cryptospridum, Entamoeba spp</i>
	Virus**	Hepatitis A y E, Adenovirus, Rotavirus, Norovirus
	Shistosomes*	Tremátodos sanguíneos
Químico	Sustancia de interés sanitario	
	Metales pesados*	Arsénico, Cadmio, Mercurio
	Hidrocarburos*	Dioxinas, Furanos, PCB
	Pesticidas**	Aldrin, DDT

Notas: **Contacto y/o consumo - *Consumo.

Notas: los asteriscos significan lo siguiente: **Contacto y/o consumo *Consumo

El grupo vulnerable de personas como niños, ancianos, inmunodeprimidos y embarazadas puede sufrir graves consecuencias en caso de ingerir frutas y verduras contaminadas con estos patógenos, e incluso de carácter mortal, en cambio la sintomatología para las demás personas suele manifestarse como un cuadro diarreico febril. Estos patógenos, ingresan a la planta mediante las raíces y las hojas o brotes donde se multiplican en el caso de contar con las condiciones idóneas como la temperatura del lugar de almacenamiento o la duración del almacenamiento de las frutas y verduras; esto en consecuencia de haber realizado técnicas de riego con aguas residuales tratadas o cuyo tratamiento fue ineficiente (OXIDINE water technology, 2024)

La OMS establece los requerimientos mínimos para el uso seguro de aguas residuales en la agricultura independientemente del tipo de cultivo, mientras que las características de calidad físico químicas y microbiológicas son establecidos por la FAO. Además, como en las aguas residuales existen elementos como el Na, Ca, Mg y B, que pueden influir en la salud del suelo y en el crecimiento de los cultivos, pero el exceso de estos elementos, pueden afectar negativamente las plantas y las características fisicoquímicas del suelo (Silva et al., 2008)

Por tanto, existen regulaciones sobre las descargas de aguas residuales, así como los límites permisibles de cada contaminante, el cual varía dependiendo del uso posterior de esta agua, en México, la norma NOM-003-SEMARNAT-1997 establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reutilizan en servicios al público, incluyendo patógenos como bacterias y parásitos presentes en el agua como muestra la tabla 17, así como establecer cuáles actividades se consideran servicios al público con contacto directo o indirecto, en

donde el riego agrícola debe ser considerada como contacto directo debido a que algunos cultivos no sufren un procesamiento antes de ser consumidos lo cual representa un riesgo.

Tabla 17. Límites máximos permisibles de contaminantes patógenos, Adaptado de NOM-003-SEMARNAT-1997

TIPO DE REUSO	LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES				
	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes	Huevos de	Grasas y	DBO ₅	SST mg/l
	fecales	helminto	aceites	mg/l	
	NMP/100 ml	(h/l)	mg/l		
SERVICIOS AL PUBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≥1	15	20	20
SERVICIOS AL PUBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	≤5	15	30	30

La NOM-001-SEMARNAT-2021, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores propiedad de la nación, además menciona la restricción en cuanto a cultivos que es posible regar de acuerdo con la calidad bacteriológica del agua, definiendo las siguientes restricciones del riego.

Riego restringido: es el agua residual destinada a actividades de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas, excepto legumbres y verduras que se consumen crudas, por otro lado, el riego no restringido, es el agua residual destinada a actividades de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas en forma ilimitada como forrajes, granos, frutas, legumbres y verduras, por lo tanto, el agua de riego agrícola depende de la calidad bacteriológica y se debe seleccionar también el cultivo a establecer. La clasificación de riesgos a la salud asociados al riego con aguas residuales depende del tipo de cultivo, además de su destino, por ejemplo, si es para consumo humano, animal o se va a industrializar, por otro lado, el grupo expuesto de trabajadores agrícolas y consumidores pueden sufrir un riesgo bajo, medio o alto (Cisneros Estrada, 2016).

Los agricultores de las zonas que utilizan aguas residuales reportaron que esta agua afecta la salud de las personas que riegan los campos agrícolas, causando diversos problemas, el 18.8 % mencionó daños en la piel, como enrojecimiento y micosis en los pies, el 10.4 % reportó problemas respiratorios con irritación de garganta, enrojecimiento de ojos y dolor de cabeza, un 10.4 % indicó que el agua afecta el sistema inmunológico, haciendo que las personas sean más propensas a enfermarse, afectando su crecimiento, debilitando el cuerpo y causando desgaste, un 2.1 % reportó efectos psicológicos, como preocupación, y otro 2.1 % mencionó enfermedades en general. Además, el 12.5 % afirmó que la contaminación del agua genera dificultades en sus actividades diarias, aunque un 12.5 % desconoce si existe o no afectación, ninguno indicó que el agua afecte la salud hasta provocar la muerte (Pérez et al., 2023).

Es importante recordar que en algunos casos, pasada la época de cosecha del cultivo, los animales generalmente ovinos y equinos, pastorean las parcelas, bebiendo el agua de los canales, respecto a esta práctica, los agricultores han observado malestares en los animales, el 12.5 % mencionan que el agua afecta a los animales, mientras que el 66.7 % consideran que no les afecta y el 2.1 % indica que es incierto. Dentro de los agricultores que sí señalan afectaciones, el 14.6 % menciona que se producen parásitos en el sistema digestivo de los animales, el 8.3 % observó infecciones o enrojecimiento de la piel, el 4.2 % enrojecimiento de ojos, el 2.1 % infecciones o problemas respiratorios, el 4.2 % facilidad de enfermarse y 8.3 % otros malestares (Pérez et al., 2023).

En aguas residuales que contengan una alta carga bacteriológica solo podrán ser regados cultivos de consumo indirecto o aquellos que pasen por un proceso de agro industrialización como maíz grano, arroz, trigo, cultivos forestales, algunas oleaginosas como el cártamo, girasol, soya, etc., materia prima para la industria, cultivos forrajeros de ciclo largo o perennes como la alfalfa, y otros pastos cultivados en praderas, en donde el ganado no pastore directamente, esto reduce los riesgos a la salud pública en zonas con reúso de aguas residuales (Cisneros Estrada, 2016).

Mitigación de riesgos a la salud debido al riego agrícola con aguas residuales sin tratamiento

Los trabajadores agrícolas constituyen el primer eslabón de riesgo en las zonas con reúso de aguas residuales crudas, por ende existen recomendaciones generales para preservar su salud y la de sus familias, la higiene que los trabajadores deben tener durante y después de su jornada laboral es algo esencial, así como algunas medidas de protección, debido a que el manipular aguas residuales conlleva un riesgo que puede ocasionar contraer enfermedades en la piel, gastrointestinales y de otro tipo, para reducir este riesgo se recomienda que los trabajadores agrícolas que participen en labores de cosecha, utilicen prendas de protección, así como también los trabajadores que rieguen los deben portar básicamente los mismos elementos, sólo que cumplen funciones adicionales, el material de lo que estén hechos puede variar: (Cisneros Estrada, 2016)

La combinación de prácticas como el manejo del cultivo y del agua, son importantes para establecer proyectos de reúso de aguas residuales eficientes, debido a que un punto esencial al utilizar agua residual como agua de riego en la parcela, se debe evitar el contacto directo del agua con los cultivos, lo cual permitirá obtener una mejor calidad sanitaria de los productos cosechados (Cisneros Estrada, 2016), como ya se mencionó, los patógenos se adhieren a las partes comestibles de la plantas cuando existe un mayor contacto directo del agua como en los sistemas de aspersión o los cultivos hidropónicos, los patógenos en ocasiones, pueden penetrar dentro de la propia planta. En el caso de las frutas y verduras que se consumen hervidas o deshidratadas, la BfR indica que se podría utilizar agua residual sin mayor riesgo (OXIDINE water technology, 2024).

Ante esto, la BfR recomienda evitar el riego de aguas residuales en aquellos cultivos que se acostumbran a consumir en crudo o que se encuentran en contacto directo con el suelo, se aconseja evitar el consumo de ensaladas y vegetales crudos envasados o precortados, otra opción es utilizar

aquellos tipos de riego por goteo sobre el suelo o subterráneo debido a que estos métodos evitan el contacto directo con la parte comestible de la planta (OXIDINE water technology, 2024), en la tabla 18 se puede observar un concentrado de información, sobre la supervivencia de distintos patógenos, generada por diversos autores (Cisneros Estrada, 2016).

Tabla 18 Tiempo en días de supervivencia de patógenos en suelo, agua y cultivos, Elaborado con datos de Orta (1985), Shuval et al., (1986) y D'itri et al. (1981)

Pátogeno	Suelos		Cultivo		Agua	
	Máximo	Común	Máximo	Común	Máximo	Común
Bacterias	365	20-70	180	2-30	60	10-30
Virus	180	20-100	60	15-60	120	50
Protozoarios ¹⁾	20	2-10		1-5	153	15-30
Helmintos ²⁾	7 años	2 años		30	Varios meses	Varios meses

¹Quistes, ²Huevos o cigotos

Muchos estudios han demostrado que la humedad del suelo está relacionada con la población de patógenos en donde se han usado aguas residuales para el riego, por lo que al disminuir la humedad del suelo cuando menos 2 semanas antes de la cosecha suprimiendo el riego, esta práctica genera muerte por desecación en los patógenos presentes tanto en la capa superficial del suelo como en las partes de las plantas más próximas al suelo, esto puede complementarse con exposición al sol y al viento de los productos cosechados que así lo permitan. Esta práctica reduce los riesgos de enfermedades, tanto para los jornaleros agrícolas que participan en la cosecha, como para los consumidores (Cisneros Estrada, 2016).

Sin embargo, esta práctica de supresión del último se adapta a cultivos de alto porte como la caña de azúcar, así como a cultivos de granos que se comercializan en seco, como el maíz, arroz, trigo, sorgo, etc. En el caso de hortalizas cuyas características agronómicas no les permiten resistir la sequía, los agricultores realizan un cambio en la fuente de agua de riego, es decir, que producen con agua residual y 2 semanas antes de la cosecha, implementan agua de pozo lo que mejora la calidad sanitaria de las hortalizas antes de comercializarlas, aunque hacen falta estudios que constatan la efectividad de esta práctica (Cisneros Estrada, 2016).

Por ello autores como Cisneros Estrada (2016), proponen que los agricultores, jornaleros y trabajadores que rieguen los campos agrícolas porten el siguiente equipo de protección personal.

Botas de hule o cuero: protegen los pies y evitan el contacto con el agua y el suelo, en donde pueden estar presentes larvas de lombrices, debido a que especies como *Ancylostoma duodenale* y *Necator americanus*, son capaces de atravesar la piel desnuda ocasionando dermatitis cutánea, anquilostomiasis en casos graves, cuyos síntomas son debilidad, anemia entre otros. Además, evitan que el cuerpo roce con los cultivos de altura baja y brindan protección de la picadura de algún animal (Cisneros Estrada, 2016).

Cubre bocas y mascarillas para partículas: protege boca y nariz de partículas finas, polvo, gases y de residuos de tierra que podrían contener patógenos provenientes de las aguas residuales al momento de regar las parcelas, evita que el trabajador contamine el área de la boca o nariz con sus manos en labores propias del trabajo, evitando que ingresen al organismo y disminuyendo los riesgos de contraer enfermedades de las vías respiratorias (Cisneros Estrada, 2016).

Guantes de látex para trabajo pesado o industrial: protegen las manos durante la manipulación y distribución del agua en la parcela o suelo, así como durante la manipulación de malezas, cultivos o frutos de cosecha que pudieran estar contaminados, los guantes resultan muy útiles para evitar que los residuos de tierra se acumulen bajo las uñas, lo que reduce el riesgo de contraer enfermedades dérmicas y gastrointestinales (Cisneros Estrada, 2016).

Una nota importante es que, aquellos trabajadores que participen en la labor de preparación, mezcla o aplicación de plaguicidas no deben usar guantes de cuero o tela, pues éstos absorben los plaguicidas, se recomienda materiales como el neopreno ligero o nitrilo (Cisneros Estrada, 2016).

Vestimenta de trabajo: Se recomienda portar una vestimenta habitual de trabajo que sea de algodón y de colores claros de manga larga, pantalón y gorra o sombrero que proteja del sol, debido a que dichas prendas brindan protección al mismo tiempo que son frescas y permite realizar con comodidad labores en el campo, siendo de fácil lavado, el regador en especial debe portar dicha vestimenta, trabajadores que preparen, mezclen y apliquen plaguicidas, se recomienda portar sobre la vestimenta, un traje de protección completo de overol con capucha (Cisneros Estrada, 2016).

Existe una responsabilidad personal de mantener la salud, de manera general las prácticas de higiene que deberán observar los trabajadores agrícolas, durante y después de la jornada de trabajo: (Cisneros Estrada, 2016)

- Uso adecuado de las prendas de protección durante la jornada laboral, cambio de prendas por ropa limpias y secas (Cisneros Estrada, 2016).
- No almacenar ropa de trabajo sucia evitando los riesgos de contraer alguna enfermedad, de preferencia secarla al sol (Cisneros Estrada, 2016).
- Continuo lavado de manos con agua limpia y jabón, no ingerir alimentos o bebidas durante las labores dentro de la parcela (Cisneros Estrada, 2016).
- Bañarse diariamente con agua limpia y jabón, para retirar cualquier residuo que se hubiera adherido al cuerpo durante su labor en la parcela (Cisneros Estrada, 2016).
- Mantener limpias y recortadas las uñas y acudir al servicio médico en caso de presentar síntomas de cualquier enfermedad (Cisneros Estrada, 2016).

Las familias de los trabajadores agrícolas son el segundo eslabón en riesgos asociados al reúso de las aguas residuales crudas en la agricultura, derivado del contacto directo del trabajador expuesto, este puede trasladarlos del campo a su hogar, en la ropa de trabajo, por lo que se requiere lavar

constantemente, así como el consumo de productos agrícolas que son incorporados a sus dietas. A continuación, se presentan las recomendaciones generales de higiene que toda la familia debe acatar para preservar su salud (Cisneros Estrada, 2016).

- Aseo personal diario, lavado de manos antes de preparar o consumir alimentos o bebidas, además de lavar, desinfectar o cocer los alimentos antes de ser consumidos, si provienen de los campos regados con dicha agua (Cisneros Estrada, 2016).
- Lavado la ropa de trabajo para evitar que contenga residuos que pongan en riesgo la salud de la familia (Cisneros Estrada, 2016).
- Mantener fuera de la vivienda y del alcance de niños o animales, cualquier herramienta de trabajo usada en los campos agrícolas (Cisneros Estrada, 2016).
- Que la familia se desparasite al menos 2 veces al año (Cisneros Estrada, 2016).

Al finalizar la jornada laboral, es importante que los agricultores antes de retirar botas y guantes sean lavados con agua limpia, antes de quitárselos, para evitar la autocontaminación (Cisneros Estrada, 2016). Finalmente, los consumidores constituyen el último eslabón en la cadena de riesgos asociados al reúso de aguas residuales tanto tratadas como no tratadas para el riego agrícola, por lo que se detallan, algunas recomendaciones generales de higiene para que los consumidores mejoren la calidad sanitaria de los productos agrícolas (Cisneros Estrada, 2016).

La mayoría de los productos agrícolas que se distribuyen a mercados o centros de abasto no cuentan con una etiqueta que especifique el lugar de procedencia y mucho menos se indica la calidad de agua que fue usada para cultivar dichos alimentos, por ello es importante que el consumidor esté consciente de los riesgos de enfermedades gastrointestinales asociadas al riego con aguas residuales en los cultivos agrícolas para tomar medidas que preserven su salud y la de sus familias, los consumidores deberán observar y tomar estas medidas: (Cisneros Estrada, 2016).

- Descartar vegetales, tubérculos o frutas que presenten rajaduras (Cisneros Estrada, 2016).
- Lavar, pelar y desinfectar aquellos productos vegetales, hortalizas o frutas que se consuman en crudo, así como también solo guardar los productos previamente lavados y desinfectados si no se van a consumir de inmediato (Cisneros Estrada, 2016).
- Lavar y pelar tubérculos o raíces que se usen en jugos como las zanahorias, betabel, etc. (Cisneros Estrada, 2016).
- Enjuagar y cocinar correctamente los productos de origen agrícola frescos como habas, chícharos, papas, chayotes, berenjenas, camotes, etc. (Cisneros Estrada, 2016).
- Cumplir con el programa familiar de desparasitación de al menos 2 veces al año para evitar cualquier infección (Cisneros Estrada, 2016).

En cuanto al riesgo de enfermarse debido al origen residual del agua de riego, el 50 % de los agricultores opinó que no existen riesgos, el 35.4 % cree que es ligeramente riesgoso, el 4.2 % opina

que es bastante riesgoso, mientras que el 4.2 % considera que es muy riesgoso. Sobre la probabilidad de que ocasione una enfermedad mortal, el 50 % consideran que es totalmente improbable, el 37.5 % que es ligeramente probable, el 2.1 % que es bastante probable y 6.3 % muy probable, por tanto, al momento de reducir el riesgo, la mayoría o el 66.7 % cree que no es fácil reducirlo, mientras que el 22.9 % piensa que es algo fácil, mientras que el 4.2 % cree que es bastante fácil o muy fácil reducir este riesgo (Pérez et al., 2023).

En cuanto a la probabilidad de enfermarse, el 22.9 % creen es inevitable, el 20.8 % piensan que se puede evitar con cierta facilidad, el 8.3 % creen que es bastante fácil evitarlo y el 45.8 % consideran que se puede evitar muy fácilmente, sobre la posibilidad de que en el futuro se vean afectados, el 37.5% piensan que es poco probable, el 45.8 % que es ligeramente probable, y bajos porcentajes piensan que es bastante con un 6.25 % o muy probable con un 6.3 %. Finalmente, respecto a si el riesgo aumenta por continuar usando estas aguas para riego, el 41.7 % opinó que no aumenta, mientras que el 39.6 % piensa que aumenta un poco, un 8.3 % considera que el riesgo aumenta bastante y otro 8.3 % que aumenta mucho (Pérez et al., 2023).

Impactos al suelo debido al riego de aguas residuales

La práctica del reúso agrícola de las aguas residuales en América Latina, especialmente aguas residuales sin tratar están muy poco documentados oficialmente (Cepis, 2003), los productores que usan aguas residuales para riego en los cultivos, alcanzaban mejores rendimientos respecto a las zonas agrícolas vecinas en donde no se usaban este tipo de aguas, sin embargo es esencial considerar los riesgos sanitarios, en México, el volumen de aguas residuales producido por la Ciudad de México hacia el Valle del Mezquital era de 52 m³/s, ocupando el segundo sitio por superficie regada con aguas residuales a nivel mundial en 2010 (Cisneros Estrada, 2016).

Además, como se mencionó anteriormente, la agricultura y la ganadería pueden ser una fuente de contaminación difusa de pesticidas, antibióticos, además de contaminantes emergentes (Postigo, 2014). La contaminación de las aguas subterráneas, por contaminantes emergentes podría ocurrir por la lixiviación de los rellenos sanitarios, fugas de los tanques de almacenamiento de estiércol o riego por aspersión de aguas residuales, con y sin tratamiento, en las tierras agrícolas (Grassi, Rizzo, & Farina, 2013). Los procesos en las plantas de tratamiento empleados no controlan efectivamente la liberación de contaminantes emergentes al ambiente (Jackson & Sutton, 2008).

Las aguas residuales tratadas o no tratadas, no están exentas de efectos adversos sobre el ambiente, especialmente sobre el suelo ya que es el medio receptor, existe evidencia de algunas alteraciones en los parámetros fisicoquímicos y de la microbiota del suelo pueden afectar la fertilidad y la productividad, generando preocupación por la sostenibilidad del suelo debido a la continua acción de irrigación con aguas residuales de forma inadecuada (Becerra et al., 2015).

Si bien, los beneficios a algunos cultivos debido al riego de aguas residuales, es específico de cada cultivo, los aspectos a tomar en cuenta son: la capacidad de asimilación de nutrientes, el consumo de agua, la presencia de iones tóxicos, la concentración relativa de Na y el contenido de sales solubles, algunas condiciones climáticas pueden salinizar los suelos, modificar la composición iónica, alterando la vegetación y la productividad (Pizarro, 1990, citado por Medeiros et al., 2005).

Lo anterior es muy semejante a lo reportado en otros estudios, en donde se ha observado un daño al suelo debido al aumento en la necesidad de aplicar mayores volúmenes de insecticidas, fungicidas y herbicidas, lo cual a su vez causa un aumento de plagas y enfermedades y proliferación de malas hierbas (Ndunda & Mungatana, 2013; Pérez et al., 2023) Además, la mayoría de los usuarios del agua residual consideran que el riego, afecta negativamente al suelo como se muestra en la figura 22, donde se detallan algunas de las percepciones (Pérez et al., 2023).

Los riesgos se refieren a aquella probabilidad que existe de que los peligros pasen a convertirse, según las circunstancias en daños, es decir, el riesgo admite la presencia de peligros admisibles o tolerables que pueden llegar a convertirse en un daño (Sotelo & Sotelo, 2017). Entonces, la escasa calidad del agua puede afectar el rendimiento potencial de los cultivos regados y disminuir los ingresos que los productores obtengan de la actividad agrícola, además de degradar el suelo debido a la acumulación de sales, lo que puede perjudicar el patrimonio principal de los agricultores. Por lo que, el reúso del agua residual deberá hacerse con suma precaución (Cisneros Estrada, 2016).

Los agricultores perciben que el agua de riego tiene efectos negativos en los cultivos, por ejemplo, el 43.8 % indican que produce pudriciones en los cultivos, 18.8 % mencionan que los cultivos se marchitan, el 10.4 % reportan que las plantas se secan, de igual forma, el 14.6 % perciben un mayor ataque de plagas y el 12.5 % presenta una mayor maleza que compite a los cultivos. Por lo que, el 72.9 % notan mejoras en el crecimiento de los cultivos y el 35.4 % del total de productores no han notado afectaciones en los cultivos (Pérez et al., 2023).

Los principales efectos negativos percibido por los agricultores al suelo, ocasionados por el riego de agua residual, el 58.3 % indican que el suelo adquiere un color negro o verdoso, diferente al color normal y el 47.9 % observaron la formación de una costra blanca en la capa exterior del suelo, también se requiere de una mayor cantidad de insecticida 27.1 %, fungicidas 27.1 %, herbicidas 18.8 % y el aumento requerido de fertilizantes químicos, genera un aumento de malas hierbas y bajo rendimiento, otros efectos como se muestra en la figura 21 (Pérez et al., 2023).

Algunos agricultores, señalaron que algunas prácticas que pueden mejorar la calidad del suelo, el 8.3 % aplica abonos orgánicos, mientras que el 6.3 % utilizan insumos químicos, otros estudios reportan que los productores aplican yeso, cal, materiales de fosfato, materia orgánica, minerales arcillosos, hierro hidratado y óxidos de manganeso (Ndunda & Mungatana, 2013). Mientras que la mayoría, el 62.5 % de productores mencionan que no realizan alguna práctica (Pérez et al., 2023).

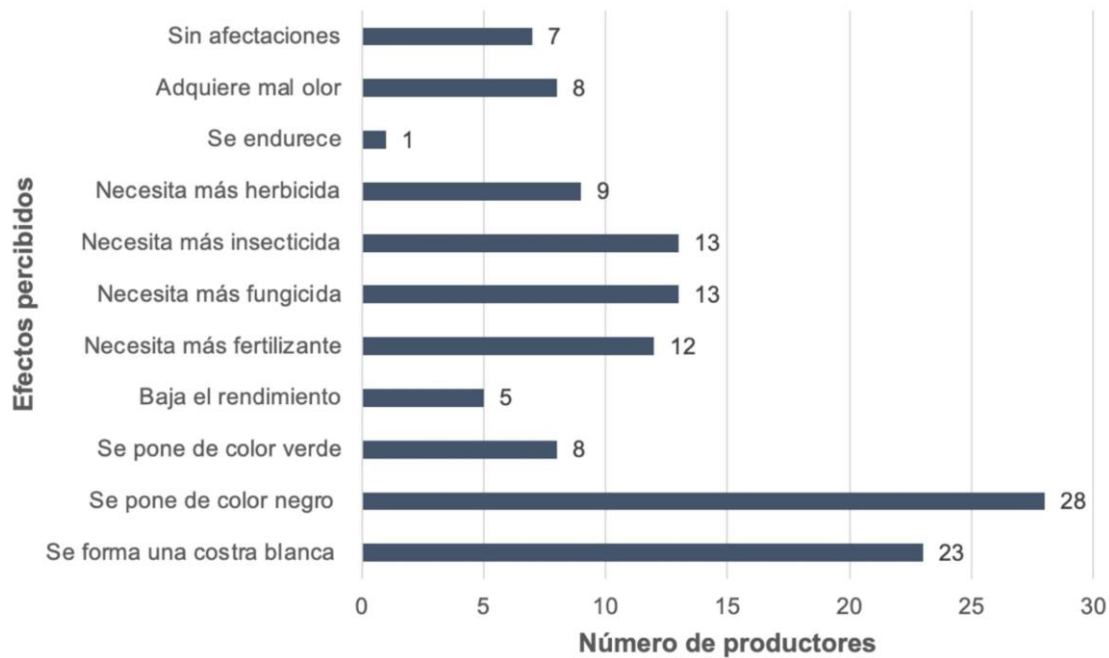


Figura 23. Percepción de los productores sobre los efectos al suelo debido al uso de aguas residuales en el riego, (Pérez et al., 2023)

Salinización de terrenos:

Puede tener diversos orígenes, el antropogénico puede ser debido a una mala práctica de riego, la mala calidad del agua favorece la concentración y afloramiento de las sales en los terrenos agrícolas. Todas las aguas de riego contienen sales en distinta proporción según su origen, ya sean superficiales, subterráneas, o residuales ya sean tratadas o crudas, las cuales tienden a concentrarse en la superficie del terreno debido al efecto de la evaporación. El manto freático elevado tiende a acarrear sales, lo que genera una costra blanquecina en la superficie (Cisneros Estrada, 2016).

En cuanto a su origen geológico, de forma natural los suelos contienen sales, aunadas a las que provienen del agua de riego, los fertilizantes aplicados, incrementan los problemas de salinización, este fenómeno de salinización de terrenos se observa frecuentemente en zonas áridas y semiáridas, esto se ve favorecido por el tipo de suelos, altas temperaturas, así como altas tasas de evaporación, la aplicada agua de riego en exceso con altas concentraciones de sales, genera paulatinamente bajas productividades, reduce la superficie cultivable y, en casos severos se abandonó dicho terreno. Entre las medidas para evitar dicha salinización de terrenos los cuales son regados con aguas residuales tratadas, destacan las siguientes prácticas (Cisneros Estrada, 2016)

- Monitorear principalmente en época de estiaje, la calidad del agua de riego (Cisneros Estrada, 2016).

- Nivelar el suelo para mejorar las condiciones de drenaje de forma natural o artificial del terreno (Cisneros Estrada, 2016).
- Además del agua necesaria para el cultivo, añadir un volumen adicional de agua para transportar y eliminar las sales que puedan acumularse en la zona de raíces, a este proceso se le denomina lixiviación (Cisneros Estrada, 2016).
- Lavar los suelos entre ciclos agrícolas, además de promover el uso de abonos orgánicos previamente compostados (Cisneros Estrada, 2016).
- Evitar aplicar fertilizantes químicos de forma excesiva y evitar fertilizantes que contengan cloro, sodio, cloruro de potasio y el nitrato de sodio (Cisneros Estrada, 2016).
- Aplicar mejoradores de suelos como el yeso u otras alternativas (Cisneros Estrada, 2016).

Respecto al lavado de suelos agrícolas, existen ecuaciones para calcular el requerimiento de lavado de suelos (Rhoades y Merrill, 1976; Flores et al., 1996) mencionan que el método de lavado de suelos es la medida más eficaz para combatir la salinización primaria y también previene la salinización secundaria de terrenos agrícolas (Cisneros Estrada, 2016).

Pérdida de infiltración de suelos

El proceso de la infiltración es por el cual, el agua se mueve desde el exterior hacia el interior del suelo (Cisneros Estrada, 2016), el modelo de producción, laboreo, y presencia de restos de cosechas incrementan esta problemática. La selección de la tecnología dependerá del tipo de tratamiento del agua residual ya que contiene presencia de N deberá considerar aspectos como el tipo de suelo y los cultivos a ser regados (Silva et al., 2008).

Otro factor que interviene en la capacidad de infiltración del suelo es la permeabilidad, la cual es la capacidad de los materiales del suelo para permitir la libre circulación del agua y el aire a través de sus poros, esta permeabilidad está relacionada con la textura del suelo, generalmente es mayor en suelos arenosos y menor en suelos arcillosos (Cisneros Estrada, 2016).

El aprovechamiento de las aguas residuales en zonas agrícolas de riego radican en que el reúso se recomienda en suelos con alta permeabilidad y evitando problemas de drenaje, en parte los problemas de infiltración en los suelos dependen del tipo de suelo, el grado de humedad, el porcentaje de cubierta vegetal existente, el porcentaje de materia orgánica presente y finalmente del grado de compactación del suelo, lo cual se produce al reducirse los espacios entre los agregados del suelo, que genera una carga animal excesiva, o por la maquinaria agrícola que causa compactación en la superficie del terreno (Cisneros Estrada, 2016).

Garantizar el manejo adecuado de las aguas residuales en actividades agrícolas generaría un mínimo riesgo, por lo que se recomienda que los países apliquen un manejo integrado de los recursos hídricos, los cuales consideren una participación y compromiso de todos los organismos

relacionados con los temas agrícolas, instituciones gubernamentales, no gubernamentales, instituciones de investigación y el sector productivo (Silva et al., 2008).

Para evitar que se produzca una pérdida de infiltración en el suelo atribuida al agua de riego con aguas residuales tratadas, conveniente: realizar una caracterización hidrodinámica del suelo con el fin de realizar un diseño del sistema de riego que se emplea en el proceso del reúso de aguas, resulta esencial monitorear y verificar la calidad del agua de riego aplicada, cumplan con los límites establecidos por la normatividad vigente o por criterios agronómicos, además resulta esencial vigilar los tiempos de riego en las parcelas para evitar que se aplique agua en exceso, de forma que este riego sea eficiente (Cisneros Estrada, 2016).

Beneficios del reúso de agua tratada en el sector agrícola

Entonces, el uso de las aguas residuales tratadas en la agricultura también conlleva beneficios ambientales y económicos, esta alternativa cada vez se adopta y acepta más en diferentes regiones que tienen problemas de escasez de agua, así como también en zonas urbanas con poblaciones crecientes las cuales demandan la mayor cantidad de agua de riego (Becerra et al., 2015; Winpenny et al., 2013). La contaminación provocada por las aguas residuales también ocasiona que no sean tratadas las aguas antes de ser dispuestas en cuerpos superficiales, y acuíferos (Banco Mundial, 2007; Winpenny et al., 2013).

Dentro de los beneficios del reúso agrícola, el agua residual se convierte en una gran alternativa para riego (Winpenny et al., 2013), ya que contribuyen al incremento de la producción agrícola en regiones de escasez hídrica, generando un aporte a la seguridad alimentaria (UNEP, UN-HABITAT, & GRID-Arendal, 2010). Pero para ello, es necesario implementar un enfoque integrado que debe incluir inversiones públicas y privadas para aumentar la disponibilidad de fuentes de agua para riego, servicios públicos, tecnologías de riego, de tratamiento, y tomar en cuenta la protección social para los más vulnerables (FAO, 2015).

Dentro de los beneficios económicos dependen de la situación local, el reúso agrícola, aunque genera un costo menor al que causa la extracción de las aguas subterráneas, aunado a los costos de utilización de energía asociada al bombeo representan el 65 % de las labores de riego (Cruz, 2009). Los nutrientes presentes en las aguas residuales permiten un ahorro en fertilizantes (Drechsel et al., 2010; Moscoso, 1995; UNEP UN-HABITAT, & GRID-Arendal, 2010; Veenstra, Depeweg, & Rockstrom, 2001; Winpenny et al., 2013), garantizando que el ciclo de nutrientes especialmente nitrógeno y fósforo generando que los microelementos retornen de manera directa a los cuerpos de agua, lo cual reduce las condiciones de eutrofización de los cuerpos hídricos y reduce costos de los importe de agroquímicos a los agricultores (Candela et al., 2007; Jaramillo, 2014).

Las aguas residuales en la agricultura contribuyen a la liberación de recursos de capital por pago, como instrumentos económicos por parte de los diferentes actores (Jaramillo, 2014), un ejemplo es

el beneficio económico es la valoración del agua dulce que se libera para abastecimiento humano, en algunos países esto reduce los costos para las autoridades municipales, ya que no es necesario buscar fuentes alternativas de agua a través de medios más costosos (Winpenn, et al., 2013).

Otro beneficio asociado al reúso de agua residual en la agricultura es disminuir de las descargas de aguas residuales sobre cuerpos hídricos, lo que previene la contaminación hídrica y aumenta la calidad del agua en las fuentes (Bixio & Wintgens, 2006; Toze, 2006), los sistemas de agua subterránea se preservan con el porcentaje de recarga que aporta al reúso de aguas residuales, estas deben cumplir con altos estándares (CEPIS/OPS, Moscoso, & Egocheaga, 2002; Moscoso, 1993).

Algunas características climáticas y geográficas permiten disminuir los costos en la instalación y optimización de las plantas de tratamiento de aguas residuales para ser consideradas como una opción viable, a través de ciertos tipos de opciones tecnológicas que cumplen con objetivo de producir un efluente de la calidad eficiente, reutilizando el agua (Winpenny et al., 2013). Por lo que, el reúso agrícola contribuye a las políticas adecuadas, inversión y financiación para la prevención, así como el control de la contaminación (Hernández, Molinos, & Sala, 2010).

Condiciones necesarias para el reúso de aguas residuales tratadas en el riego agrícola

La reutilización de aguas residuales tratadas en el sector agropecuario puede ser una alternativa con gran potencial, sin embargo, existen condiciones que se necesitan cumplirse para evitar o prevenir aquellos riesgos mencionados en el apartado de "Afectación a la salud pública debido al riego agrícola con aguas residuales" además de otros impactos anteriormente mencionados, por tanto, en este apartado se detallarán dichas condiciones. Estas condiciones a nivel parcelario son la selección de cultivos, ya que están adaptados a las condiciones locales, así como el patrón de cultivos a implementar en la zona, un método de riego eficiente, adoptar prácticas adecuadas de manejo del agua de riego y del cultivo e implementar medidas para reducir los riesgos a la salud, la capacitación de los trabajadores agrícolas (Cisneros Estrada, 2016).

La calidad del agua y las necesidades del usuario guardan una estrecha relación, ya que las características fisicoquímicas del aguas pueden afectar su adaptabilidad a un uso específico (Ayers y Westcot, 1987), la calidad de las aguas residuales depende de su origen, ya sea doméstico, industrial, etc., también de su composición y la concentración de contaminantes presentes (Cisneros Estrada, 2016) Como se mencionó anteriormente, de entre los parámetros más importantes en la calidad del agua, para aquella agua residual destinada al riego agrícola, se encuentran los parámetros biológicos, sin embargo no son los únicos de interés, debido a que algunos otros parámetros afectan al suelo o a los cultivos, estos se detallan a continuación.

Para ello, evaluar la calidad del agua de riego es fundamental, ya sea residual cruda o tratada o agua de primer uso, desde el punto de vista agronómico se debe considerar el perfil del suelo, así como parámetros que alteran su composición original como la salinidad, sodicidad y toxicidad, sobre todo

en sitios de altas temperaturas y elevadas tasas de evaporación que a su vez disminuyen la humedad del suelo (Cisneros Estrada, 2016).

Un parámetro esencial de la calidad del agua de riego que influye en la calidad sanitaria de los cultivos y que genera riesgos a la salud pública de los consumidores, es el aspecto bacteriológico, el cual debe ser evaluado e interpretado con base en la normatividad vigente, en México la norma que establece los límites de patógenos presentes en el agua, es la NOM-001-SEMARNAT-2021, además de cumplir con los límites que establece la Organización Mundial de la Salud (OMS), es necesario verificar la calidad del agua mediante muestreos (Cisneros Estrada, 2016).

Los árboles forestales, cultivos industriales, árboles frutales y pastos o forrajes pueden ser regados con aguas residuales que contengan ≤ 1 huevo de helminto (HH), mientras que el agua para regar cultivos de consumo humano, su calidad bacteriológica debe ser ≤ 1 HH y $\leq 1,000$ coliformes fecales (CF)/NMP 100 ml (Cisneros Estrada, 2016; Mara y Cairncross, 1990). Parámetros como los coliformes fecales (CF) y huevos de helmintos (HH) son indicadores internacionales que se utilizan para indicar la contaminación del agua por bacterias, parásitos o patógenos en el agua de riego, estos pueden afectar la sanidad de los productos regados e incrementar el riesgo de contraer enfermedades en los consumidores de estos productos o entre los trabajadores agrícolas que entren en contacto con el agua de riego durante la aplicación (Cisneros Estrada, 2016).

La guía de aguas residuales de la OMS del año 2006 establece los parámetros de la calidad microbiológica de las aguas residuales para irrigación, como se muestra en la tabla 19, estas medidas de protección para la salud proporcionan una orientación sobre su aplicación en diferentes contextos locales. Tienen como objetivo principal apoyar la formulación de normatividad y reglamentación nacional respecto al uso y manejo del agua residual, considerando aspectos propios de cada país (Mara, Sleight, Blumenthal, & Carr, 2007; Kramer & Mara, 2007; OMS, 2006; Kamizoulis, 2008; Kramer & Mara, 2007; Jaramillo, M. F., & Restrepo, I., 2024)

La Organización Mundial para la Alimentación y la Agricultura (FAO) también ha formulado diferentes lineamientos relacionados con el uso de las aguas en la agricultura, en 1987 se establecen las directrices para interpretar la calidad de las aguas de riego, relacionando el grado de restricción de uso del agua de acuerdo con los parámetros de salinidad, infiltración y toxicidad de los iones específicos, en 1992 la FAO publicó la guía para el "uso de aguas tratadas en el reúso agrícola de sus requerimientos de tratamiento", en donde se clasificó el tipo de reúso agrícola en función del tipo de cultivo que se va a irrigar (Ayers & Westcot, 1987, FAO, 1992)

Mientras que, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) establecieron las guías para la reutilización del agua, los avances tecnológicos de tratamiento de aguas residuales, involucrando a las comunidades en los proyectos de planificación para mejorar las prácticas, así como factores que permiten la expansión

de la reutilización de agua segura y sostenible con base en las experiencias recopiladas a nivel mundial (Jaramillo, M. F., & Restrepo, I., 2024).

En la tabla 19 y 20, se presentan las directrices para el manejo de agua de riego según el riesgo microbiológico, específicamente relacionada con la presencia de nematodos intestinales y coliformes fecales, clasificando el tipo de riesgo en tres categorías, en donde se observa que el grupo expuesto nuevamente son los productores, agricultores y en última instancia, también el consumidor está expuesto a un riesgo de salud.

Tabla 19. Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en la agricultura, (Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, 2002)

Categoría	Condiciones de aprovechamiento	Grupo expuesto	Nematodos intestinales ² (media aritmética Huevos/L)	Coliformes fecales ³ (media geométrica /100 mL)	Tratamiento necesario para lograr la calidad microbiológica exigida
A	Riego de cultivos que se consumen crudos, campos de deportes o parques públicos.	Trabajadores, consumidores, público.	< 1	< 1 000	Serie de estanques de estabilización o tratamiento equivalente.
B	Riego de cultivos de cereales, industriales, forrajeros, praderas ⁴ y árboles. ⁵	Trabajadores.	< 1	No se recomienda ninguna norma.	Serie de estanques de estabilización por 8 ó 10 d o eliminación equivalente de helmintos.
C	Riego localizado de cultivos de la categoría B cuando los trabajadores ni el público están expuestos.	Ninguno.	No es aplicable.	No es aplicable.	Tratamiento previo según lo exija la tecnología de riego, no menos que sedimentación primaria.

1. En casos específicos, se deberían tener en cuenta los factores epidemiológicos, socioculturales y ambientales de cada lugar y modificar las directrices de acuerdo con ello.

2. Especies *ascaris* y *trichuris* y *anquilostomas*.

3. Durante el período de riego.

4. Conviene establecer una directriz más estricta (< 200 coliformes fecales por 100 mL) para prados públicos, como los de los hoteles con los que el público puede entrar en contacto directo.

5. En el caso de los árboles frutales, el riego debe cesar dos semanas antes de cosechar la fruta y ésta no se debe recoger del suelo. No es conveniente regar por aspersión.

Tabla 20. Recomendaciones de la OMS para reutilizar las aguas residuales en riego agrícola. Adaptación de la (OMS, 2006)

Tipo	Categoría		Indicadores	
	Condiciones de reúso	Grupo expuesto	Nematodos intestinales (promedio aritmético de huevos/L)	Coliformes fecales (promedio geométrico/100 mL)
A	Irrigación de cultivos consumidos crudos. Campos deportivos, parques públicos.	Trabajadores, consumidores, público.	≤ 1	≤1000
B	Irrigación de cereales. Cultivos industriales, forrajes, praderas y árboles	Trabajadores	≤ 1	No se recomienda ninguna norma
C	Irrigación localizada de cultivos de la categoría B si no están expuestos los trabajadores y el público.	Ninguno	No aplicable	No aplicable

Nota: Tener en cuenta factores epidemiológicos, socioculturales y ambientales de cada lugar y modificar las directrices de acuerdo a las necesidades (Salas Barboza, 2021).

Otro parámetro para considerar en esta práctica, son las sales presentes en las aguas residuales, las cuales pueden ocasionar daño foliar, dependiendo de las concentraciones de iones individuales, la sensibilidad del cultivo, la frecuencia en las aspersiones, del estrés hídrico de las plantas antes del riego y de factores ambientales como la temperatura, humedad relativa (Cisneros Estrada, 2016).

En todo proyecto de reúso de aguas residuales se debe generar una estrategia para el uso seguro de dichas aguas, de forma que los productores conozcan en su plenitud las ventajas y desventajas, con base a la tolerancia de los cultivos, a la composición de las aguas residuales, datos de la calidad del agua, riesgos de salud pública y establecer buenas prácticas de manejo, la adecuada planeación de proyectos de reúso, la implementación de medidas de seguridad para reducir riesgos de salud, son condicionantes para reusar aguas residuales en la agricultura (Cisneros Estrada, 2016).

Selección de cultivos

Los cultivos se seleccionan de acuerdo con la calidad del agua y de las características fisicoquímicas y bacteriológicas que posea el agua de riego ya que esto influye sobre los cultivos, puede beneficiarlos o afectarlos. En zonas en donde se empleen aguas residuales tratadas en el riego agrícola, la selección de cultivos debe cumplir con las restricciones establecidas por la legislación, normatividad vigente o los referentes internacionales, los cuales se enfocan en la calidad del agua de riego y los riesgos en la salud pública (Cisneros Estrada, 2016).

En cuanto a la calidad fisicoquímica y biológica del agua, particularmente la toxicidad por iones como sodio, boro o cloro, la conductividad eléctrica del agua (CE) y los metales pesados, además de los patógenos como los huevos de helmintos y coliformes fecales (Cisneros Estrada, 2016).

La toxicidad del agua de riego se evalúa mediante la determinación de iones cloro, boro y sodio, debido a que muchos cultivos son sensibles a dichos elementos, las raíces del cultivo absorben estos elementos presentes en el agua de riego, en las hojas se acumulan e interfieren con la fotosíntesis, lo que se refleja en problemas de productividad del cultivo Ayers y Westcot (1987) mencionan que si el agua de riego tiene una conductividad eléctrica (CE) de <0.7 dS/m se pueden regar casi todos los cultivos, excepto aquellos muy sensibles a sales y si la conductividad se encuentra en el rango de 0.7 a 3.0 dS/m, solo se recomienda sembrar aquellos cultivos que tengan una buena o moderada tolerancia a la salinidad. (Cisneros Estrada, 2016; Ayers y Westcot, 1987).

En cultivos sensibles a la toxicidad por cloro se manifiesta a concentraciones de 0.3 a 1.0 %. En el caso del sodio, con concentraciones superiores a 0.25 o 0.50 % causan daño y toxicidad a cultivos arbóreos, finalmente los síntomas de toxicidad por boro, en la mayoría de los cultivos aparecen cuando la concentración foliar excede 250 o 300 mg de boro por kilogramo de materia seca, en las tablas 21 y 22 se muestra el grado de tolerancia de algunos cultivos (Cisneros Estrada, 2016).

Tabla 21. Tolerancia relativa de algunos cultivos al sodio intercambiable, (Ayers y Westcot, 1987)

Sensibles ¹ PSI < 15	Semitolerantes ¹ 15 < PSI < 40	Tolerantes ¹ PSI > 40
Aguacate (<i>Persea americana</i>)	Zanahoria (<i>Daucus carota</i>)	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)
Frutas caducifolias	Trébol ladino (<i>Trifolium repens</i>)	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)
Nueces	Pato miel, gramalote (<i>Paspalum dilatatum</i>)	Remolacha ornamental (<i>Beta vulgaris</i>)
Frijoles (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Fetusa alta (<i>Festuca arundinacea</i>)	Remolacha azucarera (<i>Beta vulgaris</i>)
Algodón (germinación) (<i>Gossypium hirsutum</i>)	Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	Zacate Bermuda (<i>Cynodon dactylon</i>)
Maíz (<i>Zea mays</i>)	Mijo (<i>pennisetum typhoides</i>)	Algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>)
Chícharo (<i>Pisum sativum</i>)	Caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	Capín, hierba de Pará (<i>Brachiaria mutica</i>)
Toronja (<i>Citrus paradisi</i>)	Bersim, trébol de Alejandría (<i>Trifolium alexandrinum</i>)	Zacate Rhodes (<i>Cholris gayana</i>)
Naranja (<i>Citrus sinensis</i>)	Meliloto, trébol dulce (<i>Melilotus parviflora</i>)	Agropiro crestado (<i>Agropyron cristatum</i>)
Durazno (<i>Prunus persica</i>)	Mostaza (<i>Brassica juncea</i>)	Agropiro alargado (<i>Agropyron elongatum</i>)
Mandarina (<i>Citrus reticulata</i>)	Avena (<i>Avena sativa</i>)	Zacate Carnal (<i>Diplachna fusca</i>)
Frijol chino (<i>Phaseolus aureus</i>)	Rábano (<i>Raphanus sativus</i>)	
Lenteja (<i>Lens culinaris</i>)	Arroz (<i>Oriza sativa</i>)	
Cacahuete (<i>Arachis hypogaea</i>)	Centeno (<i>Secale cereale</i>)	
Garbanzo (<i>Cicerarietinum</i>)	Gramma de centeno (<i>Lolium multiflorum</i>)	
Caupíes (<i>Vigna sinensis</i>)	Sorgo (<i>Sorghum vulgare</i>)	
	Espinaca (<i>Spinacea oleracea</i>)	
	Tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	
	Veza (<i>Vicia sativa</i>)	
	Trigo (<i>Triticum vulgare</i>)	

Tabla 22. Tolerancia relativa al boro de algunos cultivos, (Ayers y Westcot, 1987)

Nombre común	Nombre científico	Nombre común	Nombre científico
Muy sensibles (< 0.5 mg/L)		Moderadamente sensibles (1.0 – 2.0 mg/L)	
Limonero	<i>Citrus limon</i>	Chile	<i>Capsicum annum</i>
Zarzamora	<i>Rubis spp.</i>	Chícharo	<i>Pisum sativa</i>
Sensibles (0.5 – 0.75 mg/L)		Zanahoria	<i>Daucus carota</i>
Aguacate	<i>Persea americana</i>	Rábano	<i>Raphanus sativus</i>
Toronja	<i>Citrus X paradisi</i>	Papa	<i>Solanum tuberosum</i>
Naranja	<i>Citrus sinensis</i>	Pepino	<i>Cucumis sativus</i>
Albaricoquero	<i>Prunus armeniaca</i>	Moderadamente tolerantes (2.0 – 4.0 mg/L)	
Melocotonero	<i>Prunus persica</i>	Lechuga	<i>Lactuca sativa</i>
Cerezo	<i>Prunus avium</i>	Repollo	<i>Brassica oleracea capitata</i>
Ciruelo	<i>Prunus domestica</i>	Apio	<i>Apium graveolens</i>
Caqui	<i>Diospyros kaki</i>	Nabo	<i>Brassica rapa</i>
Higuera	<i>Picus carica</i>	Pasto azul	<i>Poa pratensis</i>
Vid	<i>Vitis vinifera</i>	Avena	<i>Avena sativa</i>
Nogal	<i>Juglans regia</i>	Maíz	<i>Zea mays</i>
Pecana	<i>Carya illinoensis</i>	Alcachofa	<i>Cynara acolymus</i>
Caupíes	<i>Vigna unguiculata</i>	Tabaco	<i>Nicotiana tabacum</i>
Cebolla	<i>Allium cepa</i>	Mostaza	<i>Brassica juncea</i>
Sensibles (0.75 – 1.0 mg/L)		Trébol dulce	<i>Melilotus indica</i>
Ajo	<i>Allium sativum</i>	Calabaza	<i>Cucurbita pepo</i>
Camote	<i>Ipomoea batatas</i>	Melón	<i>Cucumis melo</i>
Trigo	<i>Triticum estivum</i>	Tolerantes (4.0 – 6.0 mg/L)	
Cebada	<i>Hordeum vulgare</i>	Sorgo	<i>Sorghum bicolor</i>
Girasol	<i>Helianthus annuus</i>	Tomate	<i>Lycopersicon esculentum</i>
Frijol chino	<i>Vigna radiata</i>	Alfalfa	<i>Medicago sativa</i>
Ajonjolí	<i>Sesamum indicum</i>	Veza	<i>Vicia benghalensis</i>
Lupino, altramuz	<i>Lupinus hartwegii</i>		
Fresa	<i>Fragaria spp.</i>		
Alcachofa	<i>Helianthus tuberosus</i>		
Frijoles	<i>Phaseolus vulgaris</i>		
Pallar, judía lima	<i>Phaseolus lunatus</i>		
Cacahuete	<i>Arachis hypogaea</i>		

Normalmente, para evaluar la salinidad del agua de riego se utiliza la conductividad eléctrica (CE) y un elevado contenido de sodio en el agua induce a elevados índices de porcentaje de sodio intercambiable (PSI), lo cual puede traducirse en pérdida de estructura del suelo por dispersión o hinchamiento de los agregados (Cisneros Estrada, 2016).

Aunque, no todos los cultivos responden de igual manera a la salinidad, algunos cultivos con niveles altos de salinidad producen rendimientos aceptables, otros en cambio, no prosperan ni siquiera con ligeros aumentos de sal en el suelo, esto se debe a que algunos cultivos tienen una mejor capacidad de adaptación osmótica para absorber el agua (Cisneros Estrada, 2016).

Cultivos tolerantes a cierto grado de salinidad

El término para clasificar plantas que crecen en ambientes salinos, como costas marítimas y desiertos salinos es halófito, el cual hace referencia a plantas tolerantes a sales (Cisneros Estrada, 2016), además, estos forrajes tienen una buena aceptación para alimentar al ganado bovino, ovino, caprino, porcino y cunícola, algunos de estos forrajes alternativos son la Coquia (*Kochia scoparia* L.), frijol yorimon (*Vigna unguiculata* L.Walp), pasto Taiwan (*Pennisetum purpureum* Schum), nopal (*Opuntia* spp), y pasto salado (*Distichlis* *Espicata*) entre otros, (Murillo et al., 2009).

Los productores cuyo terreno o suelo, presenta características productivas poco favorables generalmente por concentraciones de salinidad, aunado a su ubicación en zonas áridas o semiáridas, semidesérticos o en zonas cercanas a las costas, así como zonas regadas con baja calidad de agua, por ello es importante considerar aquellos cultivos que pueden sembrarse considerando la concentración de sales en las aguas residuales debido a que limita el aprovechamiento de los cultivos, estas plantas denominadas halófitas que resisten ciertos grados de salinidad, los cuales son de utilidad para generar ingresos (Cisneros Estrada, 2016). Estos cultivos y forrajes producen altos rendimientos de materia fresca y seca, con poca agua e incluso con agua de una conductividad eléctrica mayor a 3 dS/m (Murillo et al., 2009).

Medidas para elevar la calidad del agua tratada

A continuación se detallan algunas opciones para elevar la calidad del agua de riego hasta cumplir los estándares, esto se puede llevar a cabo en la misma planta de tratamiento o en la parcela, si bien de forma ideal, cuando las aguas residuales son reutilizadas en la agricultura, el efluente debe cumplir con los límites de contaminantes que marca la normatividad vigente en México NOM-001-SEMARNAT-1996 o con los referentes internacionales que maneja la OMS, es decir, que esta agua de riego debe provenir de un sistema de tratamiento (Cisneros Estrada, 2016)

En un panorama realista, la mayoría de las aguas residuales aún no cumplen con la calidad de reúso para regar los cultivos y parcelas, a fin de mejorar su calidad se requieren de un tratamiento complementario, sobre todo en el aspecto bacteriológico (Cisneros Estrada, 2016). Existen varios métodos de tratamiento terciario para reducir los patógenos y contaminantes emergentes, como la

oxidación avanzada, siendo considerada como uno de los mejores métodos, además de la adición de carbón activado, el uso de membranas, filtración, luz ultravioleta, cloración y ozonización, sin embargo, los costos de implementación, la generación de subproductos tóxicos, y los efectos de riesgo sinérgicos que pueden ser carcinógenos son aspectos a considerar (Zahmatkesh et al., 2022).

Desinfección con rayos ultravioleta (UV) y ozono

La desinfección con rayos ultravioleta (UV) es un método ideal para complementar el proceso de desinfección, debido a que su longitud de onda permite eliminar de forma eficaz aquellos microorganismos y agentes patógenos que ocasionan enfermedades de tipo gastrointestinal, estos rayos UV actúan sobre el ADN de las bacterias destruyendo su información genética e impide su reproducción, se busca emplear tecnologías que sean seguras, eficaces y que no produzca residuos previo al riego de parcelas agrícolas, esta metodología posee ventajas: (Cisneros Estrada, 2016).

- No requiere de productos químicos para erradicar a bacterias (Cisneros Estrada, 2016).
- No forman sustancias no deseadas como los trihalometanos (Cisneros Estrada, 2016).
- La desinfección no produce ni olores ni sabores desagradables (Cisneros Estrada, 2016).
- Su efectividad no depende del pH del agua (Cisneros Estrada, 2016).
- El equipo instalado para esta tecnología requiere de poco espacio (Cisneros Estrada, 2016).
- Los costos de mantenimiento son bajos, frente a su gran efectividad en la remoción de microorganismos y patógenos (Cisneros Estrada, 2016).
- Remueven microorganismos como *Cryptosporidia* y *Giardia*, los cuales son muy resistentes (Cisneros Estrada, 2016).
- Requiere de un menor tiempo de contacto en contraste con otros sistemas de desinfección (Cisneros Estrada, 2016).

Aunque, los rayos UV no tiene un efecto residual, para eliminar bacterias, virus, esporas y quistes solo requieren de 20 a 30 segundos de contacto, lo cual permite reducir la carga biológica del agua, elevando la calidad sanitaria del efluente hasta que alcance los límites permisibles cuando el agua residual tiene fines para su reuso tanto en riego agrícola como en servicios al público (Cisneros Estrada, 2016). García Giménez (2010) menciona que el sistema de desinfección con rayos ultravioleta con un influente de 3,000 y 16,000 coliformes fecales NMP/100 ml, después de pasar por los rayos UV, se obtenía agua con menos de 1,000 coliformes fecales NMP/100 ml, lo que muestra su alta efectividad, entre sus desventajas se encuentran: (Cisneros Estrada, 2016).

- Requiere de una inversión inicial para adquirir el equipo (Cisneros Estrada, 2016).
- Los costos de operación y mantenimiento son frecuentes (Cisneros Estrada, 2016).
- Los sólidos en suspensión mayores a 30 mg/L evitan que la desinfección sea efectiva (Cisneros Estrada, 2016).
- Se requiere de una fuente de energía eléctrica (Cisneros Estrada, 2016).

En cambio, el gas ozono se ha utilizado desde finales del siglo XVIII, por su efectividad para remover bacterias y virus, este gas se produce a partir de oxígeno puro, comparado con la cloración, actualmente esta tecnología integra un generador de ozono que incluye filtros de aire, un sistema difusor y un tanque de contacto, para usarlo como desinfectante, el sistema se instala en la tubería de suministro de agua y mediante sensores internos se inicia la producción de ozono ajustándose a la demanda de agua, este proceso funciona de forma automática. Aunque es una tecnología compleja, las principales desventajas son altos costos de inversión inicial, requiere de una fuente de energía eléctrica cercana y continua, además, es fundamental que el operador esté capacitado y plenamente consciente de los riesgos, para operar de forma adecuada evitando accidentes durante su operación (Cisneros Estrada, 2016).

Existen generadores que funcionan con una potencia de 55W y que desinfectan entre 5 y 15 litros por minuto, el tiempo de contacto necesario varía según la calidad del agua residual, pero con unos pocos minutos es suficiente. Sin embargo, a temperaturas más bajas, será necesario un mayor tiempo de contacto y una concentración mayor de ozono (Comisión Nacional de Riego, 2007, citado por García Giménez, 2010; Cisneros Estrada, 2016).

Uso de membranas y osmosis inversa

El empleo de membrana para realizar, la micro, ultra y nanofiltración requiere pasar el agua a través de membranas para remover bacterias, virus, presentes del agua residual, los principios de esta técnica se basan en la separación física de partículas por tamaño de poro de las membranas a utilizar, esto determinará la eficacia en la remoción de los sólidos y microorganismos patógenos (0.1 a 10 μm). Antes de emplear las técnicas de micro y ultrafiltración es esencial que el agua de reúso mínimamente tenga un tratamiento primario o pase por una unidad de prefiltración con un poro entre 0.001 a 0.01 μm (Cisneros Estrada, 2016).

Aunque en el proceso de la ósmosis inversa, la permeabilidad de la membrana también juega un papel esencial, el tamaño de poro puede ser tan pequeño, que la mayoría de las impurezas, bacterias y virus son separados del agua ya que el agua es impulsada para cruzar la membrana, dejando las impurezas del otro lado, este procedimiento es usado en el tratamiento de aguas, en las calderas de alta presión, farmacéuticos, cosméticos, consumo humano, potabilización del agua marina, diálisis etc. Debido a su gran versatilidad, se ha extendido su uso, lo cual reduce los costos de los equipos, se considera a la ósmosis inversa como un hiper filtro, el cual permite eliminar en un 80 a 98 % de sales disueltas y otros contaminantes (Rincón, M. N. C., 2014).

Las principales desventajas radican en la complejidad de esta tecnología, además de requerir de energía continua que proporcione una presión constante mediante bombas, filtros, depósitos de agua, lo que representa un alto costo de inversión inicial, mantenimiento y operacional, por lo que solo en algunos cultivos bajo invernadero se justifica su aplicación (Cisneros Estrada, 2016).

ESTUDIOS DE CASO

Como se detalló en el apartado de "panorama general de las aguas residuales", el problema de escasez de agua dulce a nivel mundial es creciente (Norton-Brandão, D., Scherrenberg, S., Van Lier, J., 2013), es por ello que, se hace necesario tener fuentes alternativas, como la reutilización de aguas residuales municipales tratadas, en zonas áridas representa una fuente viable y es comúnmente utilizada, por ejemplo en Israel más del 60 % de las aguas residuales municipales son reutilizadas (United States Environmental Protection Agency (Usepa), 2012).

En 1998, la Organización Panamericana de la Salud señaló que, en América Latina, menos del 14 % de los 600 m³/s de aguas residuales domésticas reciben algún tratamiento, antes ser vertidas a ríos y mares, únicamente el 6 % pasa por un tratamiento aceptable. A esto se añade, que un 40 % de la población urbana cercana, contrae enfermedades infecciosas relacionadas al agua (Veliz Lorenzo et al., 2009). Países como África del Sur, Alemania, Arabia Saudita, Argentina, Australia, Chile, China, Estados Unidos, India, Israel, Kuwait, México, Perú, Sudán y Túnez durante el período de posguerra existió una necesidad creciente de optimizar los recursos hídricos, esto a su vez generó un interés por aprovechar las aguas residuales (Parreiras, 2005, Silva et al., 2008). Esta práctica se ha generalizado durante la segunda mitad del siglo XIX, se ha registrado el reúso en distintos lugares alrededor de todo el mundo, como se observa en la tabla 23 (Cisneros Estrada, 2016).

Tabla 23. Registros documentados del reúso de agua residual por países. Adaptado de (Metcalf & Eddy, 1994)

País o localidad	Fecha de inicio	Superficie (ha)	Caudal usado (m ³ /s)
Berlín, Alemania	1874	2 720	N.d.
Braunschweig, Alemania	1896	4 400	0.7
Croydon-Beddington, Inglaterra	1860	252	0.2
Leamington, Inglaterra	1870	160	0.04
Melbourne, Australia	1893	4 160	2.19
Valle del Mezquital, México	1890	90 000	N.d.
París, Francia	1869	640	3.46
Wroclaw, Polonia	1882	800	1.23
Calumet City, MI, EUA	1888	4.8	0.05
Ely, Nevada, EUA	1908	160	0.07
Fresno, CA, EUA	1891	1 600	1.14
San Antonio, TX, EUA	1895	1 600	0.88
Vineland, NJ, EUA	1901	5.6	0.04
Woodland, CA, EUA	1889	96	0.18

Las estimaciones sobre la reutilización de aguas residuales domésticas (ARD) en todo el mundo indican que, aproximadamente 20 millones de hectáreas de tierras agrícolas se riegan con aguas residuales tratadas y no tratadas (Jiménez y Asano, 2008). Probablemente, esta práctica se expanda en las próximas décadas, debido a que la escasez de agua se intensifica, especialmente en países de bajos ingresos y en países desarrollados con zonas áridas y semiáridas (Hamilton et al., 2007; Scheierling et al., 2010). Generalmente, esta práctica se realiza en forma desorganizada, debido a

las malas condiciones de infraestructura, así como a la nula o escasa aplicación de legislaciones para regular dicha actividad local y nacionalmente (Ampuero y van Rooijen, 2006).

Los países con la mayor cantidad de proyectos de reúso son Japón con 1,800 y Estados Unidos con 800, seguidos por Australia con 450 y la Unión Europea con 230 proyectos empleando 963 m³/año de agua residual sin tratamiento, en el Medio Oriente se registran cerca de 100 plantas de tratamiento con reutilización, mientras que África subsahariana posee 20, América Latina reportó 50, alrededor de 400 m³/s de agua residual cruda son descargadas en fuentes superficiales para posteriormente irrigar los campos (Wintgens & Hochstrat, 2006; Bixio y Wintgens, 2006; Post, 2006). La FAO reportó que el área irrigada con aguas residuales sin tratar o tratamiento parcial a nivel mundial es de un 10%, lo que corresponde a 20 millones de hectáreas en 50 países, como se muestra en la figura 23 (Winpenny, Heinz, & Koo-Oshima, 2013).

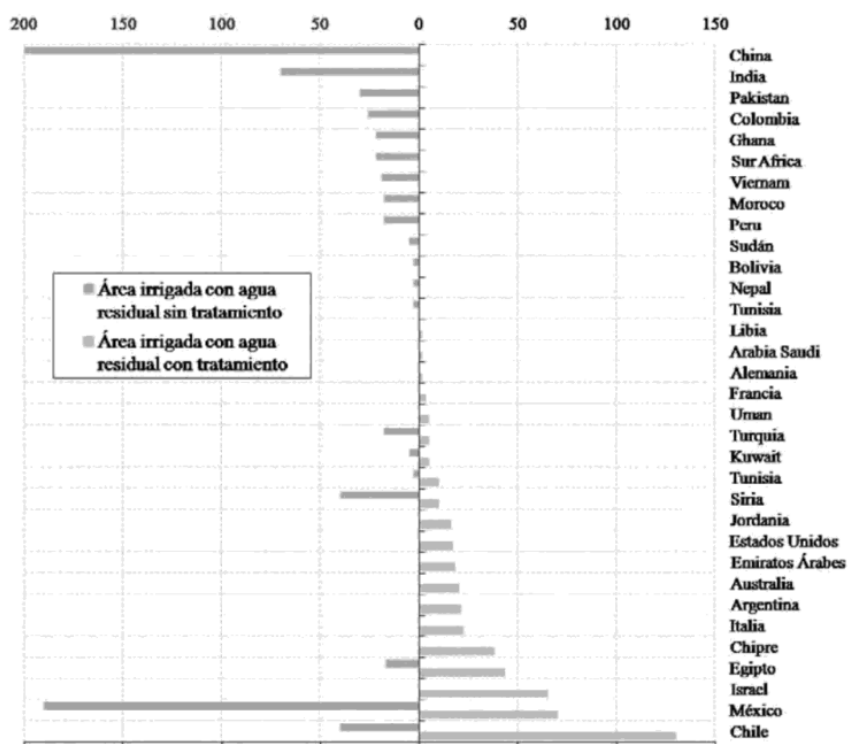


Figura 24. Miles de hectáreas de reúso en agricultura por países, (Jimenez & Asano, 2008).

En América Latina, en donde se ha identificado como los principales en donde se irrigan más de 500,000 hectáreas agrícolas directamente con aguas residuales sin tratar, son México con alrededor de 350,000 ha, Chile con 16,000 ha, Perú con 6,600 ha y Argentina con 3,700 ha, mientras que, en otros países como China, aproximadamente 1,300,000 ha agrícolas. En Chile, el tratamiento a nivel secundario del agua, en zonas urbanas es mayor al 90 % y menos del 5 % pasa por plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, los efluentes se reutilizan en actividades agrícolas, en

otros países en vías de desarrollo esta situación puede ser similar (Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), 2013). En Cuba, prácticamente no se utilizan las aguas residuales domésticas tratadas para riego agrícola, únicamente son destinadas al turismo de algunos hoteles y para el riego de sus áreas verdes, así como para campos de golf (Chao A.C, 2005).

En cambio, en países desarrollados, el uso planificado de dichas aguas tratadas es común en casos como Israel, el cual se encuentra a vanguardia, seguidos por Australia, Alemania y Estados Unidos (Veliz Lorenzo et al., 2009). Actualmente, en zonas como California aproximadamente el 50 % de las aguas reutilizadas son destinadas a la agricultura, debido a que este sector ocupa más del 70 % de los recursos de agua dulce (Pedrero, F., Kalavrouziotis, I., Alarcón, J., Koukoulakis, P., Asano, T, 2010). Se estima que para 2040 un 70 % del agua que requiere la agricultura será obtenida mediante el tratamiento de efluentes, debido a que actualmente una gran parte de la población mundial consume alimentos producidos con aguas residuales, aunque no siempre de forma segura (Veliz Lorenzo et al., 2009).

En 2000, el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá y la Organización Panamericana de la Salud-Organización Mundial de la Salud (OPS-OMS) crearon un convenio para crear un proyecto de investigación durante 30 meses, cuyo objetivo general fue estudiar el tratamiento de aguas residuales domésticas y su uso en agricultura urbana, en América Latina para recomendar estrategias de diseño e implementación de estos sistemas integrados e identificar oportunidades novedosas (Veliz Lorenzo et al., 2009).

Se seleccionaron 18 casos de estudio, en donde se observan cuatro situaciones del manejo de las aguas residuales, en primer lugar las ciudades donde se tratan y usan aguas residuales para riego agrícola (CT-CR), ciudades donde no se usan las aguas residuales aunque se trate (CT-SR), ciudades donde se riega con aguas residuales sin tratamiento (ST-CR) y ciudades donde no se tratan las aguas residuales para riego agrícola, ni se usan para este fin (ST-SR), en la mayoría de los casos, el agua residual es la única fuente de abastecimiento y se aplica mediante riego por inundación (Veliz Lorenzo et al., 2009)

Los estudios mostraron que los agricultores desconocen los riesgos a la salud asociados al riego con aguas residuales, también se encontró que en todos los casos, la actividad agrícola se desarrolla mayormente sin regulación sobre su tratamiento y no existen mecanismos de coordinación sobre otras instituciones involucradas, las tecnologías de tratamiento empleadas en los países de estudio, fueron principalmente, lagunas de estabilización, facultativas o aerobias, lodos activados en tres casos y en un solo caso con tratamiento por floculación química, como se muestra en la tabla 24 (Veliz Lorenzo et al., 2009).

Tabla 24. Sistemas de tratamiento y disposición final de las aguas residuales en los casos estudiados, (Veliz Lorenzo et al., 2009)

Localización	Alcantarillado		Tratamiento			
	País	Población servida (%)	Caudal (L/s)	Descarga	Tipo de planta	Disposición final
CT - CR	Argentina	37	2 900	Planta de tratamiento	Lagunas facultativas	Riego agrícola
	Bolivia	77	520	Planta de tratamiento	Lagunas facultativas	Riego agrícola
	Chile	97	470	Planta y mar	Lodos activados	Riego agrícola
	México	80	4 600	Canal riego y plantas	Floculación	Riego agrícola
		90	28 000	Canal drenaje y plantas	Laguna facultativa y lodos activados	Riego agrícola y forestal
		80	1 500	Planta y mar	Laguna aireadas	Riego agrícola
	Perú	84	370	Planta de tratamiento	Lagunas facultativas	Riego agrícola
	República Dominicana	90	600	Planta de tratamiento	Laguna aireadas	Riego agrícola
CT - SR	Brasil	46	150	Planta y mar	Lagunas facultativas	Laguna
	Costa Rica	79	50	Planta de tratamiento	Lodos activados	Estero
	Ecuador	85	52	Planta de tratamiento	Lagunas facultativas	Río
	Venezuela	52	3 400	Lago y planta	Lagunas estabilización	Lago
ST - CR	Chile	98	13 400	Ríos (riego agrícola)	—	—
	Perú	20	2 600	Riego agrícola	—	—
ST-SR	Colombia	78	1 380	Ríos y planta piloto	—	Río
	Guatemala	75	19	Quebrada y planta piloto	—	Quebrada
	Nicaragua	55	2	Quebrada y planta piloto	—	Quebrada
	Paraguay	—	—	Lago y río	—	—

En cuanto a los cultivos y al porcentaje irrigado con aguas residuales, se observó que, en el caso del maíz, arroz, además de otras hortalizas las cuales son procesadas antes de su consumo, los vegetales, frutos que se consumen crudos y en menor medida forrajes, además de cultivos industriales como el algodón y árboles maderables, la calidad del agua y el área irrigada varía dependiendo del país como lo detalla la tabla 25 (Veliz Lorenzo et al., 2009).

Tabla 25. Calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas para riego en los casos estudiados, (Veliz Lorenzo et al., 2009).

Localización		Agua residual		Área de reúso						
País	Coliformes (NMP/100 mL)	Parásitos (huevos/L)	Área total (ha)	Cultivos (Porcentaje del área total)						
				Cultivos (Porcentaje del área total) (%)						
	Argentina	2,5 E + 03	< 1	2 500	Vid	30	Hortalizas	30	Frutales	30
	Bolivia	2,1 E + 06	—	80	Maíz	—	Tomate	—	Pimienta	—
	Chile	1,0 E + 02	—	1 500	Maíz	28	Zanahoria	10	Algarrobo	9
CT - CR		—	< 1	26 000	Algodón	25	Alfalfa	13	Trigo	12
	México	6,1 E + 04	—	10 800	Maíz	49	Remolacha	—	Avena	—
		5,0 E + 03	< 1	757 000	Maíz	7	Alfalfa	4	King grass	3
	Perú	2,5 E + 04	—	740	Maíz	47	Alfalfa	9	Eucalipto	5
	República Dominicana	5,0 E + 03	—	250	Arroz	100	—	—	—	—
CT - SR	Brasil	5,1 E + 01	0	—	—	—	—	—	—	—
	Costa Rica	2,1 E + 05	—	—	—	—	—	—	—	—
	Ecuador	1,7 E + 05	< 1	—	—	—	—	—	—	—
	Venezuela	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ST - CR	Chile	1,0 E + 06	—	52 000	Hortalizas	27	Praderas	22	Cereales	19
	Perú	6,5 E + 07	—	535	Apio	30	Porro	23	Cebolla	22
ST - SR	Colombia	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Guatemala	1,2 E + 07	—	—	—	—	—	—	—	—
	Nicaragua	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Paraguay	—	—	—	—	—	—	—	—	—

A continuación, se detallarán algunas estrategias, tecnologías e innovaciones implementadas por diversos países con una cantidad considerable de proyectos de reúso de agua

Estrategias implementadas en Israel

Las aguas residuales son consideradas como un problema para muchos países, sin embargo, para Israel son un recurso preciado, este país cuenta con una gestión integral del recurso hídrico que cuenta con vigilancia y una política hídrica debido a que este país valora y fomenta dicho reúso, sus tres vertientes son, la protección a la salud, preservación al ambiente para reutilizar el agua en la producción agrícola (Cisneros Estrada, 2016).

A inicios de 1970 en Israel de forma masiva comenzaron a aplicar el riego con aguas residuales para la producción de algodón, posteriormente en 1990, se mejoró el tratamiento poniendo especial atención en la calidad del agua, por lo que el riego se extendió a otros cultivos entre los que destacan la uva para producir vino, aceitunas para producir aceite, dátiles, trigo, jojoba, flores de corte y algunas hortalizas como pimientos y tomates, por lo que la metodología israelí que consiste en usar

reservorios como unidades de tratamiento o pulimento, por lo que consideran al suelo como un biofiltro, por ello, el riego agrícola es su principal destino (Cisneros Estrada, 2016).

Cerca de la ciudad de Haifa se encuentra el mayor reservorio de aguas residuales destinadas a la agricultura, el cual almacena 12 millones de metros cúbicos, estos reservorios son capaces de remover el 90 % de la DBO, de 3-4 órdenes de magnitud de coliformes fecales, detergentes y otros contaminantes (Quipuzco, 2004), en cuanto a los costos del tratamiento de estos reservorios, resultan más accesibles a comparación de otras alternativas (Cisneros Estrada, 2016).

Las aguas residuales tratadas en Israel mediante Soil Aquifer Treatment, son aprovechadas en la recarga de acuíferos subterráneos (Kanarek, 1996). Esta técnica permite infiltrar agua residual pretratada utilizando el perfil del suelo para remover contaminantes presentes, generando un flujo de agua descendente que recargue el acuífero, después de aproximadamente 400 días, puede extraerse agua de buena calidad para su uso en distintas actividades a través del bombeo de pozos de recuperación, algunas de estas actividades son el riego agrícola (Cisneros Estrada, 2016).

Se estima que en el 2016 Israel produce 440 millones de metros cúbicos de aguas residuales al año, un 95 % se recoge en plantas depuradoras y el 75 % es tratado, esta característica los posiciona en el primer lugar mundial en el reúso de las aguas residuales, para 2020 se espera que el 100 % de la agricultura sea abastecida con aguas residuales tratadas (Cisneros Estrada, 2016).

Estrategias implementadas en Estados Unidos

En 1890 Estados Unidos establece por primera vez en el país que las de aguas residuales pueden usarse en el riego agrícola en California, posteriormente en 1920 en Arizona, se usaron para regar cultivos de algodón, trigo y algunos cultivos de forraje como el maíz y alfalfa (Garduño et al., 2003). En los años 60 las aguas residuales tratadas se aprovechaban en el riego forestal de zonas boscosas creadas artificialmente, con la finalidad de generar condiciones para la recarga de acuíferos, dicho proyecto comenzó en el estado de Pensilvania, posteriormente se continuó en el estado de Michigan (Sutherland et al., 1974).

Las primeras zonas boscosas artificiales que fueron regadas con aguas residuales formadas principalmente por árboles como robles (*Quercus* spp), pinos rojos (*Pinus resinosa*) y abetos blancos (*Picea glauca*) (Braatz y Kandiah-FAO-Unasyuva 185). Estas zonas eran en su mayoría árboles plantados de manera artificial. Con el tiempo, los procesos para tratar el agua residual mejoraron en Estados Unidos, logrando que el agua fuera de mayor calidad. Esto permitió que se pudiera usar para regar diferentes tipos de cultivos, no solo árboles, ampliando las opciones de plantaciones que se pueden irrigar con estas aguas tratadas (Cisneros Estrada, 2016).

El organismo para la protección ambiental y la academia nacional de ciencias de Estados Unidos en 1983 establecieron una norma para el riego con 1,000 coliformes totales por 100 ml como también

lo establece el programa de vigilancia e investigación de la contaminación en el medio ambiente de Estados Unidos, para el riego de cultivos no procesados comercialmente, la calidad debe ser similar a la del agua potable y las recomendaciones son muy estrictas incluso más que las establecidas por la OMS, lo cual implica utilizar procesos de tratamientos eficientes y específicos principalmente para la desinfección, sin necesitar elevar la dosis de desinfectantes por ejemplo de cloro, debido a que esto podrían resultar agresivos para los cultivos, por ello la tabla 26 toma en cuenta indicadores de la calidad como el pH, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), turbidez o sólidos suspendidos (SS) y definen el tratamientos en cada caso (Veliz Lorenzo et al., 2009).

Tabla 26. Normativa de la Agencia de Protección Ambiental (EE. UU) sobre la reutilización de aguas residuales para uso agrícola, (Veliz Lorenzo et al., 2009)

Tipo de reutilización	Tratamiento	Calidad	Distancia de seguridad
Riegos de cultivos comestibles no procesados comercialmente.	Secundario Filtración Desinfección	pH = 6 - 9 < 10 mg/L DBO < 2 UNT 0 CF/100 mL 1 mg/L ClO ₂	15 m a fuentes o pozos de agua potable. A 30 m de zonas permitidas al público.
Riego de cultivos que se consumen procesados.	Secundario Desinfección	pH = 6 - 9 < 30 mg/L DBO < 30 mg/L SS 200 CF/100 mL 1 mg/L ClO ₂	A 90 m de fuentes o pozos de agua potable. A 30 m de zonas permitidas al público.
Riego de pastos de animales productores de leche y cultivos industriales.	Secundario Desinfección	pH = 6 - 9 < 30 mg/L DBO < 30 mg/L SS 200 CF/100 mL 1 mg/L ClO ₂	A 90 m de fuentes o pozos de agua potable. A 30 m de zonas permitidas al público.

DBO Demanda bioquímica de oxígeno. UNT Unidades nefelométricas de turbiedad. SS Sólidos suspendidos. CF Coliformes fecales.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) recomienda una normatividad a nivel federal sobre la reutilización de aguas residuales en el sector agrícola, para aquellos estados que aún no han desarrollado su propia regulación, dichas entidades se han guiado por normas internacionales, fundamentalmente de la EPA para diseñar e instalar plantas de tratamiento en algunos hoteles con el fin de irrigar áreas verdes (Chao A.C.,2005).

Durante la primera década de los años 2000, se promovió con mayor énfasis el uso de aguas residuales en algunas granjas porcinas en los estados de Carolina del Norte y Carolina del Sur en donde se empezó a sembrar pasto bermuda, este pasto, generó ingresos para los porcicultores mediante la venta del forraje o para alimentar ganado bovino. En el 2015, Estados Unidos reutilizaba cerca del 7 % del total de sus aguas residuales tratadas (RWL Water, 2015; Cisneros Estrada, 2016).

Aprovechamiento de aguas residuales tratadas en España

En España en 1955, se planeó el primer intento de aprovechamiento de las aguas residuales mediante un programa de reforestación en el que se plantaron franjas forestales, como álamos (*Populus euroamericana*), en los límites de las riberas de los ríos para estabilizar su cauce, las zonas forestadas eran regadas con aguas residuales que provienen de una planta de tratamiento, en los años 80 se retomó el proyecto con el nombre de "filtros verdes", para la época de los 90 España sufrió problemas debido a la sobreexplotación de acuíferos subterráneos, por lo que las aguas residuales fueron vistas como un recurso hídrico que podía complementar la demanda de agua que requería la agricultura, si se mejorara su calidad fisicoquímica y bacteriológica a través del tratamiento y se mezclaban con un 75 % de aguas superficiales de ríos, lo cual redujo la extracción de volúmenes, apoyando a la recuperación del acuífero (Cisneros Estrada, 2016).

España ha mostrado su pleno respaldo al cumplimiento de los ODS, lo que se traduce en una conciencia social de respeto por el medioambiente, una reducción de la huella de carbono o un consumo responsable de recursos y uso de fuentes energéticas renovables, lo cual también ha impactado en el sector agrario ya que, su sistema productivo se ha ajustándose a los principios de la sostenibilidad (Santander, 2024). La propia Estrategia Española de Economía Circular (EEEC), España Circular 2030 remarcar que, el sistema de economía lineal en el sector primario implica "algunas externalidades negativas que llevan a la degradación del suelo, agotamiento en el uso de los recursos naturales, con una especial atención a los recursos hídricos" (Santander, 2024).

Hasta el 22 de mayo de 2006 en España se reguló la reutilización de aguas regeneradas mediante la Ley de Aguas y el proyecto del Real Decreto, estableciendo que toda reutilización requiere de autorización administrativa, además de un convenio entre el gestor de la instalación y los usuarios en donde se establezcan las condiciones básicas para reutilizar las aguas depuradas, lo cual modifica parcialmente el reglamento del dominio público hidráulico anterior, aprobado por el Real Decreto 849/1986 del 11 de abril. El proyecto de Real Decreto establece que las aguas regeneradas podrán utilizarse según los criterios y valores máximos permisibles (Cisneros Estrada, 2016).

Las aguas residuales tratadas que se utilizan para el riego agrícola son denominadas "aguas regeneradas", y cumplen la característica de tener una mejor calidad por medio de tratamientos especializados con la finalidad de que sean aptas para usarlas nuevamente en diversas actividades y zonas. Actualmente, en la provincia de Andalucía se reutilizan 53 Hm³ de aguas residuales tratadas, de este volumen la finalidad del 32.2 % es el riego agrícola, de donde se abastece una superficie de 3,500 ha de cultivo bajo invernadero, los cuales están localizados en la subcomarca del bajo Andarax en Almería (Junta de Andalucía, 2007). La justificación de reutilizar aguas residuales para el riego de cultivos hortícolas en Almería se debe a las condiciones de moderada salinidad y su alto contenido en nutrientes principalmente N, P y K, elementos esenciales para la nutrición de las plantas (Baeza et al., 2012).

Dichas condiciones han favorecido la aceptabilidad por parte de los productores agrícolas españoles, el distrito hidrográfico mediterráneo de Andalucía se encuentra en la vanguardia sobre el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas, como se muestra en la figura 24 el principal destino de esta agua residual es abastecer la demanda de los 29 campos de golf que se localizan en la Costa del Sol (Cisneros Estrada, 2016).

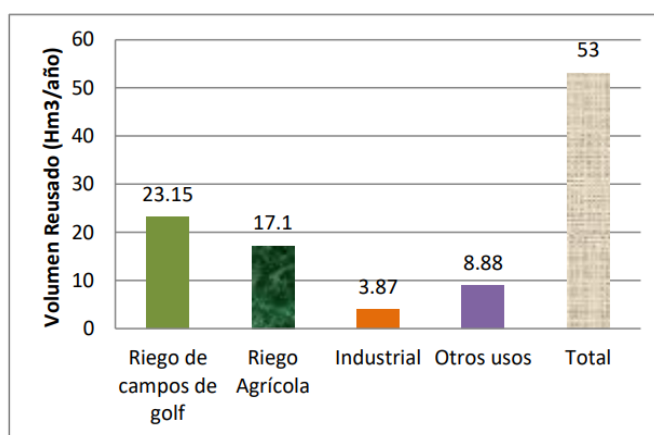


Figura 25. Distribución del reúso en Andalucía en 2007, (Cisneros Estrada, 2016)

Por tanto, en el tema de aprovechamiento de sus aguas residuales tratadas España ha avanzado continuamente, de forma que en el 2000 pasó de reusar un 9 % o equivalente a 230 Hm³/año a un 14 % en el 2010, lo cual representó 450 Hm³/año, para el año 2015 se posicionó como el segundo a nivel mundial en reutilizar sus aguas tratadas, obteniendo una tasa de aprovechamiento del 17 % del total tratado (Cisneros Estrada, 2016). Dicha tendencia continúa vigente hasta nuestros días, en toda Europa, este país tiene las tasas más altas de reutilización y aprovechamiento, especialmente regiones áridas como Murcia y Almería.

Con la finalidad de eliminar de forma completa los contaminantes de las aguas residuales, la FCC Aqualia desarrollar la primera planta comercial basada en microalgas de 10 hectáreas, la cual se localiza en Chiclana la frontera española, es capaz de tratar las aguas residuales de 80.000 habitantes, los datos proporcionados por FCC Aqualia señalan que empleando un consorcios de microalgas y bacterias es posible tratar hasta 1,000 m³/día, generando 950 m³/día de agua regenerada apta para riego, y hasta 100 t/año de biomasa microalgal (Fernández et al., 2018).

Siendo un perfecto ejemplo de bioeconomía sostenible, pues en el proceso se ahorran más de 0,3 kWh/m³ de energía por agua residual tratada, lo que representa un importante ahorro económico, la biomasa obtenida se puede usar para producir biogás con lo que se produce biometano que abastecen a 10 vehículos ligeros durante todo un año, dicha biomasa también puede ser utilizada en la producción de bioinsumos de uso agrícola, por lo que las microalgas pueden transformar de forma

revolucionaria los actuales procesos convencionales, el diseño del sistema planteado se muestra en la figura 25 (Fernández et al., 2018).

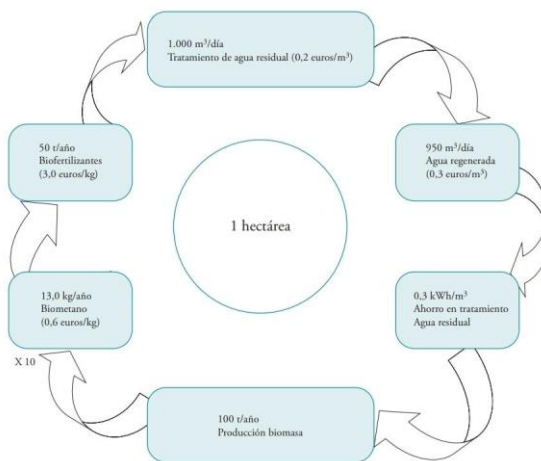


Figura 26. Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales empleando consorcios de microalgas y bacterias, (Comunicado de FCC Aqualia, 2017)

Actualmente en España se pueden encontrar alguna que otra empresa reciente sobre microalgas, las cuales se encuentran en vías de producción como Easy algae, Algaenergy o Aqualgae (EBT) para acuicultura o Cleanalgae para la acuicultura e inician en el mercado de la cosmética, nutrición, farmacéutica o bioenergía, por lo que estas empresas son de gran interés para grandes el sector alimentario. Por otro lado, este país es el único en implementar más de un centenar de proyectos tecnológicos basados en microalgas, así como también una decena de proyectos grandes para la construcción de plantas de cultivo (García, C, 2013).

Además, la Universidad de Almería, España trabaja en una propuesta de patente para un sistema de eliminación de metales pesados en aguas mediante microalgas, este método emplea cultivos de microalgas vivas en una secuencia de etapas adecuadamente diseñadas para obtener un funcionamiento óptimo del sistema. El proceso es robusto y escalable, pues es posible aplicarlo en distintas ubicaciones debido a que no depende de un tipo de microalga concreta, sino que es adaptable a cualquier especie de microalga, además, en cuanto a costos es un proceso competitivo, su única dificultad es el gran tamaño de los equipos requeridos para los elevados caudales de agua contaminada a tratar (Acién, F.G et al., 2017).

El proceso comprende diversos reactores, un reactor se emplea para producir la biomasa de microalgas a emplear en el proceso de depuración de agua contaminada, su tamaño está determinado por el caudal de agua a tratar debe operarse de forma continua para generar un flujo constante de cultivo que las microalgas requieren, posteriormente en una unidad de contacto las microalgas entran en contacto con los metales pesados, eliminándolos mediante procesos combinados de consumo, adsorción y precipitación. En el reactor las microalgas vivas producen elevadas cantidades de

oxígeno, que junto con la alcalinidad favorecen los procesos de oxidación y la precipitación de los metales pesados, lo que aumenta la remoción de los mismos comparado con procesos biológicos de consumo o de adsorción en superficie (Acién, F.G et al., 2017).

La unidad de separación de la biomasa de microalgas puede realizarse mediante procesos de centrifugación y/o filtración, es recomendable usar tecnologías de floculación y sedimentación o flotación, ya que es una opción más económica que permite caudales grandes, también se pueden emplear membranas de retención de biomasa como las utilizadas en dicho proyecto (Acién, F.G et al., 2017). Por otra parte, la biomasa producida es utilizada en la producción de biofertilizantes y alimento para animales, lo cual está relacionada con consumos grandes de cantidades de abonos, tierra, deforestación y consumo de agua, de esta forma se contribuye a la sostenibilidad (Jorquera et al., 2010; Romero García et al., 2012). Finalmente, en la figura 26 se presenta una estimación grosso modo de las producciones de microalgas más importantes a nivel mundial (García, C, 2013).

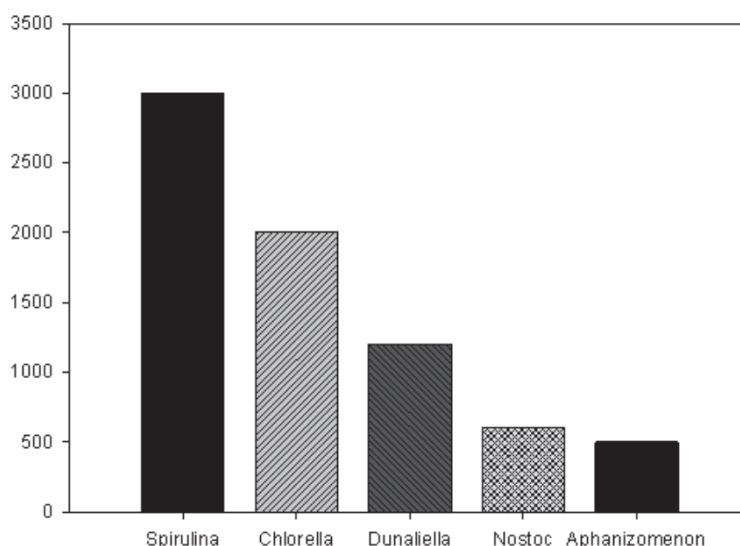


Figura 27. Producción anual de biomasa microalgal en toneladas/año, (García, C, 2013)

Aplicaciones en trenes de tratamiento

La Unión Europea (UE) en el 2012 adoptó e impulsó una estrategia innovadora de la bioeconomía, uno los pilares de esta estrategia es la "bioeconomía azul" el cual hace referencia a la producción de microalgas con la finalidad de obtener productos de alto valor para uso humano (Anon, 2012). Como se mencionó anteriormente, las microalgas son una fuente sostenible de nutracéuticos y alimentos para uso humano, debido a sus altas propiedades nutricionales, las cuales contrastan con algunos cultivos convencionales como cereales y verduras, debido a que estos necesitan mayores requerimientos de terreno, además las microalgas correctamente cultivadas tienen menores riesgos relacionados a la inseguridad alimentaria en un mundo global (Draaisma et al., 2013).

A pesar de que las ventajas de la biomasa de microalgas son ampliamente demostradas para su consumo humano, actualmente se comercializa sólo las microalgas reconocidas como seguras (GRAS), las microalgas como una alternativa alimentaria enfrentan diversos aspectos regulatorios para su incorporación, especialmente en la UE (Fernández et al., 2018). Sin embargo, en Europa, los productos a base de microalgas recientemente se han analizado y comercializado principalmente como alimentos y piensos (Enzing et al., 2014).

El mercado de biotecnología marina global en 2011 estimó que, del sector de alimentos saludables y suplementos dietéticos, las microalgas son uno de sus componentes principales, generando 2,4 billones de euros, con un crecimiento anual del 10 %, por lo que grandes empresas como BASF, Unilever, Roquette y Dow Chemical las cuales comercian con ingredientes alimentarios ya participan en proyectos relacionados a la producción de microalgas (Fernández et al., 2018). Por tanto, analizando las medidas propuestas en la Estrategia Española de Economía Circular (EEEC), así como sus impactos positivos al implementar un esquema de economía circular en la agricultura y en el sector primario, para su correcto funcionamiento proponen una serie de acciones como se detalla a continuación: (Santander, 2024)

Se fomenta la utilización de tecnologías "basadas en la agroecología o en la agricultura inteligente y sostenible, en las que se conjuga eficiencia, preservación de los recursos, mantenimiento del entorno y competitividad". Valorando, adaptando y adecuando la elección de los cultivos a sembrar por las características propias del terreno, incentivar las "rotaciones de cultivos con especies mejorantes, de manera que su mejor adaptación a una determinada región permita mayor sostenibilidad y eficiencia en el uso de los recursos naturales", en cuanto a los recursos hídricos se deben desarrollar "nuevos sistemas de riego de precisión que mejorarán la eficiencia del proceso de absorción de agua", finalmente "apoyar una alimentación animal a base de pastos u otros cultivos propios de la zona agroclimática correspondiente". (Santander, 2024)

En cuanto a los casos de aplicación o propuestas de sistemas de tratamiento con microalgas en España más específicamente en Almería se encuentra la estación experimental de Cajamar, la cual resulta fundamental para el desarrollo y la producción de las microalgas, en cuya construcción han participado varios grupos de investigación de la Universidad de Almería, concretamente, el Grupo de Biotecnología de Microalgas Marinas dirigido por Emilio Molina Grima, esta planta es la más eficiente del mundo en cuanto a producción de estos microorganismos vegetales (García, C, 2013).

La planta de Cajamar posee una capacidad de 40 m³, por ello son capaces de producir unas 70 toneladas de microalgas al año por cada hectárea, en contraste algunas plantas alemanas producen 20 toneladas al año por hectárea, el mercado objetivo de esta planta es producir microalgas para fines nutricionales, carotenoides, ácidos grasos poliinsaturados o biomasa microalgal destinada a acuicultura, las instalaciones son de carácter demostrativo, todos los proyectos son financiados por el ministerio de economía y competitividad, o la Junta de Andalucía y cofinanciado por diversas

empresas como Acciona, Aqualia SA, Albaida SA, Endesa o Algaenergy, además participan grandes compañías energéticas como Repsol o Iberdrola (García, C, 2013).

En cuanto a la construcción de plantas piloto hasta la escala operativa de aplicación industrial para el cultivo de microalgas se anexa la planta "La Viñita", con una superficie de media hectárea. En el mismo, se emplearán aguas pre-tratadas urbanas, considerando los parámetros de cultivo para tales aguas, el comportamiento de la flora autóctona de microalgas y se ajustarán las variables para maximizar la remoción de P y N, así como la producción de biomasa (Codina, MF, García, CB, Barón, JH, Da Silva, SM y Bosch, JP, 2014)

Esta planta piloto del 0,5 ha, se estima una inversión de 1,5 millones de pesos, más costos operativos de \$150.000 anuales, estos costos principalmente recaen en el sistema de cosecha, el secador spray representa un 35 % del total de la inversión y el filtro tangencial un 16 %, en segundo lugar la construcción y montaje del laboratorio para el análisis de microalgas (23 %), seguido del mantenimiento de la planta casi un 30 % y energía eléctrica para el funcionamiento de los sistemas de agitación, cosecha e inyección de CO₂ lo que representa un 12 % (Codina, MF, García, CB, Barón, JH, Da Silva, SM y Bosch, JP, 2014).

En la figura 27 se muestra el diagrama de flujo propuesto para la construcción de la planta, para el cultivo de microalgas anexado a una planta de tratamiento de aguas residuales convencional, mientras que en la figura 28, muestra el proceso de producción y purificación de biogás. (Codina, MF, García, CB, Barón, JH, Da Silva, SM y Bosch, JP, 2014)

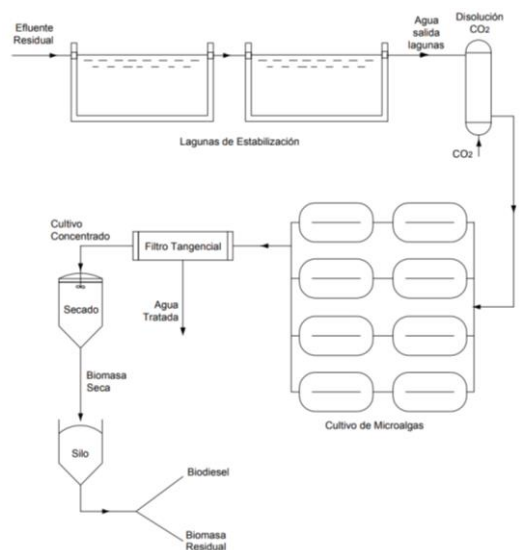


Figura 28. Cultivo de microalgas incorporado a una planta genérica de tratamiento de efluentes, (Codina, MF, García, CB, Barón, JH, Da Silva, SM y Bosch, JP., 2014)

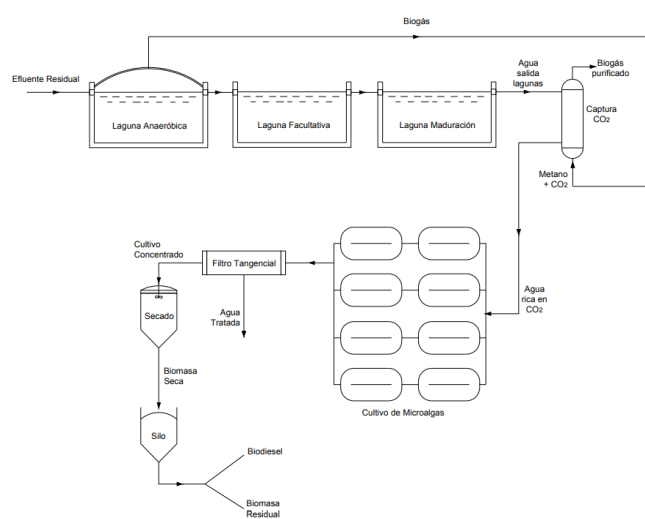


Figura 29. Purificación de biogás mediante captura en agua para cultivo de microalgas, (Codina, MF, García, CB, Barón, JH, Da Silva, SM y Bosch, JP., 2014)

Otro proyecto europeo que desarrolló tecnología experimental basada en microalgas para el tratamiento integral de aguas residuales urbanas y escorrentía agrícola es el nombrado Innovative Eco-Technologies for Resource Recovery from Wastewater (INCOVER), este sistema innovador además de permitir reutilizar las aguas tratadas produce co-productos de valor añadido y genera de forma simultánea múltiples recursos aprovechables (Uggetti et al., 2018). El diseño se fundamenta en un policultivo de microalgas el cual incluye diversas especies eucariotas y procariotas en consorcio con bacterias heterotróficas, esta estrategia facilita la acumulación de polihidroxibutiratos en la biomasa, compuestos esenciales para la posterior producción de bioplásticos (Amaro et al., 2023).

La valorización de la biomasa se desarrolla en múltiples etapas, a partir de la producción de polihidroxibutiratos, la biomasa remanente se aprovecha para generar biogás mediante digestión anaeróbica, esta se procesa junto con lodos secundarios, posteriormente el digestato se procesa para producir biofertilizantes. Las aguas residuales tratadas pasan por ultrafiltración y desinfección mediante un proceso solar que combina filtración con carbón activado y desinfección por rayos UV, finalmente, estas aguas se reutilizan en el sistema de riego inteligente para el cultivo de energéticos. Los resultados operacionales del sistema INCOVER demuestran su viabilidad técnica: ya que el sistema procesa 6,9 m³ de aguas residuales diariamente, la cual es usada para irrigar una plantación de girasoles de 125 m², en cuanto a la biomasa, produce aproximadamente 2 kg/día de biomasa rica en polihidroxibutirato y 150 L/día de biogás (Amaro et al., 2023).

En la figura 29, el apartado (A) hace referencia al proyecto europeo INCOVER descrito anteriormente, la biomasa de microalgas se utiliza para coproducir PHB y formular bioplásticos, biogás y fertilizantes, mientras que el agua tratada se destina a aplicaciones agrícolas, mientras que el apartado (B) hace referencia al trabajo de investigación desarrollado por Kumar et al. (2021): el cual se enfocada en la mitigación de contaminantes convencionales, metales pesados y bacterias resistentes a los antibióticos (BRA), utilizando microalgas de la especie *Pseudochlorella pringsheimii*, las aguas residuales tratadas se reutilizan en la acuicultura, mientras que la biomasa de microalgas se usa para producir biocombustibles (Amaro et al., 2023).

El diagrama de flujo del proyecto INCOVER se muestra en la figura 30, dicho proyecto es financiado por la Comisión Europea en el marco del programa Horizonte 2020, el cual pretende mejorar su eficacia, las soluciones de dicho proyecto incluyen la monitorización y control por medio de sensores ópticos y soft-sensors, de forma que las soluciones propuestas por INCOVER reducen al menos un 50% el costo total de operación y mantenimiento, esta estrategia europea de economía circular pretende usar las aguas residuales como una fuente de producción de energía y productos de alto valor añadido (Proyecto INCOVER, 2025).

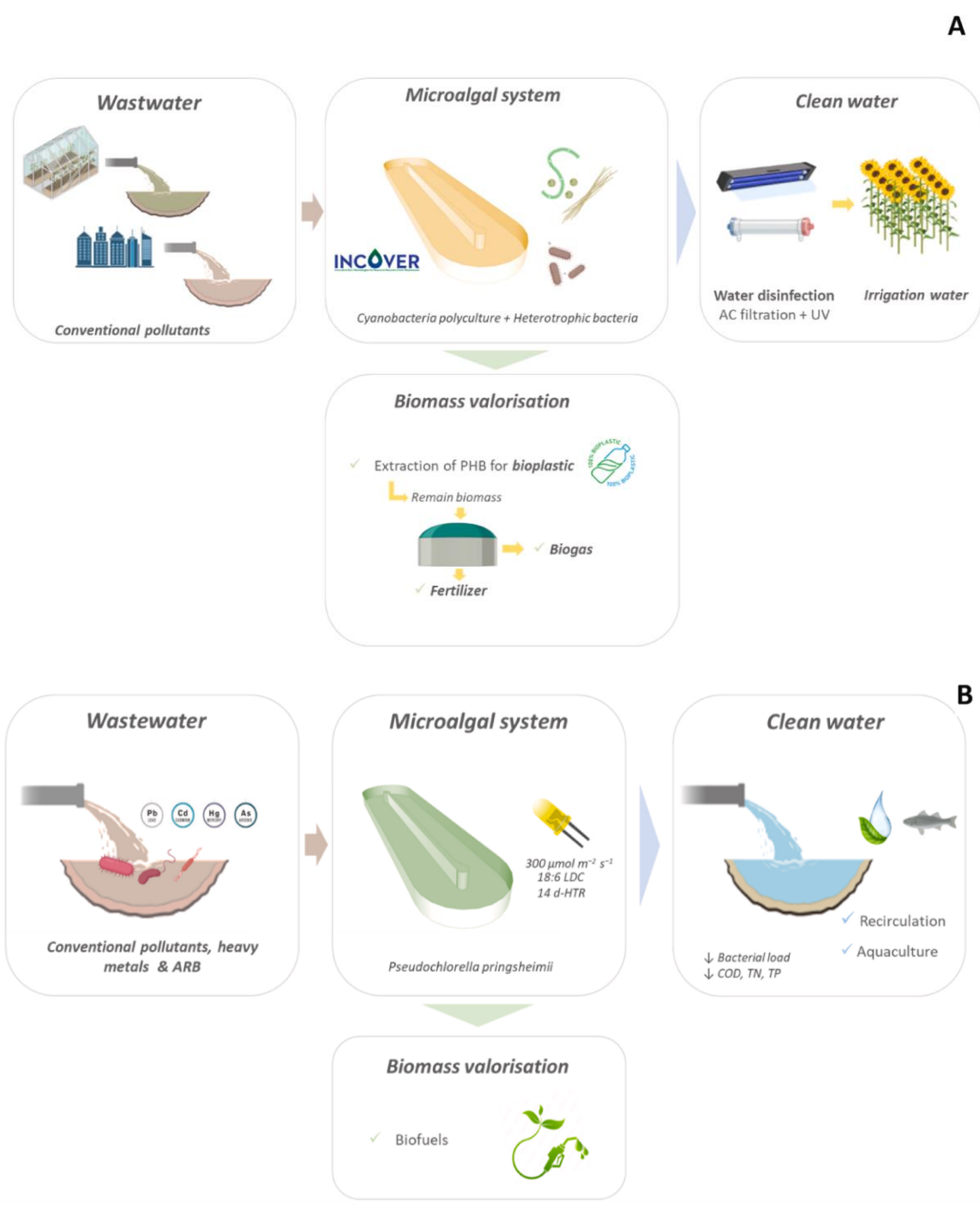


Figura 30. Diagramas de flujo del proyecto INCOVER, caso A y B, (Amaro et al., 2023).

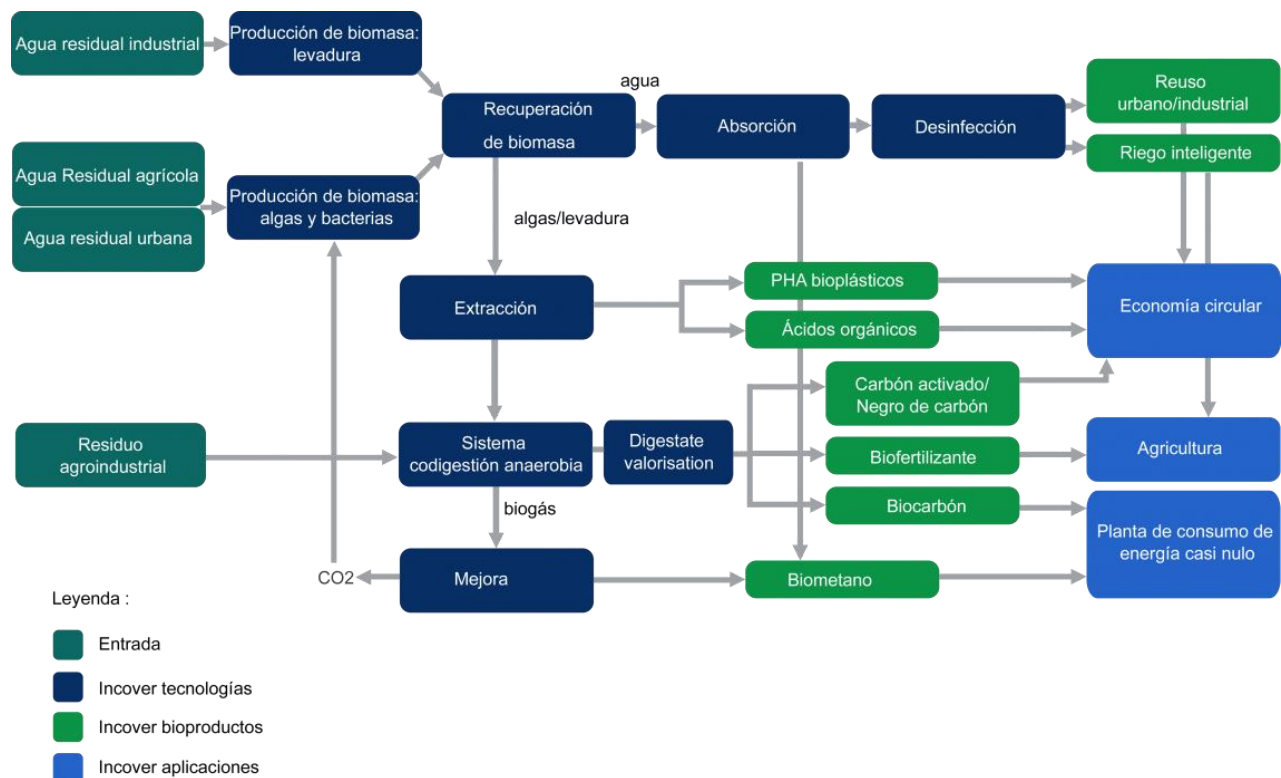


Figura 31. Diagramas de flujo del proyecto INCOVER, (Proyecto INCOVER, 2025).

Otro proyecto es el de SaltGae, este proyecto se enfoca en el tratamiento de aguas residuales industriales salinas, estas aguas representan un desafío significativo debido a su composición diversa y compleja, sus altas concentraciones salinas y de materia orgánica, se deben al procesamiento de carne, pescado enlatado, vegetales encurtidos, acuicultura o curtidurías, estas aguas son particularmente difíciles y costosas de tratar, especialmente para empresas pequeñas, este proyecto fue financiado por la Unión Europea H2020, en donde se proponen sistemas de consorcios algas/bacterias halotolerantes en HRAP (High Rate Algal Ponds) para eliminar materia orgánica, contaminantes convencionales y producir subproductos de valor (Amaro et al., 2023).

En el sistema de microalgas para el tratamiento de aguas residuales de las industrias láctea, curtidurías y acuicultura, se evaluaron especies como *Dunaliella salina*, *Spirulina*, *Tetraselmis suecica* y *Chlorella sp.*, la combinación de las bacterias y algas redujeron en un 90% la energía necesaria para la aireación, además permitieron obtener biomasa microalgal para producir diversos productos comerciales, los cuales incluyen desde piensos para lechones, protectores de frutas, recubrimientos comestibles, hasta biocompuestos para impresión 3D (Cordis, 2019). De esta forma, el proyecto no solo desarrolló tecnologías verdes para un tratamiento eficiente de aguas residuales saladas, sino que también se innovó en el desarrollo de nuevos biomateriales verdes obtenidos mediante procesos sostenibles (Amaro et al., 2023).

Este tipo de aguas residuales, cuenta con altas concentraciones de materia orgánica biodegradable, sólidos suspendidos, nutrientes principalmente nitrógeno y fósforo, así como una concentración de sal cercana al 15 %, y su descarga directa representa una gran amenaza para el medio ambiente; debido a que la salinidad puede causar eutrofización en el agua y sodificación del suelo, para las pymes de la industria total de alimentos y bebidas representan el 5 %, aproximadamente el 15,000 empresas, lo que representar hasta el 14 % de su facturación anual, aproximadamente 63,700 millones de euros, un coste estimado de aproximadamente 4,460 millones de euros en todo el sector de alimentos y bebidas (Saltgae Solution Algae to Treat Saline Wastewater, 2016).

Aunque este sistema se probó únicamente a escala de laboratorio, se desarrolló para adaptarse a diversas escalas, según las necesidades requeridas, en función del tipo de microorganismo, tamaño, tipo de tejido, tipo de gel y densidad. El sistema está inspirado en microesferas microbianas, su efectividad de biorremediación depende de la organización de la biopelícula (Melnikova et al., 2022). Una ventaja adicional es la portabilidad de la microesfera terminada, se puede transportar fácilmente al lugar en donde se va a aplicar, este sistema integró un tratamiento de aguas residuales que utiliza la biomasa de microalgas como fertilizante (Amaro et al., 2023).

El sistema utiliza la especie de microalga *Chlorella sorokiniana*, cuyas células se inmovilizan en un soporte biodegradable denominado AlgalTextile (AT), el cual está compuesto de alginato y tejido de algodón, este material se coloca en un fotobiorreactor horizontal abierto para el tratamiento seguro de las aguas residuales, la biomasa microalgal presenta potencial para la producir biocombustibles, incluyendo biocompuestos como antierosión y anti desertificación, así como biofertilizantes (Amaro et al., 2023).

Estos casos de estudios fueron financiados por entidades gubernamentales de Asia, especialmente de China, India y Rusia y por la Unión Europea, demostrando un gran interés global en la implementación de sistemas de microalgales y a pesar de encontrarse en etapa de escala experimental, como la mayoría de los proyectos los beneficios económicos y ambientales de estos sistemas destacan en todos los escenarios evaluados (Amaro et al., 2023).

La figura 31 en la sección (A) muestra el diagrama de flujo del proyecto europeo SaltGae, el cual busca la eliminación de contaminantes convencionales e incluye un proceso posterior de desalinización de las aguas residuales tratadas industriales, utilizando especies de microalgas halotolerantes en consorcios con bacterias, dicha biomasa de microalgas se utilizara para alimentar animales y obtener biocompuestos para impresión 3D, por otro lado la sección (B) muestra la investigación desarrollada por (Geng et al., 2022), el cual se centra en la eliminación de contaminantes convencionales utilizando un consorcio compuesto por la microalga *Chlorella vulgaris* y las bacterias *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, la biomasa se destinó a la acuicultura intensiva, especialmente a la alimentación de mejillones (Amaro et al., 2023). De esta forma el agua vuelve a ser usada cerrando la economía circular.



Figura 32. Diagramas de flujo del proyecto SaltGae caso A y B, (Amaro et al., 2023).

La viabilidad para tratar diversos tipos de aguas residuales, como lo son la acuicultura, agricultura, fuentes municipales e industriales, utilizar diversas configuraciones como los reactores de estanque, PBRS, lagunas generan un alto potencial al momento de aplicar un sistema de microalgas a gran escala, se pueden adaptar dichos sistemas de microalgas según las necesidades específicas y construirlos en el sitio, lo cual representa una ventaja competitiva significativa para su implementación futura (Amaro et al., 2023).

Como lo demuestran todos los sistemas anteriormente vistos a pequeña o gran escala, la incorporación de las microalgas en un sistema de tratamiento de aguas residuales es realizable, viable y un sistema por el cual se debe de optar en la actualidad.

PROPUESTAS Y DISCUSIÓN

El presente apartado integra a la vez que contrasta los hallazgos clave de la revisión, con el fin de fundamentar propuestas de implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales basados en microalgas en pequeña y gran escala, con un enfoque de economía circular en el que se busca aprovechar de forma integral a la biomasa en el sector agropecuario.

En este marco, el tratamiento, además del reúso responsable de los recursos hídricos, junto con la valorización de subproductos, constituyen a avanzar hacia estrategias, además de sistemas productivos sostenibles, como ya se mencionó, la motivación central de esta investigación deriva de la necesidad de ampliar el acceso a agua segura para riego y de reducir la presión sobre las fuentes convencionales, en concordancia con los objetivos de desarrollo sostenible, donde el agua, aunado a la producción alimentaria resultan fundamentales para obtener una estabilidad en la estructura social, económica y ambiental (Unesco Physical Document, 2016).

La evidencia técnica recopilada muestra que los sistemas con microalgas son agentes ambientales eficaces para remover contaminantes convencionales (N, P y carbono orgánico) debido a que, cuando su diseño y planificación es eficiente, se puede operar como un tratamiento secundario /terciario, generando de forma paralela biomasa con un potencial de valorización de la biomasa para diferentes fines. Estos sistemas además de demostrar altas eficiencias de remoción también permiten replantear a las aguas residuales como un recurso dentro de un esquema circular (Amaro et al., 2023). Esta perspectiva justifica un análisis separado, dependiendo de la escala de implementación, así como por las opciones de aprovechamiento, ya sea como insumo agrícola o suplemento ganadero, dichas propuestas se presentan en este apartado.

La revisión bibliográfica evidencia que, si se implementa un sistema de tratamiento de aguas residuales con microalgas, esto puede representar una alternativa sostenible y eficiente, a pequeña escala, estos sistemas pueden instalarse en comunidades, granjas o industrias locales con inversiones iniciales más bajas, además de requerir un mantenimiento menos complejo.

Esta alternativa a pequeña escala no solo remueve contaminantes como el nitrógeno y fósforo, evitando la eutrofización de cuerpos de agua, si no que la biomasa obtenida es rica en compuestos bioactivos que pueden aplicarse en agricultura y ganadería, contribuyendo a la reducción de insumos químicos (Olguín, 2012). Sin embargo, el espacio requerido para la instalación de estanques o fotobiorreactores puede ser un factor limitante en áreas con alta densidad poblacional, además en un sistema a pequeña escala es necesario concentrar las aguas residuales de toda la comunidad o utilizar aquellas provenientes de una ciudad aledaña, de modo que el volumen tratado sea suficiente para mantener un cultivo de microalgas estable y productivo (Muñoz y Guieysse, 2006). Además, se debe tener en cuenta que las condiciones necesarias para cultivar microalgas son específicas, por lo que se requiere de asistencia técnica para mantener el sistema.

Para facilitar la implementación a gran escala, se propone desarrollar un marco de transferencia tecnológica que considere las recomendaciones del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente para el uso de aguas residuales recuperadas en aplicaciones específicas, la cual incluye protocolos de calidad, sistemas de monitoreo continuo, y estrategias para superar las barreras técnicas y regulatorias actuales (Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, 2002), el éxito de la implementación dependerá de la velocidad con la que estas barreras puedan ser resueltas (Fernández et al., 2018). En cuanto a la viabilidad económica, esta resulta el principal desafío para la implementación de un sistema a gran escala (Enzing et al., 2014), se propone desarrollar un sistema integral que mejore de la productividad de los sistemas actuales, ampliación del tamaño de las instalaciones, y acople la producción de microalgas con otros procesos como el tratamiento de residuos (Acién et al., 2012; Norsker et al., 2011).

En el contexto de gran escala, el principal beneficio radica en la capacidad de tratar grandes volúmenes de agua residual, por lo que a su vez se genera biomasa de forma masiva, lo cual para el sector agrícola esta biomasa representa biofertilizantes, bioinsumos , mejorando las propiedades físicoquímicas del suelo, incrementando la retención de humedad y aportando tanto macro, como micronutrientes esenciales para el suelo, al mismo tiempo que se reduce la necesidad de usar insumos sintéticos (Markou y Georgakakis, 2011). Esta estrategia busca reducir los costos de producción, mientras se aumenta la capacidad de producción.

Por tanto, si el agua residual va a emplearse en la agricultura, el factor determinante es la calidad del efluente, ya que debe evaluarse los límites máximos permisibles microbiológicos y físicoquímicos que establecen la OMS/FAO, en caso particular de México, los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021, con el fin de proteger la salud pública e integridad del suelo, además, evaluar continuamente el efluente es esencial para evaluar posibles contaminantes acumulados en la biomasa como pesticidas, metales, fármacos antes de su uso, conforme a una lógica de bioeconomía segura (Spolaore et al., 2006; García, C., 2013; Amaro et al., 2023) Es por ello que, cualquier propuesta técnica debe integrar medidas de control para verificar la calidad del agua, así como criterios de selección de cultivos y prácticas de riego.

En cuanto al aprovechamiento en el sector ganadero, la biomasa puede emplearse como suplemento proteico de alta digestibilidad, aportando ácidos grasos esenciales que mejoran la salud y la productividad de los animales (Becker, 2013). La revisión bibliográfica, documenta el valor nutricional en cuanto a proteínas, perfil de aminoácidos y compuestos funcionales, de esta forma se hace evidente el potencial de la biomasa empleada como suplemento ganadero. No obstante, este tipo de sistemas implica una complejidad técnica mayor, debido a los altos costos de construcción y operación, así como un monitoreo diario para evitar contaminaciones o pérdida de productividad (Rawat et al., 2011). Además de que, controlar las condiciones de cultivo a gran escala requiere de equipo sofisticado, costoso y asistencia especializada por expertos.

Este balance de oportunidades y salvaguardas enmarca una discusión comparativa entre los beneficios, así como las desventajas, con lo que se pueden orientar las propuestas de implementación gradual con criterios técnicos, sanitarios y regulatorios. (Becker, 2007; Spolaore et al., 2006; García, C., 2013; Amaro et al., 2023). Además, el encuadre sanitario y ambiental es la base para discutir configuraciones tecnológicas como puede ser el emplear consorcios de microalgas-bacterias, aunado a implementar estrategias operativas (Cisneros Estrada, 2016; Mara y Cairncross, 1990; OMS, 2006; Mara et al., 2007; Jaramillo & Restrepo, 2024).

Una propuesta integradora sería desarrollar un modelo híbrido que combine la instalación de sistemas a pequeña escala en zonas agrícolas o ganaderas, con plantas de tratamiento a gran escala en zonas urbanas, este sistema no solo permitiría una distribución descentralizada del tratamiento, reduciendo los costos de transporte de aguas residuales, sino que también fomenta el aprovechamiento local de la biomasa, impulsando modelos de economía circular (Chisti, 2007).

Por tanto, esta propuesta contempla desde las características específicas de los efluentes generados, el cultivo de biomasa, el procesamiento para transformarlo en pienso de ganado, forrajes, así como bioinsumos, integrando todos los procesos y agentes involucrados en la cadena productiva, además de considerar las normativas ambientales aplicables (Villavicencio Gutiérrez, 2022). De forma que dicha propuesta considerando el potencial del sector agrícola mexicano para implementar nuevas tecnologías que reduzcan barreras sanitarias y fitosanitarias, se propone desarrollar un sistema de tratamiento de aguas residuales específicamente adaptado para la industria agroalimentaria (Ismael Corona Ramírez, 2016).

Para abordar los problemas de sostenibilidad ambiental identificados, incluyendo la producción de N_2O y la acumulación de contaminantes en la biomasa, se propone desarrollar un sistema integrado que considere la evaluación exhaustiva del contenido de pesticidas, toxinas y metales pesados en la biomasa antes de su aprovechamiento para otros fines (Yong et al., 2021), así como el desarrollo de estrategias de valorización que conviertan los subproductos en recursos útiles para la bioeconomía, este modelo que no solo genera oportunidades de negocios, sino que proporciona beneficios socioambientales en la conservación de recursos disponibles (Cerdeña y Khalilova, 2016).

Se propone implementar un sistema integral que aplique los principios de no generar residuos y contaminación desde el planteamiento, mantener productos, así como regenerar los sistemas naturales (EMF, 2017). El sistema parte de considerar que la agricultura emplea el 70 % del agua y contribuye en un 90 % a su contaminación a nivel global, mientras que, se deben buscar técnicas innovadoras para mantener la seguridad alimentaria sin deteriorar recursos hídricos y ecosistemas. Por lo que, la propuesta de esta investigación se sustenta en el principio precautorio, el principio de subsidiariedad descentralizada, el principio de inclusión y participación, en el cual se involucra a todos los agentes del sector agroalimentario (Rosario, 2008).

Propuesta del sistema integrado de tratamiento con microalgas y su implementación en el sector agropecuario

Se presenta una propuesta para la implementación de sistemas de tratamiento de aguas residuales con microalgas, realizada a partir de los hallazgos clave de la revisión y reconociendo la importancia de la gestión sostenible del recurso hídrico en la economía, así como el bienestar social, conforme a lo establecido por la ONU y la UNESCO (Unesco Physical Document, 2016).

En términos técnicos, el sistema con microalgas integra un modelo a pequeña escala en zonas agrícolas o ganaderas para contextos comunitarios con una operación robusta y a gran escala para caudales urbanos donde se integre la desinfección para asegurar el cumplimiento sanitario, además ambos panoramas deben cumplir con los criterios de calidad y manejo del agua para riego, selección de cultivos, siguiendo las referencias de los expertos y casos tecnológicos revisados (Cisneros Estrada, 2016; OMS, 2006; Jaramillo & Restrepo, 2024; Amaro et al., 2023).

Por tanto, el sistema integrado debe producir un efluente apto para riego agrícola y ganadero de forma que se valore la biomasa en el sector agropecuario, en cuanto a la calidad sanitaria del efluente, debe cumplir con los límites establecidos en la norma oficial mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 y con las directrices de la OMS para riego, verificando la calidad mediante muestreos periódicos para cultivos alimentarios, en cuanto a los parámetros microbiológicos el agua debe cumplir con ≤ 1 huevo de helminto (HH) y $\leq 1,000$ coliformes fecales (CF) por 100 ml (Cisneros Estrada, 2016; OMS, 2006; Jaramillo & Restrepo, 2024).

Diversos estudios han demostrado el éxito de los sistemas microalgales para absorber contaminantes de aguas residuales, aunque la mayoría de las investigaciones se han realizado a escala de laboratorio con condiciones controladas (Yong et al., 2021). Las investigaciones futuras deben centrarse en optimizar las condiciones operativas, considerando los escenarios reales fluctuantes de la gran escala o industriales para garantizar la viabilidad técnica y económica del sistema. En cuanto al tren de tratamiento conceptual, el diseño se inspira en los casos de estudio incluidos en la presente investigación, así como en los esquemas proporcionados por INCOVER y SaltGae, que muestran interacciones reales entre tratamiento del agua y la valorización de la biomasa microalgal (Veliz Lorenzo et al., 2009; Project INCOVER, 2025; SaltGae, s.f.).

Si bien, estos casos de estudio tienen finalidades diferentes a la investigación desarrollada en este trabajo, son ejemplos a tomar en cuenta como un margen de referencia, el sistema propuesto está conformado por múltiples etapas como el pretratamiento, tratamiento primario, posteriormente se integra el cultivo de microalgas, el reactor fototrófico es el núcleo del tratamiento biológico, posteriormente la biomasa es cosechada y el agua es desinfectada con el fin de producir un efluente apto para irrigar los campos agrícolas, este sistema se alinea a la evidencia mostrada por (Amaro et al., 2023), así como sus respectivas contribuciones a los esquemas de economía circular.

Pretratamiento: Esta etapa debe incluir rejillas y desarenador para proteger el mezclado de los reactores fototróficos, además respetar la hidráulica. En caso de que la turbidez generada por los sólidos suspendidos totales (SST) pueda comprometer la penetración de luz que requieren las microalgas, es necesario retirar una parte de los sólidos sedimentables, sin embargo (Amaro et al., 2023), menciona que las microalgas requieren de una fracción disuelta para alimentarse, por tanto, para mejorar la condiciones del cultivo microalgal es necesario implementar una sedimentación primaria, esta etapa se considera opcional a excepción de que las condiciones así lo requieran.

Tratamiento secundario: Esta etapa debe incluir reactores fototróficos mediante estanques de alta tasa (HRAP/raceways) o lagunas modificadas de poca profundidad, las cuales operan un consorcio microalga-bacteria, los policultivos propuestos se discuten a continuación, este sistema pretende que la fotosíntesis aporte O₂, favorezca las oxidaciones, eleve la alcalinidad y las precipitaciones, lo cual reduce la demanda energética frente a aireación mecánica, además cuando sea viable, se puede inyectar el CO₂ para potenciar la productividad, considerando las limitaciones de transferencia entre el gas-líquido (Amaro et al., 2023; Franco Acosta, 2008).

Cosecha de biomasa: Esta etapa es posterior al reactor fototrófico, la biomasa debe ser cosechada mediante floculación, decantación y/o flotación por aire disuelto (DAF), además la investigación contempla la necesidad de contar con sistemas de respaldo para separar la biomasa.

Desinfección final: El sistema finaliza con estanques de maduración y/o UV, de forma que se verifique analíticamente el cumplimiento sanitario de agua para riego, aplicando las medidas correspondientes de manejo del agua como lo enfatizan los autores (Cisneros Estrada, 2016; OMS, 2006; Jaramillo & Restrepo, 2024), de forma que el agua cumpla con los criterios establecidos por la normatividad mexicana y la OMS, sobre los cultivos de consumo humano, principalmente los criterios bacteriológicos, en especial ≤ 1 huevos de helminto y $\leq 1,000$ coliformes fecales/100 ml.

Elección de especies microalgales: Dentro de los criterios de selección, para un sistema de tratamiento cuya finalidad es operar el sistema con policultivos, ya sean microalgas solas o consorcio con bacterias, se maximiza la absorción de nutrientes, la producción de biomasa, además de que frente a variaciones ambientales poseen resiliencia operativa, además según las investigaciones de los autores (Mandal et al., 2018; Ray et al., 2022; Singh y Singh, 2022; Stockenreiter y Litchman, 2019; Tran et al., 2020; Vargas-Estrada et al., 2021; Cembella, 2003; Gonçalves et al., 2017; Subashchandrabose et al., 2011; José et al., 2022), el punto de partida para la selección de especies parte de probar cepas nativas, ya que estas se encuentran adaptadas al agua local, con base a esto se puede decidir si se requiere un consorcio microalga-bacteria, otros factor importante a considerar es la composición del afluente, ya que su composición puede ser convencional, con alta carga de antibióticos, patógenos, etc., además de otros factores como la luz, temperatura y pH, finalmente otro factor importante es la competencia por nutrientes y posibles aleloquímicos, estos criterios nos

darán un margen de referencia para elegir las cepas a emplear, el sistema también depende de cual es la meta de remoción o/y de valorización.

Como evidencia la revisión bibliográfica, la *Chlorella spp.* (*vulgaris*, *sorokiniana*), es una de las especies más comunes y utilizadas en el tratamiento convencional, de residuos animales e industrial, debido a su alto aprovechamiento de N y P, también se ha probado que se incrementa la eficiencia en consorcios, además de la reducir costos energéticos, como lo que la *Chlorella vulgaris* se probó con *Bacillus (subtilis, licheniformis)*, dicho consorcio se destinó a la acuicultura, otro caso es el de AlgalTextile (AT), donde la *Chlorella sorokiniana* fue inmovilizada en dentro de un fotobiorreactor horizontal abierto con potencial de producir biofertilizantes, biocombustibles, además debido a su relevancia nutricional, el perfil de aminoácidos, vitaminas y lípidos, lo cual respalda su uso como insumo agropecuario. Por lo que, conforme a los autores (Andrade et al., 2009; Amaro et al., 2023; Geng et al., 2022; Gouveia et al., 2008; Becker, 2007; Brennan & Owende, 2010), justifican y priorizan el uso de la especie *Chlorella* como punto central del sistema propuesto, debido a su robustez fisiológica y versatilidad de aprovechamiento.

Otra especie que figura junto con la *Chlorella*, entre las más utilizadas para el tratamiento de aguas residuales es la *Scenedesmus spp.* (*S. obliquus*, *S. acutus*) debido a su eficiencia en la asimilación de nutrientes, su capacidad para producir biomasa a escala, el desempeño para tratar efluentes, en especial para estanques de alta tasa/lagunas modificadas, además del valor nutricional que sustenta su selección como coprotagonista del consorcio, la literatura reporta aplicaciones reales en el proceso de la industria pesquera para producir biomasa de la especie *Scenedesmus sp.*, debido a su contenido proteico y patrón lipídico con la finalidad de usarlo para alimento humano y monogástricos (SCP), aunque existen algunas notas sobre su digestibilidad según los siguientes autores (Andrade et al., 2009; Becker, 1994; González, Aguado & Álvarez, 1996).

Debido al enfoque de aprovechamiento agropecuario, especies como *Spirulina* o *Arthrospira spp.*, se recomiendan ampliamente como componente nutricional, posee alto contenido proteico, vitaminas del grupo B y ácidos grasos relevantes, cuando las condiciones de la calidad del agua lo permitan, de esta forma se maximiza el valor del subproducto, la investigación reporta su uso histórico como complemento alimenticio, además de su capacidad para aportar compuestos funcionales (Cordis, 2019; Richmond, 1986, 1990; Brennan & Owende, 2010).

La evidencia muestra que los policultivos y los consorcios microalga-bacteria son una excelente opción para escalamiento, debido a los beneficios de eficiencia, robustez y autosuficiencia del proceso, diversos autores (Mandal et al., 2018; Ray et al., 2022; Singh y Singh, 2022; Stockenreiter y Litchman, 2019; Tran et al., 2020; Vargas-Estrada et al., 2021; Amaro et al., 2023), proponen como base en líneas municipales a especies como *Chlorella* y *Scenedesmus*, también especies como *Dunaliella* y *Tetraselmis* para aguas con un alto grado de salinidad, además cuando la biomasa se destina al sector pecuario, la especie *Spirulina* se recomienda debido a su alto valor proteico, el

consorcio entre *Chlorella* y *Bacillus* ilustran una sinergia metabólica para remover contaminantes convencionales y obtener biomasa apta para pienso animal.

La selección final puede apoyarse de diversas tablas incluidas en la presente investigación, así como de las secciones tituladas "Microalgas de interés económico", "Biocompuestos y subproductos de las microalgas: aplicaciones industriales futuras", entre otras, de la selección de especies depende el éxito de la implementación que integre tanto las capacidades de tratamiento de aguas residuales como el potencial de comercialización de productos derivados. Además, considerando que el mercado global de biomasa de microalgas alcanza aproximadamente 5,000 toneladas/año de materia seca con un volumen de ventas de 1.25×10^9 dólares/año según datos de los autores (Pulz y Gross, 2004; Andrade et al., 2009).

La biomasa debe cumplir con un criterio sanitario para uso agropecuario, la presente investigación muestra que la biomasa destinada a suplementos ganaderos, así como a insumos agrícolas, es imprescindible evaluar la inocuidad de la biomasa de compuestos como pesticidas, toxinas, metales pesados antes de su empleo en el campo agrícola, en caso de exceder los límites legales de la NOM-052-SEMARNAT-2019 se debe considerar como un residuo peligroso, la cual se debe manejar y disponer finalmente de forma adecuada, este criterio sanitario no solo protege los suelos y a los animales, sino que también prevé y prioriza la cadena de valor propuesta (Yong et al., 2021; NOM-052-SEMARNAT-2019; José C., 2023).

Configuración a gran escala: Debido a que los caudales urbanos poseen volúmenes y concentraciones elevadas, se recomienda emplear en el tratamiento secundario, estanques de alta tasa con mezclado continuo, así como con alimentación controlada de CO₂, como pueden ser los HRAP o raceways, este sistema se ha evaluado a escala, como el caso de estudio INCOVER y SaltGae, donde la integración de procesos permite reducir insumos energéticos y obtener bioproductos, apoyando a la economía circular hidráulica, la literatura compilada por (Project INCOVER, 2025; SaltGae, s.f.; Yang et al., 2024), sugiere implementar a dichos sistemas tecnologías para captar biogás, seguidos de la separación de biomasa, así como la flotación por aire disuelto o cosecha por membranas, la cual puede desaguar mecánicamente y secarse con apoyo térmico solar con fines de reducir costos energéticos, así como preservar calidad, por último la etapa de desinfección final se debe cumplir los límites máximos permisibles antes de ser empleada (Pastor et al., 2023). Con este fin, un punto vital del sistema es integrar un laboratorio que monitorea de forma continua la calidad del agua, así como realizar análisis a la biomasa para asegurar su inocuidad.

Diagrama de flujo a gran escala: Pretratamiento (Rejillas + desarenador) → Tratamiento primario (sedimentador primario*opcional*) → Tratamiento secundario (HRAP/raceways) consorcio de *Chlorella*/*Scenedesmus* + *Bacillus* → Cosecha de biomasa (DAF/filtración, decantación, secado

solar) → Desinfección final (radiación ultravioleta) (Acien et al., 2017; OMS, 2006; INCOVER; SaltGae), el tren de tratamiento se muestra en la figura 32.

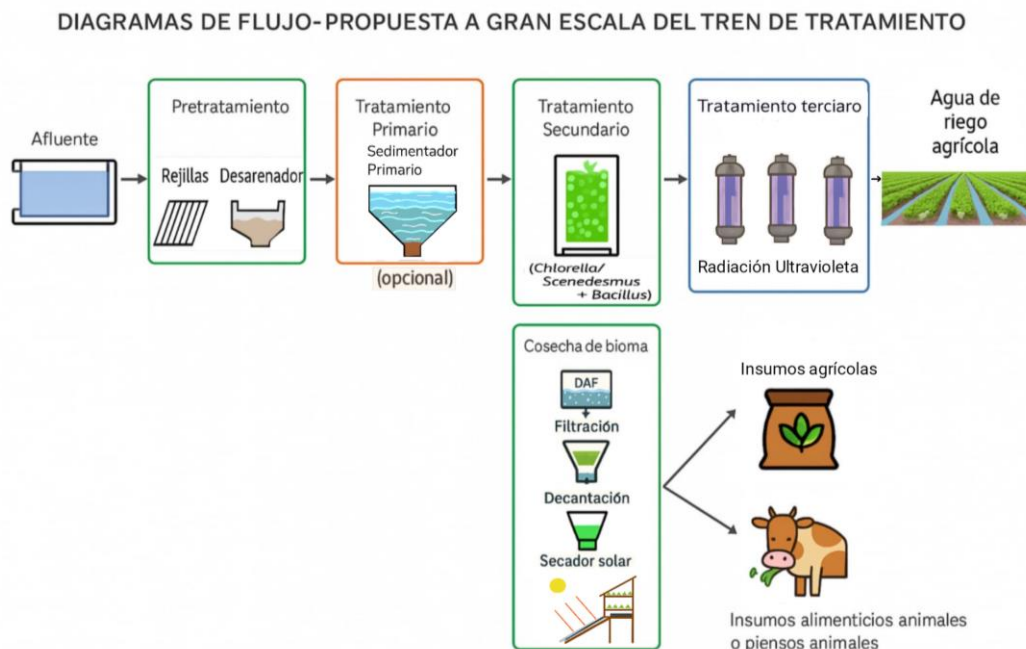


Figura 32. Diagrama de flujo del tren de tratamiento propuesto a gran escala, autoría propia

Configuración a pequeña escala: Para poblaciones cercanas a los 100–5,000 habitantes, se proponen configuraciones de tratamiento descentralizado, para adaptar el tren de tratamiento se propone establecer en el tratamiento secundario, lagunas de estabilización modificadas para potenciar el cultivo microalgal, además, para la etapa de cosecha de la biomasa, se recomienda separar la biomasa de forma gravitacional, realizar una filtración sencilla, se decanta y se realiza un secado natural de la biomasa en un deshidratador solar adaptado, esta opción es robusta, compatible con contextos de baja capacidad operativa. Sin embargo, se disminuyen los costos, un punto a tener en cuenta es que siempre que se acompañe de vigilancia sanitaria para alcanzar los límites bacteriológicos del riego agrícola (Cisneros Estrada, 2016). Esta ruta es consistente con la purificación del agua, además genera cultivo y fabrica biomateriales, el sistema requiere operarse de forma mayormente manual, para asegurar la inocuidad de la biomasa antes de emplearse en el sector agropecuario.

Pequeña escala: Pretratamiento (rejillas + desarenador) → Tratamiento primario (sedimentador primario*opcional*) → Tratamiento secundario (lagunas modificadas con consorcios nativos) → Cosecha de biomasa (filtración, decantación y secado) → Desinfección final (cloración + estanques de cloración).

Es la vía más robusta y de bajo costo, sin embargo, cumple con las recomendaciones mencionadas por (Cisneros Estrada, 2016; OMS, 2006; Amaro et al., 2023), así como cumplir con los límites máximos permisibles de calidad bacteriológica, tanto el agua de riego como la biomasa antes de ser implementadas en el sector agropecuario. El esquema del tren de tratamiento se presenta en la figura 33.



Figura 33. Diagrama de flujo del tren de tratamiento propuesto a escala pequeña, autoría propia

Supuestos: debido a que esta investigación no se enfoca específicamente a un caso de estudio, existen varias situaciones que se deben asumir en el tren de tratamiento a gran y pequeña escala, como considerar un afluente típico, con una carga contaminante convencional, que sea compatible con los sistemas biológicos, acorde al diseño de HRAP/lagunas se requiere de contar con una amplia disponibilidad de área, condiciones climáticas favorables para instalar captar la energía solar y posibilidad de inversión tecnológica para integrar CO₂ de fuentes locales cuando convenga, el sistema debe operar con personal capacitado, conforme a un plan de bioseguridad, monitoreando la calidad del agua, en especial parámetros como CF y HH para decidir si es necesario implementar etapas de tratamiento adicionales, así como para monitorear la calidad de la biomasa destinada a alimentación animal, finalmente autores como (Cisneros Estrada, 2016; OMS, 2006; Project INCOVER, 2025), proponen que antes de irrigar los campos agrícolas, primero se deben seleccionar los cultivos agrícolas conforme a las directrices de calidad del agua.

Viabilidad técnica y eficiencias esperadas: La evidencia sintetizada reporta que los consorcios microalga-bacteria, teniendo altas eficiencias de remoción, junto con la capacidad de cumplir directrices de riego tras una etapa de desinfección final, según los autores (Amaro et al., 2023; OMS, 2006), los HRAP, así como las lagunas con microalgas han mostrado remociones elevadas de nutrientes y mejora del carbono orgánico, en donde a gran escala, la combinación HRAP + DAF/membranas y la desinfección UV permite alcanzar los límites bacteriológicos para riego de alimentos, mientras que a en pequeña escala, las lagunas adaptadas en serie con estanques de maduración, una desinfección simple logran los mismos objetivos sanitarios, respetando los tiempos de retención, así como el diseño hidráulico (OMS, 2006; Cisneros Estrada, 2016).

Existen parámetros que se deben considerar para el diseño, sin importar la escala existe una afectación en el crecimiento de las microalgas, que depende del tipo del reactor, si es cerrado o abierto, así como de la distribución e intensidad de la luz dentro del reactor, la temperatura, el tiempo de retención, la agitación o mezcla de los medios de cultivo, el intercambio gaseoso, el control del pH, entre otros, como menciona el autor (Johanna et al., 2015), la configuración del reactor puede favorecer la absorción de la luz, si este es de poca profundidad y se adapta para este fin, recordemos que la fotosíntesis es un proceso vital, así como para el crecimiento, además de la reproducción de las microalgas.

Además, la implementación exitosa de esta propuesta integral en el sector agropecuario, debe considerar la percepción de los agricultores respecto al uso de aguas residuales tratadas, aunque la mayoría de los productores reconocen que el agua es de baja calidad, argumentan bajos riesgos para generaciones presentes y futuras, además de una actitud positiva (Pérez et al., 2023), por lo que se propone propiciar herramientas de concientización, ya que cambiar la forma de pensar y actuar de los productores, además de quienes manejan el recurso hídrico es esencial, aprovechando que existe reconocimiento del problema de contaminación, el programa debe establecer medidas diferenciadas para agricultores, las comunidades e instituciones.

Por tanto, el sistema de tratamiento de aguas residuales con microalgas propone una alternativa viable que integra principios de economía circular, lo cual ofrece beneficios ambientales, económicos y sociales significativos, por tanto la implementación exitosa del sistema requiere un enfoque integral que considere factores socioeconómicos, culturales y ambientales del contexto específico de la zona de aplicación, además, la viabilidad técnica del sistema depende críticamente de las condiciones locales, de la disponibilidad de mercados para los subproductos, además de cumplir con el marco regulatorio, implementar gradualmente esta propuesta permite validar, además de optimizar sistemas antes de su escalamiento comercial, minimizar riesgos y maximizar las probabilidades de éxito a largo plazo.

CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación, confirma que las microalgas representan una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales, además de la obtención de la biomasa, esta tiene aplicaciones biotecnológicas en el sector agropecuario, el cual integra principios de la economía circular permitiendo simultáneamente la captura de contaminantes, la depuración del recurso hídrico, además de la generación de insumos con valor agregado, como se observó a lo largo del análisis, este enfoque conlleva beneficios ambientales, económicos y sociales, pero también implica retos técnicos de gestión que requieren atención desde un enfoque integral.

En primer lugar, se reafirma que la gestión eficiente del agua constituye un prerrequisito para el desarrollo sostenible, la UNESCO enfatiza que la mejora de los servicios de agua, saneamiento e higiene constituyen a una condición indispensable para garantizar oportunidades de empleo y beneficios socioeconómicos (Unesco Physical Document, n.d.), Por tanto, la integración de microalgas en el procesos de saneamiento están relacionados a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como lo son el sexto objetivo que corresponde al de agua limpia y saneamiento, además del segundo objetivo, el cual corresponde al de hambre cero, los cuales se encuentran interconectados y relacionados a la producción agrícola, este sector es el responsable de producir comida en todo el planeta, apoyando el desarrollo, el cual está centrado en los agricultores, además de proteger el ambiente (Naciones Unidas, ODS).

La escasez de agua se ha consolidado como uno de los problemas más graves a nivel mundial, con repercusiones directas en la producción agrícola y ganadera (Kesari et al., 2021), en este contexto, emplear un consorcio de microalgas en un sistema de tratamiento de aguas residuales permiten minimizar el estrés hídrico, así como reducir la presión sobre los acuíferos, sin embargo, el diagnóstico teórico confirma que las actividades industriales, mineras y agrícolas representan las principales fuentes de contaminación hídrica, especialmente debido a la descarga de metales pesados como mercurio, cromo y otros contaminantes (Insuasty Manrique, MJ, 2017), la biomasa microalgal tiene la capacidad de adsorber y biotransformar diversos contaminantes, debido a que sus capacidades son superiores a otros organismos, esta característica les permite resistir altas concentraciones a los compuestos tóxicos, siendo ideales para estos sistemas.

Por otro lado, el aprovechamiento de la biomasa representa un pilar fundamental en la propuesta de economía circular, debido a sus diversas y versátiles aplicaciones como biocompuestos, subproductos e insumos, como es el caso de la industria farmacéutica, cosmética y alimentaria, como señalan Johanna et al. (2015) además de constituir una opción viable para generar materias primas estratégicas que fortalecen la competitividad agropecuaria y agroindustrial en el mercado, en el ámbito agrícola, la incorporación de biomasa microalgal como biofertilizante, fungicida natural y mejorador de suelos incrementa la productividad, así como la resiliencia de los cultivos, de esta forma se disminuye la dependencia de agroquímicos convencionales con efectos adversos para la salud, así como para los ecosistemas (Renuka et al., 2018).

En el sector ganadero, la biomasa microalgal se proyecta como suplemento alimenticio viable para el mejorar la calidad nutricional del ganado, además para diversificar las fuentes proteicas en la acuicultura (Abalde et al., 1995), en cuanto a la valorización de la biomasa generada, se comprueba que las microalgas constituyen biocompuestos de interés industrial, alimenticio, fármacos, cosméticos y aditivos, así como proteínas unicelulares que no solo ayudan a disminuir el déficit global de nutrientes, la proteína de microalgas es comparable, además de competente con otras proteínas vegetales convencionales, la propuesta abre la posibilidad de reducir los gastos para los productores generados debido a la alimentación animal, además de establecer cadenas productivas basadas en insumos locales que fortalecen la soberanía economía rural y alimentaria, además de otros beneficios nutricionales que ofrecen las microalgas a los animales.

Además de los factores técnicos y de investigación, para implementar de forma exitosa estos sistemas requieren atender factores sociales, culturales, así como ambientales, ello implica que la aceptación social por parte de los productores, los cuales primero que nada deben de tener un entendimiento completo e integral de los cambios a implementar, así como sus respectivas implementaciones, además de las motivaciones de fondo, esto se puede fortalecer mediante programas de concientización, acompañados de marcos regulatorios concisos que preserve la salud de los agricultores así como de sus familias que son grupos vulnerables (Pérez et al., 2023), esto se puede fortalecer mediante apoyos institucionales que garanticen una actitud positiva hacia su uso.

En síntesis, las microalgas se consolidan como un agente estratégico en la transición hacia modelos de bioeconomía circular, ya que transforman los residuos en recursos, reducen la huella ambiental de la producción agropecuaria y generar bioproductos de valor añadido, sin embargo, su adopción a gran escala depende en parte del compromiso político, de la planeación comunitaria, así como de inversión en infraestructura, investigación, además de una regulación efectiva, de esta forma gradualmente tanto los sistemas comerciales, como los rurales se implementaran en el sector agropecuario de forma correcta, efectiva y eficiente.

Finalmente, este trabajo reafirma que la biomasa microalgal cultivada en aguas residuales no solo contribuye a la depuración del agua, mejora de la calidad del suelo agrícola, sino que también proporciona un portafolio de insumos agropecuarios y agroindustriales, que pueden posicionar a México y otros países en desarrollo un esquema de bioeconomía circular. En conclusión, las microalgas se consolidan como una biotecnología clave para enfrentar los retos globales del agua, la energía, además de alimentos, su implementación es una estrategia que se sustenta en la sostenibilidad, sin embargo, esta alternativa depende no solo de que el sistema sea técnicamente viable, sino también de su capacidad para articular ciencia, tecnología, políticas públicas y aceptación social, asegurando que es socialmente justa, así como económicamente rentable.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abalde, J., Cid, A., Fidalgo Paredes, P., Torres, E., Herrero, C. (1995). *Microalgas: cultivo y aplicaciones*. A Coruña: Universidade, Servizo de de Publicaciones.
2. Ación Fernández, FG, Fernández Sevilla, JM, Molina Grima, E., & Gómez Serrano, C. (2017). Sistema de eliminación de metales pesados en aguas mediante microalgas, Universidad De Almería. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/5461>
3. Agricultura, Cría y Explotación de Animales, Aprovechamiento Forestal, Pesca y Caza: Salarios, producción, inversión, oportunidades y complejidad | Data México. (n.d.). Data México. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/industry/agriculture-animal-production-forestry-fishing-and-hunting>
4. Aguas residuales y contaminación en México – Agua.org.mx. (2018, February 19). Agua.org.mx. <https://agua.org.mx/actualidad/aguas-residuales-contaminacion-en-mexico/>
5. Amaro, H. M., Salgado, E. M., Nunes, O. C., Pires, J. C., & Esteves, A. F. (2023). Microalgae systems - environmental agents for wastewater treatment and further potential biomass valorisation. *Journal of Environmental Management*, 337, 117678. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117678>
6. Andrade R, Charity E, Vera B, Alexandra L, Cárdenas L, Carmen H, & Morales A, Ever D. (2009). Producción de biomasa de la microalga *Scenedesmus* sp. utilizando aguas residuales de pescadería. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 32(2), 126-134. Recuperado en 06 de mayo de 2024, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702009000200005&lng=es&tlng=es.
7. Beltrán-Pineda, ME y Gómez-Rodríguez, AM (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12 (2), 172-197.
8. *Brazilian Journal of Food Technology*, 22, e2019043. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.04319>
9. C, D. G. H. (n.d.). La evolución de la producción agropecuaria en el campo mexicano: concentración productiva, pobreza y pluriactividad. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-00632010000200005
10. Campos, M. A. R. (2018). El uso de pesticidas en la agricultura y su desorden ambiental. *Revista Enfermería la Vanguardia*, 6(2), 40-47.
11. Cañizares-Villanueva, R. O. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de microbiología-México*-, 42(3), 131-143.
12. Carranza-Patiño, M., Aragundi-Sabando, L., Macias-Barrera, K., Paredes-Sarabia, E., & Villegas-Ramírez, A. (2024). Conservación y Manejo Sostenible del Suelo en la Agricultura: Una Revisión Sistemática de Prácticas Tradicionales y Modernas. *Código Científico Revista De Investigación*, 5(E3), 1–28. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/nE3/303>
13. CENSO 2022 agropecuario- resultados definitivos. (2023, 21 noviembre). INEGI. Recuperado 28 de marzo de 2025, de https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ca/2022/doc/ca2022_rdnal.pdf
14. Cisneros Estrada, O. X. (2016, diciembre). Reúso de aguas residuales en la agricultura. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado 29 de marzo de 2025, de https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/riego-drenaje/reuso-aguas-residuales.pdf
15. Clasificación de fungicidas y bactericidas según el modo de acción. (2019). FRAC España. Recuperado 25 de julio de 2024, de https://fmcagro.es/img/folleto_Clasificaci%C3%B3n%20de%20fungicidas%20y%20bactericidas%20seg%C3%BAn%20el%20modo%20de%20acci%C3%B3n.pdf
16. Codina, MF, García, CB, Barón, JH, Da Silva, SM y Bosch, JP (2014). Planta piloto de microalgas para mejoramiento del tratamiento efluentes urbanos en Catamarca, Argentina. Obtenido de <https://www.researchgate.net/profile/Stela->

[Silva/publication/266485563_Planta_piloto_de_microalgas_para_mejoramiento_del_tratamiento_efluentes_urbanos_en_Catamarca_Argentina/links/5735d76708ae9ace840ae158/Planta-piloto-de-microalgas-para-mejoramiento-del-tratamiento-efluentes-urbanos-en-Catamarca-Argentina.pdf](https://doi.org/10.1016/j.scitech.2020.100115)

17. Cognita. (n.d.). Mecanismos de Remediación Ambiental con Microalgas. Cognita Conecta. <https://cognitaconecta.com/mecanismos-de-remediacion-ambiental-con-microalgas/>

18. Costa, JAV, Freitas, BCB, Cruz, CG, Silveira, J., & Morais, MG (2019). Potencial de las microalgas como biopesticidas para contribuir a la agricultura sostenible y al desarrollo ambiental. *Journal of Environmental Science and Health, Parte B*, 54 (5), 366–375. <https://doi.org/10.1080/03601234.2019.1571366>

19. Cotler, Helena, Corona, José Alfonso, & Galeana-Pizaña, J. Mauricio. (2020). Erosión de suelos y carencia alimentaria en México: una primera aproximación. *Investigaciones geográficas*, (101), e 59976. Epub 02 de octubre de 2020. <https://doi.org/10.14350/riig.59976>

20. Dacal, A. C. A. (s. f.). La huella del abuso de los plaguicidas permanece en el suelo durante décadas. *The Conversation*. <https://theconversation.com/la-huella-del-abuso-de-los-plaguicidas-permanece-en-el-suelo-durante-decadas-175855>

21. Dewi, I., Falaise, C., Hellio, C., Bourgougnon, N., & Mouget, J. (2018). Anticancer, antiviral, antibacterial, and antifungal properties in microalgae. In Elsevier eBooks (pp. 235–261). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811405-6.00012-8>

22. Diversidad de hongos fitopatógenos del suelo de México. (s. f.). Instituto de Fitosanidad. Edo de México. Recuperado 20 de agosto de 2024, de <https://azm.ojs.inecol.mx/index.php/azm/article/download/1846/1960/4565>

23. Documentación de un sistema para el manejo y conservación de cepas de referencia utilizadas en el laboratorio de microbiología de una empresa avícola en SANTANDER. (2020). Universidad de Pamplona facultad de ciencias básicas departamento de microbiología. Recuperado 10 de septiembre de 2024, de http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/3274/1/Vega_2020_TG.pdf

24. Durán, G. V., Medina, A. B., & Prado, L. O. (2001). *La ganadería en México*. (1.a ed.). (2001). [Libro electrónico] <https://librosoa.unam.mx/handle/123456789/1397>

25. Efecto de la salinidad y pH en la composición bioquímica de la microalga *Scenedesmus* sp. en cultivos discontinuos. (2019, junio). *Rev. Cient. Cien. Nat. Ambien*. Recuperado 2 de enero de 2025, de https://www.researchgate.net/publication/353787351_Efecto_de_la_salinidad_y_pH_en_la_composicion_bioquimica_de_la_microalga_Scenedesmus_sp_en_cultivos_discontinuos

26. Escalante, J. P. A. (2024). Aplicación y evaluación de métodos de conservación a corto y mediano plazo para hongos filamentosos y levaduras de interés industrial, agroindustrial y biotecnológico. *Cuaderno Activa*, 15(1). <https://doi.org/10.53995/20278101.1064>

27. FAO. Código Internacional de conducta para la distribución y utilización de plaguicidas. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (Internet) Roma; 2006. 40 P. (Citado el 6 de Diciembre 2017) Disponible en: www.fao.org/docrep/006/Y4544S/Y4544S00.htm

28. Fernández, F. G. A., Sevilla, J. M. F., & Grima, E. M. (2018). Contribución de las microalgas al desarrollo de la bioeconomía. *Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6648783>

29. Ferrer Polo, J.; Seco Torrecillas, A.; Robles Martínez, Á.; Asensi Dasí, EJ.; Serralta Sevilla, J. (2022). *Tratamientos biológicos de aguas residuales*. Editorial Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/181422>

30. Galindo, L. A. G., Rivas, A. C., Melendez, J. P., & Mayorquín, N. (2020). Alternativas microbiológicas para la remediación de suelos y aguas contaminados con fertilizantes nitrogenados. *Scientia et Technica*, 25(1), 172-183.

31. García, A., Laurín, M., Llosá, M. J., González, V., Sanz, M. J., & Porcuna, J. L. (2008). Contribución de la agricultura ecológica a la mitigación del cambio climático en comparación con la agricultura convencional. *Agroecología*, 1, 75–88. Recuperado a partir de <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/169>

32. García, C. (2013). Producción de microalgas con aplicaciones nutricionales para humanos y animales. *Cuadernos de estudios agroalimentarios*, 1 (5), 83-101.

33. Garrido T, Costa C, Fraile J, Orejudo E, Niñerota J, Ginebreda A, et al. Análisis de la presencia de plaguicidas en diversos acuíferos de Cataluña. Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente (Internet). Valencia, España; 1998. 7 p. (Citado el 10 de Diciembre 2017) Disponible en: www.researchgate.net/publication/267827760_análisis_de_la_presencia_de_plaguicidas_en_diversos_acuíferos_de_cataluña.
34. Guerra, R. E. S., & Torres, M. a. L. (2025, March 27). Biorremediación. . . ¿con microalgas? <https://leka.uaslp.mx/index.php/universitarios-potosinos/article/view/771>
35. Hacia una ganadería sostenible en México – Consejo Mexicano de la Carne. (n.d.). Consejo Mexicano De La Carne. <https://comecarne.org/hacia-una-ganaderia-sostenible-en-mexico/>
36. Inneara. (2024, 19 enero). Estrategias de economía circular en el sector agrario. Consultoría de innovación estratégica agroalimentaria. <https://www.inneara.com/economia-circular-en-el-sector-agrario/#:~:text=Mejorar%20la%20eficiencia%20de%20los,procesos%20de%20producci%C3%B3n%20de%20alimentos>.
37. Instituto Federal para la Evaluación de Riesgos (BfR). Aufbereitete Abwässer: Bakterielle Krankheitserreger auf frischem Obst und Gemüse vermeiden. (2022). Recuperado de: <https://www.bfr.bund.de/cm/343/aufbereitete-abwaesser-bakterielle-krankheitserreger-auf-frischem-obst-und-gemuese-vermeiden.pdf>
38. Instructivo para producción de biomasa microalgal de cepas nativas del género *Desmodesmus* colectadas en zonas altoandinas del Perú. (2018, septiembre). Instituto del Mar del Perú. Recuperado 2 de enero de 2025, de <https://hdl.handle.net/20.500.12958/3442>
39. Insuasty Manrique, MJ (2017). Estudio sobre captura eficiente de metales pesados empleados en procesos de biorremediación <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/13548>
40. Ismael Corona, R. (2016). El desarrollo de la agricultura y el impacto que tendría en las finanzas públicas de México. Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. Recuperado 22 de marzo de 2025, de https://cefp.gob.mx/formulario/Trabajo_12a.pdf
41. Jaramillo 35, M. F., & Restrepo 36, I. (2024). Reúso de las aguas residuales en la agricultura: beneficios y riesgos. Desafíos en la gestión integral del agua: Ahorro, uso eficiente y microcontaminantes, 149.
42. Jhadyn, P. T. K. (2019, December 2). Aplicación de la microalga *Chlorella Vulgaris* como alternativa para la bioadsorción de metales pesados Pb, Hg, Cd en aguas. <https://repositorio.upeu.edu.pe/items/176f9f0a-c2b6-4e2e-861e-dbd73377954f>
43. Johanna, R. C. L., Enid, R. C. M., & Yesid, V. S. (2015, April 17). Microalgas para la industria alimenticia. <http://hdl.handle.net/20.500.11912/2306>.
44. Las microalgas: la esperanza para la producción de combustibles verdes | Academia de Ciencias de Morelos, A.C. (n.d.). <https://acmor.org/publicaciones/las-microalgas-la-esperanza-para-la-produccion-de-combustibles-verdes>
45. Lilian, A. M. M. (2013, October 7). Evaluación de parámetros fisicoquímicos en cultivos de microalgas para estimular la producción de lípidos. UAM. <https://bindani.izt.uam.mx/concern/tesiuams/7w62f873b>
46. López J. A, Martínez C, Moreno L, Navarrete P. Las aguas subterráneas y los plaguicidas. Instituto Geológico y Minero de España; 1992. 149 p. (Citado el 18 de Noviembre 2017) Disponible en: aguas.igme.es/igme/publica/libro28/lib28.htm
47. Lopez Lopez, F. A. Biolixiviación de un concentrado de MoS₂ con bacterias termófilas extremas en nuevos reactores biológicos (2012). [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. eTESIUNAM Recuperado 4 de mayo de 2025, de <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000707998/3/0707998.pdf>
48. Manuel Cristóbal, D. R. (2016). Biolixiviación de cobre por bacterias ferroxidantes a partir de calcopirita en un sistema de columnas de lixiviación por gravedad.

49. Mapa Digital de México en línea. (n.d.). <https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjZLjMyMDA4LGxvbjotMTAxLjUwMDAwLHo6MSxsOmNhMjAyMg==&layers=ca2022>
50. Martínez-Rodríguez, B. V. M. R., & Viguera, M. R. (2017). Impactos del cambio climático en la agricultura de Centroamérica, estrategias de mitigación y adaptación. Turrialba, Costa Rica.
51. Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal. (2007). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. Recuperado 4 de octubre de 2024, de https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1001/539/1/arredondo_b.pdf
52. 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. (2022). https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0
53. NORMA Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos (n.d.). <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/1055/SEMARNA/SEMARNA.htm>
54. Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997, (2011) https://diariooficial.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5202413&fecha=27/07/2011#gsc.tab=0
55. Olmedo Galarza, V. (2019). Carbohydrates and proteins in microalgae: potential functional foods.
56. OXIDINE water technology. (2024, March 5). Riesgos asociados al riego de frutas y verduras con aguas residuales. Oxidine Water Technology. <https://oxidine.net/riesgo-sanitario-regar-frutas-verduras-con-aguas-residuales/>
57. Pastor, R. L., Pinna-Hernández, M., & Fernández, F. A. (2023). Technical and economic viability of using solar thermal energy for microalgae drying. *Energy Reports*, 10, 989–1003. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.07.040>
58. Pérez Espejo, Rosario. (2008). El lado oscuro de la ganadería. *Problemas del desarrollo*, 39(154), 217-227. Recuperado en 14 de marzo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0301-70362008000300011&lng=es&tlng=es.
59. Posada C, G. C., Quintero, J. A., Palacios-Arrieta, D., & Páez-Ciro, J. M. (2023). Análisis Bibliométrico Acerca de la Contaminación por Órgano-Fosforados en Cuerpos de Agua en Colombia, sus Implicaciones, Afectaciones Especialmente de Origen de Fertilizantes en Suelos Agrícolas. *Revista de Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(5), 7784-7796. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i5.8362
60. Programa Institucional 2013-2018 de la Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero. (2018). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado 14 de marzo de 2025, de https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5343084#:~:text=La%20agricultura%20representa%20el%2056.8,relacionados%20con%20la%20producci%C3%B3n%20primaria.
61. Project - Saltgae solution algae to treat saline wastewater. (n.d.). SaltGae.eu. <https://saltgae.eu/project/>
62. Project- INCOVER. (2025). <https://incover-project.eu/es/titulo>
63. Rincón, M. N. C. (2014). Estudio de la biosorción de metales pesados en microalgas (doctoral dissertation, universidad del zulia).
64. Rivas-Valencia, P., Rosales-Rivas, L., Ávila-Quezada, G., & Martínez-Martínez, T. (2021). Economía del sector agrícola mexicano en tiempos de COVID-19. *Revista Mexicana De Fitopatología*, 39 (4). doi: <http://dx.doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2021-21>
65. Rodríguez, M. G., González, L. C., Fernández, M. R., Pérez, G., Carretera, E. D. C. L. C., & de Cumanayagua, C. (2008). Evaluación de cepas de *Trichoderma* spp. contra patógenos en semillas de frijol, lechuga, girasol y arroz. *Centro Agrícola*, 35, 11-15.
66. Romero Sánchez, J. A. (s.f.). Evolución del sector agropecuario en la etapa de la sustitución de importaciones 1960-1982. Facultad de economía, UNAM. Recuperado 22 de abril de 2025, de <http://herzog.economia.unam.mx/lecturas/inac2/u114.pdf>

67. Romero, D. C. V., Cardozo, A. P., & Montes, V. D. (2022). Utilización de microalgas como alternativa para la remoción de metales pesados. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8202375>
68. Salas Barboza, A. G. J., Gatto D'Andrea, M. L., Garcés, V., Rodríguez Álvarez, S., Liberal, V. I., Paoli, H., & Seghezzo, L. (2021). Uso actual y potencial de aguas residuales domésticas (ARD) para irrigación en la provincia de Salta, Argentina. *Avances En Energías Renovables Y Medio Ambiente - AVERMA*, 18, 1–7. Recuperado a partir de <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/averma/article/view/1917>
69. Sánchez Gasca, M. Vulnerabilidad del sector agropecuario en Guanajuato ante el estrés hídrico. (2024). [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. eTESIUNAM https://tesiuam.dgb.unam.mx/F/9JDPQM79ININAX1HEPN4V4KLM4U4KJR7DC2AG8BK3YL2HT3D6T-04106?func=myshelf-add-full&doc_library=TES01&doc_number=000864260&format=&source_func=&NOTE=Agrop-Guanajuato
70. Sánchez M.J., Sánchez M. Los plaguicidas, adsorción y evolución en el suelo. Instituto de recursos naturales y agrobiología. (Internet) Boletín. 1era ed. Salamanca, España; 1984. (Citado el 12 de Octubre 2017) Disponible en: digital.csic.es/handle/10261/12919
71. Santander, B. (2024, December 10). Estrategias de economía circular en el sector agrario. Banco Santander. <https://www.bancosantander.es/blog/pymes-negocios/estrategias-economia-circular-sector-agrario>
72. Serrano Enriquez, MA (2022). Evaluación de capacidad de remoción de metales pesados por parte de microalga (*Chlorella* sp.) y totora (*Scirpus californicus*) para su uso en humedales artificiales.
73. Silva, Jorge, Torres, Patricia y Madera, Carlos. (2008). Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana* , 26 (2), 347-359. Recuperado el 14 de marzo de 2025, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652008000200020&lng=en&tlng=es.
74. Téllez Pérez, V., Ocampo Fletes, I., Tornero Campante, M. A., López, P. A., Villarreal Manzo, L. A., & Mendoza Hernández, J. C. (2023). Percepción de los agricultores sobre el riesgo por el uso de agua residual para riego en la zona de Atlixco, Puebla. *Acta universitaria* 33, 1–18. <https://doi.org/10.15174/au.2023.3676>
75. UnescoPhysicalDocument. (2016). UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000244431_spa
76. United Nations. (n.d.). Objetivos de Desarrollo Sostenible | Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/page/objetivos-de-desarrollo-sostenible>
77. Valenzuela B, Alfonso, Sanhueza C, Julio, & Valenzuela B, Rodrigo. (2015). Las microalgas: una fuente renovable para la obtención de ácidos grasos omega-3 de cadena larga para la nutrición humana y animal. *Revista chilena de nutrición*, 42(3), 306-310. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182015000300013>
78. Vehapi, M., Koçer, A. T., Yılmaz, A., & Özçimen, D. (2019). Investigation of the antifungal effects of algal extracts on apple-infecting fungi. *Archives of Microbiology*, 202(3), 455–471. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01760-7>
79. Velasco, I. V. (2006) Mitigación del impacto de la sequía en la agricultura.
80. Véliz Lorenzo, E., Llanes Ocaña, JG, Asela Fernández, L., & Bataller Venta, M. (2009). Reuso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas* , 40 (1), 35-44.
81. Vera Puerto, Ismael Leonardo, Rojas Arredondo, Mauricio, Chávez Yavara, Wladimir, & Arriaza Torres, Bernardo Tomás. (2016). Evaluación de materiales filtrantes para el reúso en agricultura de aguas residuales tratadas provenientes de zonas áridas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(1), 5-19. <https://doi.org/10.18359/rcin.1633>
82. Villavicencio Gutiérrez, M. del R. (2022, 18 octubre). Adaptación al cambio climático con enfoque de economía circular para reducir la vulnerabilidad del sector ganadero extensivo en México: estado del arte. *Regiones y Desarrollo Sustentable*. Recuperado 22 de marzo de 2025, de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/808750/01_2023_Art_culo_adaptaci_n_con_enfoque_economia_circular_en_sector_agropecuario.pdf
83. Vol. 1 Núm. 3 (2024): Revista de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (RevICAp). Recuperado 10 de septiembre de 2024, de <https://revistas.uncu.edu.ar/ojs3/index.php/revicap>

84. We Are Water. (2024, March 6). Aguas negras, el rastro de nuestra historia - We Are Water. <https://www.wearewater.org/es/insights/aguas-negras-el-rastro-de-nuestra-historia/>
85. We Are Water. (2024, March 6). Microalgas: biotecnología para el saneamiento universal - We Are Water. <https://www.wearewater.org/es/insights/microalgas-biotecnologia-para-el-saneamiento-universal>
86. Yang, K., Wang, J., Zheng, J., & Cai, W. (2024). Microalgae-based wastewater treatment: Advances and challenges in membrane harvesting technologies. *Separation and Purification Technology*, 130805. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130805>

GLOSARIOS DE TÉRMINOS

1. Microalgas: Microorganismos fotosintéticos, unicelulares o multicelulares simples, capaces de crecer en ambientes acuáticos dulces o salados, responsables de hasta el 32% de la fotosíntesis global y de gran importancia en procesos de biorremediación y producción de biomasa (Mata, Martins & Caetano, 2010; Benemann, 2003).
2. Biomasa microalgal: Materia orgánica obtenida a partir del cultivo de microalgas, que puede emplearse como insumo agrícola, suplemento alimenticio para el ganado, biofertilizante o materia prima para biocombustibles (Abalde et al., 1995; Renuka et al., 2018).
3. Economía circular: Modelo de producción y consumo que busca el aprovechamiento máximo de recursos, minimizando residuos mediante la reutilización, el reciclaje y la valorización de subproductos, aplicado en esta tesis al tratamiento de aguas residuales y al uso de microalgas (Villavicencio, 2022).
4. Biorremediación: Proceso biotecnológico en el que organismos vivos, como las microalgas, son empleados para remover o transformar contaminantes presentes en el agua, suelos o aire, incluyendo metales pesados y nutrientes (Yin et al., 2019; Gutiérrez Benítez et al., 2014).
5. Manto freático: Agua de infiltración en el suelo que se ubica a poca profundidad; también es llamada capa freática o tabla de agua y corresponde a la zona saturada del suelo donde los huecos o poros entre los granos de tierra se llenan de agua. Una aportación excesiva de agua (riego o lluvia), puede elevar el manto freático hacia la zona de raíces. El movimiento ascendente del nivel freático es una de las causas de problemas de salinización de terrenos con riego (Cisneros Estrada, 2016).
6. Aguas residuales: Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (SEMARNAT, 1997).
7. Aguas residuales tratadas: Son aquellas que mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos u otros, se han adecuado para hacerlas aptas para su reúso en servicios al público, mediante procesos físicos, químicos y biológicos, han

- alcanzado un nivel de calidad adecuado para su reúso seguro en actividades como la agricultura (SEMARNAT, 1997).
8. Aguas residuales crudas: descargas de origen doméstico, industrial o agropecuario que no han recibido tratamiento alguno y que representan un riesgo sanitario y ambiental (SEMARNAT, 1997).
 9. Aguas de reúso: Aguas residuales que han sido tratadas y que cumplen con calidad para su reutilización en diversas actividades productivas, entre ellas la agricultura de riego (Cisneros Estrada, 2016).
 10. Agricultura de riego con aguas residuales: Cultivo de la tierra con aplicación de agua de riego proveniente de un efluente tratado que le permite al productor rural obtener algún beneficio económico o satisfactor en especie (Cisneros Estrada, 2016).
 11. Calidad sanitaria de productos: Condición de los productos agrícolas de estar libres de elementos nocivos principalmente para sus consumidores (Cisneros Estrada, 2016).
 12. Límite máximo permisible: Valor o rango asignado a un parámetro, que no debe ser excedido por el responsable del suministro de agua residual tratada (SEMARNAT, 1997).
 13. Reúso en servicios al público con contacto directo: Es el que se destina a actividades donde el público usuario esté expuesto directamente o en contacto físico. En lo que corresponde a la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, se consideran los siguientes reúsos: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines (SEMARNAT, 1997).
 14. Reúso en servicios al público con contacto indirecto u ocasional: Es el que se destina a actividades donde el público en general esté expuesto indirectamente o en contacto físico incidental y que su acceso es restringido, ya sea por barreras físicas o personal de vigilancia. En lo que corresponde a la Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, se consideran los siguientes reúsos: riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones (SEMARNAT, 1997).
 15. Monitoreo de calidad del agua: Es una herramienta fundamental en el manejo de las aguas residuales de reúso. Consiste en el muestreo sistemático de toma de muestras de agua de riego y acciones para su análisis, bajo un procedimiento metodológico y técnicas seleccionadas, que tienen como objetivo determinar y controlar la calidad del agua de reúso en un punto, una zona o un sitio de interés (Cisneros Estrada, 2016).
 16. Calidad del agua: Se refiere a la condición del agua en función de las características fisicoquímicas y bacteriológicas que guarda dependiendo de su origen, del uso a que se destinó y del reúso que se le pretenda dar. Desde la perspectiva de su gestión, la calidad del agua se define por su uso final. Es un factor que determina la salud de los ecosistemas y el bienestar humano; de ella depende en parte la biodiversidad, la calidad de los alimentos

- obtenidos y el desarrollo de actividades económicas en lugares marginados. Influye en la pobreza o riqueza de una zona o región económica (Cisneros Estrada, 2016).
17. Grasas y aceites: Lípidos residuales contaminantes del agua que se pueden presentar en el agua de reúso en estado sólido o líquido y que poseen diversas estructuras químicas, y que cuando sobrepasan los límites establecidos por la normatividad vigente, pueden causar daños a los suelos donde se apliquen para el riego (Cisneros Estrada, 2016).
 18. Contaminantes patógenos y parasitarios: Son los microorganismos, quistes y huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los coliformes fecales medidos como NMP o UFC/100 ml (número más probable o unidades formadoras de colonias por cada 100 mililitros) y los huevos de helminto medidos como huevos por litro (SEMARNAT, 1997).
 19. Patógenos: Microorganismos (bacterias, virus, protozoos y helmintos) que pueden estar presentes en las aguas de reúso y causar daño o enfermedades a través de la ingesta de productos contaminados (Cisneros Estrada, 2016).
 20. Coliformes fecales, es un grupo de bacterias que tiene ciertas características bioquímicas en común y que resultan de gran importancia como indicadores de contaminación del agua y de los alimentos. El término coliforme viene de la bacteria principal de este grupo que es la *Escherichia coli*, de origen fecal. Se utilizan como indicadores de contaminación bacteriológica del agua residual de riego (Cisneros Estrada, 2016).
 21. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Cantidad de oxígeno disuelto que requieren los microorganismos para descomponer la materia orgánica biodegradable presente en el agua (Metcalf & Eddy, 2003).
 22. Demanda Química de Oxígeno (DQO): Medida de la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica e inorgánica presente en el agua (Metcalf & Eddy, 2003).
 23. Huevos de helmintos: El huevo constituye la etapa contagiosa de los parásitos de helminto (gusanos llamados lombrices), que son excretados por las heces y que contaminan las aguas, el suelo o los alimentos y que pueden parasitar a los humanos o animales. Se utilizan generalmente como indicadores de contaminación bacteriológica del agua de reúso (Cisneros Estrada, 2016).
 24. Sólidos disueltos totales (TDS o STD): Es la cantidad total de sólidos disueltos en el agua, es una medida de la presencia en el agua de sustancias orgánicas e inorgánicas en forma molecular, ionizada o microgranular. Los STD se utilizan como un indicador de la contaminación química o concentración de sales en el agua (Cisneros Estrada, 2016).
 25. Población expuesta: Grupo o conglomerado de personas que son susceptibles de padecer una enfermedad al entrar en contacto con algún contaminante presente en las aguas de reúso o ingerir algún producto contaminado con ellas (Cisneros Estrada, 2016).

26. Divulgación de riesgos: Término que se aplica al acto de dar a conocer al público, a través de material informativo de cualquier tipo, sobre la probabilidad de ocurrencia de daño o perjuicio en virtud del reúso con aguas residuales en el riego agrícola (Cisneros Estrada, 2016).
27. Eslabón de riesgo: Pieza o elemento necesario en la sucesión de hechos de ocurrencia de daño o perjuicio por el aprovechamiento de las aguas residuales en el riego agrícola. Los principales eslabones de riesgo son los trabajadores agrícolas y los consumidores de productos provenientes de las zonas de reúso (Cisneros Estrada, 2016).
28. Riesgos de salud: Exposición de un individuo o grupo de individuos a ciertos contaminantes, lo que aumenta su probabilidad de sufrir una enfermedad (Cisneros Estrada, 2016).
29. Riego de gravedad: Es el método de riego más antiguo, que utiliza las pendientes naturales o artificiales del terreno y la fuerza de gravedad para aplicar y distribuir el agua de riego en una parcela (Cisneros Estrada, 2016).
30. Desparasitación: Tratamiento que los médicos recomiendan para eliminar parásitos en humanos que han estado expuestos a productos contaminados (Cisneros Estrada, 2016).
31. SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales que se encarga de impulsar la protección, restauración y conservación de los ecosistemas y recursos naturales y bienes y servicios ambientales con el objetivo de propiciar su aprovechamiento y desarrollo sustentable (Cisneros Estrada, 2016).
32. IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, es un organismo público descentralizado de investigación y desarrollo tecnológico en materia hídrica, dependiente de la (SEMARNAT), la cual desarrolla tecnologías y metodologías para la gestión integral del agua (Instituto Mexicano De Tecnología Del Agua, n.d.)
33. CONAGUA: Comisión Nacional del Agua, es un organismo administrativo desconcentrado de la SEMARNAT, con autonomía técnica, operativa y de gestión, la cual otorga concesiones, asignaciones y permisos relacionados con el uso del agua, además supervisa el cumplimiento de la Ley de Aguas Nacionales (Comisión Nacional Del Agua, n.d.)
34. PROFECO: Procuraduría Federal del Consumidor, es un organismo público descentralizado del gobierno de México, sectorizado en la secretaría de economía, la cual verifica precios, calidad y seguridad de bienes y servicios en el mercado (Procuraduría Federal Del Consumidor, n.d.)
35. INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, es un organismo público autónomo del estado mexicano, con personalidad jurídica y patrimonio propio, lo cual genera información estadística confiable y oportuna para la planeación y evaluación de políticas públicas (Estadística y geografía INEGI, n.d.).
36. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, se considera agua residual a "las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos,

incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas" (SEMARNAT, 1996).

37. La agricultura se define como la actividad del hombre sobre la tierra para la extracción de productos de origen vegetal utilizando la energía solar como fuente de energía. Sin embargo, la expansión de nuevas zonas de vida por el hombre a consecuencia del crecimiento de la población mundial ha generado una demanda cada vez mayor de alimentos (Campos, M. A. R., 2018).
38. Nivelación del suelo: Es la tarea que consiste en obtener una pendiente uniforme del terreno, eliminando los altos o bajos. Dicha pendiente debe ser no erosiva y permitir el movimiento del agua de riego para una distribución uniforme, de manera que favorezca una reducción de la cantidad de agua a aplicar en las parcelas agrícolas (Cisneros Estrada, 2016).
39. Permeabilidad del suelo: Es la propiedad que tienen los suelos agrícolas, de permitir la infiltración del agua y el aire. El concepto permeabilidad puede recibir también las acepciones de conductividad o transmisividad hidráulica, dependiendo del contexto en el cual sea empleado (Cisneros Estrada, 2016).
40. Lavado de sales: Medida de mejoramiento de suelos para combatir la salinización de terrenos agrícolas de riego, que consiste en aplicar una lámina de sobre riego para desplazar las sales a estratos inferiores a la zona de raíces (Cisneros Estrada, 2016).
41. Salinización de terrenos: Es un fenómeno que se presenta en mayor medida en zonas agrícolas ubicadas en zonas áridas y semiáridas, donde se ve favorecido por el tipo de suelo, altas temperaturas y tasas de evaporación, así como por la presencia de drenaje deficiente y mantos freáticos someros, mala práctica del riego y uso de aguas de riego de mala calidad fisicoquímica (Cisneros Estrada, 2016).
42. Forestación: Actividad que se ocupa de gestionar la práctica de las plantaciones de árboles con fines medioambientales o comerciales regadas, en este caso específico, con aguas residuales (Cisneros Estrada, 2016).
43. Malezas: Son plantas indeseables que crecen como organismos macroscópicos junto con las plantas cultivadas, interfiriendo en su desarrollo y productividad (Cisneros Estrada, 2016).
44. Patrón de cultivos: Conjunto de cultivos que se establecen de forma tradicional en determinados ciclos agrícolas en una zona específica (Cisneros Estrada, 2016).
45. Plantas halófitas: El término halófito se refiere a plantas tolerantes a las sales presentes en la solución del suelo. No existe una definición universalmente aceptada de ese término, sin embargo, se usa para clasificar a las plantas que crecen en ambientes con suelos salinos y que presentan tolerancia a la salinidad (Cisneros Estrada, 2016).
46. Prácticas de manejo del cultivo: Son las acciones específicas que se toman para proteger al cultivo o sus frutos, buscando que tenga una calidad sanitaria óptima para no poner en riesgo a los consumidores (Cisneros Estrada, 2016).

47. Prácticas de higiene: Son los hábitos, cuidados, prácticas, acciones o técnicas que se realizan de manera personal o en grupo, tendientes a conservar la salud o prevenir enfermedades (Cisneros Estrada, 2016).
48. Restricciones: Limitaciones o reducciones, naturales o impuestas, según corresponda. El concepto se utiliza para marcar un límite en cuanto a la calidad del agua de riego según el tipo de cultivos (Cisneros Estrada, 2016).
49. Prendas de protección: Es el equipo que debe portar el trabajador agrícola durante toda su jornada laboral y que lo protege de la exposición a contaminantes presentes en el agua residual de reúso o en los cultivos regados con esta (Cisneros Estrada, 2016).
50. Eutrofización: Proceso de enriquecimiento excesivo de nutrientes en cuerpos de agua, que provoca proliferación de algas y cianobacterias, reduciendo oxígeno disuelto y afectando la biodiversidad acuática (Fernández et al., 2018).
51. Consorcio microalgal-bacteriano: Asociación simbiótica entre microalgas y bacterias en sistemas de tratamiento de aguas residuales, en la cual las microalgas generan oxígeno que es utilizado por bacterias heterótrofas, mientras que estas proveen CO₂ y nutrientes a las microalgas (Oswald & Golueke, 1960; Abalde et al., 1995).
52. Biofertilizante: Producto derivado de la biomasa microalgal que mejora la fertilidad del suelo y la absorción de nutrientes por los cultivos, reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos (Renuka et al., 2018).
53. Fungicida natural: Sustancia obtenida de microalgas con propiedades para inhibir o controlar hongos fitopatógenos en cultivos agrícolas (Morales et al., 2019).
54. Fotobiorreactor (PBR): Sistema cerrado de cultivo de microalgas diseñado para optimizar la captación de luz y el suministro de nutrientes, con el fin de incrementar la productividad y reducir la contaminación externa (Mata, Martins & Caetano, 2010).
55. Lagunas de alta tasa (HRAP): Sistemas abiertos de tratamiento de aguas residuales basados en el crecimiento de microalgas, que permiten una eficiente remoción de contaminantes y producción de biomasa (Oswald, 1975).
56. Estrés hídrico: Relación entre la cantidad de agua utilizada y la disponibilidad de recursos hídricos renovables, indicador de presión sobre el recurso en una región (FAO, s.f ;Sánchez Gasca, 2024).

ANEXOS

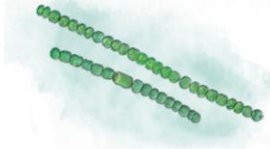
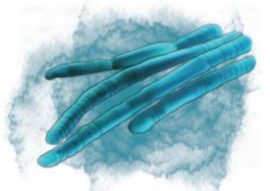





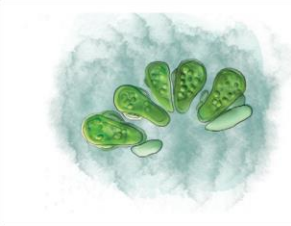
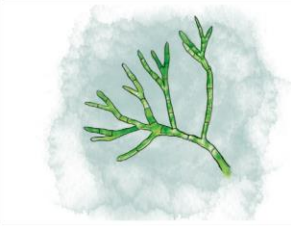

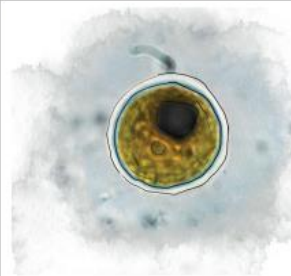
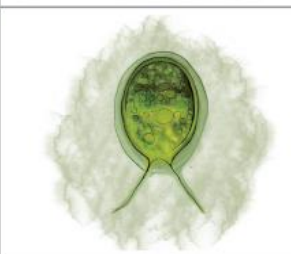

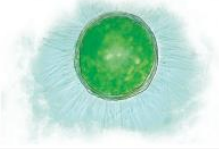
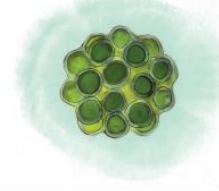

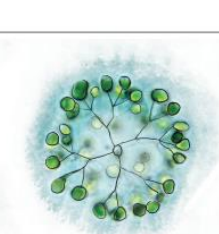
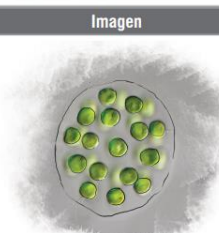
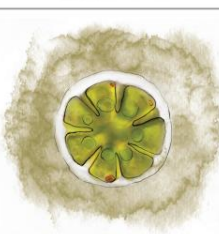
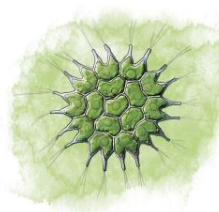
Tipo de microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Cianofíceas / Cyanophyta (Algas verde-azuladas)	<i>Anabaena sp.</i>		Forma filamentososa solitaria, que a veces se encuentra inserta en masas gelatinosas. Los filamentos son rectos o ligeramente curvados. Las células son esféricas o en forma de tonel.
	<i>Lyngbya sp.</i>		Filamentos largos, curvados, agrupados en haces de color verdeazulado. Los filamentos pueden presentar vainas gruesas, incoloras, que se pegan entre sí, formando un mucilago
Tipo de microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Cianofíceas / Cyanophyta (Algas verde-azuladas)	<i>Nostoc sp.</i>		Talos filamentosos con capa exterior gelatinosa. Las células son esféricas. Cuando los talos se desarrollan masivamente, dan aspecto de masas gelatinosas de color oscuro.
	<i>Oscillatoria limosa</i>		Talos de coloraciones verde oscura, libres o sésiles. Filamentos rectos, no estrangulados en las paredes laterales, finamente granulosa. Las células son anchas, de forma discoidal.
	<i>Oscillatoria rubescens</i>		Microalga filamentososa que presenta un tono ligeramente rosado. Las células terminales desarrollan extremos gradualmente apuntados.
	<i>Oscillatoria tenuis</i>		Talo de color verdeazulado. Los filamentos son rectos, con extremos no apuntados. Las células son en general cuadradas, siendo las terminales ligeramente cónicas.
Tipo de microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Cianofíceas / Cyanophyta (Algas verde-azuladas)	<i>Tolypothrix lanata</i>		Talo formado por filamentos de hasta dos centímetros de longitud, con frecuentes pseudoramificaciones. Las células son cuadradas de color verde azulado.

Tabla 27. Microalgas Cianofíceas / Cyanophyta (Algas verde-azuladas), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011).

Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Clorofíceas / Chlorophyta (Algas verdes)	<i>Botryococcus brauni</i>		Es un alga colonial que crece principalmente en agua dulce y con frecuencia se la ve flotando sobre la superficie de aguas estancadas debido a la gran cantidad de hidrocarburos localizados extracelularmente.
	<i>Chaetophora elegans</i>		Los talos pueden alcanzar tamaños de cm., y son de color verde claro. A partir de una base de células laxamente unidas o de cortos filamentos surgen las ramificaciones.
Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Chlamydomonas angulosa</i>		Células elípticas anchas. La membrana forma una ancha papila en la parte anterior celular. Cloroplasto con pirenoide cuadrangular. Mancha ocular grande en forma de bastón.
	<i>Chlamydomonas ehrenbergi</i>		Células con formas de irregular a ovadas. Membrana delicada, que puede estar algo separada del borde del citoplasma. Los flagelos parten de una pequeña protuberancia cutánea. Mancha ocular en el centro de la célula.
	<i>Chlamydomonas reinhardi</i>		Células casi esféricas. Membrana no engrosada en una papila anterior. Cloroplasto con un gran pirenoide. Mancha ocular grande.
	<i>Closteriosis sp.</i>		Células solitarias, libres, fusiformes y muy alargadas, puntiagudas en los dos extremos y desprovista de vaina gelatinosa. Presentan un plasto parietal con numerosos pirenoides.

Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Chlorella sp.</i>		Es un género de una sola célula verde de algas. Es de forma esférica, de 2 a 10 micras de diámetro, y es sin flagelos.
	<i>Coelastrum sp.</i>		Microalga colonial, formada por colonias de 8 a 128 células, puede ser globosa, hueca o esférica. Las células se encuentran unidas por finas superficies gelatinosas.
	<i>Cosmarium botrytis</i>		Células solitarias con un profundo surco que las divide en dos hemicélulas. La superficie se encuentra cubierta de pequeñas verrugas que le dan un aspecto característico.
	<i>Dictyosphaerium ehrenbergianum</i>		Colonias insertas en una masa gelatinosa claramente delimitada. Las células son ovaladas en disposición periférica y están unidas entre sí mediante cordones gelatinosos.
Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Eudorina elegans</i>		Microalga colonial compuesta de células flageladas insertas en una vaina gelatinosa común.
	<i>Pandorina morum</i>		Colonia aproximadamente esférica, compuesta de 16 células flageladas de forma triangular -aovada, insertas en una vaina gelatinosa común.
	<i>Pediastrum duplex</i>		Las células marginales son profundamente recortadas, sólo fusionadas en la base, y presentan dos lóbulos muy prolongados.


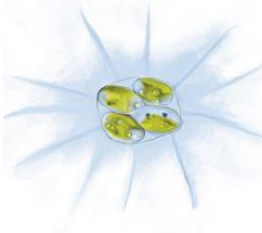

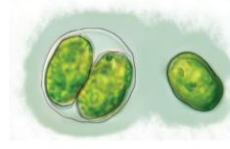
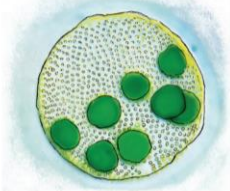

Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Scenedesmus quadricauda</i>		Individuo colonial, constituido por 4, 8 ó 12 células. Las células centrales con alargadas y sin apéndices, las terminales, se abomban en el centro y presentan dos espinas que se proyectan hacia el exterior.
	<i>Siderocelis sp.</i>		Especie que agrupa individuos con células elípticas que presentan numerosas verrugas pardas en su exterior. El color pardo se debe a la inclusión de sales de hierro.
	<i>Spirogyra sp.</i>		Microalga filamentosa con cloroplastos espiralados en doble hélice que recorren todo el tricoma.
Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Tetraselmis sp.</i>		Son verdes, móviles, y miden usualmente 10 μm de largo x 14 μm de ancho.
	<i>Volvox aureus</i>		Colonia esférica, gelatinosa, con las células situadas en la periferia. Vistas por encima, las células son circulares y se comunican entre sí mediante filamentos plasmáticos muy finos.

Tabla 28. Microalgas Clorofíceas / Chlorophyta (Algas verdes), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)

Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Criptofíceas / Cryptophyta (Algas pardas)	<i>Cryptomonas sp.</i>		Células emarginadas en la parte anterior, más delgadas en la posterior, con la cara ventral plana y la dorsal abombada. Presentan dos cloroplastos y dos flagelos de igual longitud.

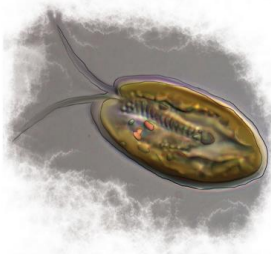
Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Cryptomonas erosa</i>	 A detailed illustration of the microalga Cryptomonas erosa, showing its elongated, spindle-shaped body with a distinct anterior end and a long, thin flagellum extending from the front.	Las células son fuertemente emarginadas en la parte anterior.

Tabla 29. Microalgas Criptofíceas / Cryptophyta (Algas pardas), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)

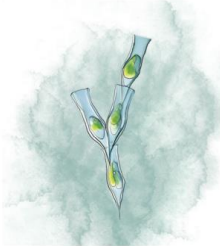
Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Crisofíceas / Chrysophyta (Algas doradas)	<i>Dinobryon divergens</i>	 An illustration of the colonial microalga Dinobryon divergens, showing a central cell with a funnel-shaped structure and several radiating, elongated cells.	Individuo colonial de células sésiles con caparazones en forma de embudo. Las tecas se insertan unas a otras y se encuentran dilatadas en el centro, con la parte basal cónica.

Tabla 30. Microalgas Crisofíceas / Chrysophyta (Algas doradas), (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)

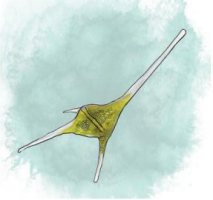
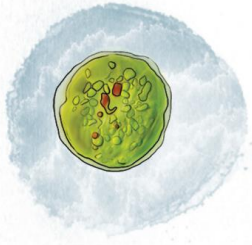
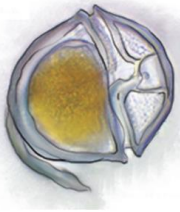
Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Dinofíceas / Dinophyceae	<i>Ceratium hirudinella</i>	 An illustration of the dinoflagellate Ceratium hirudinella, showing its characteristic pear-shaped body with a long, thin apical horn and three basal horns.	Especie de contorno asimétrico, que presenta un cuerno apical muy largo, con el extremo abierto. Cuernos basales en número de 3.
	<i>Gymnodinium paradoxum</i>	 An illustration of the dinoflagellate Gymnodinium paradoxum, showing its oval-shaped cell with a prominent central nucleus and several dark, longitudinal and transverse furrows.	Especie móvil, con células ovaladas, y surcos longitudinal y transversal poco profundos. Cloroplastos de color pardo oscuro dispuestos en manchas alrededor del núcleo central.
	<i>Peridinium cinctum</i>	 An illustration of the dinoflagellate Peridinium cinctum, showing its spherical cell with a distinct, multi-layered, and often spiny outer covering (theca).	Especie móvil formada por células esféricas, de sección arriñonada. Un caparazón, dividido en placas características de cada especie, rodea la célula. El caparazón también puede presentar espinas. Los cloroplastos son de color pardo.

Tabla 31. Microalgas Dinofíceas / Dinophyceae, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)


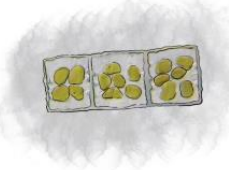
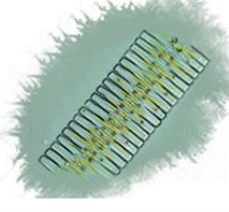


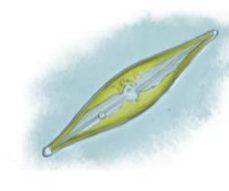
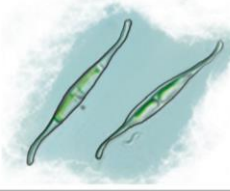
Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Diatomeas/ Diatoms	<i>Asterionella formosa</i>		Diatomea que forma colonias estrelladas de unas 8 células. Cada célula presenta un lado pleural, más ancho en los extremos. Las valvas son muy estrechas con los extremos algo abultados.
	<i>Diatoma hiemale</i>		Diatomea colonial que forma cintas muy largas y densas. Las valvas son lanceoladas, lineales o elípticas. Presenta costillas robustas e irregulares.
	<i>Fragilaria crotonensis</i>		Diatomea de células dilatadas en el centro que se unen formando cintas curvadas y retorcidas. Las valvas son muy estrechas y presentan sutiles estriás transversales.
	<i>Gomphonema sp.</i>		Género de diatomea que agrupa células cuyas caras pleurales son cuñiformes. Las células se pueden encontrar fijadas a sustratos mediante pedúnculos gelatinosos simples.
	<i>Melosira varians</i>		Diatomea colonial que forma cadenas largas de células en forma de tambor. Presentan cloroplastos en forma de plaquitas de color pardo amarillento.
Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
	<i>Navicula sp.</i>		Incluye individuos con valvas lanceoladas, estriadas transversalmente en la zona media, en sentido opuesto a los polos. Los extremos de la célula son redondeados.
	<i>Nitzschia sp.</i>		Género que agrupa células, en general pequeñas, con valvas lanceoladas que presentan estriás transversales muy finas, apenas visibles y dispuestas densamente.

Tabla 32. Microalgas Diatomeas / Diatoms, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)





Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Euglenoficeas / Euglenophyta	<i>Euglena oxyuris</i>		Microalga constituida por células alargadas, con punta terminal corta, casi siempre retorcidas en sentido longitudinal. La membrana presenta estriación espiralada. El flagelo es relativamente corto. Presenta numerosos cloroplastos en forma de placa.
	<i>Euglena viridis</i>		Individuos de aspecto fusiforme y con un flagelo de igual longitud que el cuerpo. Los cloroplastos tienen forma de cinta y están orientados hacia un pirenóide central. Aunque son fotosintéticos pueden ingerir materia orgánica.
	<i>Phacus pyrum</i>		Las células son ovoides, con el extremo posterior adelgazado en una espina larga y recta. Ocho estrías espiraladas confluyen en la desembocadura del sáculo del flagelo.
	<i>Phacus torta</i>		Células intensamente retorcidas, con larga espina caudal y membrana con estriación longitudinal. Los cloroplastos tienen forma de placa.

Tabla 33. Microalgas Euglenoficeas / Euglenophyta, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)


Tipo de Microalga	Microalga	Imagen	Descripción
Xantoficeas / Xantophyta	<i>Tribonema sp.</i>		Microalga que presenta numerosos cloroplastos. La membrana es fina y delicada presentando apéndices en forma de H bien visibles.

Tabla 34. Microalgas Xantoficeas / Xantophyta, (Microorganisms Atlas. Algae. AYMA , 2011)