



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



APLICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN PEQUEÑOS CENTROS POBLADOS



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"



JOSE FERNANDO ESPITIA CANTERO

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERIA AMBIENTAL
MONTERIA, CÓRDOBA

2022



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL
Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



APLICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN PEQUEÑOS CENTROS POBLADOS



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"



JOSE FERNANDO ESPITIA CANTERO

**Trabajo de grado presentado, en la modalidad de Monografía, como parte de los requisitos
para optar al Título de Ingeniero Ambiental.**

Director (es):

GABRIEL ANTONIO CAMPO DAZA, M.Sc.

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERIA AMBIENTAL
MONTERIA, CÓRDOBA**

2022



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



La responsabilidad ética, legal y científica, de las ideas, conceptos, y resultados del proyecto de investigación, serán responsabilidad de los autores.

Artículo 59, Acuerdo N° 022 del 21 de febrero de 2018 del Consejo Superior.

Tener en cuenta los Artículos y directrices establecidos la Resolución 1775, del 21 de agosto de 2019. En donde se establecen las directrices y las políticas de funcionamiento del repositorio institucional de la Universidad de Córdoba (Artículos tercero, octavo, once, entre otros).

“11 – BUENA FE: La universidad considera que la producción intelectual que, los profesores, funcionarios administrativos y estudiantes le presenten, es realizada por éstos, y que no han transgredido los derechos de otras personas. En consecuencia, la aceptará, protegerá, publicará y explotará, según corresponda y lo considere pertinente”. Artículo 1, Acuerdo N° 045 del 25 de mayo de 2018 del Consejo Superior.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



A Dios

*A mi madre Luz Mady Cantero por su
inmenso amor*

*A mi padre Dagoberto Espitia, que
espero se sienta orgulloso de mí desde el
cielo*

*A mi hermano Camilo Andrés Espitia
por su apoyo incondicional*



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Agradecimientos especiales a:

Al director Gabriel Antonio Campo Daza por su disposición y compromiso con esta investigación

A los profesores Mauricio Javier Martínez López y Juan Fernando Arango Meneses por hacerme entender que la importancia de una asignatura está en los conocimientos adquiridos

A mi tía Teresa Espitia y mi prima María Teresa Guerrero por su contribución desinteresada en mi formación profesional

A mis queridos amigos Lina Ortiz y Rafael García por darme todo su apoyo y creer en mí en todo momento

Agradecimientos:

A mis amigos Milly Benítez y Carlos Serpa por darme ánimos en todo este proceso

A Ana Hernández por su ayuda incansable en el desarrollo de este trabajo



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
1. SANEAMIENTO: ORIGEN E IMPACTO DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	2
1.1 USO DEL AGUA	3
1.2. EL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA EN LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.....	4
1.2.1. Situación del sexto objetivo de desarrollo sostenible	5
1.3. IMPACTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	7
2. CONTEXTUALIZACIÓN: UN ANÁLISIS LOCAL SOBRE EL SANEAMIENTO EN LAS ZONAS RURAL DE CÓRDOBA	10
2.1. POBLACIÓN RURAL EN LOS MUNICIPIOS DE CÓRDOBA	10
2.2. CONDICIONES SOCIOECONÓMICAS EN LAS ZONAS RURALES DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA	11
2.3. CONDICIONES DE SANEAMIENTO EN LAS ZONAS RURALES DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA	13
2.3.1. Brecha entre las zonas rurales y urbanas en el acceso al agua y al saneamiento básico	14
2.4. CONSIDERACIONES FINALES Y LIMITACIONES.....	18
3. PRESENTACIÓN DE UNA SOLUCIÓN BASADA EN LA NATURALEZA PARA LA GESTIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LAS ZONAS RURALES DE CÓRDOBA.....	10
3.1. HUMEDALES ARTIFICIALES	19
3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	20
3.3. COMPONENTES DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL.....	24
3.3.1. Sustrato	24
3.3.2. Vegetación	27
3.3.3. Microorganismos	30



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



3.4. PURIFICACIÓN DEL AGUA RESIDUAL MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES.....	32
3.4.1. Mecanismo de eliminación de contaminantes.....	33
3.5. DISEÑO E IMPLEMENTACION DE HUMEDALES ARTIFICIALES	38
3.5.1. Balance de Masa: Hidráulica e Hidrología en humedales artificiales.....	39
3.5.2. Remoción de contaminantes en humedales artificiales.....	42
3.5.3. Parámetros de diseño de humedales artificiales.....	44
3.5.4. Mantenimiento de humedales artificiales.....	46
3.6. HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS	47
3.6.1. Humedales artificiales: una solución basada en la naturaleza para el tratamiento de las aguas residuales en las zonas rurales de Córdoba.....	48
3.6.2. Ejemplo de dimensionamiento de humedales artificiales	49
CONCLUSIÓN	54
BIBLIOGRAFÍA	55



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de humedales artificiales subsuperficial	21
Tabla 2. Clasificación de humedales artificiales superficiales.....	22
Tabla 3. Comparación de los tipos de humedales artificiales	23
Tabla 4. Sustratos provenientes de subproductos	25
Tabla 5. Principales sustratos utilizados en los humedales artificiales	27
Tabla 6. Plantas utilizadas en los humedales artificiales	29
Tabla 7. Mecanismo de eliminación de contaminantes.....	32
Tabla 8. Ecuaciones de balance de masa dentro de los humedales artificiales	41
Tabla 9. Valores de la constante dependiente de la temperatura.....	43
Tabla 10. Parámetros de diseño	44
Tabla 11. Velocidades en los humedales artificiales.....	45
Tabla 12. Valores para el cálculo por vivienda en acueducto	50
Tabla 13. Parámetros de diseño del humedal artificial-Caso de estudio.....	53



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Impactos de las aguas residuales no tratadas.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2. Diagrama F.....	9
Figura 3. Humedales artificiales	20
Figura 4. Funciones del sustrato dentro de un humedal.....	25
Figura 5. Tipo de macrófita	28
Figura 6. Procesos de eliminación de contaminantes por microorganismos	31
Figura 7. Esquema del proceso de digestión anaerobia	35
Figura 8. AFM de las rutas de eliminación de nitrógeno (1) y Materia orgánica (2)	¡Error! Marcador no definido.
Figura 9. Procesos de remoción de microorganismos.....	38
Figura 10. Factores para tener en cuenta en la elección del sitio.....	39
Figura 11. Balance de masa dentro de los humedales artificiales..	¡Error! Marcador no definido.
Figura 12. Retos de las soluciones basadas en la naturaleza	49



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



LISTADO DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Saneamiento en zonas rurales de Córdoba 2018.....	14
Gráfica 2. Gráficas de dispersión entre población rural y cobertura	17



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



RESUMEN

El saneamiento corresponde a una necesidad básica de cualquier individuo, que condiciona su calidad de vida, debido a que tiene impactos significativos tanto a nivel ambiental como económico y de salud. De igual forma, las zonas rurales se ven afectadas por disparidades entre la cobertura de estos servicios, agudizando aún más la situación en estos territorios. Colombia presenta una marcada diferencia entre estos dos sectores, es por esto que realizar un análisis correlativo a nivel departamental, en este caso para el departamento de Córdoba, que relacione la población rural y el saneamiento (recolección de residuos sólidos -0,937, alcantarillado -0,866, inadecuada eliminación de excretas 0,422 y acceso a fuente de aguas mejoradas 0,477) es una acción necesaria para la contextualización de la información, así como presentar alternativas como los humedales artificiales que son soluciones basadas en la naturaleza enfocadas en estándares internacionales que se ajustan a las condiciones de estas zonas y encaminan hacia el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.

Palabras claves: Saneamiento, rural, Humedales artificiales



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



ASBTRACT

Sanitation corresponds to a basic need of any individual, which conditions their quality of life, because it has significant environmental, economic and health impacts. Similarly, rural areas are affected by disparities between the coverage of these services, further exacerbating the situation in these territories. Colombia presents a marked difference between these two sectors, which is why carrying out a correlative analysis at the departmental level, in this case for the department of Córdoba that relates the rural population and sanitation (solid waste collection -0.937, sewerage -0.866, inadequate disposal of excreta 0.422 and access to improved water source 0.477) is a necessary action for the contextualization of information as well as presenting alternatives such as artificial wetlands that are nature-based solutions focused on international standards that adjust to the conditions of these areas and lead to the fulfillment of the sustainable development goals.

Keywords: Sanitation, rural, artificial wetlands



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



INTRODUCCIÓN

En Colombia, para el 2018 el 22,9% de la población residía en zonas rurales y dispersa (DANE & CNPV 2018); y en departamentos como Córdoba la ruralidad tiene una gran influencia (COLOMBIA PNUD 2019), por lo cual se debe considerar este porcentaje a la hora de implementar políticas y/o proyectos a nivel nacional. Asimismo, el efecto de la pobreza golpea severamente a las zonas rurales, en donde para el año 2020, el 42% de la población colombiana se encontraba en condiciones de vulnerabilidad (COLOMBIA PNUD 2021). Para el territorio nacional, la pobreza se mide gracias a dos indicadores; en esta monografía se hará uso de la medida de pobreza multidimensional que incluye 5 dimensiones y que articulado con los ODS evalúa las coberturas relacionadas con el agua y el saneamiento básico (Departamento Nacional de Planeación (DNP) 2017).

El saneamiento básico es un conjunto de medidas enfocadas sobre los residuos y el manejo de las aguas residuales domesticas evitando la contaminación de fuentes hídricas y reduciendo el riesgo asociado con enfermedades, tales como la colera, la tifoidea, hepatitis infecciosa, polio y ascariasis (Amit Singh Vishen 2020). Es de esta manera evidente, que el saneamiento es un principio fundamental dentro de cualquier nación, razón por la cual este trabajo centra las primeras partes en la revisión de análisis sobre los impactos de las aguas residuales y su relación con el porcentaje de población rural por cada municipio del departamento de Córdoba a través de análisis correlativos haciendo uso de indicadores que componen la medida de pobreza multidimensional suministrados por el Departamento administrativo nacional de Estadística.

Al ser reconocible el deber de aumentar el número de hogares que cuenten con instalaciones seguras en saneamiento en las zonas rurales y una clara problemática para este tema en los municipios del departamento, se presenta a los humedales artificiales como una herramienta que permita lograr este objetivo, mejorando la calidad de vida de la población y reduciendo la brecha existente entre las zonas rurales y urbanas en el



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



departamento de Córdoba (Moreira & Dias 2020). La elección de esta ecotecnología estuvo vinculada a la pertinencia de métodos más sustentables y que presenten buena eficiencia en la eliminación de contaminantes (Donde 2017). Por último, se evidenció que al aumentar el número de habitantes que reside en zonas rurales en los municipios, disminuye los porcentajes de favorabilidad en agua y saneamiento básico, lo cual permite asegurar que en un contexto departamental la población rural presenta una relación inversa ubicándola en una zona vulnerable y con latente aparición de problemáticas de salud ambiental.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL
Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



1. SANEAMIENTO: ORIGEN E IMPACTO DE LAS AGUAS RESIDUALES



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



1.1 USO DEL AGUA

El agua corresponde a un elemento de gran demanda y, por tanto, de mucha importancia para la vida. Este es un recurso finito que, a pesar de encontrarse en el planeta en todos los estados de la materia, se ve fuertemente amenazado por una crisis climática que flagela al siglo XXI (Agencia de la ONU para los Refugiados 2018). La situación se agrava cuando se observa que tanto el crecimiento económico como la supervivencia y el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible están ligados a mejoras en este recurso (Banco Mundial 2021).

Entre los usos de mayor importancia se encuentra el agrícola, doméstico, energético e industrial cada uno de ellos conectados a través del empleo de este recurso dentro de sus actividades (EPA 2021). Con base en una proyección realizada para los años 2025 y 2040 sobre la demanda de agua, el sector agrícola será el que abandere en extracción y consumo de este recurso, seguido en términos de extracción por el uso municipal para las dos temporalidades, pero al considerar las cifras en cuanto a consumo, el industrial supera al municipal (UNESCO 2019).

Para el 2016, las cifras que se presentaron para estos sectores referente a la extracción fueron 69.2% para el uso agrícola, 19.1% el uso industrial, y el municipal, 11.5% siendo las regiones de Asia, Norteamérica y Europa las de mayor extracción de este recurso respectivamente (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) 2017).

Según cifras presentadas por el Instituto de Meteorología y Estudios Ambientales (2019) a través del documento *Estudio Nacional del Agua-2018* el sector agrícola es el que presenta mayor demanda a nivel nacional con 43.1 %, lo cual concuerda con las cifras mundiales, pero, por otro lado, el doméstico (7.3%) le saca una ventaja considerable al industrial (2.9%). Igualmente, se resaltan sectores como el energético (24.3%), pecuario (8.2%) y piscícola (8.1%) que le siguen al agrícola respectivamente.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Como se ha estudiado hasta este punto, el agua corresponde a un factor determinante dentro del bienestar (Angelakis et al. 2021) y el desarrollo económico (Water.org 2021) de cualquier sociedad, es en este aspecto en el que se basan los diferentes usos que el hombre le puede dar a este recurso, pero se debe tener en cuenta que a lo largo que se desarrolla la actividad, el agua se ve sometida a diferentes tipos de contaminantes y condiciones que alteran su calidad colocando en riesgo la salud humana y de los ecosistemas (Wear et al. 2021).

Apoyado en los objetivos de la presente monografía, se dará especial interés al uso doméstico, siendo este asociado a actividades cotidianas tales como la ducha, lavado personal, arrastres de excretas y orina, lavado de ropa, limpieza de casa y lavado de utensilios del hogar. Las proporciones en cuanto al consumo por cada actividad varían y están restringidas por factores como las condiciones geográficas, el acceso al agua, las tarifas, el clima, la cultura del uso del agua, entre otras; pero si se puede asumir que la mayor cantidad de agua empleada en las viviendas corresponde a la higiene corporal y al arrastre de excretas y orinas (Blanco S. et al. 2014). Esta información permite dimensionar que un volumen de agua se encuentra en contacto directo con las heces y orina, así como a diversas sustancias que se usan de manera habitual en los hogares, como los detergentes y demás productos.

1.2. EL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA EN LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

El ser humano basado en su desarrollo económico y su propio bienestar produce grandes volúmenes de residuos líquidos. Ante esta situación, es necesario definir de forma correcta lo que se considera como aguas residuales; por esta, se entiende a las aguas producidas como resultado de actividades industriales, preparación de alimentos, actividades domésticas, entre otros y que debido a esto se le ha modificado su calidad por la



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



incorporación de contaminantes (Ministerio de Salud-El Salvador 2015; Subdirección de Salud Ambiental-MSPS 2015).

Las aguas residuales domésticas pertenecen a una clasificación de las aguas residuales, que de acuerdo con la resolución 631 del Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible la define como aquellas procedente de los hogares y de las instalaciones sanitarias, áreas de aseo personal, cocina y lavado, es decir, las que no presentan un origen industrial y/o comercial (Minambiente 2015). A nivel de composición, el agua residual domestica se encuentra conformada por 99.9% de agua y 0.1% de sólidos, de los cuales se dividen en orgánicos e inorgánicos(Ruiz-cuello et al. 2015). Los componentes típicos de estas aguas recaen en la presencia sólidos, nutrientes, grasas, organismos patógenos, materia orgánica, entre otros (Zanuttín 2018).

Al estudiar las aguas residuales domésticas, se debe traer a alusión el termino de saneamiento el cual comprende a ese conjunto de acciones encaminada a la eliminación de forma segura de las heces y orinas, la realización de prácticas higiénicas, recolección de residuos y la purificación de las aguas residuales(Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Emerging and Zoonotic Infectious Diseases (NCEZID) 2017) En vista de la complejidad de temas que aborda el saneamiento básico y por otras razones, el saneamiento se encuentra como el sexto objetivo de desarrollo sostenible acompañado de la disponibilidad y gestión del agua. En donde se han fijado metas para el 2030 que permitan mejorar la salud y el ambiente. Las áreas rurales son las de mayor preocupación dentro de este contexto debido a que son las que menor porcentaje de su población cuenta con servicios de saneamiento y agua potable (Organización de las Naciones Unidas (ONU) 2015).

1.2.1. Situación del sexto objetivo de desarrollo sostenible

Se dedicará esta sección a la consulta de diversas fuentes que concedan la oportunidad de tener una visión sobre la situación actual del objetivo considerado en diferentes contextos



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



geográficos.

A nivel mundial, se encuentra con la barrera referente a la actualización y monitoreo de información. En términos del objetivo de agua y saneamiento básico, la información se encuentra un poco superior al 60% de países que reportan datos disponibles y su actualización figura para el año 2017; en el sector del agua potable, 2200 millones de personas carecen de agua potable gestionada, y en saneamiento, 4200 millones carecen de instalaciones seguras. Ante este panorama la población se ve obligada a utilizar métodos inadecuados que permitan suplir sus necesidades; sumado a lo anterior, ciertos países presentaron una dificultad que, en un lenguaje numérico, fue del 65% para cumplir metas relacionadas a este objetivo (Organización de las Naciones Unidas (ONU) 2020). Otro aspecto para considerar se vincula con la defecación al aire libre lo cual supone un riesgo a la salud y transmisión de enfermedades. Para el 2017, 673 millones de personas realizaron esta práctica (Organización de las Naciones Unidas (ONU) 2019).

Según Rozo López (2020) para América Latina las cifras en cuanto a cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenibles son bastante preocupante hasta el punto de predecir posibles incumplimientos. En cuanto al objetivo de control, este se encuentra con un índice de cumplimiento del 88.1% (Centro de los objetivos de desarrollo sostenible para America Latina 2020), pero al revisar los porcentajes de la población que cuenta con servicio de agua potable se evidencia que es de 75% y saneamiento de 34% para el 2020. A nivel de territorio, se observa la existencia de una diferencia relacionada con las zonas rurales y urbanas, por ejemplo, el porcentaje de población que realizaba defecación al aire libre en las zonas rurales (6%) es seis veces mayor que en las zonas urbanas, esta tendencia también se presenta para los porcentajes de acceso a agua potable y saneamiento (Comisión Económica para América Latina y el Caribe & Naciones Unidas 2021).



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Un claro ejemplo de lo antes descrito es Colombia, en donde uno de los principales obstáculos que tiene para garantizar el acceso al agua potable y el saneamiento adecuado dentro del territorio colombiano es la brecha existente entre las áreas urbanas y rurales. En el 2020, 98.07% de la población en zona urbana contaba con acceso a agua potable y estas cifras se disminuyen cuando se ven desde la óptica de las zonas rurales, en donde el servicio fue de un 76.2%, situación similar ocurre en el saneamiento en donde para zonas urbanas en el 2017 era de un 92.4% y bajó a un 73.8% en zonas rurales (Departamento Nacional de Planeación (DNP) 2018, 2021).

La desigualdad antes identificada conduce a territorios más pobres en las zonas rurales en Colombia, a la vez que también corresponde a una alerta en temas de salud, al conocerse el gran poder del agua como conductora de ciertas enfermedades, siendo lo anterior un aspecto que incide en el bienestar de la población (Herrera 2018).

1.3. IMPACTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Es reconocible la relevancia que los recursos hídricos tienen en las dinámicas actuales, debido a los usos y su importancia dentro de la supervivencia como seres humanos y planeta; pero es claro que, al aumentar la demanda sobre el agua, aumentará la producción de aguas residuales. En esta sección se estudiará acerca de los impactos de las aguas residuales no tratadas, las cuales se focalizan en tres ejes importantes: salud, económica y ambiente (Organización de las Naciones Unidas (ONU) 2017).



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



- Reconociendo la existencia entre el mal manejo de las aguas residuales y la aparición de enfermedades de tipo digestivo, respiratorio y dérmico, se hace posible ubicarla dentro de un factor clave para la aparición de enfermedades de origen ambiental. La problemática es que en las aguas residuales de origen municipal se encuentran materiales patógenos como bacteria, virus, protozoos y helmintos, estos organismos entran al agua, especialmente, por los desechos fecales tanto de humanos como animales (Chahal et al. 2016; Mori Del Aguila & Tello 2017; Organización mundial de la salud (OMS) 2018)
- En primer lugar, en este contexto se debe analizar los costes asociados a la salud pública por enfermedades relacionadas con el agua, por otro lado, si se efectúa un vertimiento directo o con un sistema ineficiente de tratamiento de aguas residuales se debe analizar también desde los usos debido a que la contaminación sufrida por el vertimiento, imposibilitaría su uso o demandaría mayor esfuerzo técnico y económico para su utilización, lo cual se traduce en pérdidas económicas. Asimismo, los usos del agua corresponden a una gran fuente de empleo y obtención de recursos monetarios, por tal razón una situación de esta magnitud significaría un gran golpe a la economía (BossTech n.d.; J. P. Rodríguez et al. 2016).
- Una gran parte de las aguas residuales son descargadas en cuerpos de aguas superficiales y uno de los principales efectos de esta actividad es la disminución de oxígeno disuelto en las aguas, el cual constituye un pilar indispensable para el mantenimiento de la vida acuática; asimismo la inserción de nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo puede conducir a procesos de eutrofización. Estos impactos estarán estrechamente relacionados con aspectos como la composición y concentración de los contaminantes y el volumen y frecuencia de dichos vertidos, de igual forma, afectando también su capacidad autodepurativa (Edokpayi et al. 2017; Quiroz et al. 2018).

Figura 1. Impactos de las aguas residuales no tratadas

Tomado de: Autor, 2022



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Como se evidenció en el anterior esquema, los impactos están conectados entre sí, pero debido a la definición de contaminación ambiental, este es un aspecto que de cierta manera se encuentra más fuertemente conectados con los otros evaluados en esta sección, en parte porque provienen de él. Al igual, el cuerpo receptor tiene muchas interconexiones con otros ecosistemas y vidas lo cual indica un riesgo mayor a nivel ambiental (Héctor Rodríguez 2017). La contaminación odorífera producto de la generación de malos olores originada por distintos procesos anaeróbicos, así como algunas sustancias, las cuales, evidentemente, son clasificadas como un olor desagradable. Los efectos en la salud de esta contaminación se centran en enfermedades respiratorias, pero al igual pueden presentar afecciones de salud tales como insomnio, mal humor, estrés, dolor de cabeza, náuseas, vómitos, pérdidas de memorias, entre otras, todo ello necesita atención, lo que significa un gasto económico (Ramos Rincón et al. 2018).

Al tener en cuenta la existencia de un número considerable de personas que practican la defecación al aire libre y que, aproximadamente, el 74% de la población mundial no lava sus manos al estar en contacto con excretas (Organización Mundial de la Salud (OMS) 2019), se ubica el problema en varias vías que pueden llevar patógenos a un nuevo hospedador, las cuales pueden ser reducidas con progresos en saneamiento, higiene y agua potable, lo anterior es representado a través del F-diagrama.

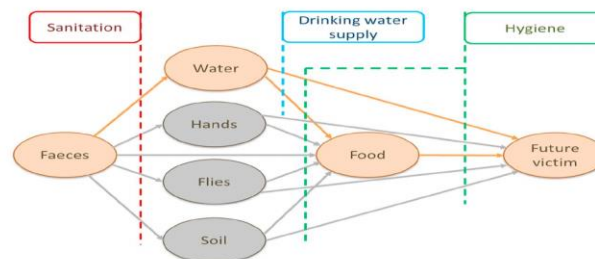


Figura 2. Diagrama F

Tomado de: (Guo et al. 2019)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



2. CONTEXTUALIZACIÓN: UN ANÁLISIS LOCAL SOBRE EL SANEAMIENTO EN LAS ZONAS RURAL DE CÓRDOBA



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



2.1. POBLACIÓN RURAL EN LOS MUNICIPIOS DE CÓRDOBA

El departamento de Córdoba limita con el mar Caribe por el norte; con los departamentos de Sucre y Bolívar por el este y por el occidente con el departamento de Antioquia. Dentro de su área se encuentran comprendido 30 municipios, siendo Montería su capital. Sus suelos están dedicados en un alto porcentaje a las actividades agropecuarias y es reconocido en el sector minero energético y por albergar gran variedad de fauna y flora dentro de él (Gobernación de Córdoba 2020).

De acuerdo con cifras entregadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE 2020), el departamento de Córdoba, para el 2018, contaba con un 47.48% de sus habitantes viviendo en zonas rurales y según las proyecciones calculadas por esta misma entidad, para 2022 ese porcentaje aumentará al 48.40% lo que deja entrever que un número cercano a la mitad de la población de este departamento reside en zonas rurales.

Los municipios que contaran con un mayor número de habitantes para este 2022 en zonas rurales son Tuchín, San Carlos, San Pelayo, Los Córdoba y Chimá; al analizar su población rural, superan el 70%. Al revisar la población de Montería que vive en zona rural, se logra evidenciar que equivale al 12% del total de la población rural en el departamento, lo cual indica una cifra representativa agregada por la capital. Se tiene que 26 de los 30 municipios presentan un porcentaje de población rural superior al 40% y al aumentar el criterio a “superior a 60%” también se registra un dato significativo, en donde 16 de los 30 municipios lo cumplen (DANE 2020a).

Por último, es notable la importancia de la ruralidad y la necesidad de focalizar estrategias, al considerar que la mayoría de los municipios tienen una fuerte presencia de habitantes que viven en áreas rurales.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



2.2.CONDICIONES SOCIOECONÓMICAS EN LAS ZONAS RURALES DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA

Con el fin de presentar las condiciones socioeconómicas de la zona rural dentro del departamento de Córdoba, se hará uso de tres indicadores calculados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), los cuales son: la medida de pobreza multidimensional, necesidades básicas insatisfechas y déficit habitacional estimados para el año 2018.

Para hacer un correcto análisis sobre el déficit habitacional es necesario revisar tanto el déficit cualitativo como el cuantitativo, siendo este último el de mayor gravedad porque supone la necesidad de la incorporación de una vivienda nueva debido a que no es posible realizar arreglos estructurales como si es el caso del cualitativo (DANE 2020b). La situación más neurálgica respecto al déficit cuantitativo es para el municipio de Canalete con un 89.99% donde la gran mayoría de sus habitantes habita en una vivienda en pésimo estado hasta tal punto que necesita ser cambiada; situación parecida se presenta en los municipios de Puerto Escondido y Valencia. Por otro lado, en cuanto a déficit cualitativo, el municipio de Sahagún con un 80.84% existiendo limitaciones dentro del hogar. En general, para la zona rural en los municipios del departamento de Córdoba, este aspecto presenta altas cifras para todos los municipios, incidiendo en la calidad de vida de la población en este sector (DANE 2020c).

En cuanto a la medida de pobreza multidimensional la situación es un poco más crítica y al tener en cuenta el gran número de criterios que ella tiene para su cálculo (5 dimensiones y 15 indicadores), es alarmante que únicamente cuatro municipios tienen un valor menor que 50%, pero se advierte que el municipio de Momil está muy cerca de este umbral con 49.9% (DANE 2020d). Dichas privaciones permiten conocer un porcentaje estimado de la pobreza en los municipios, lo cual afecta aspectos como el bienestar de la población; de igual forma estas privaciones obligan a continuar en la pobreza ya que no tiene acceso a



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



medios que les facilite salir de ella como la educación y a un trabajo digno (ConcernWorldwide US 2021).

Otra forma de hablar de pobreza es sobre las necesidades básicas insatisfechas y miseria, en donde una porción significativa en la zona rural se encuentra dentro de estas, resaltando municipios como Tuchín, San Andrés de Sotavento, Puerto Libertador, Puerto Escondido Canalete, Tierralta y Valencia para los cuales estos dos criterios presentan una alta puntuación (Necesidades básicas insatisfechas y miseria) (DANE 2021).

Los factores tomados para la evaluación de las condiciones socioeconómicas se encuentran fuertemente vinculados en la forma en que se calculan, pero estos presentan una situación de pobreza en el contexto rural para la gran parte de los municipios. La pobreza es un factor que involucra limitaciones y problemas de salud mental, por tanto, es un eje que debe estudiarse y buscar alternativas que permitan reducir estas limitaciones para toda la población en cualquier área (Knifton & Inglis 2020).

Haciendo uso de los criterios utilizados para la obtención de las cifras sobre la medida de la pobreza multidimensional, se seleccionaron algunas de estas que guardan estrecha relación en cuanto a temas de interés dentro del saneamiento básico, entre estas se tiene el hacinamiento, bajo logro educativo, barreras de acceso a servicios de salud, sin aseguramiento a la salud y trabajo informal, su elección está fuertemente ligada a los impactos que las aguas residuales tienen sobre la salud, el conocimiento del riesgo por la población, y la estabilidad económica.

De esta revisión, se deduce que, en términos de logro educativo, para todos los municipios se presentaron altas cifras en cuanto a bajo logro; en salud, las cifras fueron relativamente bajas relacionadas a barreras en acceso a esta, pero en aseguramiento se presentó un aumento, aunque ninguna de estas sobrepasa el 20%; en hacinamiento crítico, resaltan



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



municipios como Tuchín y Tierralta, y por último, en trabajo informal, en donde las cifras se mantienen en superior a 80% en todo los municipios (DANE 2020d).

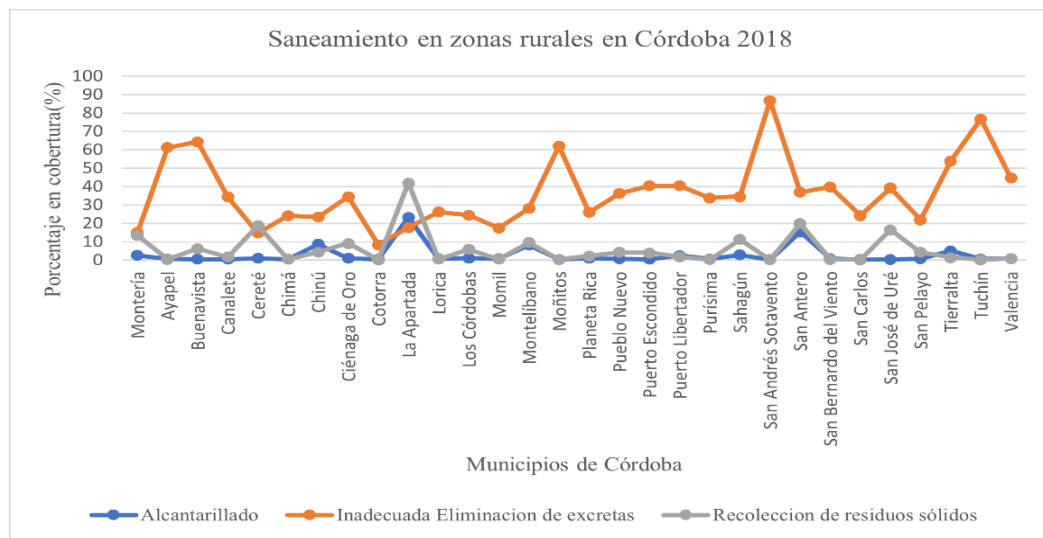
2.3. CONDICIONES DE SANEAMIENTO EN LAS ZONAS RURALES DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA

El saneamiento básico en una comunidad es un pilar indispensable para el buen vivir de la población debido a su relación con la salud, asimismo es de importancia para la población vulnerable como niños debido a que la falta de instalaciones seguras puede conducir a enfermedades diarreicas agudas que pueden afectar severamente a esta población (WaterForSouthSudan 2016). Con base a lo anterior, en esta sección se describirá a nivel municipal las condiciones de saneamiento en estas áreas geográficas. Para este ítem, se eligieron las variables de cobertura de alcantarillado, eliminación de excretas y la cobertura en recolección de residuos sólidos (Naughton & Mihelcic 2017).

Para las cifras relacionadas con la cobertura de alcantarillado, el 67% de los municipios, cuentan con una cobertura inferior al 1% y ninguno de estos tiene una cobertura superior al 25%, siendo el más alto el municipio de La Apartada con un 23,33% (DANE 2019). Son reconocidas las dificultades que se presentan a la hora de prestar el servicio de saneamiento en las zonas rurales, por tal razón se utilizó el criterio de eliminación inadecuada de excretas con el objetivo de tener una visión un poco más amplia en cuanto a saneamiento básico, pero esta muestra cifras relativamente altas para algunos municipios, como es el caso de San Andrés de Sotavento, Tuchín, Buenavista, Moñitos y Ayapel en donde más del 60% de su población no cuenta con un sistema adecuado para tratar sus excretas (DANE 2020d) .

El análisis del plan de desarrollo municipal de Montería, indicó que, al tener cifras deficientes en cuanto a cobertura de alcantarillado, un cierto número de viviendas opta por la defecación al aire libre (Alcaldía de Montería 2020); con gran similitud, el plan de desarrollo territorial del municipio de San Andrés de Sotavento, el cual registró el valor

más alto de inadecuada eliminación de excretas (86.7%), resalta la problemática ambiental sobre la aparición de enfermedades infecto contagiosas por la realización de las necesidades al aire libre en su municipio (Alcaldía de San Andrés de Sotavento 2020). Este análisis efectuado por estos dos documentos permite demostrar la existencia de una problemática que debe ser atendida y estudiada.



Gráfica 1. Saneamiento en zonas rurales de Córdoba 2018

Tomado de: DANE (2020,2021)

El transporte y manejo de las heces es una situación prioritaria para cualquier población, por lo cual se debe educar sobre la relevancia de contar con instalaciones seguras y su utilización, pero de igual forma se deben facilitar estas instalaciones. El objetivo de esta monografía es estudiar a los humedales artificiales con el fin de mostrarlos como una opción para su aplicación en las zonas rurales del departamento (Aluko et al. 2017).

2.3.1. Brecha entre las zonas rurales y urbanas en el acceso al agua y al saneamiento básico

La disparidad entre las áreas rurales y urbanas constituyen un punto negativo a la hora de alcanzar el desarrollo equilibrado como nación, es apoyado en esta idea y con la



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



disponibilidad de la información recolectada, que se efectuará un análisis sobre las brechas existentes en estas áreas (M. Wang, Kang, and Zhang 2020). Se discutirá sobre las variables del servicio de alcantarillado, acueducto, recolección de residuos sólidos, eliminación inadecuada de excretas y el no acceso a fuente de aguas mejoradas para las zonas tanto rurales como urbanas para todos los municipios del departamento de Córdoba. Lo anterior se realizará apoyado sobre una metodología de análisis correlativo, adecuada para este fin (Nguyen et al. 2020).

Las coberturas más bajas en agua y saneamiento, en su mayoría, se localizan en las zonas rurales, notándose una clara diferencia entre estas zonas, que permite concluir la existencia de una gran brecha entre estas dos áreas geográficas para los municipios; lo anterior es descrito por los números encontrados entre las coberturas, que, por lo general, se encuentra bastante alejadas y en algunos casos extremos, la separación salta de porcentajes menores a 20% a superiores de 90% lo cual es bastante diciente sobre la desigualdad encontrada. Un aspecto que se debe mencionar es acerca de la inadecuada eliminación de excretas, en donde la brecha favorece en varias ocasiones a las zonas rurales, siendo la situación más crítica en las zonas urbanas, pero esto obedece a una problemática mayor relacionada con el acceso a alcantarillado en estas zonas.

Al analizar las variables estudiadas en este subcapítulo con el porcentaje de población que se encuentra viviendo en zonas rurales a través del coeficiente de correlación Pearson con ayuda de Microsoft Excel y lo estudiado por Espinosa et al. (2018) se encontró que el alcantarillado y recolección de basura presenta una correlación fuerte de -0.866 y -0.937 respectivamente, indicando que, a lo que se aumenta la población rural, disminuye la cobertura de estos elementos; para el caso de inadecuada eliminación de excretas, se presentó la correlación más baja con un 0.422 lo que, claramente, se ve alterado por valores mayores en las zonas urbanas.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Asimismo, se presenta una correlación bastante interesante en las demás variables que, aunque sea menor, si representa un influencia a tener en cuenta, en donde el acueducto es de -0.494 y sin acceso a fuentes de agua mejorada es de un 0.477 lo que significa una correlación moderada, pero esta se ve influenciada por los valores mayores en la zona rurales y urbanas en comparación con los de mayor correlación lo que favorece a resultados más alto en el total; aun así es evidente que en acueducto existe una correlación negativa y la de sin acceso a fuentes, una positiva, lo que permite afirmar que la desfavorabilidad en temas sobre agua se ve marcado por el número de población rural.

El acceso a agua segura, saneamiento e higiene son elementos indispensables en la atención y prevención de enfermedades como el Covid-19, de esta manera se debe potencializar estos elementos en poblaciones vulnerables estableciendo barreras que impidan la infección del virus (Donde et al. 2021; Marcos-Garcia et al. 2021); con base en lo identificado en el análisis anterior, se puede afirmar que la situación es crítica en las áreas rurales debido a que la correlación favorecía de cierta manera a la población urbana.

Es claro que la ruralidad presenta un gran peso en cuanto a cobertura de saneamiento y que se debe trabajar en mejorar tanto en zonas rurales como urbanas al aumento de este, pero al ser tan evidente el alto porcentaje de población en el sector rural que se ve limitado crece la preocupación acerca de culturas de aseo, uso y estado de los sistemas considerados como aceptables en la eliminación de excretas lo que obliga a revisar tecnologías que de manera adecuada favorezcan a reducir el número de habitantes privados de un sistema adecuado de tratamiento de aguas residuales domésticas. El siguiente grupo de graficas muestra la correlación entre las zonas rurales y las coberturas de agua y saneamiento básico, lo cual permite mejorar la comprensión entre lo explicado en esta capítulo

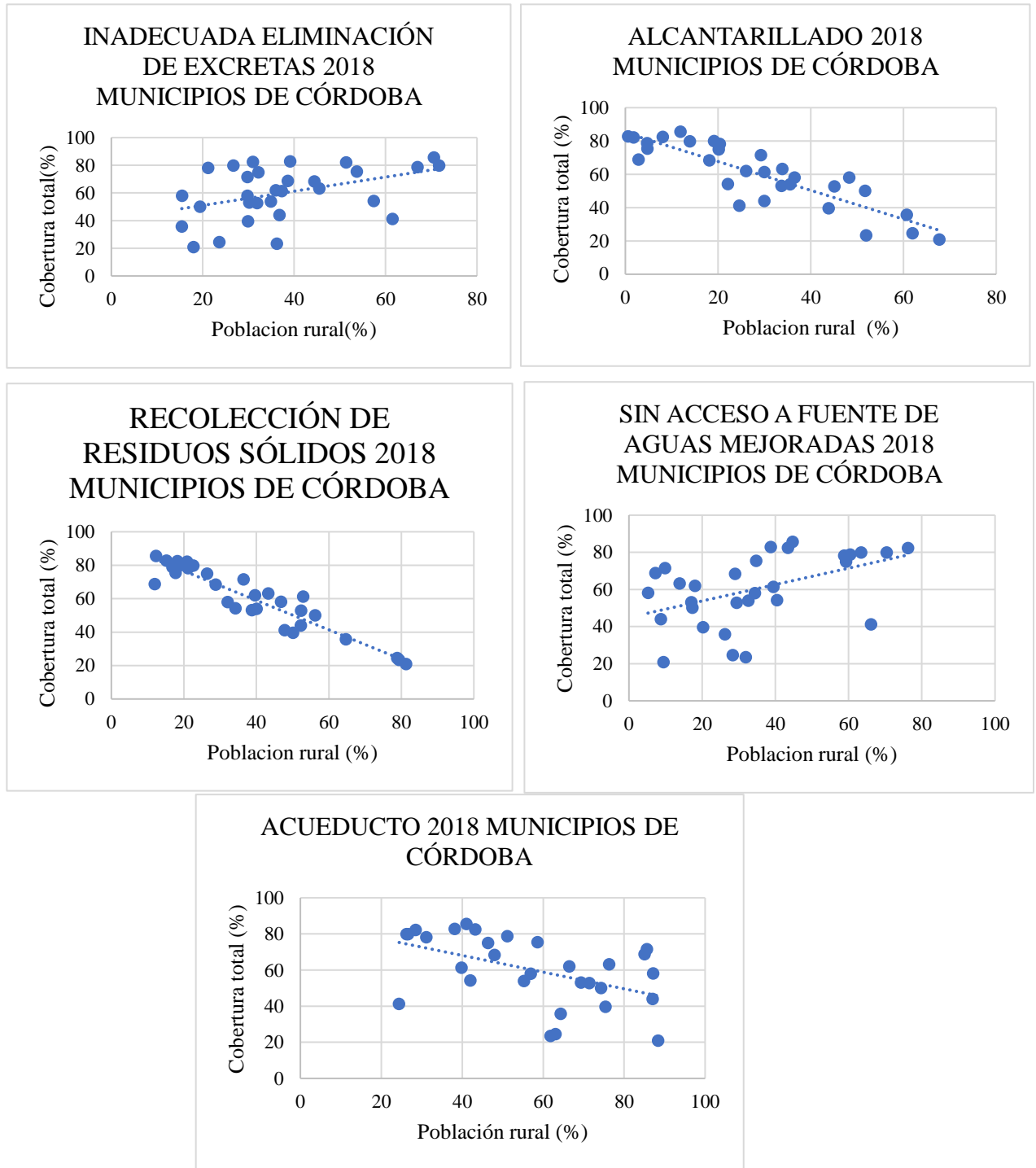


"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Gráfica 2. Gráficas de dispersión entre población rural y cobertura

Tomado de: Autor 2022



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



2.4. CONSIDERACIONES FINALES Y LIMITACIONES

Como es posible observar a lo largo de la lectura de este capítulo la información se extrajo del Departamento administrativo estadística nacional con datos del 2018, es por tanto factible que la información este ligeramente diferente en la actualidad, como es el caso de Montería; pero aun así es de señalar que es un registro que desagrega entre el total, y zonas urbanas y rurales para todos los municipios del departamento de Córdoba permitiendo hacer un radiografía confiable que brinda apreciaciones correcta sobre el estado del saneamiento en Córdoba (Alcaldía de Montería 2021).

Con relación a lo antes planteado y para ampliar y soportar la información se revisó el plan departamental territorial de Córdoba (2020) en los componentes de Agua y saneamiento arrojando preocupaciones referentes a las diferencias entre cobertura para las áreas urbanas y rurales, la continuidad del servicio de acueducto y el estado de los sistemas de tratamientos de aguas residuales guardando esto relación con lo analizado en este documento.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



3. PRESENTACIÓN DE UNA SOLUCIÓN BASADA EN LA NATURALEZA PARA LA GESTIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LAS ZONAS RURALES DE CÓRDOBA



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



3.1. HUMEDALES ARTIFICIALES

A lo largo de las secciones anteriores se ha discutido acerca de los impactos de las aguas residuales sobre la salud, el ambiente y la economía, pero del otro lado, se debe mencionar su utilidad en la determinación de sustancias de abuso (Bijlsma et al. 2018) y en su reutilización apoyada en la economía circular (Salgot & Folch 2018). Las anteriores actividades, están fuertemente basadas en un correcto control y tratamiento de las aguas residuales.

De manera similar, se ha expuesto acerca de una situación problema referente al tratamiento de las aguas residuales en zonas rurales en el departamento de Córdoba, lo anterior obliga al estudio de nuevas tecnologías que se alejen de los sistemas convencionales y que permitan de manera sustentable la eficiencia en el tratamiento, adaptándose a nivel operativo, técnico, económico y a las condiciones geográficas de estas y otras zonas que deseen implementarlo para su utilización en la limpieza de aguas residuales domésticas (Kweinor Tetteh et al. 2019).

Con base en lo anterior, los humedales artificiales son una tecnología que basada en la naturaleza cumple los requerimientos antes descritos (Machado et al. 2017). Los humedales artificiales corresponden a un fitotratamiento que, con el mismo principio de la fitorremediación, emplea macrofitas en infraestructura construida con el objetivo de propender la purificación del agua residual al imitar los procesos de los humedales naturales (Bakhshoodeh et al. 2020). Su clasificación está dada según criterios como la exposición del agua a la atmósfera, su movimiento dentro del sustrato, y el tipo de vegetación a utilizar; sin importar el tipo de humedal, se hace necesario considerar el afluente a tratar, la especie a utilizar y criterios hidráulicos (Delgadillo et al. 2010).

De acuerdo con lo estudiado por ElZein et al. (2016), humedales artificiales son un tratamiento sostenible y descentralizado que puede ser utilizado en comunidades, trayendo consigo beneficios a nivel económico, ambiental y social que son perfectos para países que se encuentren en vías de desarrollo, mejorando la calidad de vida de sus habitantes



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



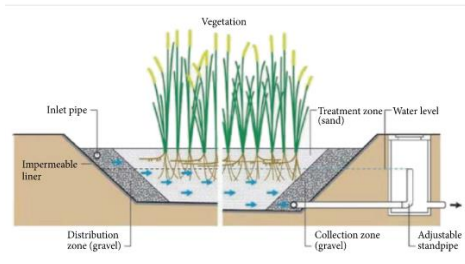
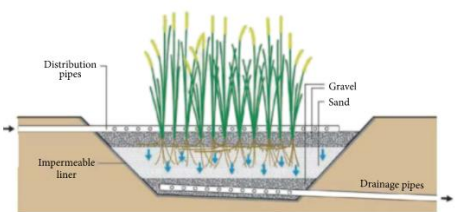
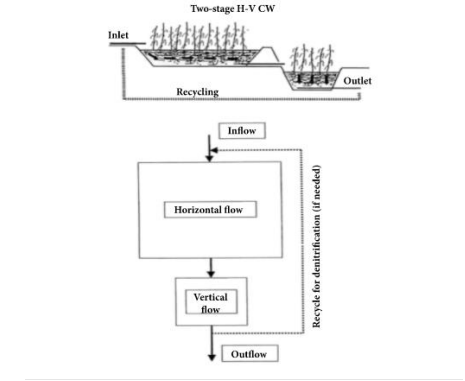
Figura 3. Humedales artificiales

Tomado de: (Biomatrix Water 2021)

3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

La clasificación estudiada dentro de este apartado obedece a la ubicación donde se encuentre el agua dentro de la infraestructura; en ese orden de ideas, figuran dos clasificaciones: la primera, es de flujo libre, en el cual el agua se encuentra expuesta a la atmósfera, es decir, no atraviesa el sustrato; por otra parte, los humedales subsuperficiales, el agua se va abriendo camino a lo largo del humedal por la matriz. Para el caso de estos últimos, existe una subclasificación que está condicionada de acuerdo con la dirección del agua (Almuktar et al. 2018).


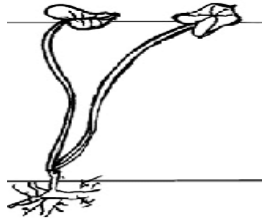


Tabla 1. Clasificación de humedales artificiales subsuperficial

Nombre	Descripción	Imagen
<p>Horizontal</p>	<p>El agua es llevada al humedal y esta fluye de manera horizontal a través del sustrato, atravesando zonas aerobias, anóxicas y anaerobias.</p> <p>Es muy eficaz para eliminar materia orgánica y sólidos en suspensión</p>	
<p>Vertical</p>	<p>En esta tecnología el agua es filtrada de manera vertical por el sustrato caracterizado porque el proceso se produce de manera intermitente.</p> <p>La eficiencia de eliminación de DBO, DQO, patógenos son más altas que el horizontal</p>	
<p>Hibrido</p>	<p>Es posible aprovechar las ventajas que ambos sistemas tienen, por tal razón el sistema híbrido corresponde a una combinación de los dos sistemas anteriores. Con esta unión se han logrado resultados favorables en la remoción de contaminantes</p>	

Tomado de: (Makopondo et al. 2020)

Los humedales de flujo libre al no ser dependiente del sustrato, su clasificación está determinada al tipo de macrofita usada para el proceso de tratamiento.

Tabla 2. Clasificación de humedales artificiales superficiales

Nombre	Descripción	Imagen
Emergentes	Gran parte de la planta crece fuera del agua y esta se encuentra sujeta al sustrato	
Hoja flotante	Sus hojas se encuentran a la altura de la superficie del agua y suelen ser hojas de tipo circular o elíptica	
Flotantes	La planta se encuentra en la superficie, pero no se encuentra atada al sustrato	
Sumergidas	La planta se encuentra dentro del agua, es decir, por debajo del nivel del agua	

Tomado de: (Ausable River Association n.d.; Jones et al. 2016)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Existen otros tipos de humedales artificiales que corresponde a mejoras en la infraestructura con el fin de facilitar la eliminación de los contaminantes, es decir utilizan los tipos tradicionales y emplean nuevas técnicas, como por ejemplo, la aireación (Wu et al. 2015). Por otro lado, los sistemas convencionales presentan diferencias que deben conocerse para su implementación

Tabla 3. Comparación de los tipos de humedales artificiales

Tipo de Humedales	Flujo Superficial	Subsuperficial (Horizontal)	Subsuperficial (Vertical)
Diseño	Simple, requiere una gran área de terreno	Complejo, requiere menor área que el superficial, debe tener tratamiento primario	Complejo, requiere menor área que el horizontal, debe tener tratamiento primario
Operación	Bajo costo, simple operación, alta evapotranspiración	Mayor sorción, costo de operación relativamente más alto, flujo con bajo contenido de sólidos, solo transpiración	Mayor sorción, costo de operación relativamente más alto, flujo con bajo contenido de sólidos, solo transpiración
Mantenimiento	Muy afectado por la temperatura, olor y mosquito, bajo costo de mantenimiento	Mayor tolerancia al frío, menos olor y plagas, problemas de obstrucción, mayor costo de mantenimiento	Mayor tolerancia al frío, menos olor y plagas, problemas de obstrucción, mayor costo de mantenimiento

Tomado de: (Hassan et al. 2021)

De acuerdo con lo observado en la tabla anterior, el diseño y construcción de los humedales difiere notablemente entre superficiales y subsuperficiales; por lo que sus procesos



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



principales de remoción igual. Para los Humedales superficiales son sedimentación, precipitación, descomposición y consumo, y para los humedales subsuperficiales, descomposición, filtración, consumo y adsorción (Fu et al. 2018).

3.3. COMPONENTES DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL

La eficiencia en la remoción de contaminantes en los humedales se basa en la interacción y mantenimiento de sus componentes, por lo cual son factores que se deben revisar con cuidado si se desea implementar este tipo de tecnologías (Lu, Pei, and Bai 2015). Dentro de los humedales artificiales, se encuentran cuatro elementos importantes: el agua, sustrato, la vegetación y los organismos; Cualquiera que sea el tipo de humedal estos tienen las características de presentarse en zonas cercanas o con agua, por tanto, en este caso el agua residual constituye un elemento a considerar, el cual fue estudiado y analizado en capítulos anteriores (Oscar Omondi & Caren Navalía 2021).

3.3.1. Sustrato

El efecto combinado de los elementos que componen un humedal se da de manera simultánea en la eliminación de contaminantes, en este apartado se estudiará el sustrato como un factor clave en diferentes procesos de remoción (Y. Wang et al. 2020). Es de señalar que las categorías y disposición del sustrato repercute en el oxígeno disuelto, hidroperiodo, crecimiento vegetal y microbiano, lo que a su vez es importante en la eliminación de materia orgánica, sólidos suspendidos y nutrientes (Ji et al. 2021). Las principales funciones de un sustrato se describen en el esquema siguiente.

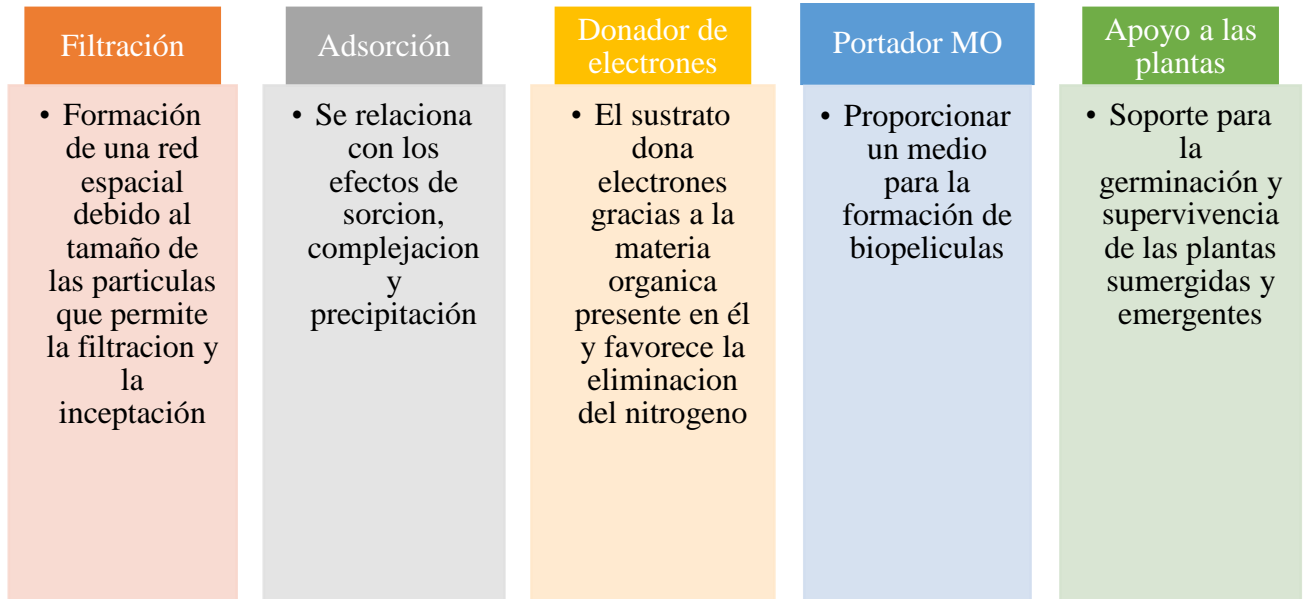


Figura 4. Funciones del sustrato dentro de un humedal

Tomado de: (Ji et al. 2021)

Existen tres categorías del material del sustrato que son: Productos naturales, hechos por el hombre y subproductos industriales (Mustafa & Ali 2019). Teniendo en cuenta que el sustrato significa un costo, la utilización de elementos proveniente de subproductos constituye un ahorro significativo (H. X. Wang et al. 2018). En la tabla siguiente se ofrecen ciertos subproductos utilizados y sus ventajas y desventajas.

Tabla 4. Sustratos provenientes de subproductos

Sustrato	Ventaja	Desventaja
Biochar	Alta porosidad, económico, mejora la eliminación de nutrientes, reduce la emisión de N ₂ O	Propiedades muy variables
Residuos de construcción	Facilita el crecimiento de las plantas y microorganismos, sorción de P	El producto es cambiante.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Sustrato	Ventaja	Desventaja
Astillas de llantas	Barato, abundante, buena retención de nitrato y fosforo	Toxicidad en plantas
Paja de arroz	Sin contaminantes secundarios, fuente de carbono, económico	Su recolección es laboriosa y su disponibilidad está ligada al tiempo de cosecha
Astilla de madera	Abundante, fuente de carbono, buena eficiencia en eliminación de compuestos nitrogenado	
Plástico polietileno	Alta porosidad, reduce la obstrucción	

Tomado de: (Yang et al. 2018)

Zamora et al. (2019) evaluó 16 celdas de humedales artificiales en las que se encontraban una combinación de sustratos (incluyendo material plástico) junto con plantados y no plantados, los hallazgos encontrados indican que la utilización de plantas mejoró la eficiencia en la eliminación y la unidad que contaba con el arreglo con plástico presentó una remoción parecida a la unidad de control, asegurando que el uso del plástico como sustrato es una alternativa viable, lo que concuerda con los resultados de Saraiva et al. (2018). De igual forma, han sido resaltados productos más orgánicos como el biochar (Deng et al. 2021) y madera (Wu et al. 2014) con alta eficiencia en la eliminación de materia orgánica y nutrientes.

Entre los criterios principales para la elección de un sustrato se encuentran el costo, la disponibilidad local y el tamaño de las partículas (Y. Wang et al. 2020). En la tabla que se



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



muestra a continuación se presenta información relacionada con los tipos de materiales más comunes utilizados en los humedales artificiales y propiedades hidráulicas de importancia para los mecanismos de remoción.

Tabla 5. Principales sustratos utilizados en los humedales artificiales

Tipo de material	Tamaño efectivo, mm	Porosidad (n)%	Conductividad hidráulica Ks(m³/m²/d)
Arena gruesa	2	28-32	100-1000
Arena gravosa	8	30-35	500-5000
Grava fina	16	35-38	1000-10000
Grava media	32	36-40	10000-50000
Roca gruesa	128	38-45	50000-250000

Tomado de: (Rabat Blasquez 2016)

3.3.2. Vegetación

Diferentes especies de plantas han sido utilizadas para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales mostrando éxitos en la remoción de metales y contaminantes de interés (Bathia and Goyal 2013). Dentro las funciones de las plantas acuáticas se encuentran absorción de nutrientes y eliminación de contaminantes, producción de oxígeno, reducción del impacto de la radiación solar, aumento en la porosidad del sustrato y apoyar en la generación de un ambiente agradable para el desarrollo de microorganismos, además aportando un valor estético al humedal (Kochi et al. 2020).

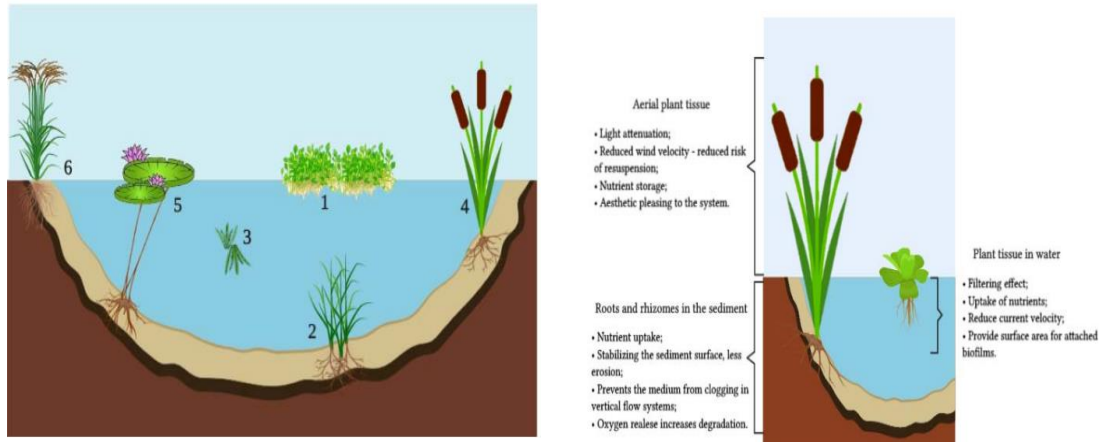


Figura 5. Tipo de macrófita

Tomado de: (Kochi et al. 2020)

Descripción; La hidrófita utilizada en los humedales artificiales se puede clasificar en flotante (1), arraigada sumergida (2), sumergida libre (3), emergente (4), sumergida con hoja flotante (5), anfibia (6)

Según Opitz et al. (2021), los efectos de las plantas en los humedales artificiales se pueden agrupar en filtración, bioquímicos, fitológicos, ambientales e hidráulicos. La elección de la macrofita debe ser un punto clave y crucial dentro del diseño del humedal, la planta debe adaptarse a situaciones climáticas severas, al anegamiento-anóxico, y a situaciones hiper-eutróficas (Rahman et al. 2020). En la tabla 5 se presenta información sobre algunos tipos de plantas y aspectos claves



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"






UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Tabla 6. Plantas utilizadas en los humedales artificiales

Nombre común	Nombre científico	Profundidad radicular	Imagen
Jacinto de agua	Eicchornia Crassipes	0,2 m	
Totora	Typha angustifolia	Más de 30 cm	
Pasto Alemán	Echinochloa polystachya	60 cm	
Lenteja de Agua	Lemna minor	<10mm	
Lechuga de Agua	Pistia stratiotes	0,2 m	





"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Nombre común	Nombre científico	Profundidad radicular	Imagen
Lentejuela de Agua	Salvinia minima	<10mm	
Lirio Amarillo	Iris Pseudoacoru	15 cm	

Tomado de:(Granados 2018)

La macrofita comúnmente usada para los humedales horizontales son *Phragmites* sp., *Typha* sp., *Scirpus* sp., *Phalaris arundinacea*, e *Iris* sp.; para los verticales, *Phragmites australis*, *Typha* sp., *Echinochloa pyramidalis* y en los superficiales, *Scirpus* sp., *Eleocharis* sp., *Cyperus* sp., *Glyceria maxima*, *Juncus* sp., *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea*, and *Typha* sp (Gorgoglione and Torretta 2018).

3.3.3. Microorganismos

La presencia de nitrógeno, nitrógeno amoniacal, nitrato y materiales carbonosos en los humedales artificiales que entran por las aguas residuales permite el desarrollo de los microorganismos debido a que son su fuente de alimento (Zhai et al. 2012), ocupando un puesto de impacto dentro del ciclo biogeoquímico que se dan en el ambiente de los humedales artificiales. Las bacterias, hongos y algas son fundamentales en la eliminación de

contaminantes orgánicos y su presencia en la matriz está determinado de acuerdo con la presencia de oxígenos en zonas anaeróbicas y aeróbicas que confluyen en la eliminación de contaminantes (Rajan et al. 2019).

Los roles que cumplen los microorganismos dentro de los humedales son: Fijación del nitrógeno, degradación de contaminantes orgánicos y remoción de metales pesados; por tanto se entiende que los microorganismos son de especial interés dentro de la eliminación de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos que pueden estar presentes en las aguas residuales (Shahid et al. 2020).

Según Ma et al. (2018) identificar la comunidad microbiana presente en los humedales ayuda a la hora de evaluar la remoción de contaminantes en el agua residual doméstica. Entre las bacterias más comunes encontradas en los humedales artificiales son Proteobacteria, Chloroflexi, Bacteroidetes, Acidobacteria, Cyanobacteria, Nitrospirae, Planctomycetes, Actinobacteria, Firmicutes, Chlorobi, Spirochaetae, Gemmatimonadetes, Deferribacteres, Nitrospira (Guan et al. 2015).

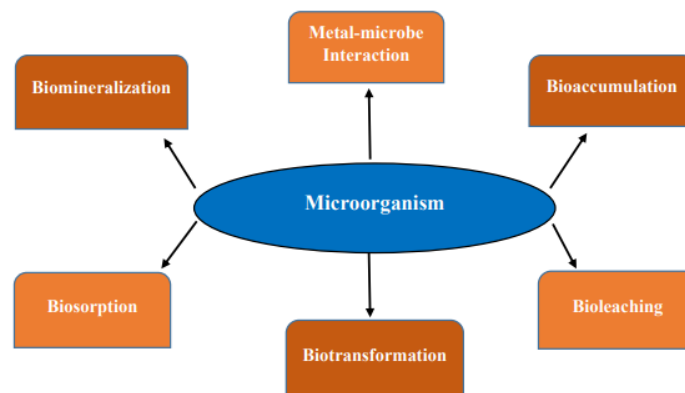


Figura 6. Procesos de eliminación de contaminantes por microorganismos



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Tomado de: (Hussain et al. 2018)

3.4. PURIFICACIÓN DEL AGUA RESIDUAL MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES

Como cualquier otro tratamiento de las aguas residuales, los humedales artificiales funcionan con el principio básico de remover los contaminantes presentes en el afluente con el objetivo de obtener efluentes más limpios para su posterior descarga en cuerpos receptores, reduciendo la contaminación de estos y preservando sus usos futuros (Britannica Online Encyclopedia 2021). Lo anterior, en los humedales artificiales, se da gracias a procesos físicos, químicos y biológicos debido a la interacción de los diferentes elementos existentes en los humedales (Zhang et al. 2021). Debido a la complejidad de estos fenómenos que ocurren dentro del humedal, se presenta la siguiente tabla, la cual resume y organiza los mecanismos y el contaminante que elimina, así como los posibles factores por los cuales se puede ver limitada.

Tabla 7. Mecanismo de eliminación de contaminantes

Proceso	Tipo	Contaminantes	Factores que la afectan
Sedimentación	Físico	Sólidos suspendidos, Materia orgánica particulada, patógenos	Flujo del agua, porosidad del sustrato, tiempo de retención, vegetación
Filtración	Físico	Sólidos suspendidos, Materia orgánica particulada, patógenos	Flujo del agua, porosidad del sustrato, tiempo de retención, vegetación



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Proceso	Tipo	Contaminantes	Factores que la afectan
Precipitación	Químico	Coloides, nutrientes, orgánicos solubles	pH, temperatura
Adsorción	Químico	Nutrientes	pH, temperatura
Volatilización	Químico	Orgánicos, materia volátil, gases	Temperatura
Descomposición	Biológico	Materia orgánica	Sustrato orgánico, pH, temperatura
Absorción por la planta	Biológico	Fosforo, Nitrógeno, materia orgánica soluble	Tipo de planta, capacidad de absorción
Fermentación	Biológico	Materia orgánica	pH, Temperatura

Tomado de: (Kataki et al. 2021)

Como se ha observado en la anterior tabla tanto fenómenos hidráulicos como ambientales, pueden comprometer la eliminación del contaminante en cuestión. Por ejemplo, la influencia de la temperatura y el pH juega un importante rol dentro de estos sistemas de tratamiento debido a que impacta tanto a la macrófita, sustrato y microorganismo presentes en estas estructuras (Varma et al. 2021).

3.4.1. Mecanismo de eliminación de contaminantes

La presencia de elementos extraños dentro de las aguas residuales, las cuales, claramente, comprometen su calidad y al contemplar los impactos que se tiene en diversos contextos por



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



el mal manejo de estas, se hace necesario revisar los mecanismos a utilizar por los humedales construidos en la remoción.

En primer lugar, se estudiará a la materia en suspensión, de esta se destaca la filtración, y se da gracias que al entrar el agua en los humedales su velocidad decae, lo que obliga a una separación de las partículas y a un movimiento lento ocasionado por la presencia de poros en el sustrato, el cual funciona como filtro reteniendo las partículas. Las que son más gruesas empiezan a sedimentarse y las menos gruesas comienzan un viaje dentro del humedal hasta que se sedimentan (Aguilar 2019). Los humedales artificiales tienen una alta eliminación de sólidos gracias a la retención y filtración por el medio poroso, pero se debe advertir una inevitable colmatación (Vymazal 2019). Otro proceso del que se debe hacer mención durante la eliminación de los sólidos en suspensión corresponde al de floculación, en donde gracias al viaje que realiza las partículas por el humedal estas comienzan a agruparse hasta el punto de comenzar a sedimentarse (M. T. A. Herrera et al. 2018). En la imagen siguiente se muestra como la raíz de la planta y la matriz filtran los contaminantes en el agua

La materia orgánica particulada se elimina por procesos físicos asociados con el material en suspensión y otra parte es fraccionada por procesos abióticos volviéndose parte de la disuelta; la cual está vinculada a procesos bioquímicos (Roig 2014). Para dichos procesos se identifican dos ambientes ligados a la disponibilidad de oxígeno disuelto; en primer lugar, se tiene a la digestión aerobia, en donde las bacterias heterotróficas aeróbicas oxidan la materia orgánica empleando al oxígeno como aceptor de electrones (M. T. A. Herrera et al. 2018).

Dentro de la degradación anaerobia, se da una serie de procesos originando la conversión de la materia orgánica por bacterias (Adelere et al. 2016), comenzando por la hidrólisis en donde se convierte componentes complejos, en otros más sencillos, los cuales pueden ser utilizado

por los microorganismos. El resultado de esta transformación es aprovechado por las bacterias acidogénicas produciendo ácidos grasos y otros productos; en la siguiente etapa los ácidos grasos son convertidos a acetato, este proceso es conocido como acetogénesis y como último escalón, se encuentra a la metanogénesis aquí los microorganismos metanogénicos convierte a los productos posibles a metano (Meegoda et al. 2018). Considerando la interacción de los procesos y la relación con los productos que se generan en cada fase, se opta por la presentación de un recurso gráfico que esquematice las etapas

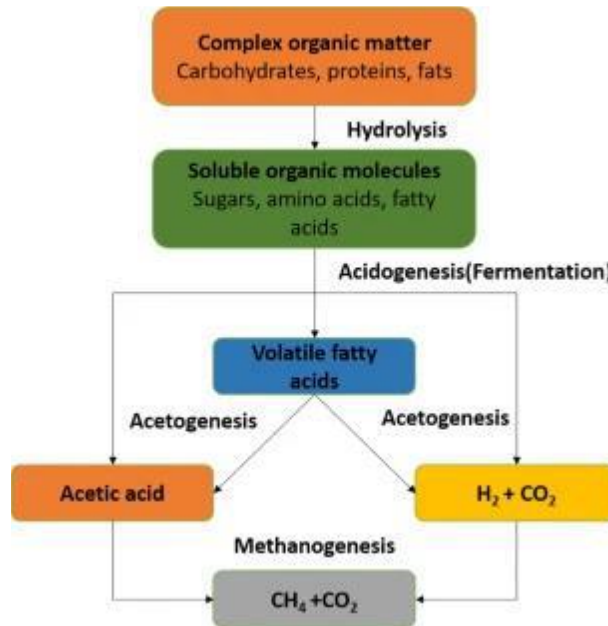


Figura 7. Esquema del proceso de digestión anaerobia

Tomado de: (Mothe and Polisetty Rao 2020)

Para el caso del nitrógeno, las vías de eliminación constituyen volatilización del amoníaco, nitrificación, desnitrificación, fijación del nitrógeno, asimilación por la planta y microbiota,



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

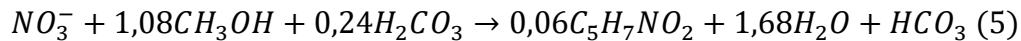
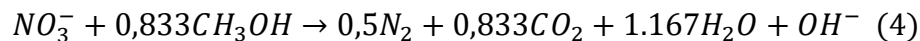
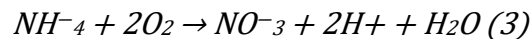
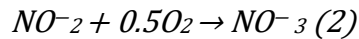
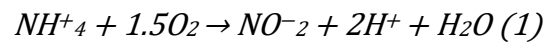
INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



mineralización, reducción de nitratos a amonio, oxidación anaeróbica del amoniaco y adsorción; La amonificación seguida por la nitrificación-desnitrificación son las principales vías de eliminación (Arteaga-Cortez et al. 2019).

La nitrificación consiste en un proceso aeróbico que por medio de una conversión biológica transforma los compuestos de nitrogenados orgánicos e inorgánicos a un estado más oxidado obteniendo como producto final nitratos; seguida de la oxidación del amonio al nitrito y luego este se oxida a nitrato; en la desnitrificación se obtienen productos tales como óxido nitroso y gas nitrógeno y en donde estos gases son devueltos a la atmosfera y se explica gracias al proceso de reducción bioquímica de nitrógenos oxidados, nitratos y nitritos en condiciones anaeróbicas (Yadav 2019). A continuación, se presentan un grupo de ecuaciones correspondientes a cada proceso.



Ecuaciones de nitrificación (1-3) y desnitrificación (4-5)

Tomado de: (Rana & Maiti 2020; Xie et al. 2018)

La eliminación del fósforo se da gracias a precipitación, actividad microbiana y asimilación por la planta (Dell'Osbel et al. 2020), por lo que el gran porcentaje de remoción de este contaminante se da debido al sustrato y a la planta (Quan et al. 2016).

Con el ánimo de ofrecer un entendimiento más completo acerca de la remoción de la materia orgánica y la eliminación del nitrógeno, se presenta los siguientes esquemas, los cuales constituyen un resumen de los procesos, los elementos del humedal presente, y el contaminante,

es de aclarar pertenecen a un balance de masa

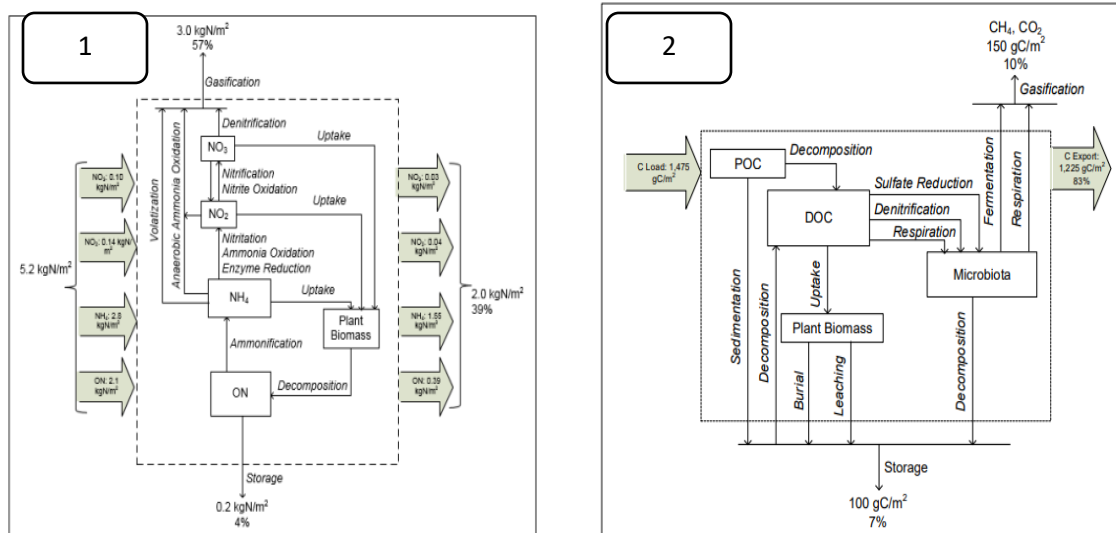


Figura 8. AFM de las rutas de eliminación de nitrógeno (1) y Materia orgánica (2)

Tomado de: (Chakraborti and Bays 2020)

Sedimentación, adsorción, radiación ultravioleta, excreción de biocidas por las plantas, y depredación por algunos microorganismos constituyen ciertos mecanismos que los humedales artificiales usan para la eliminación de patógenos dentro del sistema (Stefanakis and Akratos 2016). Los microorganismos como los huevos de helmintos y otros protozoos y bacterias con baja velocidad son susceptibles a empezar un proceso de sedimentación en los humedales; la adsorción se da cerca de la zona de la raíz y está vinculada a la interacción de los elementos del humedal tales como las raíces de las plantas, el sustrato y la microbiota que la acogen; la radiación ultravioleta asociada con el oxígeno disuelto tiene un efecto directo en las bacterias coliformes y la liberación de antibiótico por ciertas plantas a través de sus raíces (Alufasi et al. 2017). En la figura siguiente se esquematiza lo antes descrito

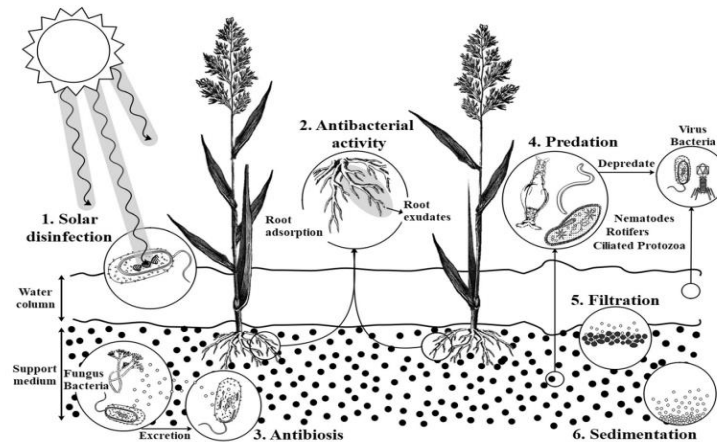


Figura 9. Procesos de remoción de microorganismos

Tomado de: (López et al. 2019)

3.5. DISEÑO E IMPLEMENTACION DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Con el objetivo claro de que cada vez un número mayor de personas cuente con servicio de agua potable y saneamiento, las ecotecnologías empiezan a jugar un rol importante, especialmente, en zonas vulnerables, al requerir menos costos de inversión, operación y mantenimiento, una huella considerablemente menor y una buena eficiencia de remoción (Rene et al. 2019). En vista de esta situación, la implementación de los humedales artificiales representa una alternativa viable en donde es imperativo revisar las interacciones entre cada elemento de la ecotecnología lo que se vincula a un correcto diseño de estas infraestructuras. Por tanto, para favorecer un buen diseño Kadlec y Wallace (2008) propone un algoritmo básico que permite ilustrar de manera general el proceso de diseño de los humedales:

1. Determine las concentraciones y los flujos de entrada.
2. Determine las concentraciones objetivo (límites reglamentarios y factores de excedencia permitidos).
3. Determine las tasas de entrada y filtración permitidas.

4. Determine la lluvia, ET y rangos de temperatura para el sitio del proyecto.
5. Seleccione el tipo de humedal (FWS o SSF).

Las etapas 3 y 4 están muy condicionadas al sitio y ubicación del humedal, ya que dependiendo de las condiciones del suelo, topografía y clima pueden interferir en la entrada y salida del agua del humedal (Dauda Ahmed et al. 2021). En el siguiente esquema permite explicar los factores y su relación con el diseño de humedales artificiales.



Figura 10. Factores para tener en cuenta en la elección del sitio

Tomado de: (Kadlec, Robert H.; Wallace 2008)

3.5.1. Balance de Masa: Hidráulica e Hidrología en humedales artificiales

La estación del año y el clima del sitio generan alteraciones en la eficiencia de los humedales, en parte por factores como la temperatura y precipitación (Wang et al. 2019). Queluz et al. (2018) expresa la dependencia de la eficiencia de los humedales en la eliminación de



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



contaminantes con el ciclo hidrológico, expresando que las pérdidas debido a la evapotranspiración y ganancias por la precipitación en los humedales debe ser tenidas en cuenta.

En la evapotranspiración, se da una liberación de sustancias a la atmósfera, principalmente, en zonas cálidas y ventosas, en donde este fenómeno reduce el flujo volumétrico en las aguas residuales, lo que significa un aumento en el tiempo de retención hidráulica y contaminantes no degradables contenidos en el afluentes (Milani et al. 2019) por otra parte, la precipitación altera la química del agua y que se presente una mayor dilución, afectando el tiempo de retención y por tanto, la remoción de nutrientes y de sólidos (Travaini-Lima & Sipaúba-Tavares 2012).

En la siguiente tabla se muestra factores relacionados con el clima del lugar que pueden influir en el volumen y aspectos hidráulicos del humedal.

$$Q_i - Q_o + Q_c - Q_b - Q_{gw} + Q_{sm} + (P \times A) - (ET \times A) = \frac{dV}{dt}$$

A= Área de la superficie superior (m²)

ET= Tasa de evapotranspiración (m d⁻¹)

P= Tasa de precipitación (m d⁻¹)

Q_b=Filtración superficial(m³d⁻¹)

Q_c =Tasa de escorrentía (m³ d⁻¹)

Q_{gw}= Infiltración de agua subterránea(m³d⁻¹)

Q_i=Caudal de entrada(m³d⁻¹)

Q_o=Caudal de salida (m³ d⁻¹)

Q_{sm}=Tasa de deshielo (m³ d⁻¹)

t= tiempo(d)

V=Volumen de agua almacenado en el humedal



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Tabla 8. Ecuaciones de balance de masa dentro de los humedales artificiales

Factor	Ecuación	Parametro
Precipitación	$Q = \Psi P A_c$	Q_c =Tasa de escorrentia (m ³ d ⁻¹); A_c =Area de captación, no incluye el area del humedal (m ²); Ψ =coeficiente de escorrentía, 1 si es impermeable(adimensional); P = precipitación (m)
Evapotranspiración	$ET = \frac{Q_i}{A} + P - \frac{Dv}{A}$	ET = evapotranspiración (m d ⁻¹); Q_i =caudal entrante (m ³ d ⁻¹); A =área del humedal (m ²); P precipitación neta (m d ⁻¹); Dv volumen de descarga (m ³ d ⁻¹)
Filtración superficial	$Q_b = \lambda L_b (H - H_s)$	Q_b =Filtración superficial (m ³ d ⁻¹); H = elevación del agua del humedal (m); H_s = elevación de agua exterior, (m); L_b = longitud de la berma (m); λ = coeficiente empírico (m d ⁻¹)
Infiltración	$Q_{gw} = kA \left(\frac{H_w - H_{lb}}{H_{lt} - H_{lb}} \right)$	A =área de humedales (m ²); H_{lb} = elevación del fondo del revestimiento (m); H_{lt} = elevación de la parte superior del revestimiento (m); H_w = elevación de la superficie del agua del humedal (m); K = conductividad hidráulica del revestimiento (m d ⁻¹); Q_{gw} = Infiltración de agua subterránea (m ³ d ⁻¹)

Tomado de:(Kadlec, Robert H.; Wallace 2008; Milani et al. 2019)

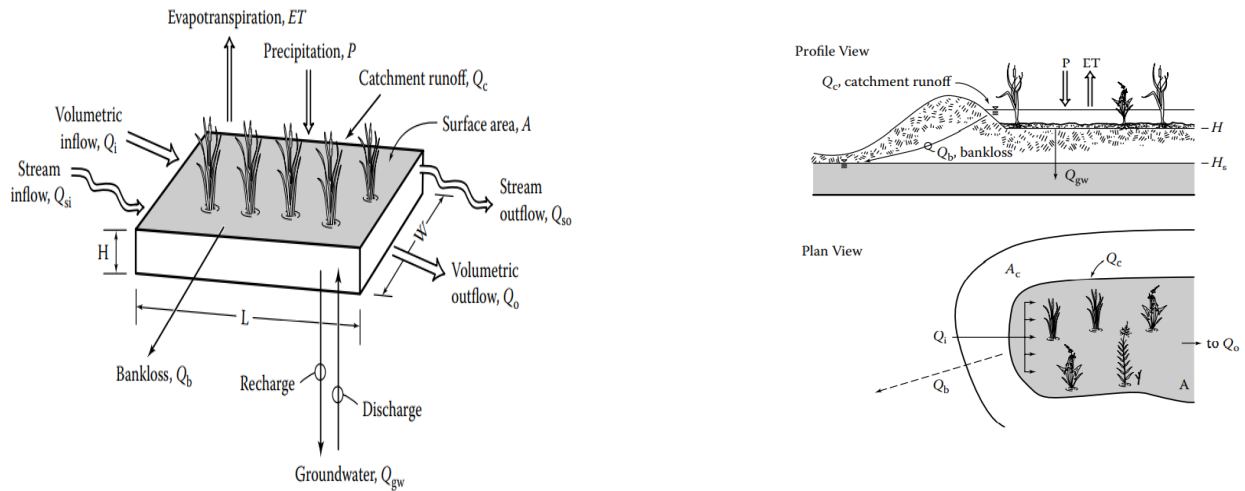


Figura 11. Balance de masa dentro de los humedales artificiales

Tomado de: (Kadlec, Robert H.; Wallace 2008)

3.5.2. Remoción de contaminantes en humedales artificiales

La ecuación siguiente representa el área necesaria para la remoción de contaminantes en los humedales artificiales

$$A_s = \frac{Q(\ln(C_o/C_e))}{K_T(y)(n)}$$

Ecuación del área superficial en los humedales artificiales

AS = Área superficial del humedal, m²

Ce = Concentración en el efluente, mg/l

Co = Concentración en el afluente, mg/l

KT = Constante dependiente de la temperatura

n = Porosidad del humedal



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



y = Profundidad del agua en el humedal, m

Q = Caudal medio a través del humedal, $m^3 d^{-1}$

En relación con lo revisado por Tanaka et al. (2011), sobre la constante dependiente de la temperatura estos muestran valores a reemplazar en la siguiente en la ecuación para hallar dicha constante

$$K_T = K_{20} \theta_{20}^{(T-20)}$$

Ecuación de la contante dependiente de la temperatura

T= Temperatura del afluente, ° C

Tabla 9. Valores de la constante dependiente de la temperatura

Contaminante	Superficiales		Subsuperficiales	
	θ_{20}	K_{20}	θ_{20}	K_{20}
DBO	1.060	0,678	1,060	1,104
Nitrificación	1.048	0,218	1,048	0,411
Desmitificación	1.150	1,000	1,150	1,000

Tomado de: (Tanaka et al. 2011)

Existen otros modelos empleados diferentes a los propuestos por Reed para la determinación del área superficial para ambos tipos de humedales, tales como EPA, WEF MOP FD-16, Kadlec and Knight, SINT. Para el caso del contaminante DBO, se debe considerar la DBO residual producto del detritus de los organismos presentes en el humedal. Como se observa en la tabla 8 existen valores diferentes para K_{20} , los cuales dependen de la temperatura en la que se encuentra el afluente, pero en la tabla únicamente se muestran los que corresponde a climas cálidos (Rabat Blasquez 2016).



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



3.5.3. Parámetros de diseño de humedales artificiales

Un correcto diseño del humedal asegura una correcta eliminación de contaminantes en los sistemas de tratamiento de aguas residuales; por tal razón establecer unas características o situaciones que se presenten en el humedal es vital para lograr el objetivo (Li et al. 2018). La tabla siguiente explica los parámetros para el dimensionamiento de humedales artificiales

Tabla 10. Parámetros de diseño

Factor	Ecuación	Parámetro
Área transversal	$A_c = \frac{Q}{(K_s S)}$	A_c = Área transversal del lecho (m ²); K_s = Conductividad hidráulica Darciana (m s ⁻¹); Q = Caudal medio que circula a través del sistema (m ³ /s); S = Pendiente longitudinal del fondo del lecho.
Tiempo de retención	$t = \frac{V_{ac}}{Q} = \frac{LW hn}{Q}$	t =Tiempo de retención hidráulica(d); V_{ac} = volumen activo; Q = Caudal (m ³ d ⁻¹); L = longitud (m); W = ancho (m)
Ancho	$W = \frac{A_c}{d}$	A_c = Área transversal del lecho (m ²); W = Ancho del humedal (m); d = profundidad del agua (m)
Longitud	$L = \frac{A_s}{W}$	A_s = Área superficial del sistema (m ²); W = ancho del humedal (m)

Tomado de: (Tanaka et al. 2011;Arce 2018)

Para el tiempo de retención hidráulica tanto Tanaka et al. (2011) como Arce, (2018) ofrecen ecuaciones asociadas a este factor que se hace necesario revisar. De igual forma, Kadlec y otros (2008) presentan ecuaciones vinculadas a este factor que deben ser tenidas en cuenta durante el diseño de humedales artificiales.

Para humedales superficiales,



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



$$t = \frac{(\ln C_o - \ln C_e) - 0,6539}{65K_T}$$

$$K_T = K_{20}(1,1)^{T-20}$$

$$K_{20} = 0.0057$$

C_e = Concentración en el efluente, mg/l

C_o = Concentración en el afluente, mg/l

KT = Constante dependiente de la temperatura

Para humedales subsuperficiales horizontales,

$$t = \frac{\ln C_o - \ln C_e}{K_T}$$

C_e = Concentración en el efluente, mg/l

C_o = Concentración en el afluente, mg/l

KT = Constante dependiente de la temperatura

Tabla 11. Velocidades en los humedales artificiales

Factor	Ecuación	Parámetros
Velocidad real del agua	$V = \frac{Q}{\epsilon h W}$	V = velocidad real del agua (m d ⁻¹); Q = Caudal (m ³ d ⁻¹); ε = porosidad de la cama; h = profundidad del agua(m); W = ancho del humedal(m)
Velocidad superficial	$\mu = \frac{Q}{h W}$	μ = Velocidad superficial del agua (m d ⁻¹); Q = Caudal (m ³ d ⁻¹); W = ancho del humedal(m); h = profundidad del agua(m)

Tomado de: (Kadlec, Robert H.; Wallace 2008)



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



3.5.4. Mantenimiento de humedales artificiales

En los humedales superficiales, la profundidad media es un valor dependiente a las características del terreno, su rango se mantiene entre 0,1 m a 0,45 m; para el caso de los subsuperficiales, estos no tienen una profundidad uniforme, pero la altura de la cama se encuentra entre 0,49 a 0,79 m, pero, generalmente, en 0,6 m. Como se analizó en la figura 10 el sitio de ubicación consiste en un aspecto a tener en cuenta y este debe cumplir como mínimo las siguientes características: ubicado cercano a la fuente generadora de aguas residuales, pendiente suave, no estar ubicado en llanura aluvial, no contener especies amenazadas o recursos arqueológicos y cumplir con demás disposiciones legales en la ubicación de sitios de proyecto de tratamiento; asimismo se debe medir las propiedades del suelo la permeabilidad, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el pH, la conductividad eléctrica (CE), la textura y la materia orgánica del suelo, aunque la mayoría de suelo pueden soportar el desarrollo de la vida, pero se recomienda un pH de 6,5 y 8,5 (Kadlec, Robert H.; Wallace 2008; Tanaka et al. 2011) El material de las tuberías tanto externas como internas debe realizarse con el objetivo de no ser necesario su revisión constante y las paredes del humedal deben ser cubiertas con impermeables.

El mantenimiento del humedal debe realizarse de acuerdo con especificaciones que tenga la planta, así como la aparición de material no deseado dentro del humedal, a continuación, se enlistan ciertas actividades que deben ser desarrolladas para conservar la vida útil del humedal dejando en evidencia la facilidad de estas (City of Alexandria n.d.; FUQUAY-VARINA 2017).

- Retirar basura y escombros
- Revisar y reparar áreas erosionadas
- Eliminar animales molestos y madrigueras
- Inspeccionar y reparar cualquier daño estructural y fuga
- Inspeccionar las entradas y salidas y reparar cualquier obstrucción



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



- Retirar vegetación leñosa en o cerca de las estructuras
- Eliminar plantas invasoras
- Reemplazar el material vegetal muerto o dañado

3.6. HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS

Autores como (Carvajal Arias et al. 2018; Sudarsan et al. 2018; Shukla et al. 2021) resaltan la utilidad de los humedales artificiales en las zonas rurales para el tratamiento de las aguas residuales de tipo doméstico, destacándose por aspectos como la no producción de olor, estéticamente agradable y bajo costo, a la vez que permite ser construido y operado con relativa facilidad.

Para el territorio colombiano, los humedales construidos han sido utilizados para la purificación de distintas aguas residuales desde domésticas, procesamiento de café (Ortíz and Montes 2018), aguas de curtiembres (Suárez Escobar and Agudelo Valencia 2014), entre otras, concluyéndose que corresponden a un tratamiento con costos menores si se comparan con los sistemas convencionales. Al igual, su incorporación en el Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico como una tecnología aprobada de saneamiento contribuye al gran avance que ha tenido Colombia referente a la incorporación de estas nuevas tecnologías en el saneamiento básico (Siegua 2017; Metaute 2020).

Hernández et al. (2015) en su artículo *titulado Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales de flujo sub-superficial utilizando Stipa ichu para el tratamiento de aguas residuales domésticas* presenta resultados de remoción logrado por humedales artificiales de un 99,5% para DBO y DQO, para fósforo total de 97,38% y de Nitrógeno de un 94,37 % ; por otro lado Acosta et al. (2016) encontró resultados similares y una remoción para SST de 73 % y 94,09 % datos que son dependientes del tipo y diseño del humedal, así



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



como del afluente y tipo de vegetación, pero permiten formar una idea acerca del alcance de los humedales.

3.6.1. Humedales artificiales: una solución basada en la naturaleza para el tratamiento de las aguas residuales en las zonas rurales de Córdoba

Una revisión exhaustiva de la información existente sobre un tema es un insumo clave a la hora de comenzar a estudiar ideas como soluciones a problemáticas actuales, debido a que este tipo de documento presenta un análisis completo sobre el tópic que permite al investigador hacerse una idea sobre teorías, aplicaciones y avances de este (Bahishti 2021). Una revisión de literatura es tan importante que en palabras de (Snyder 2019) es capaz de resolver impactantes preguntas de investigación en comparación con algunos estudios por separado.

En ese orden de ideas, realizar una compilación sobre los humedales artificiales dentro del contexto de Córdoba es una alternativa relevante (Stefanakis 2019). Por tanto, se debe revisar cierta información relacionada con el clima y amenazas dentro del departamento. La temperatura es en promedio de 28° c y la precipitación de 1000 mm a 3000 mm, claramente estos valores varían conforme a la ubicación dentro del departamento y sus amenazas naturales son inundación, vendavales, lluvias y sequias (Consejo departamental para la gestion del riesgo 2012). Es bien conocido que cada área seleccionada para el sitio del humedal tiene características y condiciones diferentes al promedio del departamento, asimismo dependiendo de la época del año, las cuales deben ser tenidas en cuenta(Kujala et al. 2019).

Como se comentó Córdoba es un territorio con clima cálido que presenta condiciones idóneas para la ubicación de humedales artificiales por tener temperaturas que favorecen el desarrollo microbiano(Pérez-Salazar et al. 2019). Con lo anterior en mente, los humedales artificiales corresponden a una solución basada en la naturaleza para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, en donde estas soluciones permiten

disminuir la presión sobre los recursos abordando desafíos sociales, estando estas sometidas a retos que son ilustrados en la siguiente imagen (Unión internacional para la conservación de la naturaleza 2020).

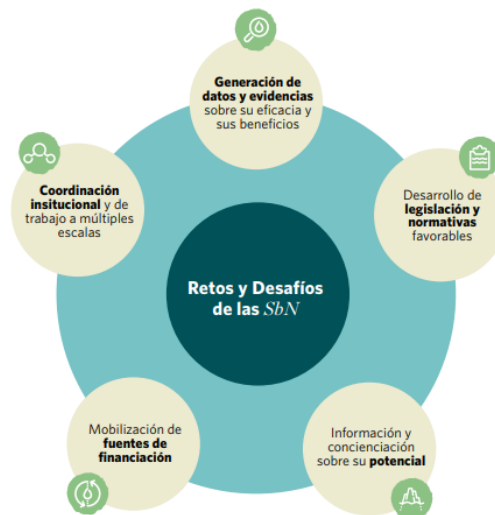


Figura 12. Retos de las soluciones basadas en la naturaleza

Tomado de: (MITECO - Gobierno de España 2019)

Las soluciones basadas en la naturaleza permiten tener una mayor seguridad hídrica en los territorios y a su vez representan no solo beneficios relacionados con el agua, sino también con otros sectores maximizando su potencial. Por otro lado, la solución basada en la naturaleza más utilizada para el tratamiento de las aguas residuales domesticas son los humedales artificiales (WWAP 2018).

3.6.2. Ejemplo de dimensionamiento de humedales artificiales

En este apartado se expondrá un caso de dimensionamiento de humedales artificiales para una comunidad rural del municipio de San Pelayo, Córdoba. Para el cálculo de la estructura es indispensable conocer el caudal de aguas residuales domesticas generada en la comunidad, por lo tanto, se trabajará este ejemplo en dos ítems, el primero dedicado al



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



cálculo del caudal y el segundo el dimensionamiento del humedal. En relación con lo revisado en la tabla 3 y la proximidad de la población al humedal, se utilizará un humedal de tipo subsuperficial horizontal

Determinación del caudal de aguas residuales

Para el caudal generado de aguas residuales se revisó el *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico-Título J* (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio 2021) siendo la base para los cálculos y consideraciones realizados, asimismo se contó con conocimiento previo sobre el número de habitantes y viviendas. A continuación, se procede al cálculo del caudal, así como de ciertos criterios relevantes.

1. Caudal requerido por vivienda en acueducto

$$Q_d = \frac{\text{Dotacion por habitante} * \text{Habitantes promedio por vivienda} * \text{Número total de viviendas}}{86.400}$$

La información de los elementos de la anterior ecuación se presenta en la siguiente tabla. Para la obtención de la Dotación Neta se tomó el consumo como suficiente, por lo tanto, debe encontrarse en valores entre los 20 y 200 l/hab.d.

Tabla 12. Valores para el cálculo por vivienda en acueducto

Parámetro	Valor
Dotación neta (l/hab. d)	90
Perdidas	25%
Habitantes/Vivienda	4
N° de Viviendas	7

Tomado de: Autor 2022



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL
Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Reemplazando se obtiene que:

$$Q_d = \frac{90 \frac{l}{hab} \cdot d * 4hab * 7}{86.400} = 0,029 \text{ l/s}$$

2. Caudal de diseño de acueducto

$$Q_D = \frac{Q_1 + Q_2}{0,75}$$

El Q2 corresponde a una suma de caudales ubicados en entornos, al no presentarse en la zona, el caudal de diseño de acueducto queda solamente como la división del caudal requerido por viviendas sobre 0,75, al considerarse pérdidas del 25%

$$Q_D = \frac{0,029 \text{ l/s}}{0,75} = 0,038 \text{ l/s}$$

3. Caudal de aguas residuales domesticas

$$Q_D = \frac{CR * P * D_{Neta}}{86.400}$$

Donde (DNETA) es la dotación neta de agua potable proyectada por habitante (L/hab. día) y (P) es el número de habitantes proyectados al periodo de diseño.

$$Q_D = \frac{0,8 * 28hab * 90 \frac{l}{hab} * d}{86.400} = 0,0233 \text{ l/s}$$

4. Caudal máximo diario

$$Q_{MH} = Q_D * \text{Factor de mayorizacion}$$

Se recomienda factores de mayorización entre 1,4 y 3,8



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL
Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



$$Q_{MH} = 0,0233 \frac{l}{s} * 3,8 = 0,0885 l/s$$

5. Determinación del caudal de diseño del sistema de humedales

Se obtiene de la suma del caudal máximo horario, aportes por infiltración y conexiones erradas. Al suponer un nivel freático bajo la normativa permite que este valor sea nulo, asimismo se toma como cero el valor de conexiones erradas al ser un sistema nuevo. Por tanto, el Caudal de diseño del humedal corresponde al caudal de máximo horario.

Dimensionamiento del humedal

Con el caudal que entrará al humedal se procede a hallar los valores estudiados en la sección de diseño. La construcción del ejemplo obtuvo información de (Tanaka et al. 2011) y de una caracterización para el sistema de tratamiento del municipio de Tierralta (Serviquimico 2016).

- Tipo de planta: Totora
- Profundidad: 0,3 m
- Porosidad: 0,39
- Pendiente: 0,01
- Temperatura: 30°C
- Caudal: 7,6464 m³ d⁻¹
- Concentración DBO: 298 mg l⁻¹
- Concentración DBO objetivo: 180 mg l⁻¹
- K_s= 480 m³/m²/d
- Sustrato: Arena gruesa

$$K_T = 1,104 * 1,06^{(30-20)} = 1,977 d$$

$$A_s = \frac{7,6464 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1} (\ln(\frac{298 \text{ mg l}^{-1}}{180 \text{ mg l}^{-1}}))}{1,977 \text{ d}(0,3\text{m})(0,39)} = 16,665 \text{ m}^2$$

$$A_s = 17 \text{ m}^2$$

Tabla 13. Parámetros de diseño del humedal artificial-Caso de estudio

Factor	Ecuación	Resultado
Área transversal	$A_c = \frac{7,6464 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}}{(480 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1} * 0,01)}$	1,593 m ² 2 m ²
Ancho	$W = \frac{2 \text{ m}^2}{0,3\text{m}}$	6,666 m 7 m
Longitud	$L = \frac{17 \text{ m}^2}{7 \text{ m}}$	2,428 m 3 m
Tiempo de retencion	$t = \frac{3 \text{ m} * 7 \text{ m} * 0,3 \text{ m} * 0,39}{7,6464 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}}$	0,321 d 1 d

Tomado de: Autor 2022



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



CONCLUSIÓN

Producto de la revisión bibliográfica realizada sobre la importancia del saneamiento básico y los humedales artificiales, así como el análisis de datos de los indicadores para los municipios de Córdoba se lograron obtener las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Existe una problemática preocupante relacionada con saneamiento básico tanto a nivel mundial, regional, nacional y departamental para las poblaciones rurales. Para el departamento de Córdoba, la cobertura más baja se presentó en los municipios que tenían mayor ruralidad.
- Hay suficiente material bibliográfico que sustenta el empleo de humedales artificiales como una ecotecnología capaz de lograr remociones favorables, a la vez que material relacionado con diseño y mantenimiento
- Los humedales artificiales son una alternativa óptima para atender la problemática en zonas rurales para Córdoba debido a que su clima es cálido, lo que favorece la actividad microbiana y se adapta al paisaje de estas zonas
- El diseño e implementación de los humedales artificiales es relativamente sencillo permitiendo ser operado por cualquier persona con previa capacitación

Recomendaciones:

- Se debe ampliar el conocimiento en estas zonas acerca de la facilidad de los humedales artificiales y los peligros de un mal manejo de aguas residuales
- Desde los entes gubernamentales y centros de conocimiento se debe apoyar este tipo de ecotecnologías en los territorios para el tratamiento de las aguas residuales, mediante el apoyo financiero y técnico de estas instalaciones



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, Cristian, Rudy Silván, Gaspar Ocaña, Raúl Bautista, and Mario Romellón. 2016. “Tratamiento de Aguas Residuales Por Humedales Artificiales Tropicales En Tabasco , México.” *Revista Iberoamericana de Las Ciencias Biológicas y Agropecuaria* 5.
- Adelere, Ezekiel Adeniran, Aina Adetunke, and Oshunrinade Omolaraeni. 2016. “An Evaluation of Biogas Production from Anaerobic Digester of a Constructed Wetland Domestic Wastewater Treatment Plant.” *African Journal of Environmental Science and Technology* 10(10):329–37. doi: 10.5897/ajest2016.2153.
- Agencia de la ONU para los Refugiados. 2018. “¿Por Qué Es Importante El Agua Para La Vida En El Planeta?” *ACNUR*. Retrieved April 15, 2021 (https://eacnur.org/blog/la-importancia-del-agua-para-la-vida-tc_alt45664n_o_pstn_o_pst/).
- Aguilar, KAREN. 2019. “Diseño de Un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Con Humedales Artificiales Para La Comunidad de Charcay, Provincia Del Cañar (Ecuador).” *Universidad Politécnica de Valencia*.
- Alcaldía de Montería. 2020. *Plan de Desarrollo Municipal: Plan de La Gente 2020-2023*.
- Alcaldía de Montería. 2021. “95 % DE AVANCE TOTAL EN OBRA DE LA PTAR NORORIENTAL.” Retrieved November 29, 2021 (<https://www.monteria.gov.co/publicaciones/3176/95--de-avance-total-en-obra-de-la-ptar-nororiental/>).
- Alcaldía de San Andrés de Sotavento. 2020. *Plan de Desarrollo Territorial 2020-2023: TRABAJEMOSJUNTOS*.
- Almuktar, Suhad A. A. A. N., Suhail N. Abed, and Miklas Scholz. 2018. “Wetlands for Wastewater Treatment and Subsequent Recycling of Treated Effluent: A Review.” *Environmental Science and Pollution Research* 25(24):23595–623.
- Alufasi, Richwell, Jephri Gere, Ereck Chakauya, Phiyani Lebea, Wilson Parawira, and Walter Chingwaru. 2017. “Mechanisms of Pathogen Removal by Macrophytes in Constructed Wetlands.” *Environmental Technology Reviews* 6(1):135–44. doi: 10.1080/21622515.2017.1325940.
- Aluko, Olufemi Oludare, Olusegun Temitope Afolabi, Emmanuel Abiodun Olaoye, Adeyinka Daniel Adebayo, Seun Oladele Oyetola, and Oluwaseun Olamide



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Abegunde. 2017. "The Management of the Faeces Passed by under Five Children: An Exploratory, Cross-Sectional Research in an Urban Community in Southwest Nigeria." *BMC Public Health* 17(1):1–15. doi: 10.1186/s12889-017-4078-1.

Amit Singh Vishen, Rakesh Kumar Gupta and Hemant Kumar. 2020. "Sanitation and Its Importance in Present Scenario - 2020." Retrieved January 12, 2022 (<https://krishijagran.com/featured/sanitation-and-its-importance-in-present-scenario-2020/>).

Angelakis, Andreas N., Heikki S. Vuorinen, Christos Nikolaidis, Petri S. Juuti, Tapio S. Katko, Riikka P. Juuti, Jim Zhang, and George Samonis. 2021. "Water Quality and Life Expectancy: Parallel Courses in Time." *Water (Switzerland)* 13(6):1–15. doi: 10.3390/w13060752.

Arce, Paul. 2018. "Humedales Artificiales: Una Alternativa Para Tratamiento de Aguas de Produccion." Fundacion Universidad de America.

Arteaga-Cortez, Viviana M., Abel Quevedo-Nolasco, David H. Del Valle-Paniagua, Martiniano Castro-Popoca, Ángel Bravo-Vinaja, and Jorge A. Ramírez-Zierold. 2019. "State of Art: A Current Review of the Mechanisms That Make the Artificial Wetlands for the Removal of Nitrogen and Phosphorus." *Tecnología y Ciencias Del Agua* 10(5):319–42. doi: 10.24850/j-tyca-2019-05-12.

Ausable River Association. n.d. "5 Techniques To ID Aquatic Plants." Retrieved July 8, 2021 (<https://www.ausableriver.org/blog/5-techniques-id-aquatic-plants>).

Bahishti, Adam. 2021. "The Importance of Review Articles & Its Prospects in Scholarly Literature." 1(1). doi: 10.2147/exr.

Bakhshoodeh, Reza, Nadali Alavi, Carolyn Oldham, Rafael M. Santos, Ali Akbar Babaei, Jan Vymazal, and Pooya Paydary. 2020. "Constructed Wetlands for Landfill Leachate Treatment: A Review." *Ecological Engineering* 146(December 2019). doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.105725.

Banco Mundial. 2021. "Water Overview." Retrieved April 15, 2021 (<https://www.worldbank.org/en/topic/water/overview>).

Bathia, Misha, and Dinesh Goyal. 2013. "Analyzing Remediation Potential of Wastewater Through Wetland Plants: A Review." doi: 10.1002/ep.

Bijlsma, Lubertus, Albert Celma, Iria González, Cristina Postigo, Vicente Andreu, Rosa Marcé, Rosa Montes, Eva Pocurull, Yolanda Picó, Rosario Rodil, Luis Rodriguez, Yolanda Valcárceñ, and José Quitana. 2018. "ANÁLISIS DE AGUAS



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



RESIDUALES CON FINES EPIDEMIOLÓGICOS: APLICACIONES A LA ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE SUSTANCIAS DE ABUSO Y EN SALUD PÚBLICA EN GENERAL. RED ESPAÑOLA ESAR-NET.” *Revista Española de Salud Publica* 92(20):1–10.

Biomatrix Water. 2021. “MSR Constructed Wetlands .” Retrieved December 1, 2021 (<https://www.biomatrixwater.com/msr-constructed-wetlands/>).

Blanco S., Henry A., Milagros Lara De Williams, Ana C. Velezmore, and Víctor H. Aguilar L. 2014. “Consumo de Agua En Actividades Domésticas. Caso de Estudio: Estudiantes de La Asignatura Saneamiento Ambiental de La UCV.” *Revista de La Facultad de Ingenieria* 29(1):51–56.

Britannica Online Encyclopedia. 2021. “Wastewater Treatment.”

Carvajal Arias, Carel Elizabeth, Paola Ortiz, and Angy Lariza Vega Beltran. 2018. “Propuesta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Implementando Un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Empleando Bambusa Sp En La Finca El Recreo Ubicada En Tauramena, Casanare.” *Revista de Tecnología* 16(1):65. doi: 10.18270/rt.v16i1.2317.

Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Emerging and Zoonotic Infectious Diseases (NCEZID). 2017. “Sanitation & Hygiene.” Retrieved November 8, 2021 (<https://www.cdc.gov/healthywater/global/sanitation/index.html>).

Centro de los objetivos de desarrollo sostenible para America Latina. 2020. *Índice ODS 2019 Para América Latina y El Caribe*.

Chakraborti, Rajat K., and James S. Bays. 2020. “Natural Treatment of High-Strength Reverse Osmosis Concentrate by Constructed Wetlands for Reclaimed Water Use.” *Water (Switzerland)* 12(1). doi: 10.3390/w12010158.

City of Alexandria. n.d. “Constructed Wetlands Maintenance Schedule and Guidelines.”

COLOMBIA PNUD. 2019. *Retos y Desafíos Para El Desarrollo Sostenible Córdoba*.

COLOMBIA PNUD. 2021. “Panorama de La Pobreza En El Sector Rural | El PNUD En Colombia.” Retrieved January 12, 2022 (<https://www.co.undp.org/content/colombia/es/home/-sabias-que-/panorama-de-la-pobreza-en-el-sector-rural.html>).

Comisión Económica para América Latina y el Caribe, and Naciones Unidas. 2021.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



“ESTADÍSTICAS E INDICADORES.” Retrieved April 21, 2021
(https://estadisticas.cepal.org/cepalstat/WEB_CEPALSTAT/estadisticasIndicadores.asp?idioma=i).

ConcernWorldwide US. 2021. “The Top 11 Causes of Poverty around the World | Concern Worldwide US.” Retrieved November 27, 2021
(<https://www.concernusa.org/story/causes-of-poverty/>).

Consejo departamental para la gestion del riesgo. 2012. *Plan Departamental Para La Gestion de Riesgo de Córdoba*.

DANE. 2019. “Cobertura Saneamiento Básico En Municipios de Colombia.” Retrieved February 6, 2022
(<https://storymaps.arcgis.com/stories/22886ec822944d24a61065fae61ed4f4>).

DANE. 2020a. “Anexo-Proyecciones-Poblacion-Municipal_Area_2018-2035.”

DANE. 2020b. “Déficit Habitacional.” Retrieved February 6, 2022
(<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/deficit-habitacional>).

DANE. 2020c. “Nota Metodológica Déficit Habitacional.” *Cnpv 2018* 1–12.

DANE. 2020d. “Pobreza Multidimensional.” Retrieved February 6, 2022
(<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/pobreza-multidimensional>).

DANE. 2020e. “Proyecciones de Población.” Retrieved February 6, 2022
(<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>).

DANE. 2021. “Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI).” Retrieved February 6, 2022
(<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/necesidades-basicas-insatisfechas-nbi>).

DANE & CNPV. 2018. “Resultados Colombia Censo 2018.” *Departamento Nacional de Estadística* 1.

Dauda Ahmed, Sani, Sampson Kwaku Agodzo, and Kwaku Amaning Adjei. 2021. “Designing River Diversion Constructed Wetland for Water Quality Improvement.” *Inland Waters - Dynamics and Ecology* (December). doi: 10.5772/intechopen.92119.

Delgadillo, Oscar, Alan Camacho, and Mauricio Andrade. 2010. *Depuracion de Aguas*



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Residuales Por Medio de Humedales Artificiales.

- Dell’Osbel, Naira, Gustavo Stolzenberg Colares, Gislayne Alves de Oliveira, Maiara Priscilla de Souza, Carolina Vieira Barbosa, and Ênio Leandro Machado. 2020. “Bibliometric Analysis of Phosphorous Removal Through Constructed Wetlands.” *Water, Air, and Soil Pollution* 231(3). doi: 10.1007/s11270-020-04513-1.
- Deng, Shengjiong, Jinquan Chen, and Junjun Chang. 2021. “Application of Biochar as an Innovative Substrate in Constructed Wetlands/Biofilters for Wastewater Treatment: Performance and Ecological Benefits.” *Journal of Cleaner Production* 293:126156. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126156.
- Departamento Nacional de Planeacion (DNP). 2017. “Panorámica Regional 3ª Edición 1.” *Dnp* (2000):1–13.
- Departamento Nacional de Planeacion (DNP). 2018. *Reporte Nacional Voluntario Colombia. Objetivos De Desarrollo Sostenible.*
- Departamento Nacional de Planeacion (DNP). 2021. “Reporte Nacional Voluntario 2021. Acelerar La Implementación Para Una Recuperación Sostenible.” 1–166.
- Donde, Oscar Omondi. 2017. “Wastewater Management Techniques: A Review of Advancement on the Appropriate Wastewater Treatment Principles for Sustainability.” *Environmental Management and Sustainable Development* 6(1):40. doi: 10.5296/emsd.v6i1.10137.
- Donde, Oscar Omondi, Evans Atoni, Anastasia Wairimu Muia, and Paul T. Yillia. 2021. “COVID-19 Pandemic: Water, Sanitation and Hygiene (WASH) as a Critical Control Measure Remains a Major Challenge in Low-Income Countries.” *Water Research* 191:2016–21. doi: 10.1016/j.watres.2020.116793.
- ElZein, Z., A. Abdou, and I. Abd ElGawad. 2016. “Constructed Wetlands as a Sustainable Wastewater Treatment Method in Communities.” *Procedia Environmental Sciences* 34:605–17. doi: 10.1016/j.proenv.2016.04.053.
- EPA. 2021. “How We Use Water | US EPA.” Retrieved January 23, 2022 (<https://www.epa.gov/watersense/how-we-use-water>).
- Espinosa, Jhon, Espinosa Castro, Johel E. Rodriguez, Marlly Karina, Arenas Torrado, Sandra Milena, and Carrillo Sierra. 2018. “Sobre El Uso Adecuado Del Coeficiente de Correlación de Pearson: Definición, Propiedades y Suposiciones.” *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica* 37(5):587–95.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



- Fu, Xixi, Xiaofu Wu, Sangyang Zhou, Yonghua Chen, Mingli Chen, and Runhua Chen. 2018. "A Constructed Wetland System for Rural Household Sewage Treatment in Subtropical Regions." *Water (Switzerland)* 10(6). doi: 10.3390/w10060716.
- FUQUAY-VARINA. 2017. "OPERATIONS & MAINTENANCE MANUAL."
- Gobernación de Córdoba. 2020. " *Ahora Le Toca a Córdoba : Oportunidades , Bienestar y Seguridad.*
- Gorgoglione, Angela, and Vincenzo Torretta. 2018. "Sustainable Management and Successful Application of Constructed Wetlands: A Critical Review." *Sustainability (Switzerland)* 10(11):1–19. doi: 10.3390/su10113910.
- Granados, Mildred. 2018. "Estudio de Factibilidad de La Implementación de Humedales Artificiales Para El Tratamiento de Aguas Residuales En Ecosistema de Alta Montaña En Toquilla." *Universidad Libre Facultad de Ingenierias* 83.
- Guan, Wei, Min Yin, Tao He, and Shuguang Xie. 2015. "Influence of Substrate Type on Microbial Community Structure in Vertical-Flow Constructed Wetland Treating Polluted River Water." *Environmental Science and Pollution Research* 22(20):16202–9. doi: 10.1007/s11356-015-5160-9.
- Guo, Danlu, Jacqueline Thomas, Alfred Lazaro, Clarence Mahundo, Dickson Lwetoijera, Emmanuel Mrimi, Fatuma Matwewe, and Fiona Johnson. 2019. "Understanding the Impacts of Short-Term Climate Variability on Drinking Water Source Quality: Observations From Three Distinct Climatic Regions in Tanzania." *GeoHealth* 3(4):84–103. doi: 10.1029/2018gh000180.
- Hassan, Ikrema, Saidur R. Chowdhury, Perdana K. Prihartato, and Shaikh A. Razzak. 2021. "Wastewater Treatment Using Constructed Wetland: Current Trends and Future Potential." *Processes* 9(11):1–27. doi: 10.3390/pr9111917.
- Hector Rodríguez. 2017. "Las Aguas Residuales y Sus Efectos Contaminantes." *Iagua* 1–4. Retrieved April 28, 2021 (<https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>).
- Hernández, Daniel, Niver Ramos, Jorge Castillo, and Julieth Orduña. 2015. "Evaluación de La Eficiencia de Humedales Artificiales de Flujo Sub-Superficial Utilizando Stipa Ichu Para El Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas." *Ingenium* 9(25):47. doi: 10.21774/ing.v9i25.588.
- Herrera, Fernando. 2018. *ODS En Colombia: Los Retos Para 2030.*



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



- Herrera, María Tereza Alarcón, Florentina Zurita Martínez, Jaime A. Lara-Borrero, Gladys Vidal, and Editores Académicos. 2018. *Humedales de Tratamiento: Alternativa de Tratamiento de Aguas Residuales Aplicable En América Latina*.
- Hussain, Filza, Ghulam Mustufa, Rabisa Zia, Ali Faiq, Madeeha Matloob, Haseeb ur Rehman Shah, Waqas Rafique Ali, and Jazib Ali Irfan. 2018. "Constructed Wetlands and Their Role in Remediation of Industrial Effluents via Plant-Microbe Interaction – A Mini Review." *Journal of Bioremediation & Biodegradation* 09(04). doi: 10.4172/2155-6199.1000447.
- Instituto de Meteorología y Estudios Ambientales. 2019. *Estudio Nacional Del Agua 2018*.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2017. *El Agua Para La Agricultura de Las Américas*.
- Ji, Zehua, Wenzhong Tang, and Yuansheng Pei. 2021. "Constructed Wetland Substrates: A Review on Development, Function Mechanisms, and Application in Contaminants Removal." *Chemosphere* 286(P1):131564. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131564.
- Jones, D. L., C. Freeman, and A. R. Sánchez-Rodríguez. 2016. "Waste Water Treatment." *Encyclopedia of Applied Plant Sciences* 3(December 2016):352–62. doi: 10.1016/B978-0-12-394807-6.00019-8.
- Kadlec, Robert H.; Wallace, Scott D. 2008. *Treatment Wetlands*.
- Kataki, Sampri, Soumya Chatterjee, Mohan G. Vairale, Sanjai K. Dwivedi, and Dharmendra K. Gupta. 2021. "Constructed Wetland, an Eco-Technology for Wastewater Treatment: A Review on Types of Wastewater Treated and Components of the Technology (Macrophyte, Biofilm and Substrate)." *Journal of Environmental Management* 283(December 2020):111986. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.111986.
- Knifton, Lee, and Greig Inglis. 2020. "Poverty and Mental Health: Policy, Practice and Research Implications." *BJPsych Bulletin* 44(5):193–96. doi: 10.1192/bjb.2020.78.
- Kochi, Leticia Y., Patricia L. Freitas, Leila T. Maranhão, Philippe Juneau, and Marcelo P. Gomes. 2020. "Aquatic Macrophytes in Constructed Wetlands: A Fight against Water Pollution." *Sustainability (Switzerland)* 12(21):1–21. doi: 10.3390/su12219202.
- Kujala, Katharina, Teemu Karlsson, Soile Nieminen, and Anna Kaisa Ronkanen. 2019.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



“Design Parameters for Nitrogen Removal by Constructed Wetlands Treating Mine Waters and Municipal Wastewater under Nordic Conditions.” *Science of the Total Environment* 662:559–70. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.124.

Kweiyor Tetteh, Emmanuel, Sudesh Rathilal, Maggie Chetty, Edward Kwaku Armah, and Dennis Asante-Sackey. 2019. “Treatment of Water and Wastewater for Reuse and Energy Generation-Emerging Technologies.” *Water and Wastewater Treatment*. doi: 10.5772/intechopen.84474.

Li, Xiaoyan, Aizhong Ding, Lei Zheng, Bruce C. Anderson, Linghua Kong, Aiguo Wu, and Lei Xing. 2018. “Relationship between Design Parameters and Removal Efficiency for Constructed Wetlands in China.” *Ecological Engineering* 123(September):135–40. doi: 10.1016/j.ecoleng.2018.08.005.

López, D., A. M. Leiva, W. Arismendi, and G. Vidal. 2019. “Influence of Design and Operational Parameters on the Pathogens Reduction in Constructed Wetland under the Climate Change Scenario.” *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 18(1):101–25. doi: 10.1007/s11157-019-09493-1.

Lu, Shibao, Liang Pei, and Xiao Bai. 2015. “Study on Method of Domestic Wastewater Treatment through New-Type Multi-Layer Artificial Wetland.” *International Journal of Hydrogen Energy* 40(34):11207–14. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.05.165.

Ma, Xiaona, Xingqiang Song, Xian Li, Songzhe Fu, Meng Li, and Ying Liu. 2018. “Characterization of Microbial Communities in Pilot-Scale Constructed Wetlands with Salicornia for Treatment of Marine Aquaculture Effluents.” *Archaea* 2018. doi: 10.1155/2018/7819840.

Machado, A. I., M. Beretta, R. Fragoso, and E. Duarte. 2017. “Overview of the State of the Art of Constructed Wetlands for Decentralized Wastewater Management in Brazil.” *Journal of Environmental Management* 187:560–70. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.11.015.

Makopondo, Richard O. B., Laban K. Rotich, and Cynthia G. Kamau. 2020. “Potential Use and Challenges of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Conservation in Game Lodges and Resorts in Kenya.” *Scientific World Journal*. doi: 10.1155/2020/9184192.

Marcos-Garcia, P., C. Carmona-Moreno, J. López-Puga, and A. M. Ruiz-Ruano García. 2021. “COVID-19 Pandemic in Africa: Is It Time for Water, Sanitation and Hygiene to Climb up the Ladder of Global Priorities?” *Science of the Total Environment* 791. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148252.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



- Meegoda, Jay N., Brian Li, Kush Patel, and Lily B. Wang. 2018. "A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(10). doi: 10.3390/ijerph15102224.
- Metaute, Camilo. 2020. "Importancia de Los Humedales Artificiales En Colombia - Vestigios." Retrieved January 13, 2022 (<https://www.vestigios.co/importancia-humedales-artificiales-colombia/>).
- Milani, Mirco, Alessia Marzo, Attilio Toscano, Simona Consoli, Giuseppe Luigi Cirelli, Delia Ventura, and Salvatore Barbagallo. 2019. "Evapotranspiration from Horizontal Subsurface Flow Constructedwetlands Planted with Different Perennial Plant Species." *Water (Switzerland)* 11(10). doi: 10.3390/w11102159.
- Minambiente. 2015. "Resolución 631 De 2015." *Diario Oficial No. 49.486 de 18 de Abril de 2015 RESOLUCIÓN*(Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. EL):73.
- Ministerio de Salud-El Salvador. 2015. *Propuesta de Reglamento Técnico Salvadoreño Para El Diseño y Construcción de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales de Tipo Ordinario Para La Zona Rural.*
- Ministerio de Vivivenda Ciudad y Territorio. 2021. "Reglamento Técnico Del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico- Título J."
- MITECO - Gobierno de España. 2019. "Soluciones Basadas En La Naturaleza Para La Gestión Del Agua En España. Retos y Oportunidades." 1–52.
- Moreira, Fernanda Deister, and Edgard Henrique Oliveira Dias. 2020. "Constructed Wetlands Applied in Rural Sanitation: A Review." *Environmental Research* 190(July):110016. doi: 10.1016/j.envres.2020.110016.
- Mothe, Sagarika, and Venkateswara Polisetty Rao. 2020. "Review on Anaerobic Digestion of Rice Straw for Biogas Production." *Spirnger*. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08762-9>.
- Mustafa, Atif, and Mehmood Ali. 2019. "Waste Materials as Substrates in Vertical Flow Constructed Wetlands Treating Domestic Wastewater." *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 231:339–46. doi: 10.2495/WM180311.
- Naughton, Colleen, and James Mihelcic. 2017. "Introduction to the Importance of



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Sanitation.” 1–16.

- Nguyen, Thi Thanh Huyen, Thi Thu Hien Nguyen, Thi Le Hang Nguyen, and Nguyen van Cong. 2020. “The Impact of International Integration on the Inequality of Income between Rural and Urban Areas in Vietnam.” *Journal of Asian Finance, Economics and Business* 7(3):277–87. doi: 10.13106/jafeb.2020.vol7.no3.277.
- Opitz, Joscha, Matthias Alte, Martin Bauer, and Stefan Peiffer. 2021. “The Role of Macrophytes in Constructed Surface-Flow Wetlands for Mine Water Treatment: A Review.” *Mine Water and the Environment* 40(3):587–605. doi: 10.1007/s10230-021-00779-x.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). 2015. “Agua y Saneamiento - Desarrollo Sostenible.” *Organización de Las Naciones Unidas*. Retrieved April 18, 2021 (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>).
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). 2017. *Las Aguas Residuales: El Recurso Desaprovechado*.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). 2019. *Informe de Los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019*.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). 2020. *Informe de Los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2020*.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2019. *Healthy Environments for Healthier Populations: Why Do They Matter, and What Can We Do?*
- Ortíz, Nestor, and Cristian Montes. 2018. “Diseño Preliminar de Un Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de Bajo Impacto Ambiental Para Una Finca Cafetera En El Municipio de El Pital-Huila.” 67.
- Oscar Omondi, Donde, and Atalitsa Caren Navalía. 2021. “Constructed Wetlands in Wastewater Treatment and Challenges of Emerging Resistant Genes Filtration and Reloading.” *Inland Waters - Dynamics and Ecology* (August). doi: 10.5772/intechopen.93293.
- Pérez-Salazar, Roy, Carmen Mora-Aparicio, Carolina Alfaro-Chinchilla, Jihad Sasa-Marín, Carola Scholz, and José Rodríguez-Corrales. 2019. “Biogardens as Constructed Wetlands in Tropical Climate: A Case Study in the Central Pacific Coast of Costa Rica.” *Science of the Total Environment* 658:1023–28. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.259.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



- Quan, Quan, Bing Shen, Qian Zhang, and Muhammad Aqeel Ashraf. 2016. "Research on Phosphorus Removal in Artificial Wetlands by Plants and Their Photosynthesis." *Brazilian Archives of Biology and Technology* 59(Specialissue):1–9. doi: 10.1590/1678-4324-2016160506.
- Queluz, João Gabriel Thomaz, Francisca Franciana Sousa Pereira, and Rodrigo Máximo Sánchez-Román. 2018. "Evapotranspiration and Crop Coefficient for Typha Latifolia in Constructed Wetlands." *Water Quality Research Journal* 53(2):53–60. doi: 10.2166/wqrj.2018.041.
- Rabat Blasquez, Jorge. 2016. "Análisis de Los Modelos de Diseño de Los Sistemas Naturales de Depuración." *Universidad de Alicante* 1–112.
- Rahman, Md Ekhlatur, Mohd Izuan Effendi Bin Halmi, Mohd Yusoff Bin Abd Samad, Md Kamal Uddin, Khairil Mahmud, Mohd Yunus Abd Shukor, Siti Rozaimah Sheikh Abdullah, and S. M. Shamsuzzaman. 2020. "Design, Operation and Optimization of Constructed Wetland for Removal of Pollutant." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(22):1–40. doi: 10.3390/ijerph17228339.
- Rajan, Rajitha J., J. S. Sudarsan, and S. Nithiyantham. 2019. "Microbial Population Dynamics in Constructed Wetlands: Review of Recent Advancements for Wastewater Treatment." *Environmental Engineering Research* 24(2):181–90. doi: 10.4491/EER.2018.127.
- Ramos Rincón, Jaidith Marisol, Angye Bermudez, and Tania Rojas. 2018. "Contaminación Odorífera: Causas, Efectos y Posibles Soluciones a Una Contaminación Invisible." *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 9(1):165–80. doi: 10.22490/21456453.2053.
- Rana, Vivek, and Subodh Kumar Maiti. 2020. *Municipal and Industrial Wastewater Treatment Using Constructed Wetlands*.
- Rene, Eldon R., Li Shu, and Veeriah Jegatheesan. 2019. "Editorial: Sustainable Eco-Technologies for Water and Wastewater Treatment." *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA* 68(8):617–22. doi: 10.2166/aqua.2019.100.
- Roig, José. 2014. "Eliminación de Contaminantes Emergentes Mediante Humedales Artificiales Como Sistema Alternativo o Complementario a Un Tratamiento de Aguas Convencional." Universitat Politècnica de València. Servicio de Alumnado - Servei d'Alumnat.
- Rozo López, Damaris Paola. 2020. "América Latina y El Caribe: A Medio Camino En



"VIGILADA MINEUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



El Cumplimiento de Los Objetivos de Desarrollo Sostenibles.” *Observatorio Regional ODS*.

Ruiz-cuello, Tatiana, Juan C. Pescador-piedra, Leticia Raymundo-Nuñez, and Gabriela Pineda-Camacho. 2015. “Dimensionamiento de Un Sistema Hidráulico En Casa-Habitación Para El Uso de Agua Residual.” *Revista Cubana de Química* 27(3):315–24.

Salgot, Miquel, and Montserrat Folch. 2018. “Wastewater Treatment and Water Reuse.” *Current Opinion in Environmental Science and Health* 2:64–74. doi: 10.1016/j.coesh.2018.03.005.

Saraiva, Claudety B., Antonio T. Matos, Mateus P. Matos, and Suymara T. Miranda. 2018. “INFLUENCE OF SUBSTRATE AND SPECIES ARRANGEMENT OF CULTIVATED GRASSES ON THE EFFICIENCY OF HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW CONSTRUCTED WETLANDS We Aimed to Evaluate the Efficiency of Six Different Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands (HSSF-CWs), Wi.” 4430:417–25.

Serviquimico. 2016. *TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE TIERALTA , CÓRDOBA*.

Shahid, Munazzam Jawad, Ameena A. AL-surhanee, Fayza Kouadri, Shafaqat Ali, Neeha Nawaz, Muhammad Afzal, Muhammad Rizwan, Basharat Ali, and Mona H. Soliman. 2020. “Role of Microorganisms in the Remediation of Wastewater in Floating Treatmentwetlands: A Review.” *Sustainability (Switzerland)* 12(14):1–29. doi: 10.3390/su12145559.

Shukla, Reetika, Deepak Gupta, Gurudatta Singh, and Virendra Kumar Mishra. 2021. “Performance of Horizontal Flow Constructed Wetland for Secondary Treatment of Domestic Wastewater in a Remote Tribal Area of Central India.” *Sustainable Environment Research* 31(1). doi: 10.1186/s42834-021-00087-7.

Siegua. 2017. “Humedales Artificiales (Filtros Verdes) En Colombia.” Retrieved January 13, 2022 (<http://siegua.com/2017/06/01/humedales-artificiales/>).

Snyder, Hannah. 2019. “Literature Review as a Research Methodology: An Overview and Guidelines.” *Journal of Business Research* 104(July):333–39. doi: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.

Stefanakis, Alexandros I. 2019. “The Role of ConstructedWetlands as Green Infrastructure for Sustainable Urban Water Management.” *Sustainability (Switzerland)* 11(24). doi: 10.3390/su11246981.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



- Stefanakis, Alexandros I., and Christos S. Akratos. 2016. "Removal of Pathogenic Bacteria in Constructed Wetlands: Mechanisms and Efficiency." *Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants, Volume 4* (September):1–409. doi: 10.1007/978-3-319-41811-7.
- Suárez Escobar, Andrés Felipe, and Rafael Nikolay Agudelo Valencia. 2014. "Tratamiento de Agua Residual Procedente de La Industria de Curtiembres Mediante Humedales Subsuperficiales Usando Zantedeschia Aethiopica." *Avances Investigación En Ingeniería* 11(1):121. doi: 10.18041/1794-4953/avances.1.300.
- Subdirección de Salud Ambiental-MSPS. 2015. "ABECÉ Del Agua y Saneamiento Básico." 1–3.
- Sudarsan, J. S., R. Annadurai, M. Mukhopadhyay, P. Chakraborty, and S. Nithiyantham. 2018. "Domestic Wastewater Treatment Using Constructed Wetland: An Efficient and Alternative Way." *Sustainable Water Resources Management* 4(4):781–87. doi: 10.1007/s40899-017-0164-x.
- Tanaka, Norio, Wun Jern, and K. Jinadasa. 2011. *Wetlands for Tropical Applications*.
- Travaini-Lima, Fernanda, and Lúcia Helena Sipaúba-Tavares. 2012. "Efficiency of a Constructed Wetland for Wastewaters Treatment." *Acta Limnologica Brasiliensia* 24(3):255–65. doi: 10.1590/s2179-975x2012005000043.
- UNESCO. 2019. *Informe Mundial de Las Naciones Unidas Sobre El Desarrollo de Los Recursos Hídricos 2019. No Dejar a Nadie Atrás*.
- UNIÓN INTERNACIONAL PARA LA CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA. 2020. *Orientación Para Usar El Estándar Global de La UICN Para Soluciones Basadas En La Naturaleza: Primera Edición*.
- Varma, Mahesh, Ashok Kumar Gupta, Partha Sarathi Ghosal, and Abhradeep Majumder. 2021. "A Review on Performance of Constructed Wetlands in Tropical and Cold Climate: Insights of Mechanism, Role of Influencing Factors, and System Modification in Low Temperature." *Science of the Total Environment* 755:142540. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142540.
- Vymazal, Jan. 2019. "Is Removal of Organics and Suspended Solids in Horizontal Sub-Surface Flow Constructed Wetlands Sustainable for Twenty and More Years?" *Chemical Engineering Journal* 378(June):122117. doi: 10.1016/j.cej.2019.122117.
- Wang, Han Xi, Jian Ling Xu, Lian Xi Sheng, and Xue Jun Liu. 2018. "A Review of Research on Substrate Materials for Constructed Wetlands." *Materials Science*



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



Forum 913(February):917–29. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.913.917.

Wang, Mou, Wenmei Kang, and Ruiying Zhang. 2020. "The Gap between Urban and Rural Development Levels Narrowed." *Complexity* 2020. doi: 10.1155/2020/4615760.

Wang, Qian, Zhenfeng Cao, Yanbiao Hu, Qiang Kong, Fei Xu, Yuanda Du, and Congcong Zhao. 2019. "Season Effects on Subsurface Constructed Wetlands Performance: Role of Radial Oxygen Loss of Phragmites Australis." *Clean - Soil, Air, Water* 47(8):1–7. doi: 10.1002/clen.201800428.

Wang, Yanting, Zhengqing Cai, Sheng Sheng, Fei Pan, Fenfei Chen, and Jie Fu. 2020. "Comprehensive Evaluation of Substrate Materials for Contaminants Removal in Constructed Wetlands." *Science of the Total Environment* 701:134736. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134736.

Water.org. 2021. "Water & The Economy." Retrieved January 28, 2022 (<https://water.org/our-impact/water-crisis/economic-crisis/>).

WaterForSouthSudan. 2016. "The Importance of Sanitation for All, Especially Children — Water For South Sudan." Retrieved November 27, 2021 (<https://www.waterforsouthsudan.org/wfss-blog-use/2016/4/13/the-importance-of-sanitation-for-all-especially-children>).

Wear, Stephanie L., Vicenç Acuña, Rob McDonald, and Carme Font. 2021. "Sewage Pollution, Declining Ecosystem Health, and Cross-Sector Collaboration." *Biological Conservation* 255. doi: 10.1016/j.biocon.2021.109010.

Wu, Haiming, Jian Zhang, Huu Hao Ngo, Wenshan Guo, Zhen Hu, Shuang Liang, Jinlin Fan, and Hai Liu. 2015. "A Review on the Sustainability of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Design and Operation." *Bioresource Technology* 175:594–601. doi: 10.1016/j.biortech.2014.10.068.

Wu, Shubiao, Peter Kusch, Hans Brix, Jan Vymazal, and Renjie Dong. 2014. "Development of Constructed Wetlands Inperformance Intensifications for Wastewater Treatment: A Nitrogen and Organic Matter Targeted Review." *Water Research* 57:40–55. doi: 10.1016/j.watres.2014.03.020.

WWAP. 2018. *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water*.

Xie, Anbin, Hao Chen, and Shaohong You. 2018. "Advance of Nitrogen Removal in Constructed Wetland." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

INFORME FINAL DE LA MONOGRAFÍA CONVENCIONAL

Comité de Acreditación y Currículo Facultad de Ingeniería



301(1). doi: 10.1088/1757-899X/301/1/012120.

- Yadav, Swati. 2019. "Pryagaraj or River City Suffering from a Water Pollution and Solution for Safe a River to It by Plants." 4(2):268–78.
- Yang, Yan, Yaqian Zhao, Ranbin Liu, and David Morgan. 2018. "Global Development of Various Emerged Substrates Utilized in Constructed Wetlands." *Bioresource Technology* 261(March):441–52. doi: 10.1016/j.biortech.2018.03.085.
- Zamora, Sergio, J. Luis Marín-Muñiz, Carlos Nakase-Rodríguez, Gregorio Fernández-Lambert, and Luis Sandoval. 2019. "Wastewater Treatment by Constructed Wetland Eco-Technology: Influence of Mineral and Plastic Materials as Filter Media and Tropical Ornamental Plants." *Water (Switzerland)* 11(11). doi: 10.3390/w11112344.
- Zanuttín, Gisela. 2018. "Comparacion de Sistemas de Tratamiento de Efluentes Para Un Hotel En Ambinete Urbano. Dimensinamiento Del Proceso Seleccionado." Universidad Nacional de Rio Negro.
- Zhai, Jun, Jinsong Zou, Qiang He, Kejia Ning, and Haiwen Xiao. 2012. "Variation of Dissolved Oxygen and Redox Potential and Their Correlation with Microbial Population along a Novel Horizontal Subsurface Flow Wetland." *Environmental Technology (United Kingdom)* 33(17):1999–2006. doi: 10.1080/09593330.2012.655320.
- Zhang, Hong, Wenzhong Tang, Weidong Wang, Wei Yin, Honglei Liu, Xiaomin Ma, Yiqi Zhou, Pei Lei, Dongyang Wei, Litian Zhang, Cao Liu, and Jinmiao Zha. 2021. "A Review on China's Constructed Wetlands in Recent Three Decades: Application and Practice." *Journal of Environmental Sciences (China)* 104:53–68. doi: 10.1016/j.jes.2020.11.032.