

Substratos en Humedales Artificiales Subsuperficiales: Estado del Arte de su Caracterización Hidráulica y Fisicoquímica

Yorett , Geraldine

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad de Panamá, Panamá
geraldine.yorett@utp.ac.pa

Deago, Euclides

Centro de Investigaciones Hidráulica e Hidrotécnica, Universidad Tecnológica de Panamá
Ciudad, País
euclides.deago@utp.ac.pa

Abstract

Subsurface flow constructed wetlands (SSF CWs) have emerged as one of the main nature-based solutions for decentralized wastewater treatment. Among their components, the substrate plays a decisive role in pollutant removal efficiency, as it regulates key hydraulic parameters such as saturated hydraulic conductivity and hydraulic retention time, while providing adsorption capacity, support for macrophytes, and surface area for biofilm growth. This study presents a systematic literature review (2015–2025) focused on the physical, chemical, and hydraulic characterization of substrates used in SSF CWs. Results show that sand and gravel remain the most common substrates due to their low cost and availability; however, their limited adsorption capacity reduces treatment efficiency. In contrast, alternative materials such as zeolite, steel slag, biochar, seashells, and modified clays exhibit superior performance in nutrient retention and emerging contaminant removal. Critical substrate properties include porosity, specific surface area, particle size, elemental composition, and functional groups. The findings highlight the importance of standardized characterization protocols.

Keywords: Characterization, constructed wetlands, properties, substrate, wastewater

Resumen

Los humedales artificiales subsuperficiales (HASS) se han consolidado como una de las principales soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento descentralizado de aguas residuales. Entre sus componentes, el sustrato desempeña un papel determinante

en la eficiencia depurativa, al controlar parámetros hidráulicos clave como la conductividad hidráulica y el tiempo de retención, además de aportar capacidad de adsorción, soporte para macrófitas y superficie para el desarrollo del biofilm. Este trabajo presenta una revisión sistemática de la literatura publicada entre 2015 y 2025, enfocada en la caracterización física, química e hidráulica de los sustratos empleados en HASS. Los resultados evidencian que, aunque la arena y grava continúan siendo los materiales más utilizados por su disponibilidad y bajo costo, estos presentan limitaciones en su capacidad de depuración. En contraste, materiales alternativos como zeolita, escorias siderúrgicas, biochar, conchas de moluscos y entre otros ofrecen desempeños superiores en la retención de nutrientes y contaminantes emergentes. Asimismo, se identificó que la porosidad, el área superficial específica, el tamaño de partícula, la composición elemental y los grupos funcionales son propiedades críticas que determinan la eficacia de los sustratos. Finalmente, se destaca la necesidad de establecer metodologías estandarizadas para su caracterización.

Palabras claves: Aguas residuales, caracterización, humedales artificiales, propiedades, sustrato.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los humedales artificiales (HA) son considerados una tecnología sostenible para el tratamiento de aguas residuales, diseñados para replicar, bajo condiciones controladas, las funciones purificadoras de los humedales naturales [1]. Históricamente han sido utilizados para el tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales; sin embargo, su uso ha evolucionado y actualmente abarcan el tratamiento de una amplia gama de efluentes como las descargas industriales y agrícola, lixiviados de lodos, escorrentía urbana, efluentes hospitalarios, entre otros[2].

Los HA están compuestos por cuatro componentes: macrófitas, microorganismos, agua y sustrato, siendo este último esencial por su influencia en la dinámica hidráulica, la remoción de contaminantes y el desarrollo del biofilm y las macrófitas [3]. A lo largo del tiempo, diversos materiales han sido evaluados para ser utilizados como sustratos, incluyendo opciones inertes como gravas y arenas, minerales reactivos como zeolitas, escorias y calizas, así como materiales de origen orgánico o residual, como el maíz, turba y biochar [4]. Estas alternativas responden a diferencias en disponibilidad local, costos y propiedades de remoción, lo que hace necesaria una caracterización detallada que permita seleccionar los sustratos más adecuados para cada contexto.

En este marco, el presente trabajo tiene como objetivo identificar las principales características físico-químicas e hidráulicas que se evalúan al momento de seleccionar un sustrato para humedales artificiales subsuperficiales (HASS), así como las técnicas más utilizadas para su caracterización a escala de laboratorio y los materiales más empleados

en la actualidad. Con ello se busca aportar un estado del arte que sirva de referencia para el diseño y optimización de este tipo de sistemas.

2. MÉTODO

Para llevar a cabo este estudio, se realizó un proceso de revisión bibliográfica, la cual se desarrolló mediante la consulta de la base de datos académicas Web of Science y Google Scholar. La búsqueda incluyó publicaciones realizadas entre los años 2015 y 2025, utilizando palabras clave como: “constructed wetlands”, “substrates”, “properties” y “evaluation”. De esta búsqueda se priorizaron artículos que abordaran la caracterización física, química o hidráulica de substrato utilizados para el tratamiento de aguas residuales en HASS; Para la gestión de la bibliografía recopilada, se empleó el software EndNote.

3. RESULTADOS

A. Panorama general

Entre 2015 y 2025 se publicaron más de 50 estudios sobre evaluación de substratos en HASS. La producción científica se concentra en revistas internacionales especializadas como Journal of Environmental Management, Water Research, Chemical Engineering Journal y Environmental Science and Pollution Research, entre otras.

B. Propiedades relevantes en la caracterización del substrato

Los resultados obtenidos revelan que las principales propiedades fisicoquímicas de los substratos vinculadas a la eficiencia depuradora de los HASS son: (1) el área superficial específica, (2) la porosidad, (3) el tamaño de partícula, (4) la composición química elemental, (5) grupos funcionales, (6) la capacidad de adsorción y (7) pH [5, 6].

Por otro lado, la propiedad hidráulica más importante de los substratos en los HASS es la conductividad hidráulica, ya que regula parámetros clave dentro del sistema, como la tasa de infiltración y el tiempo de retención hidráulica (TRH), los cuales contribuyen a mantener un flujo uniforme y a prevenir problemas como la colmatación y la formación de zonas muertas.

B.1 Área superficial

El área superficial específica (SSA por sus siglas en inglés) de los substratos determina la cantidad de espacio superficial disponible para la adsorción de contaminantes y el desarrollo del biofilm, por lo que a mayor SSA, mayor capacidad tendrá el substrato de retener nutrientes, metales pesados, entre otros y de sostener comunidades microbianas metabólicamente activas [7, 8].

B.2 Porosidad

De acuerdo con F. Zhao et al., (2024) [9] la porosidad es una propiedad primordial ya que juega un rol determinante en el comportamiento hidráulico de los HA, al influir en parámetros como el TRH, el desarrollo radicular de las macrófitas y la formación del biofilm. Valores de porosidad no homogéneos pueden generar cortocircuitos hidráulicos y afectar la eficiencia del sistema, por otro lado, un porcentaje elevado favorece el anclaje y crecimiento de las raíces, así como la adsorción y colonización microbiana, mientras que valores bajos limitan el intercambio gaseoso y el espacio disponible para los microorganismos, comprometiendo la estabilidad y rendimiento global del HASS.

D. Pandey et al., (2025) [10] menciona que, además del % de porosidad, la morfología, tamaño y distribución de los poros también juegan un rol importante en la depuración de las aguas residuales; La tabla 1 muestra la relación entre los tamaños de poros y su aporte a la eficiencia del sistema.

Tabla 1. Clasificación de poros por tamaño

Clasificación	Tamaño	Aporte
Microporos	<2 nm	facilitan la interacción a nivel molecular.
Mesoporos	2–50 nm	favorecen del desarrollo de biofilm.
Macroporos	>50 nm	mejoran la dinámica hidráulica.

Fuente: Adaptado de [10]

B.3 Tamaño de la partícula

El tamaño de las partículas del sustrato influye directamente en la eficiencia hidráulica de los HASS y en el desarrollo del biofilm; Por lo general, a menor tamaño, mayor eficiencia de remoción [3]. Por otro lado, Z. X. Song et al., (2012) [11] señala que el tamaño de partícula, además de incidir en la hidráulica y el desarrollo del biofilm, también incide en la capacidad adsorción y filtración del HASS, por lo que se demostró que tamaños de partícula entre 6 y 11 mm, no comprometen la capacidad del sistema para cumplir con los requisitos primordiales dentro del sistema de tratamiento. Es importante señalar que, si bien las partículas finas incrementan la capacidad de adsorción en los HASS, también pueden favorecer la colmatación [11].

B.4 Química elemental

La caracterización de la química elemental de los sustratos es fundamental, ya que

permite seleccionar materiales con propiedades específicas para la retención de nutrientes y contaminantes puntuales. Conocer la composición elemental facilita identificar cuáles sustratos ofrecen mayor potencial para la eliminación de contaminantes como PO_4^- , NH_4^+ o NO_3^- , optimizando así el diseño y la eficiencia de los humedales artificiales [3].

B.5 Grupos funcionales

De acuerdo con A. Szymańska-Pulikowska et al., (2023) [12], los grupos funcionales de los sustratos son responsables de la sorción de iones específicos. De igual manera G. Yu et al., (2023) [13] resalta que, estos componentes facilitan el intercambio iónico y la atracción de contaminantes, regulan la química superficial del material favoreciendo la formación de biofilms, y actúan como donadores de electrones que promueven procesos como la nitrificación y desnitrificación, mejorando la remoción de nitrógeno.

B.6 Capacidad de adsorción

La capacidad de adsorción de los sustratos es determinante en la eficiencia de remoción de nutrientes, metales y contaminantes emergentes en humedales artificiales. Este parámetro depende del área superficial específica, la composición mineral y la presencia de grupos funcionales activos que facilitan procesos de intercambio catiónico, complejación y precipitación. Así, materiales convencionales como la arena y la grava presentan una baja capacidad adsorbente, mientras que alternativas como la zeolita, el biochar, el carbón activado y las arcillas modificadas muestran un desempeño superior [14].

B.7 Potencial de hidrógeno (pH)

El pH de los sustratos regula procesos fisicoquímicos y biológicos. Este influye en la precipitación y adsorción de nutrientes y metales, en el desarrollo microbiano y los procesos redox, ya que condiciona la abundancia y eficiencia de bacterias nitrificantes y desnitrificantes, así como la formación de biofilms en el sustrato. Por último, determina la solubilidad de metales pesados, favoreciendo su precipitación o, en casos desfavorables, su movilización [15].

B.8 Conductividad hidráulica

De acuerdo con Z. X. Song et al., (2012) [11] la conductividad hidráulica (K) del sustrato controla la forma en que se distribuye el flujo dentro de los HASS, mostrando una alta sensibilidad al tamaño de sus partículas; asimismo, se encuentra vinculada tanto a las propiedades intrínsecas del material como a la calidad del agua tratada en el efluente. Además, determina parámetros de diseño claves como el tiempo de retención hidráulica

(TRH), la distribución del flujo y el contacto agua–substrato–microorganismos.

C. Técnicas principales para la caracterización de sustratos

La caracterización de los sustratos empleados en HA se realiza mediante diversas técnicas físicoquímicas que permiten comprender su estructura, composición y capacidad de adsorción. Entre las más utilizadas están la adsorción de gases BET, que determina el área superficial específica y la distribución de poros [6, 21, 22]; el método del volumen desplazado, empleado para estimar la porosidad [23]; la microscopía electrónica de barrido (SEM), que analiza la morfología y textura del material [21, 24, 25]; y la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), utilizada para identificar grupos funcionales y enlaces activos [21, 25–27]. Asimismo, los ensayos Batch permiten evaluar la capacidad de adsorción de contaminantes mediante isothermas de Langmuir y Freundlich [21, 24, 28]; la fluorescencia de rayos X (XRF) identifica la composición elemental [6, 16, 29]; y los ensayos hidráulicos con trazadores estiman la conductividad y dispersión hidráulica del sistema [30].

D. Sustratos utilizados actualmente en HASS

Los sustratos empleados en humedales artificiales de flujo subsuperficial se clasifican en tres grupos principales [7, 31]. Los naturales, como la grava y la arena, son de bajo costo y alta estabilidad, aunque con limitada área superficial [5, 32, 33]; mientras que materiales como la zeolita, la piedra caliza y las rocas volcánicas mejoran la adsorción de amonio, fósforo y promueven el desarrollo del biofilm [7, 24]. Entre los subproductos agrícolas e industriales, la escoria de acero, la ceniza volante y las conchas de moluscos aumentan la capacidad de adsorción de P y metales pesados, además de regular el pH [6, 34, 35]. Finalmente, los materiales artificiales o modificados, como el biochar y las arcillas tratadas con Fe, Al o Mg, presentan alta área superficial y elevan la eficiencia de remoción de contaminantes emergentes y fósforo [7, 10].

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo recopiló y analizó el estado del arte sobre la caracterización de sustratos en humedales artificiales de flujo subsuperficial (HASS), evidenciando que las propiedades físicoquímicas e hidráulicas de los materiales son determinantes para la eficiencia del sistema. La etapa de caracterización de los materiales juega un rol clave, ya que permite identificar su idoneidad y comportamiento en los procesos de adsorción, filtración y soporte biológico. Aunque materiales convencionales como arena y grava siguen siendo ampliamente utilizados, alternativas como la zeolita, escoria siderúrgica, biochar, conchas de moluscos y arcillas modificadas ofrecen mayor capacidad de adsorción y sostenibilidad.

Referencias

- [1] [1] A. Stefanakis, "The Role of Constructed Wetlands as Green Infrastructure for Sustainable Urban Water Management," *Sustainability*, vol. 11, no. 24, 2019, doi: 10.3390/su11246981.
- [2] D. Q. Zhang, K. B. Jinadasa, R. M. Gersberg, Y. Liu, S. K. Tan, and W. J. Ng, "Application of constructed wetlands for wastewater treatment in tropical and subtropical regions (2000-2013)," *J Environ Sci (China)*, vol. 30, pp. 30-46, Apr 1 2015, doi: 10.1016/j.jes.2014.10.013.
- [3] Y. Yang, Y. Zhao, R. Liu, and D. Morgan, "Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands," *Bioresour Technol*, vol. 261, pp. 441-452, Aug 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2018.03.085.
- [4] C. Yang et al., "Selection and optimization of the substrate in constructed wetland: A review," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 49, 2022, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.103140.
- [5] S. Vishwakarma, D. Dharmendra, R. Singh, B. Bharti, and A. Ankita, "Engineering Properties of Substrate used in Constructed Wetlands Treating low Strength Sewage under Tropical Conditions," *Pollution*, vol. 9, no. 4, pp. 1345-1354, 2023, doi: 10.22059/POLL.2023.354800.1780.
- [6] J. Li, L. Liu, X. Huang, J. Liao, and C. Liu, "Cross-effect of wetland substrates properties on anammox process in three single-substrate anammox constructed wetlands for treating high nitrogen sewage with low C/N," *J Environ Manage*, vol. 304, p. 114329, Feb 15 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114329.
- [7] Y. Zhu and L. Miao, "Effects of Specific Surface Area of Artificial Carriers on Carbon Metabolism Activity of Biofilm," *Water*, vol. 14, no. 17, 2022, doi: 10.3390/w14172735.
- [8] S. Satyam and S. Patra, "Innovations and challenges in adsorption-based wastewater remediation: A comprehensive review," *Heliyon*, vol. 10, no. 9, p. e29573, May 15 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29573.
- [9] F. Zhao et al., "Review of hydraulic conditions optimization for constructed wetlands," *Journal of Environmental Management*, no. 370, 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122377.
- [10] D. Pandey et al., "Biochar application in constructed wetlands for wastewater treatment: A critical review," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 69, 2025, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.106713.
- [11] Z. X. Song, S. Y. Bai, and J. Xu, "Effect of Flow Field Distribution on the Clogging of Subsurface Flow Constructed Wetlands," *Advanced Materials Research*, vol. 610-613, pp. 1349-1353, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.610-613.1349.
- [12] A. Szymańska-Pulikowska, A. Wdowczyk, and P. Wiercik, "Analysis of changes on substrates filling constructed wetland systems after landfill leachate treatment - FTIR study," *Journal of Cleaner Production*, vol. 411, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137336.
- [13] G. Yu et al., "Recent Advances in the Effects of Biochar on Constructed Wetlands: Treatment Performance and Microorganisms," *Separations*, vol. 10, no. 12, 2023, doi: 10.3390/separations10120593.
- [14] Y. Wang, Z. Cai, S. Sheng, F. Pan, F. Chen, and J. Fu, "Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands," *Sci Total Environ*, vol. 701, p. 134736, Jan 20 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134736.
- [15] Z. Ji, W. Tang, and Y. Pei, "Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal," *Chemosphere*, vol. 286, no. Pt 1, p. 131564, Jan 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131564.

Autorización y Licencia CC

Los autores autorizan a APANAC XVIII a publicar el artículo en las actas de la conferencia en Acceso Abierto (Open Access) en diversos formatos digitales (PDF, HTML, EPUB) e integrarlos en diversas plataformas online como repositorios y bases de datos bajo la licencia CC:

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

Ni APANAC XVIII ni los editores son responsables ni del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en el artículo.