

Propuesta de modificación del flujo tecnológico de una planta de tratamiento mediante humedales artificiales para el tratamiento integral de aguas residuales y lodos sépticos

Ana Marlen Hernández RiveraE-MAIL: anamarlen594@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE)

Carolina Medina LosadaE-MAIL: carolinamedinalosada@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE)

Dariel González RodríguezE-MAIL: d.glezrguez99@gmail.com

Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana

Luis Alberto Rivero CárdenasE-MAIL: lriveroc89@gmail.com

Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana

Luis F. Córdova LópezE-MAIL: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE)

RESUMEN

La gestión deficiente de lodos provenientes de fosas sépticas incrementa la carga contaminante en los sistemas de alcantarillado y disminuye la eficiencia operativa de las plantas de tratamiento. El presente estudio plantea la modificación del flujo tecnológico de una planta de tratamiento, incorporando humedales artificiales para el procesamiento de lodos y humedales de flujo vertical en la línea de agua. Se efectuó un diagnóstico del sistema actual y se diseñó un nuevo esquema tecnológico que posibilita el tratamiento simultáneo de aguas residuales y lodos, priorizando la utilización de infraestructura disponible y reduciendo el consumo energético. El dimensionamiento preliminar incluyó cálculos de áreas, espesores de medio granular y tasas de aplicación de lodos. Los resultados demuestran que la propuesta es técnicamente factible, económicamente ventajosa y ambientalmente sostenible, mejorando la eficiencia global del sistema y disminuyendo el impacto sobre el cuerpo receptor.

PALABRAS CLAVE: *aguas residuales, flujo tecnológico, humedales artificiales, sostenibilidad, tratamiento de lodos*

Proposal for modification of the technological flow of a treatment plant using artificial wetlands for the comprehensive treatment of wastewater and septic sludge



23-05-2026 RECIBIDO

APROBADO 11-07-2026

Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ABSTRACT

Inadequate management of sludge derived from septic tanks increases the pollutant load in sewerage systems and reduces the operational efficiency of existing treatment plants. This study proposes the modification of the technological flow of a treatment plant by incorporating constructed wetlands for sludge processing and vertical-flow wetlands for the water line. A diagnostic assessment of the current system was conducted, followed by the design of a new technological scheme that enables the simultaneous treatment of wastewater and sludge, prioritizing the use of available infrastructure and minimizing energy consumption. The preliminary sizing included calculations of surface areas, granular media thicknesses, and sludge application rates. The results demonstrate that the proposal is technically feasible, economically advantageous, and environmentally sustainable, enhancing the overall efficiency of the system and mitigating the impact on the receiving body.

KEYWORDS: *constructed wetlands, sustainability, technological flow, wastewater, sludge treatment*

01 INTRODUCCIÓN

El desarrollo sostenible exige garantizar el acceso a un saneamiento adecuado y equitativo, así como promover la mejora de la calidad, la protección y la restauración de los ecosistemas hídricos. No obstante, se estima que aproximadamente el 80 % de las aguas residuales generadas a nivel mundial retornan a la naturaleza sin tratamiento, lo que genera implicaciones críticas para la salud pública y el medio ambiente (González Rodríguez, 2023).

La implementación de técnicas de gestión de aguas residuales, desde su recolección hasta su disposición final en el medio receptor, constituye una alternativa viable para atender las necesidades básicas de saneamiento en comunidades vulnerables. Dicho enfoque debe priorizar el aprovechamiento de la infraestructura existente, la optimización de la superficie disponible y la reducción del consumo de energía eléctrica (Bayas Jiménez, 2018). En las últimas décadas, los humedales artificiales han adquirido relevancia como sistemas de depuración extensivos, debido a sus ventajas frente a tecnologías convencionales: consumo energético nulo, menores costos de inversión, baja demanda de personal operativo y mínima frecuencia de generación de lodos (Agudo Llorens, 2021).

Los humedales destinados al tratamiento de lodos tienen como objetivo incrementar la concentración de sólidos totales, reducir el volumen de lodos y estabilizar la fracción biodegradable de la materia orgánica (Poveda Quintana, 2021).

Estos procesos se logran mediante operaciones de espesamiento y deshidratación, facilitadas por mecanismos de evapotranspiración y percolación (Werther & Ogada, 1998).

La tecnología de humedales aplicada al tratamiento de lodos se utiliza en diversas regiones del mundo como complemento a los procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales, consolidándose como una alternativa sostenible y eficiente (Caselles-Osorio et al., 2007).

El objetivo del trabajo presentado es proponer una modificación en la planta de tratamiento de aguas residuales existente en la Comunidad Sierra Maestra en el municipio Boyeros de la provincia de La Habana mediante la modificación de los actuales humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial, por la aplicación de humedales artificiales de flujo vertical saturados/no saturados. La realización de esta modificación permite reducir de 6 humedales de flujo horizontal a 2 de flujo vertical. En los 4 restantes se realiza el rediseño de los mismos para el tratamiento de los lodos provenientes de los carros limpia fosas.

La propuesta realizada constituye un elemento novedoso ya que se aplican los últimos conocimientos a nivel internacional para el dimensionamiento de humedales verticales de tipo saturados/no saturados, lo que permitirá la remoción de los nitratos en la zona saturada, o zona anóxica; esto mejora la calidad del efluente, así como protege del proceso de eutroficación debido al proceso de desnitrificación antes mencionado.

02 MÉTODOS

A continuación, se describe de manera detallada la zona de estudio, el proyecto actualmente ejecutado y la metodología propuesta para modificar el flujo tecnológico de la planta de tratamiento mediante la incorporación de humedales artificiales de flujo vertical, tanto saturados como no saturados, así como humedales destinados al tratamiento de lodos. El área de estudio se localiza en la Comunidad Sierra Maestra, municipio Boyeros, en Ciudad de La Habana, a 1,5 km al este del poblado Santiago de Las Vegas (Valdés, 2006). Las condiciones físico-geográficas del área de estudio corresponden a un relieve suave, lo que facilita la implementación de sistemas de tratamiento extensivos y de bajo impacto ambiental (Valdés, 2006).

2.1. Estructura actual de la planta

La planta de tratamiento actualmente está conformada por una serie de unidades operativas que corresponden a cada etapa del proceso de depuración, las cuales se describen a continuación. **Pretratamiento:** el objetivo de esta fase es la separación de sólidos de gran tamaño presentes en el agua residual (Silva Tipantasig, 2019). **Tratamiento secundario:** el tratamiento secundario tiene como finalidad la eliminación de la mayor parte de la materia orgánica biodegradable, mediante procesos de carácter biológico; esta etapa se compone de un tanque Imhoff seguido de lechos de secado (Hernández Crespo & Martín Monerris, 2023). Posteriormente, el sistema incorpora humedales de flujo subsuperficial horizontal, los cuales complementan el proceso biológico.

2.2. Datos generales del proyecto actual

El estudio realizado para la planta de tratamiento arrojó los siguientes parámetros de diseño y operación: población atendida = 1000 habitantes; carga de $\text{DBO}_5 = 45 \text{ g DBO}_5/(\text{habitante} \cdot \text{día})$; caudal medio ($Q_{\text{medio}} = 1,45 \text{ L/s}$; concentración media de $\text{DBO}_5 = 360 \text{ mg/L}$; concentración media de S.S. = 400 mg/L ; dotación normativa según NC 973:2013 = $155 \text{ L}/(\text{habitante} \cdot \text{día})$ para 1000 habitantes (Oficina Nacional de Normalización, 2013).

El caudal de agua a tratar se calculó mediante la siguiente expresión:

$$Q = \text{Población} \times \text{Dot} \times \text{APSA} \quad (2.1)$$

$$Q = 1000 \times 0,155 \times 0,8 = 124 \text{ m}^3/\text{día}$$

2.3. Muestreos realizados

La empresa provincial Aguas de La Habana realizó muestreos mensuales en la planta de tratamiento «Sierra Maestra» con el objetivo de evaluar el comportamiento de las concentraciones de contaminantes en el afluente. Los parámetros analizados fueron: DBO_5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días), indicador que mide la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en el agua residual; DQO (Demanda Química de Oxígeno), parámetro que cuantifica la materia orgánica y algunos compuestos inorgánicos oxidables; SST (Sólidos Suspendedos Totales), que representan las partículas en suspensión que afectan la calidad del agua; y NTK (Nitrógeno Total Kjeldahl), que determina la concentración de nitrógeno orgánico y amoniacal en el afluente.

Los resultados obtenidos para estos parámetros, según los muestreos realizados, se exponen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros de entrada

Parámetro	Valor (mg/l)
DBO_5	145
DQO	361
SST	55,7
NTK	45,66

2.4. Metodología para el diseño y dimensionamiento de humedales verticales franceses

A continuación, se presentan los métodos y recomendaciones utilizados para diseñar y dimensionar humedales artificiales verticales franceses, la cual es la alternativa a desarrollar para lograr los objetivos antes mencionados.

Determinación de área

Para la determinación del área de los humedales artificiales se emplean diversos métodos, entre ellos la regla general y el método de cargas aplicadas. Este último se describe a continuación.

$$As_{DBO_5} = \frac{C_{DBO_5} \cdot Q}{\text{Carga de diseño}} \quad (2.2)$$

Donde: As_{DBO_5} es el área superficial requerida según la concentración de DBO_5 ; C_{DBO_5} es la concentración de DBO_5 ; y Q es el caudal.

$$As_{DQO} = \frac{C_{DQO} \cdot Q}{\text{Carga de diseño}} \quad (2.3)$$

Donde: As_{DQO} es el área superficial requerida según la concentración de DQO; C_{DQO} es la concentración de DQO; y Q es el caudal.

$$As_{SST} = \frac{C_{SST} \cdot Q}{\text{Carga de diseño}} \quad (2.4)$$

Donde: As_{SST} es el área superficial requerida según la concentración de SST; C_{SST} es la concentración de SST; y Q es el caudal.

$$As_{NTK} = \frac{C_{NTK} \cdot Q}{\text{Carga de diseño}} \quad (2.5)$$

Donde: As_{NTK} es el área superficial requerida según la concentración de NTK; C_{NTK} es la concentración de NTK; y Q es el caudal.

Comprobación de área mediante carga hidráulica

La verificación del área de los humedales verticales franceses se realiza a través de la relación entre el caudal y el área superficial disponible para cada parámetro de diseño. Las expresiones se plantean de la siguiente manera:

$$\text{Según } DBO_5 = \frac{Q}{As_{DBO_5}} \quad (2.6)$$

$$\text{Según } DQO = \frac{Q}{As_{DQO}} \quad (2.7)$$

$$\text{Según } SST = \frac{Q}{As_{SST}} \quad (2.8)$$

$$\text{Según } NTK = \frac{Q}{As_{NTK}} \quad (2.9)$$

Recomendaciones de diseño

Según IWA (2017), en la Tabla 2.2 se presentan las recomendaciones de diseño para los humedales de flujo vertical francés, tanto saturados como no saturados, en relación con las cargas máximas de diseño y los porcentajes de remoción. Los valores se expresan por metro cuadrado de cama o celda en funcionamiento, bajo condiciones de clima seco.

Tabla 2.2. Cargas máximas de diseño para el diseño clásico de humedales de FV tipo francés en condiciones de clima seco. Los valores dados son por metro cuadrado de cama o celda en funcionamiento

Etapa de tratamiento	HLR ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$)	DQO ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$)	DBO ₅ ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$)	SST ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$)	NTK ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{día}$)
Primera etapa	0,37	350	150	150	30
Eliminación	—	$0,80 \times M_i$	$0,90 \times M_i$	$0,90 \times M_i$	$1,1128 \times M_i^{0,8126}$

Régimen de alimentación

El volumen por lote corresponde a la cantidad de agua residual que ingresa a la celda en cada ciclo de alimentación. Este parámetro depende del área de la celda y de la altura de la capa líquida seleccionada, y es clave para definir la frecuencia y duración de los pulsos de operación. La capa líquida se refiere al espesor de agua que se acumula sobre la superficie del medio filtrante, el cual influye directamente en la distribución hidráulica y en la capacidad de depuración del sistema; esta debe mantenerse entre 2 y 5 cm, rango que permite soportar episodios de lluvias sin comprometer la estabilidad hidráulica.

Cálculo del volumen por lote:

$$V_L = A_{s_{celda}} \cdot CL \quad (2.10)$$

Donde: V_L es el volumen por lote de alimentación, es decir, el volumen de agua que entra en cada ciclo; $A_{s_{celda}}$ es el área de la celda de alimentación; y CL es la capa líquida seleccionada, equivalente a la altura de agua sobre el medio filtrante.

Cálculo del número de cargas por día:

$$N_{Cargas} = \frac{Q_{medio}}{V_L} \quad (2.11)$$

Donde: N_{Cargas} es el número de cargas por día, que indica cuántos lotes de agua ingresan en 24 horas; Q_{medio} es el caudal medio, volumen promedio de agua residual que llega al sistema diariamente; y V_L es el volumen por lote de alimentación. El número de cargas no debe exceder de 14 cargas por día.

Cálculo del flujo por lote:

$$Q_L = A_{s_{celda}} \cdot ICH \quad (2.12)$$

Donde: Q_L es el flujo por lote, caudal instantáneo que ingresa en cada pulso de alimentación; $A_{s_{celda}}$ es el área de la celda de alimentación; e ICH es la intensidad de carga hidráulica, que representa la presión de agua aplicada por unidad de superficie.

Cálculo de la duración de cada pulso:

$$T_{Pulso} = \frac{V_L}{Q_L} \quad (2.13)$$

Donde: T_{Pulso} es la duración de cada pulso, tiempo que tarda en ingresar el volumen de agua correspondiente a un lote; V_L es el volumen por lote de alimentación; y Q_L es el flujo por lote.

Consideraciones operativas

Definir el régimen de alimentación del humedal es un aspecto fundamental, ya que se debe garantizar la llegada de la carga suficiente y establecer el número de días de operación y de descanso. En este esquema, una celda trabaja durante 3,5 días, mientras la otra permanece en reposo, lo que asegura la eficiencia del sistema y la recuperación del medio filtrante.

2.5. Metodología para el diseño y dimensionamiento de humedales de tratamiento de lodos

Los humedales destinados al tratamiento de lodos se dimensionan en función de la carga de sólidos suspendidos totales (SST) y el área disponible, con el objetivo de estimar la producción de lodo que será tratada por cada

unidad.

Producción de lodo:

$$\text{Producción de Lodo} = \text{Carga de SST} \times A_s \quad (2.14)$$

Donde: la producción de lodo es la cantidad de lodo generado para ser tratado en el humedal; la carga de SST es la masa de sólidos suspendidos totales aplicada por unidad de área; y A_s es el área superficial del humedal destinada al tratamiento.

Superficie por cama:

$$\text{Superficie por cama} = \frac{\text{Superficie de humedal}}{\text{No. de camas}} \quad (2.15)$$

Donde: la superficie por cama es el área asignada a cada celda o cama de tratamiento; la superficie del humedal es el área total construida para el sistema; y el número de camas es la cantidad de unidades en que se divide el humedal.

Calado del humedal:

$$\text{Calado} = A + F + H_s \quad (2.16)$$

Donde: el calado es la altura total del humedal; A es la altura de acumulación de fango (se recomienda 0,5 m para una vida útil de 5 años, considerando una tasa anual de acumulación de 0,1 m); F es el espesor del medio filtrante (valor recomendado: 0,5 m); y H_s es la altura de seguridad, que garantiza capacidad adicional frente a variaciones operativas.

Recomendaciones de diseño

De acuerdo con Silva Tipantasig (2019) y Molle (2013), se presentan a continuación en las siguientes tablas (Tabla 2.3, Tabla 2.4 y Tabla 2.5) parámetros de diseño y porcentajes de remoción en humedales de flujo vertical para el tratamiento de lodos:

Tabla 2.3. Porcientos de remoción en humedales para el tratamiento de lodos (Silva Tipantasig, 2019)

Parámetro	Valor (%)
Sólidos totales	20–37

Tabla 2.4. Porcientos de remoción en humedales para el tratamiento de lodos con lecho de carrizo (Silva Tipantasig, 2019)

Parámetro	Valor (%)
ST, DBO ₅ , DQO	31–49

Tabla 2.5. Calidad de lixiviados obtenida en funcionamiento nominal, en el momento del tratamiento de fangos extraídos de fosas pilotos de 2 m (Molle, 2013)

Carga nominal	30 kg MS · m ⁻² · año ⁻¹			50 kg MS · m ⁻² · año ⁻¹			70 kg MS · m ⁻² · año ⁻¹		
	Medio	ET	Rend (%)	Medio	ET	Rend (%)	Medio	ET	Rend (%)
MES (mg · L ⁻¹)	2907	4157	93,7	3394	3208	84,3	3572	3900	91,8
DQO (mg · L ⁻¹)	4093	5671	91,5	7391	3881	83,4	4440	3347	91,2
NH ₄ ⁺ (mg · L ⁻¹)	20,4	22,6	92,6	44,9	38,1	85,8	62,4	59,8	80,6
NO ₃ ⁻ (mg · L ⁻¹)	333,8	426,6	—	2868	3358	—	226,5	212,1	—

Actualmente no existe un régimen de carga y descanso universalmente aceptado. El período de carga suele variar entre 1 y 7 días, mientras que la duración del reposo depende de las condiciones climáticas, que juegan un papel dominante en la selección del tiempo de descanso adecuado (Stefanakis et al., 2014).

Sistema de distribución

Los sistemas de distribución o alimentación a los humedales presentan recomendaciones de diseño que permiten un mejor funcionamiento hidráulico y evitan problemas operativos: garantizar que el humedal resista una carga hidráulica de $0,6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$; utilizar agujeros de 8–12 mm en la tubería de distribución para asegurar una adecuada dispersión del caudal; emplear tuberías de 160–200 mm de diámetro, con un punto de alimentación por cada 50 m^2 de superficie; mantener una velocidad mínima de 1 m/s y máxima de 1,6 m/s en las tuberías; y evitar la existencia de agua estancada en las tuberías entre los pulsos de alimentación intermitentes.

Sistema de drenaje

Las estructuras de salida permiten mantener uniforme el caudal a través del humedal y controlar la profundidad operativa. En humedales de flujo subsuperficial, el diseño debe permitir una inundación controlada de 15 cm, lo que favorece el crecimiento de plantas y el control de maleza. Un colector subsuperficial perforado, conectado a una salida ajustable, ofrece máxima flexibilidad y fiabilidad. Las recomendaciones de diseño incluyen: emplear tuberías con diámetros mínimos de 100 mm; mantener pendiente de 0,5–1 % para garantizar el flujo adecuado; dimensionar el diámetro de la tubería central lo más amplio posible para drenar los picos hidráulicos; e instalar tuberías de drenaje con aireación por el fondo mayor a $0,25 \text{ m}^2$.

03 RESULTADOS

A continuación, se presenta la propuesta de diseño para la modificación de los filtros plantados como sistemas de tratamiento de aguas residuales en la comunidad Sierra Maestra, con el objetivo de incorporar el tratamiento de lodos procedentes de fosas y tanques sépticos, lo cual conllevará a una mejora sustancial de la eficiencia de todo el proceso de tratamiento del agua residual de la comunidad.

3.1. Propuesta de modificación del flujo tecnológico de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) «Sierra Maestra»

Se plantea un nuevo flujo tecnológico mostrado en la Figura 3.1 que responde a dos objetivos fundamentales:

- Tratar las aguas residuales que la planta procesa actualmente, garantizando un efluente que cumpla con las normas mediante la aplicación de humedales de flujo vertical francés no saturados/saturados.
- Incorporar el tratamiento de los lodos generados en la limpieza de fosas y tanques sépticos.

La planta conserva las estructuras iniciales: una cámara de rejillas, encargada del cribado y retención de sólidos gruesos, y una estación de bombeo, que impulsa el caudal hacia el tanque Imhoff, donde comienza el proceso de tratamiento. Estas unidades no se modifican en la nueva propuesta. Posteriormente, el sistema cuenta con lechos de secado y seis humedales de flujo horizontal. La propuesta establece la reconversión de dos de estos filtros en humedales de flujo vertical tipo francés, capaces de soportar mayores cargas hidráulicas y orgánicas, mientras que los cuatro restantes se destinan al tratamiento de lodos provenientes de fosas y tanques sépticos. Para garantizar una operación eficiente, se diseña un tanque de alimentación por batch, equipado con un sifón y ubicado en posición elevada, lo que permite conducir el agua por gravedad hacia los dos humedales de flujo vertical francés no saturados/saturados.

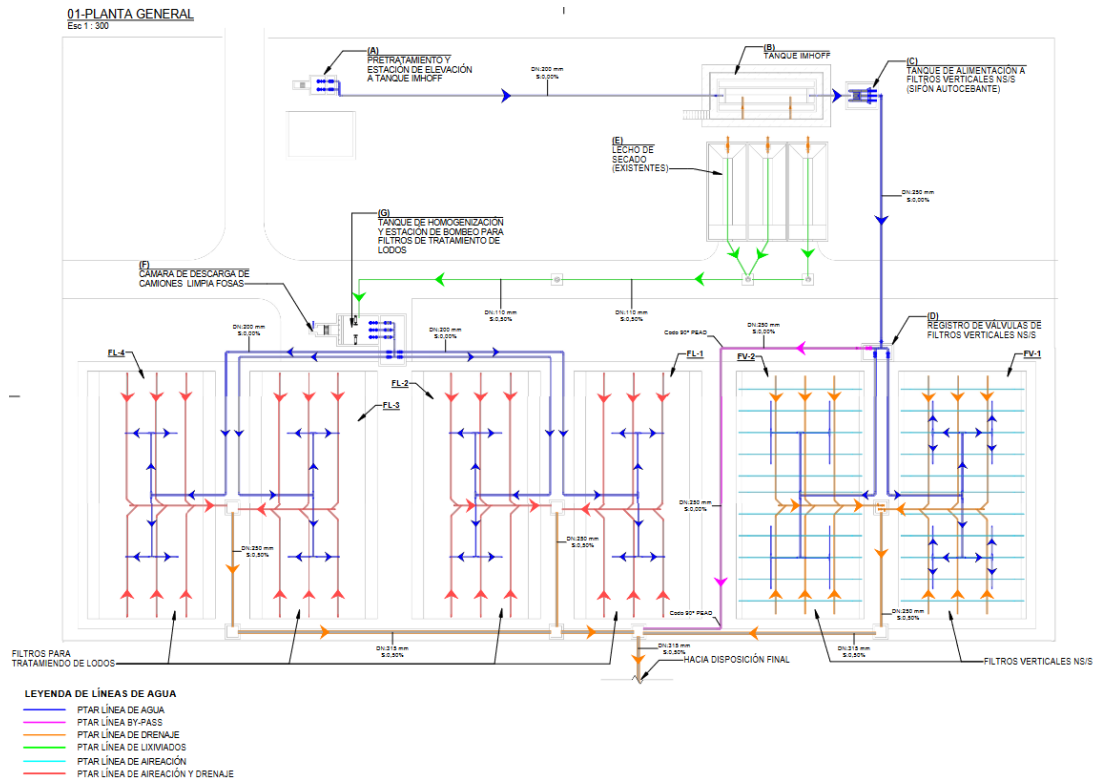


Figura 3.1. Propuesta de Flujo Tecnológico de la PTAR «Sierra Maestra».

3.2. Dimensionamiento de los elementos de la planta

La propuesta incluye un tanque de alimentación por batch, elevado y equipado con sifón, que permite conducir el agua por gravedad hacia los humedales de flujo vertical francés. La vista en 3D (Figura 3.2) muestra las cotas de elevación consideradas en el diseño.

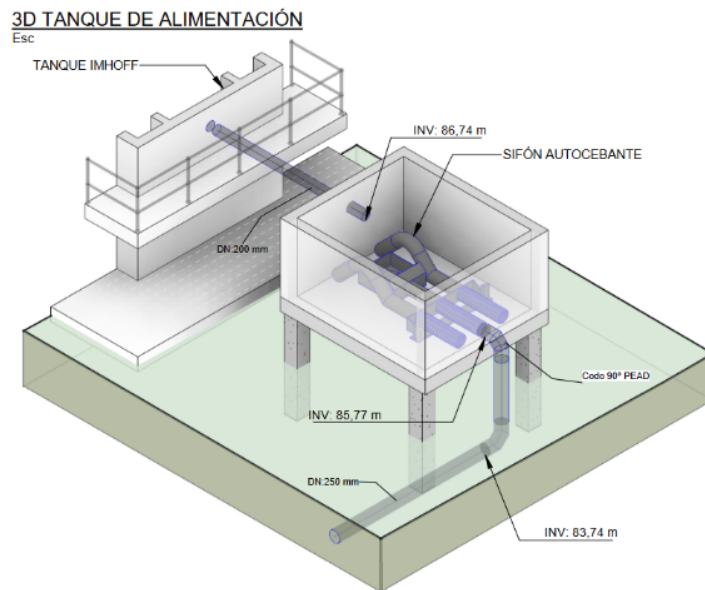


Figura 3.2. Vista en 3D del tanque de alimentación con cotas de elevación.

3.3. Diseño y dimensionamiento de los humedales verticales franceses

Los filtros actuales poseen un área de 375 m² por celda, comprobándose que la modificación de horizontales a verticales no afecta la estructura en largo, ancho ni profundidad.

Sistema de distribución: la vista en planta (Figura 3.3) del sistema de distribución, el humedal de flujo vertical no saturado-saturado (HA FV NS-S), se diseñó para garantizar una alimentación homogénea.

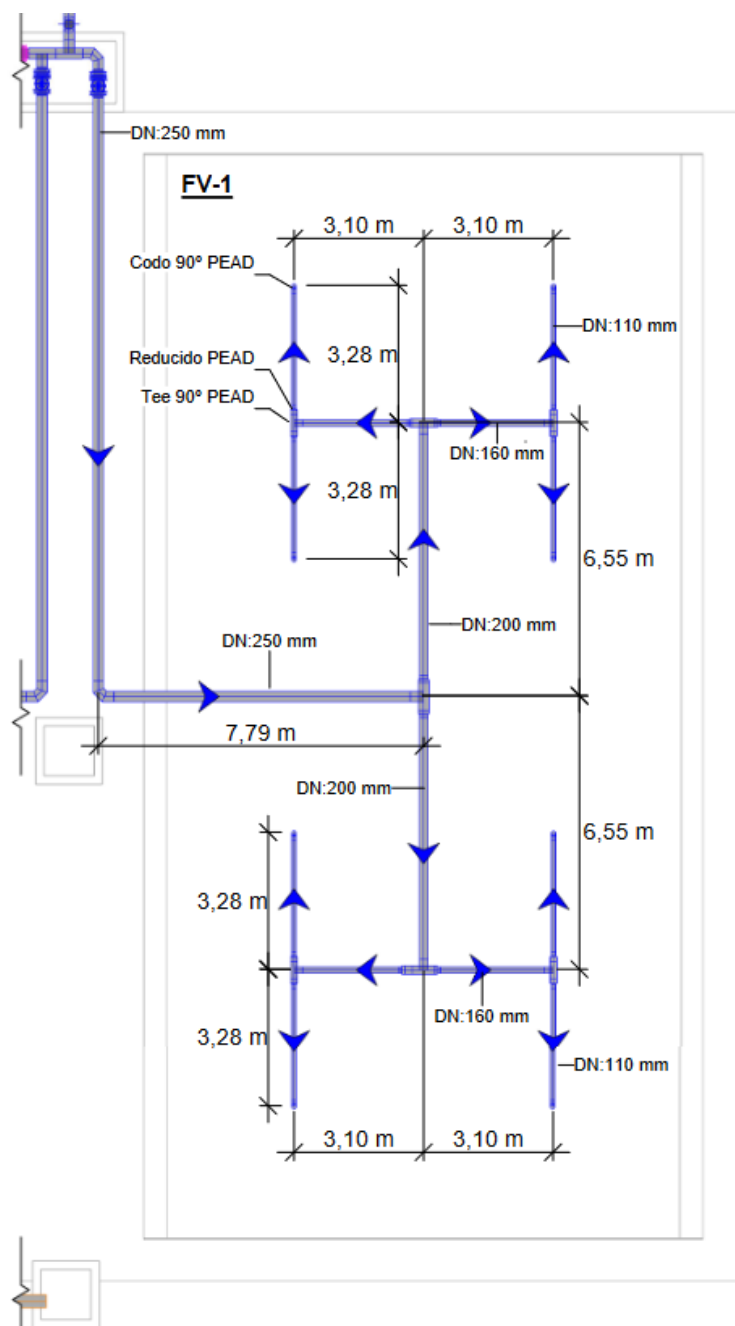


Figura 3.3. Vista en planta del sistema de distribución de HA FV NS-S.

Sistema de aireación: el sistema de aireación del humedal de flujo vertical no saturado-saturado (HA FV NS-S) (Figura 3.4) se compone de: tuberías de 110 mm de diámetro; longitud de 10,50 m; separación entre tuberías de 1,70 a 2,30 m; codos de 45°, material PEAD.

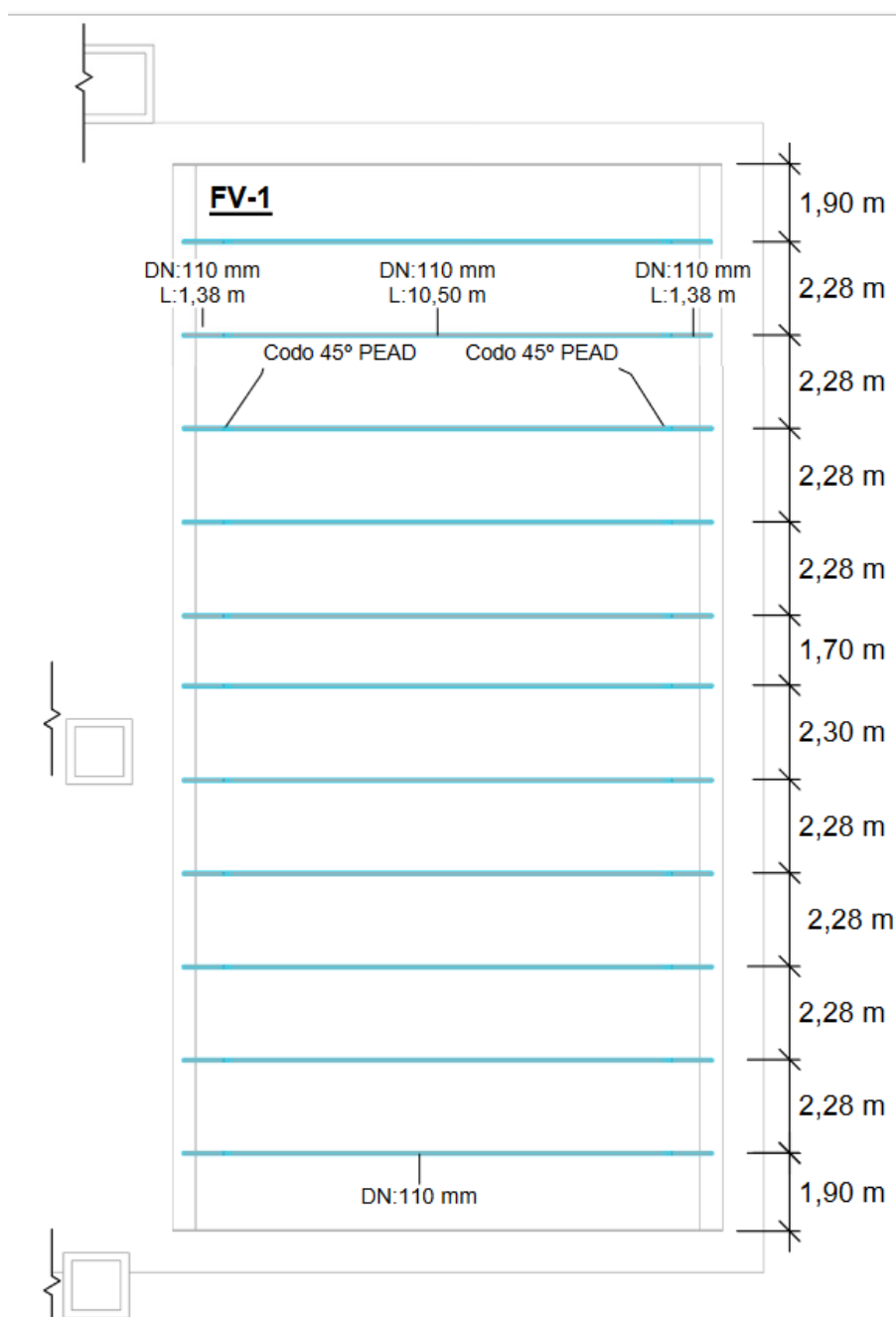


Figura 3.4. Vista en planta del sistema de aireación de HA FV NS-S.

Sistema de drenaje: el sistema de drenaje del humedal de flujo vertical no saturado-saturado (HA FV NS-S) (Figura 3.5) incluye: tres tuberías de 14 m y tres de 11 m de longitud; separación de 3,10 m entre tuberías; diámetro de 160 mm; material PEAD, con codos y tee de 45°.

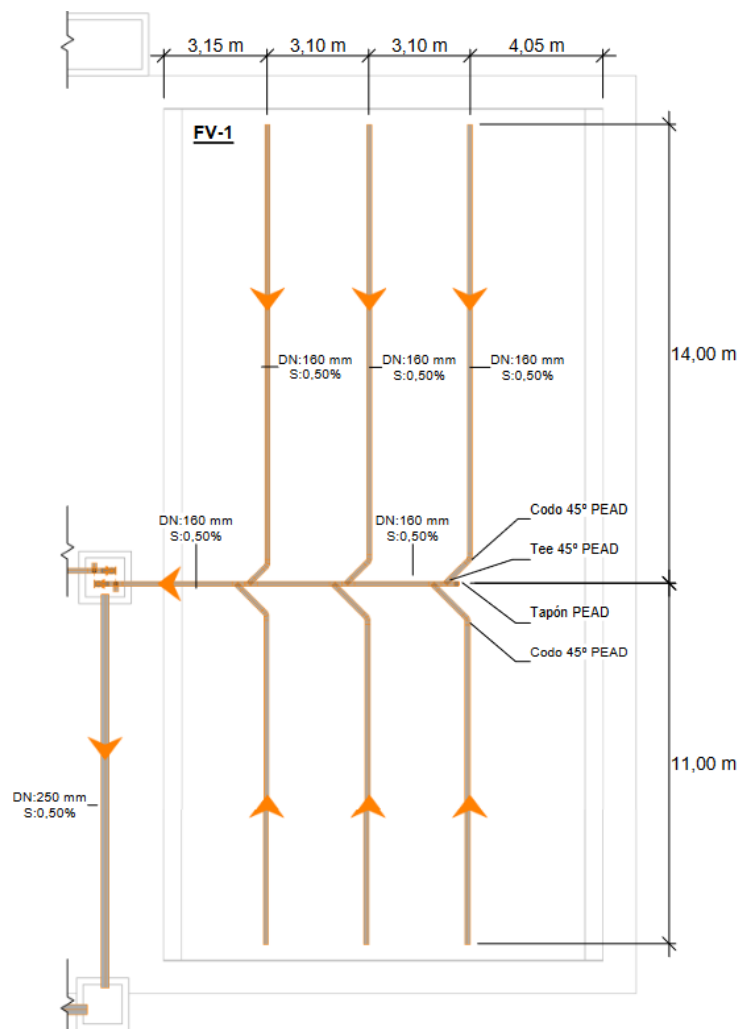


Figura 3.5. Vista en planta del sistema de drenaje de HA FV NS-S.

3.4. Caracterización del flujo

Tras el pretratamiento en el tanque Imhoff, se estima una remoción del 25 % de DBO₅, modificando las características del efluente. A continuación, en las siguientes tablas (Tabla 3.1, Tabla 3.2, Tabla 3.3 y Tabla 3.4) se muestran los resultados de dichas estimaciones:

Tabla 3.1. Características del flujo inicial

Parámetro	Valor
Q (m ³ /d)	124
DBO ₅ (mg/l)	145
DQO (mg/l)	361
SST (mg/l)	55,7
NTK (mg/l)	45,66

Tabla 3.2. Eficiencias esperadas a la salida del tanque Imhoff

Parámetro	Valor
Remoción (%)	25
DBO ₅ (mg/l)	108,75
DQO (mg/l)	270,75
SST (mg/l)	41,78
NTK (mg/l)	34,25

Tabla 3.3. Características del flujo de entrada de los humedales

Parámetro	Valor (mg/l)
DBO ₅	108,75
DQO	270,75
SST	41,78
NTK	34,25

Tabla 3.4. Características del flujo a la salida de los humedales

Parámetro	Remoción (%)	Valor (mg/l)
DBO ₅	93	7,61
DQO	85	40,61
SST	93	2,92
NTK	79	7,19

3.5. Diseño y dimensionamiento de los humedales artificiales para el tratamiento de lodos

Se recomienda una carga de 50 kg ST/m², ampliable hasta 70 kg ST/m² según resultados de estudios pilotos (Molle, 2013). La instalación debe incluir:

- Área de descarga con cámara de rejas para retener sólidos gruesos.
- Tanque de almacenamiento con agitador $\geq 50 \text{ W/m}^3$ (Figura 3.6) y sistemas de control de olores (jet hidráulico, lona, filtro de carbón activo).
- Capacidad de almacenamiento para 2–6 días, evitando sobrecargas y asegurando alimentación regular a los lechos.
- Sistema de distribución de lodos.
- Caudales de alimentación $> 0,25 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$.
- Placa deflectora bajo el chorro de lodo para mejorar la distribución y limitar erosión.
- Alimentación desde el centro o desde un borde del filtro (Figura 3.7).

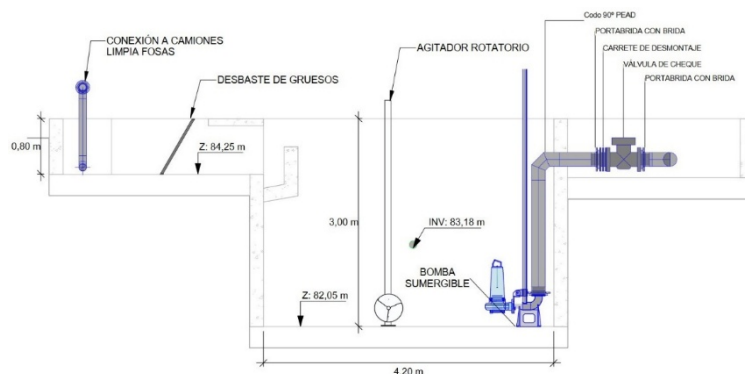


Figura 3.6. Vista en sección del tanque de homogenización.

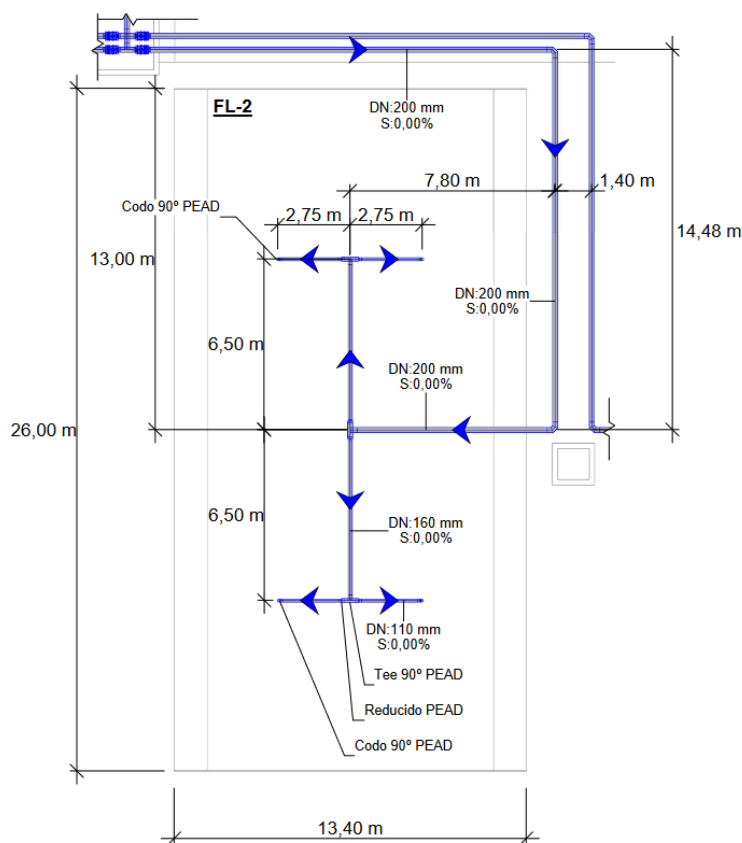


Figura 3.7. Vista en planta del sistema de alimentación.

Sistema de drenaje-aireación: la red de drenaje (Figura 3.8) que asegura evacuación de lixiviados y aireación, posee las siguientes características:

- Tubos de PVC ≥ 100 mm de diámetro.
- Ranuras de 1 cm cada 10 cm (orientadas hacia abajo para lixiviados y hacia arriba para aireación).
- Seis tuberías de 160 mm, separadas a 3,10 m.

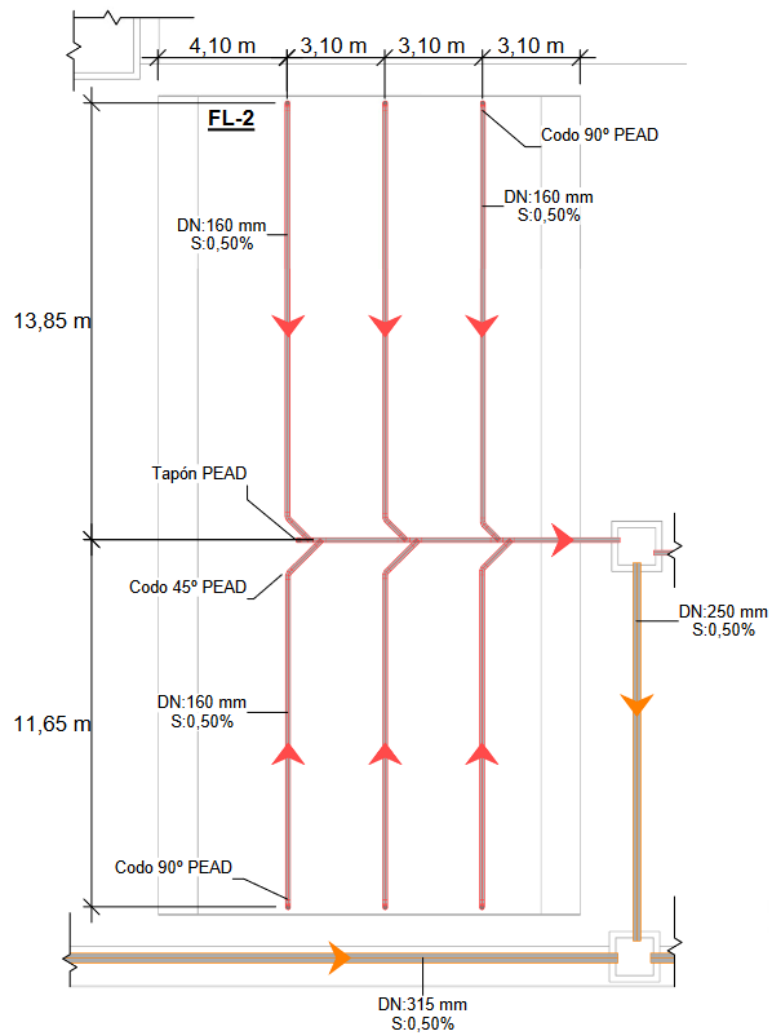


Figura 3.8. Vista en planta del sistema de drenaje-aireación.

Las eficiencias que se esperan de los lixiviados a la salida de estos humedales se muestran en la Tabla 3.5 a continuación:

Tabla 3.5. Eficiencias esperadas a la salida de humedales para tratamiento de lodos

Parámetro	Remoción (%)	Valor (mg/L)
DQO	91,8	16,4
SST	91,2	17,6
NTK	80,6	38,8

04 CONCLUSIONES

La propuesta de modificación del flujo tecnológico de la PTAR «Sierra Maestra» se ajusta a las condiciones reales de la zona y responde de manera efectiva a las necesidades de tratamiento de aguas residuales. Se aplicaron metodologías de cálculo actualizadas para el dimensionamiento de los filtros, fundamentadas en experiencias internacionales recientes y en criterios técnicos reconocidos. El sistema propuesto contempla dos líneas de flujo independientes, una destinada al tratamiento de las aguas residuales de la comunidad atendida por la planta y otra dirigida al tratamiento de los lodos provenientes de la

limpieza de tanques sépticos y fosas.

La modificación para el tratamiento de lodos permitirá procesar 10 m³ diarios. Los humedales modificados para el tratamiento de lodos tendrán una vida útil de 10 años, con una acumulación estimada de 1 m de fango (equivalente a 10 cm por año) y un volumen final de producto de 1500 m³.

Finalmente, el sistema se considera económicamente viable, ya que aprovecha la infraestructura existente y evita la construcción de una nueva planta de tratamiento, optimizando recursos y reduciendo costos de inversión.

05 REFERENCIAS

- Agudo Llorens, A.** (2021). *Propuesta de un humedal artificial para el tratamiento de las aguas residuales de Benisuera (Valencia)* [Trabajo fin de grado].
- Bayas Jiménez, L.** (2018). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en poblaciones rurales de la sierra norte del Ecuador; aplicación a la Parroquia Lita* [Trabajo de Diploma presentado en opción al título de Ingeniero Hidráulico].
- Caselles-Osorio, A., Puigagut, J., Segú, E., Vaello, N., Granés, F., García, D., & García, J.** (2007). Solids accumulation in six full-scale subsurface flow constructed wetlands. *Water Research*, 41(6), 1388-1398.
- González Rodríguez, D.** (2023). *Sistema de tratamiento de aguas residuales basado en humedales artificiales para la comunidad de Pogolotti* [Trabajo de Diploma presentado en opción al título de Ingeniero Hidráulico]. Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH).
- Hernández Crespo, C., & Martín Monerris, M.** (2023). *Guía didáctica sobre diseño de humedales artificiales*. edUPV. <https://doi.org/10.4995/REA.2023.665301>
- IWA.** (2017). *Treatment Wetlands* (Vol. VII).
- Molle, P.** (2013). Humedales artificiales utilizados en el tratamiento de lodos y fangos extraídos de fosas. Guía de dimensionamiento y gestión.
- Oficina Nacional de Normalización.** (2013). *NC 973:2013. Abastecimiento de agua. Dotación de agua. Requisitos* (inf. téc.). Gaceta Oficial de la República de Cuba. La Habana, Cuba.
- Poveda Quintana, E.** (2021). *Diseño de humedal construido para deshidratación de lodos en condiciones climáticas de la sabana de Bogotá* [Trabajo de grado].
- Silva Tipantasig, L.** (2019). *Diseño de Sistemas para el Tratamiento de Lodos mediante Tecnologías de bajo coste para la EDAR Vall Dels Alcalans (Valencia)* [Trabajo Fin de Máster].
- Stefanakis, A., Akrotos, C., & Tsihrintzis, V.** (2014). *Vertical Flow Constructed Wetlands, Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier.
- Valdés, L.** (2006). Solución Aguas Residuales Comunidad Sierra Maestra.
- Werther, J., & Ogada, T.** (1998). Combustión de lodos de depuradora. *Progress in Energy and Combustion Science*, 25(1), 55-116.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Ana Marlen Hernández Rivera <https://orcid.org/0009-0006-5660-8164>

Carolina Medina Losada <https://orcid.org/0009-0005-5485-8760>

Dariel González Rodríguez <https://orcid.org/0009-0009-1869-450X>

Luis Alberto Rivero Cárdenas <https://orcid.org/0009-0007-6620-4515>

Luis F. Córdova López <https://orcid.org/0000-0001-8175-6819>