

ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE LAS CONDICIONES DE ENTRADA Y SALIDA DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN IMPLEMENTADAS EN EL MEDIO RURAL VENEZOLANO. CASO ZONA PANAMERICANA DEL ESTADO MÉRIDA, VENEZUELA

ESPINOSA, CARLOS¹; RAMÍREZ, STEFANNY²; JÉGAT, HERVÉ¹; BARRETO, WILMER³

¹ Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, Universidad de los Andes.

² Departamento de Hidráulica y Sanitaria, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes.

³ Universidad Católica de Temuco, Chile.

caesji1@ula.ve; caesji1958@gmail.com.

RESUMEN

Se presenta la aplicación de un modelo basado en dinámica computacional de fluidos (MIKE 21 FM), para el estudio hidrodinámico de las condiciones de entrada y salida de un prototipo de laguna de estabilización implementado en la Zona Panamericana del Estado Mérida, Venezuela. En una primera fase y con base en observaciones de campo se implementa el modelo para la configuración actual de entrada y salida; se simulan las variables: elevación del nivel de agua, campos de dirección de flujo y de velocidades. Luego de analizar los resultados, en una segunda fase se plantean mejoras en las condiciones de entrada y salida, se simulan las mismas variables, se comparan, se escoge y desarrolla la considerada más práctica y que mejore el desempeño hidrodinámico. Entre las conclusiones y recomendaciones destacan que, en la configuración actual predominan patrones de flujos convergentes y de recirculación en el tercio central de la laguna, con zonas de estancamiento en los tercios localizados aguas abajo y aguas arriba de la laguna y en sus esquinas. En la configuración mejorada, se observa que el patrón de dirección de la corriente, permite menores zonas de recirculación y de flujos encontrados mejorándose así la hidrodinámica de la misma. En vista de la potencialidad de la dinámica computacional de fluidos, se recomienda implementarla para simular los procesos de depuración que ocurren en lagunas de estabilización.

Palabras Clave: dinámica computacional de fluidos, lagunas de estabilización, estudio hidrodinámico de lagunas, zona panamericana de Mérida, estudio y diseño de lagunas.

HYDRODYNAMIC STUDY OF INLET AND OUTLET CONDITIONS FOR STABILIZATION PONDS IMPLEMENTED IN THE VENEZUELAN RURAL ENVIRONMENT. CASE PANAMERICAN ZONE, MERIDA STATE, VENEZUELA

ABSTRACT

The application of a model based on computational fluid dynamics (MIKE 21 FM) is presented for the hydrodynamic study of inlet and outlet conditions, for stabilization pond prototype implemented in the Panamerican Zone of the State of Merida, Venezuela. In a first phase, and based on field observations, the model is implemented for the current input and output configuration and for the simulation of water level elevation, flow direction fields, and velocity variables. After analyzing the results, in a second phase, improvements are planned for the input and output conditions. The same variables are simulated, compared, and the most practical one that better improves hydrodynamic performance is chosen and developed. Among the conclusions and recommendations are that, in the current configuration, predominate convergent flows and recirculation patterns in the central third of the pond, with stagnation zones in the thirds located downstream and upstream of the pond and in its corners. In the improved configuration, it is observed that the flow direction pattern, allows less recirculation zones and convergent flows improving, thus, the hydrodynamics of it. In view of the potential of computational fluid dynamics, it is recommended to implement it to simulate the depuration processes that occur in stabilization ponds.

Keywords: computational fluid dynamics, stabilization ponds, hydrodynamic study of ponds, Panamerican zone of Merida, study and design of ponds.

INTRODUCCIÓN

Las lagunas de estabilización constituyen una de las tecnologías más apropiadas para la depuración de las aguas residuales domésticas en el medio rural no disperso en zonas tropicales. Básicamente son estanques poco profundos -profundidad entre 1,2m y 2,5m-, formas regulares -usualmente rectangulares-, fondos impermeables ó poco permeables, tiempos de retención entre 4 y 8 días, y cargas orgánicas entre 22 y 67 Kg DBO/ha.d. En estos sistemas se establece una simbiosis entre algas y bacterias que, junto con la digestión anaerobia en el fondo de la materia orgánica particulada sedimentada, constituyen los principales mecanismos de depuración.

En Venezuela desde 1955 se han utilizado lagunas de estabilización como sistemas de tratamiento de efluentes crudos de origen doméstico y municipal. A partir de 1963, el Ministerio de Sanidad y Asistencia Social (MSAS) y el Instituto Nacional de Obras Sanitarias (INOS) incluyeron las lagunas de estabilización complementadas con sistemas cloacales en sus actividades de estudios y proyectos para el saneamiento. El MSAS lo hizo con mayor intensidad y desempeño que el INOS, ya que atendía el saneamiento de poblaciones menores en el medio rural no disperso y periurbano. Es así como a partir de 1963 el MSAS incluyó como complemento a sus actividades de cloacas rurales el diseño, construcción y operación de plantas de tratamiento basadas en lagunas de estabilización, a través de su Dirección de Malariología y Saneamiento Ambiental (Rengel, 1977 citado por Espinosa, 2020).

El estado Venezolano a través de entes gubernamentales nacionales y estatales, han construido una serie de obras de saneamiento en la Zona Panamericana del Estado Mérida, a fin de crear las condiciones sanitarias requeridas para impulsar el desarrollo rural en la zona. Entre estas obras sanitarias destacan los sistemas lagunares para el tratamiento de las aguas residuales de los centros poblados y los asentamientos campesinos. La Figura 1 ilustra la geografía del Estado Mérida, donde se han construido unos diez sistemas lagunares entre El Vigía y Arapuey.

Uno de los prototipos implementados en el medio rural de la Zona Panamericana del Estado Mérida son Lagunas Facultativas en sistemas de dos (2) lagunas en serie (Espinosa, 2020). La secuencia de operaciones y procesos en este caso es:

1. Cribado. Se realiza en la misma tanquilla de entrada.
2. Laguna Facultativa Primaria de 20m X 30m.
3. Laguna Facultativa Secundaria de 20m X 30m.
4. Desinfección. Para este proceso se instala una caseta de cloración.

La Figura 2 presenta la imagen de un prototipo de laguna facultativa implementada en la población de Caño Seco en la Zona Panamericana del Estado Mérida cuyas dimensiones son 20 m X 30 m y profundidad de 1,50 m.

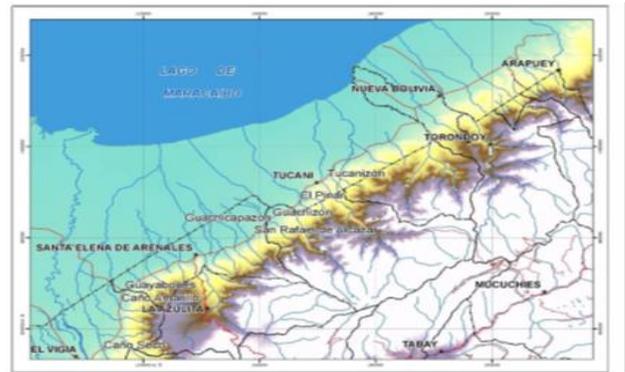


Figura 1. Geografía de la Zona Panamericana del Estado Mérida, Venezuela, donde se han construido unos diez Sistemas de lagunas de estabilización entre las poblaciones de El Vigía y Arapuey.



Figura 2. Laguna Facultativa de 20m X 30 m y profundidad 1,50m, vista aguas arriba, implementada en Caño Seco, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida.

Desde su puesta en servicio estos sistemas no han sido estudiados para su evaluación y seguimiento.

Muestran evidencias de una precaria operación y mantenimiento, razón por la cual se los considera

apropiados para analizarlos a la óptica de una evaluación hidrodinámica.

Gomes et al (2016) presentan una revisión de la compilación y análisis de 28 artículos publicados basados en el uso de la dinámica computacional de fluidos (DCF) en lagunas de estabilización no mecanizadas (anaerobias, facultativas, maduración y pulimento). El énfasis del análisis se hace en los principales aspectos de los modelos, los métodos utilizados, así como los principales resultados y conclusiones de los estudios. Después de una

introducción de las herramientas y a los resúmenes de las publicaciones, se establece una breve descripción sobre los puntos claves de las prácticas de modelaje adoptadas, con la intención de identificar los principales métodos usados, intervalos y tendencias, y sugieren, cuando es posible, buenas prácticas para el modelado. La Tabla 1 presenta una selección de cuatro (4) de los 28 artículos revisados por Gomes et al (2016), que tienen relación directa con esta investigación.

Tabla 1. Artículos revisados por Gomes et al (2016), que tienen relación directa con esta Investigación.

Referencia	Claves del Estudio	Tipo de Modelo	Modelo Usado	Análisis de Sensibilidad	Calibración Validación
Wood et al (1995)	Presenta y explora el potencial de la DFC como nueva herramienta para el diseño de lagunas.	2D/SS	FIDAP Fluid Dynamics Analysis Program	No	No
Persson (2000)	Evalúa parámetros hidráulicos y el efecto de 13 diferentes geometrías de deflectores, entradas y salidas sobre el desempeño hidrodinámico de hipotéticas lagunas.	2D/SS	MIKE 21 Danish Hydraulic Institute	No	No
Abbas et al (2006)	Estudia diferentes geometrías y configuraciones de deflectores en hipotéticas lagunas	2D/SS	Surface Water Modelling System (SMS)	No	No
Souza et al (2012)	Simula hipotéticas lagunas facultativas con diferentes configuraciones de deflectores	3D/SS	ANSYS CFX Compound File Explorer	No	No

OBJETIVOS

Objetivo General:

Estudiar la hidrodinámica de las condiciones de entrada y salida -mediante dinámica computacional de fluidos-, de uno de los prototipos de lagunas de estabilización implementados en el medio rural de la Zona Panamericana del Estado Mérida, Venezuela.

Objetivos Específicos:

1. Implementar un modelo hidrodinámico de simulación basado en dinámica computacional de fluidos (Mike 21 FM).
2. **Simular** mediante el modelo implementado, la hidrodinámica del prototipo de laguna de estabilización y proponer mejoras en la configuración de entrada y salida.

MATERIALES Y MÉTODOS

El esquema metodológico empleado para alcanzar los objetivos planteados, está constituido por 4 fases, las cuales se describen a continuación:

1. Determinación de la configuración y dimensiones típicas del prototipo de laguna del medio rural venezolano seleccionado e implementado en la Zona Panamericana del Estado Mérida, que se corresponde con el sistema de laguna de Caño Seco, con unas dimensiones de 20 m x30 m, una profundidad de 1,50m, dos entradas que se ubican en el primer tercio aguas arriba y una salida en el tercer tercio aguas abajo. Lo anterior se ilustra en las Figura 2.

2 Modelo Hidrodinámico: solicitud y activación de la licencia del Software Mike 21. Con base a la revisión bibliográfica se observó las bondades del software Mike 21 desarrollado por el Instituto Danés de Hidráulica (DHI). Se realizó una solicitud formal para el otorgamiento de una licencia de estudiante para tesis de Maestría/Doctorado limitada a un (1) año (Agreement for Educational Time-limited MIKE Powered by DHI Software Licence). El código de la licencia del Mike 21 fue activado en un computador portátil personal TOSHIBA con procesador INTEL I5, 8 GB de memoria RAM y HD de 1 TB, equipo en el cual se han realizado las simulaciones.

3. Implementación del software MIKE 21 Flow Model: Se utiliza la extensión del MIKE Zero llamada Mesh Generator, que permite la creación de la malla de cálculo, una malla no estructurada que usa una técnica de solución de volumen finito centrada en la celda. Se basa en elementos triangulares lineales -y se le denomina malla flexible-, y para su utilización fue necesario la selección de puntos con coordenadas características que permiten delimitar los bordes de tierra y configurar el espejo de agua. El suministro de la información se incorpora en archivos texto colocando las coordenadas correspondientes a los bordes de tierra, y a puntos característicos de influencia del espejo del agua. Luego se triangula dicha información y se procede a interpolar, y posteriormente generar la malla en un archivo de batimetría con extensión. mesh, el cual es reconocido por el software MIKE 21 FM y se muestra en la Figura 3.

Es oportuno aclarar que debido a la poca profundidad de las lagunas -en el orden de 1,50m- la simulación se hará en dos dimensiones (2D). Lo anterior implica que un plano de simulación cercano a la superficie del agua es representativo de lo que ocurre en la

profundidad de las lagunas. Por esta misma razón no se toman en cuenta para la simulación gradientes térmicos en la profundidad del agua, se asume que no hay pérdidas por infiltración, que la precipitación se compensa con la evaporación y se desprecian los efectos del viento en la superficie del agua. Como la laguna es revestida en concreto y el fondo de la misma no cambia, se realizan los cálculos sin correcciones de niveles de profundidad. Se asume la recomendación “Barotropic” del software para los datos de densidad, la cual implica agua de densidad constante. Para la resistencia del fondo se considera el Número de Manning correspondiente a concreto ($n=0,012$).

Para el caso estudio de la laguna de Caño Seco, y por limitación de tiempo de conexión por el tipo de licencia del MIKE 21 FM y su capacidad, se toman intervalos de tiempo de 30 segundos en un número 250 intervalos, para un tiempo de simulación de 7.500 segundos, lo que equivale a 125 minutos (2,08 horas). Este tiempo permite observar la propagación de la onda de perturbación que genera el flujo en todo el dominio de la malla de simulación de la laguna, así como tiempos posteriores. Para resolver las ecuaciones, se utiliza el algoritmo rápido de bajo orden, debido a que consume menos tiempo computacional. Se asignan las coordenadas correspondientes a la posición de las entradas de agua, así como también el caudal que ingresa por cada una de ellas. Caño Seco presenta dos entradas que se ubican en el primer tercio aguas arriba, con un caudal de descarga en cada una de ellas de $0.006 \text{ m}^3/\text{s}$. Se asumen las salidas como alcantarillas y se le asigna su ubicación y el diámetro considerado que es de 0.30 m. Se especifica que los bordes son construidos de concreto y por tanto la velocidad del agua en contacto con los mismos se considera cero. Para el análisis de los resultados de las simulaciones, se seleccionaron las siguientes variables:

- Elevación ó cota de la superficie.
- Dirección de la corriente.
- Velocidad.

En la Figura 3 se puede observar la malla de simulación generada de la Laguna de Caño Seco, basada en un esquema de elementos finitos.

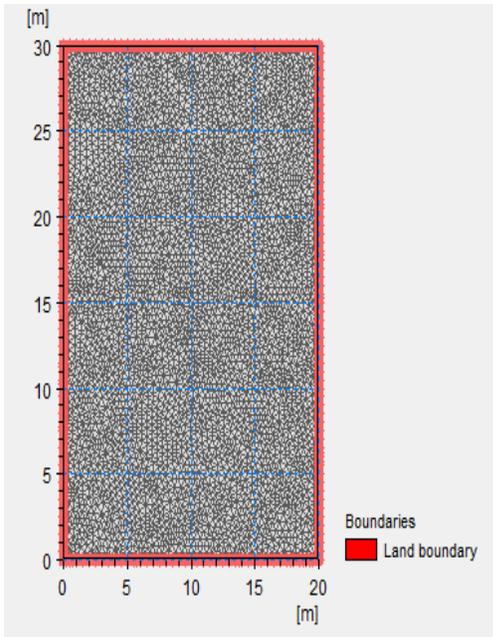


Figura 3. Malla de simulación generada de la Laguna de Caño Seco, basada en un esquema de elementos finitos.

4. Análisis e interpretación de los resultados de las simulaciones del prototipo, para formular y simular las mejoras en las condiciones de entrada y salida. Elaborar las conclusiones y recomendaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones de entrada y salida originales del prototipo

Elevación de la superficie del Agua

La simulación se inicia con la creación de ondas radiales alrededor de los puntos de entrada (Figura 4), hasta conformar una sola circunferencia la cual va avanzando en el tiempo, toma forma de elipse y luego alcanza el borde aguas arriba de la laguna (Figura 5), logrando equilibrar linealmente la propagación de la onda hasta alcanzar el borde aguas abajo (Figura 7). En esta secuencia de Figuras (4 a 7) se puede observar el comportamiento de la onda de perturbación superficial, y la implicación de la misma en la elevación de la superficie. Este comportamiento se considera el esperado. En la Figura 7 se aprecian zonas de menores niveles de agua, localizadas simétricamente en las esquinas aguas arriba y en la zona próxima a salida, en la última fase de la simulación.

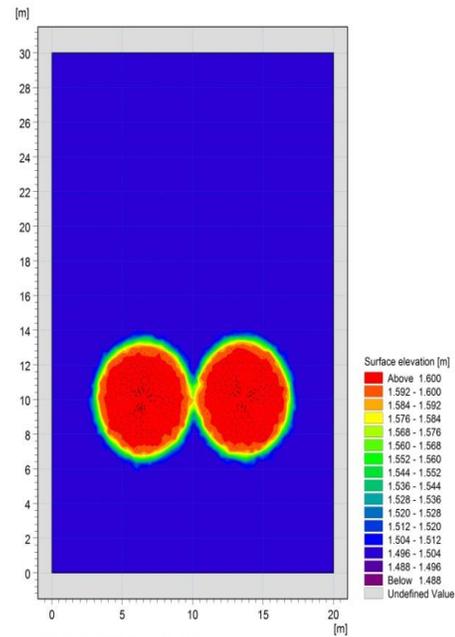


Figura 4. Elevación de la superficie a los 10 minutos de simulación.

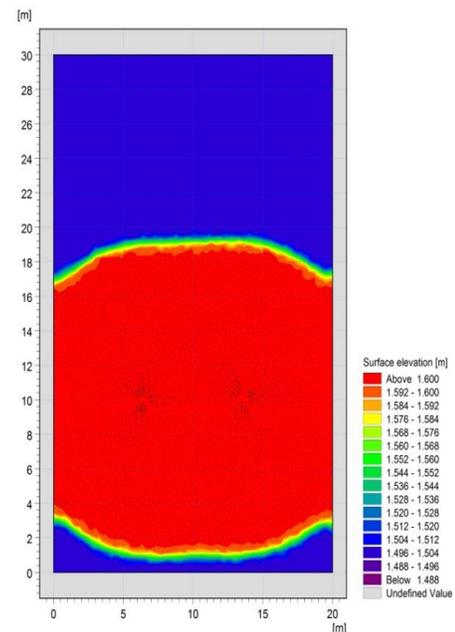


Figura 5. Elevación de la superficie a los 48 minutos de simulación.

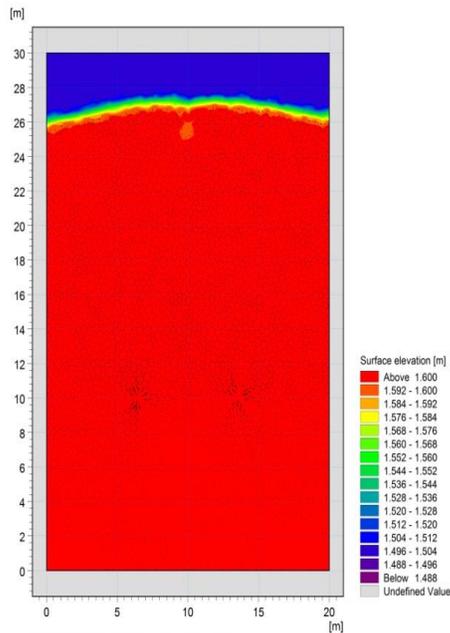


Figura 6. Elevación de la superficie a los 75 minutos de simulación.

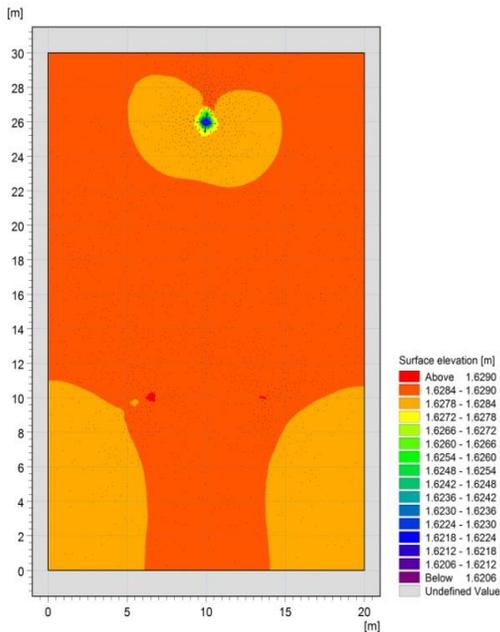


Figura 7. Elevación de la superficie a los 107 minutos de simulación.

Dirección de Flujo

Las observaciones de la simulación de dirección de la corriente, evidencian la formación de zonas de recirculación, y zonas de estancamiento, tal como lo muestran la secuencia de las Figuras 8 a 11. En las mismas se aprecian vectores de dirección de la corriente en el primer y cuarto cuadrantes en

dirección aguas abajo (colores morado, azul, amarillo, naranja) y vectores en el segundo y tercer cuadrantes del plano cartesiano, en dirección aguas arriba (colores en escala de verdes, y azules más tenues).

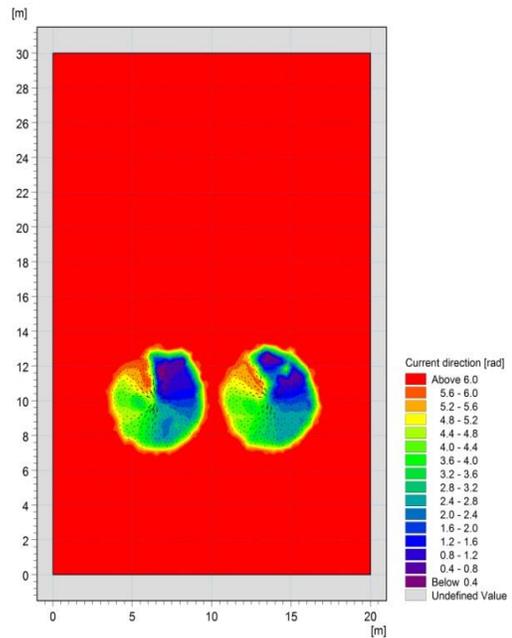


Figura 8. Dirección de flujo a los 10 minutos de simulación.

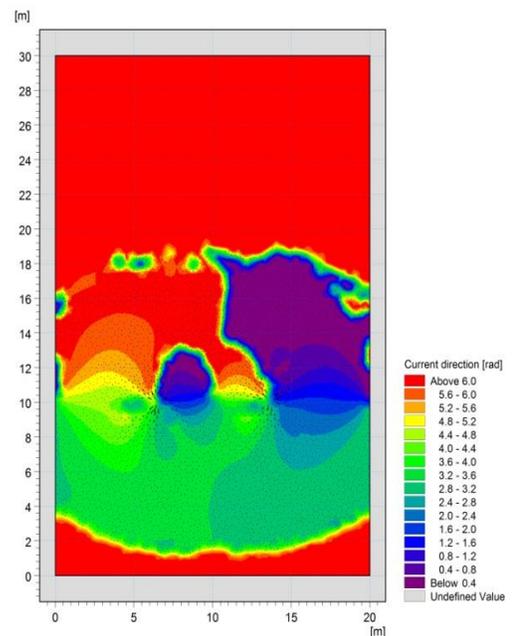


Figura 9. Dirección de flujo a los 48 minutos de simulación.

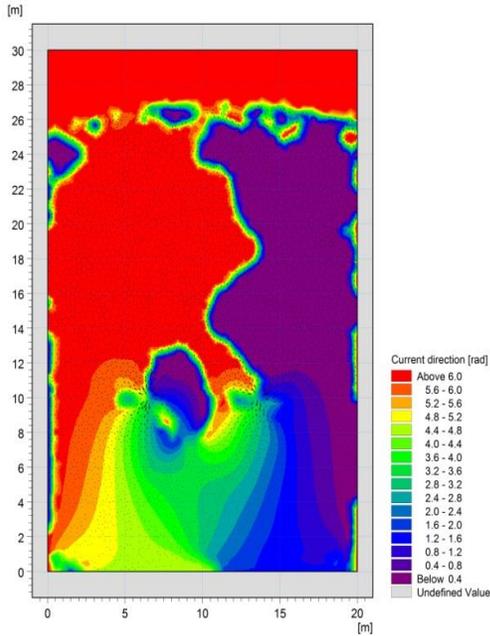


Figura 10. Dirección de flujo a los 75 minutos de simulación.

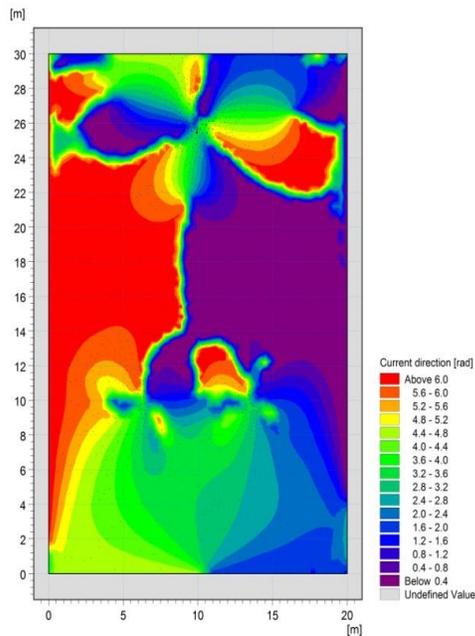


Figura 11. Dirección de flujo a los 107 minutos de simulación.

Velocidad.

En la Figura 12 se puede observar el inicio de la onda de propagación y la ubicación de los primeros vectores de velocidad, los cuales tienen una magnitud de 0.008 hasta 0.020 m/s. Es importante señalar que

además se observa la existencia de vectores en ambas direcciones con las mismas magnitudes, unos que buscando llenar el frente de la laguna aguas abajo y otros direccionados al extremo aguas arriba. En la Figura 13, se puede observar la salida de laguna en el punto (10,26), creando zonas locales de recirculación, y por tanto perturbando los vectores de dirección. Esta recirculación de flujo facilita la formación de puntos de estancamiento, los cuales se observan en la Figura 14 con una velocidad en el orden de 0.0002 m/s, considerándose prácticamente nulo el movimiento. Es importante resaltar que las zonas de estancamiento, se observan con mayor frecuencia en las esquinas de la laguna y se ha podido constatar en campo que en dichas zonas ocurre este fenómeno que genera deposición de sólidos y crecimiento de maleza, lo cual afecta el funcionamiento de la laguna de estabilización. Lo anterior se puede observar en la Figura 15.

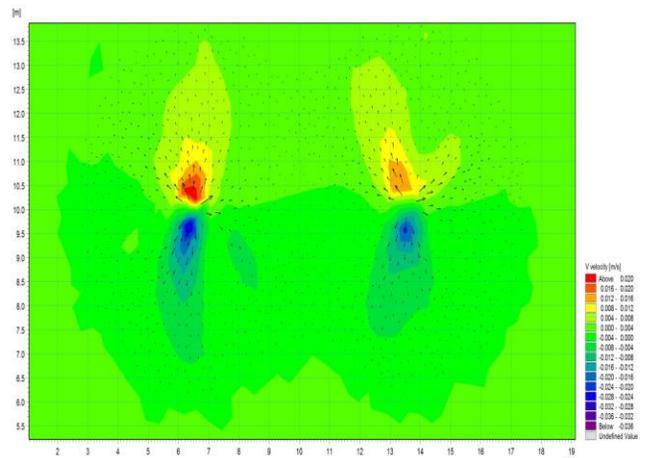


Figura 12. Laguna Facultativa de 20 m x 30 m, implementada en Caño Seco, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida. Vectores de velocidad en la zona de entrada al inicio de la simulación a los 16 minutos.

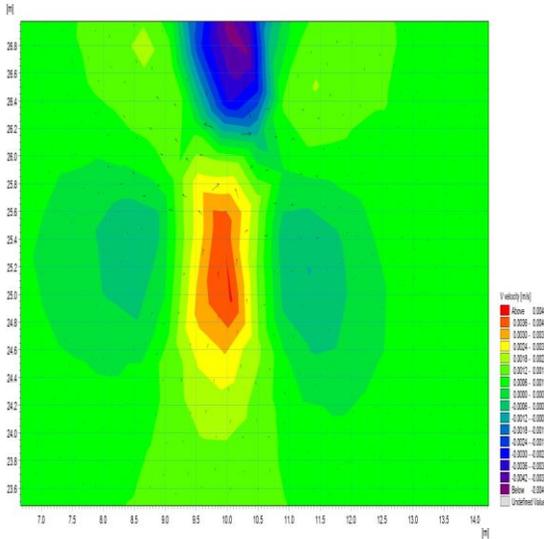


Figura 13. Laguna Facultativa de 20 m x 30 m, implementada en Caño Seco, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida. Vectores de velocidad cercanos a la tubería de salida a los 96 minutos de la simulación.

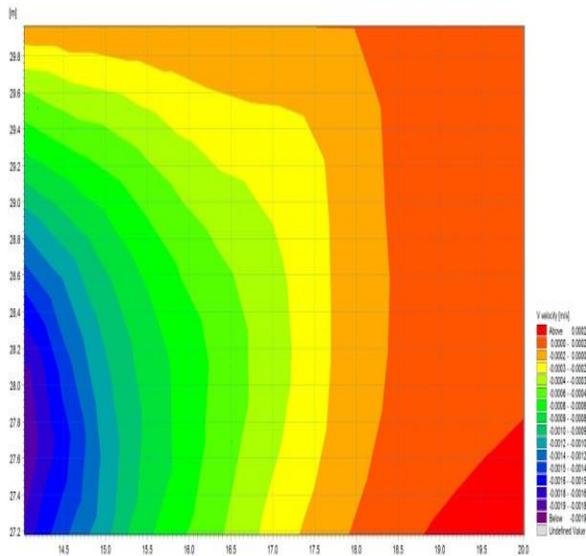


Figura 14. Laguna Facultativa de 20 m x 30 m, implementada en Caño Seco, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida. Zona de estancamiento en el extremo derecho aguas abajo de la laguna a los 125 minutos de la simulación.



Figura 15. Laguna Facultativa de 20 m x 30 m, implementada en Caño Seco, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida. Observación en campo de la zona de estancamiento localizada en el extremo derecho aguas abajo.

Queda en evidencia, que, para la configuración actual de entrada y salida del prototipo de laguna de estabilización analizado, se presentan zonas de estancamiento -con muy bajas velocidades- en las esquinas y en las zonas aguas arriba de las entradas y aguas abajo de la salida. Estas zonas de estancamiento identificadas se asocian con zonas muertas. Realizado el análisis del prototipo de laguna, se procede a proponer modificaciones en las condiciones de entrada y salida que permitan mejorar su hidrodinámica. Para tal fin se consideraron y simulamos las siguientes configuraciones:

- Una (1) entrada centrada en el borde aguas arriba y una (1) salida centrada en el borde aguas abajo.
- Dos (2) entradas simétricas en el borde aguas arriba y una (1) salida centrada en el borde aguas abajo.
- Dos (2) entradas simétricas en el borde aguas arriba y dos (2) salidas simétricas en el borde aguas abajo.

La Tabla 2 resume las principales características de las simulaciones, analizando y comparándolas se puede observar y concluir que cualquiera de ellas presenta un mejor desempeño hidrodinámico, especialmente presentan menos zonas de bajas velocidades las cuales se asocian con zonas muertas (prácticamente si flujo). Se escoge la alternativa b: dos (2) entradas simétricas en el borde aguas arriba y una (1) salida centrada en el borde aguas abajo. Esta configuración, a su vez la más práctica, implica cortar

al prototipo las dos tuberías de entrada y la tubería de salida en los bordes aguas arriba y aguas abajo de la

laguna.

Tabla 2. Comparación de las variables simuladas para las alternativas de mejoras contempladas. Prototipo de Laguna de Estabilización de Caño Seco, Municipio Alberto Adriani, Zona Panamericana del Estado Mérida, Venezuela.

Alternativa	Elevación de la superficie	Dirección de la corriente	Velocidad
a) Una (1) entrada centrada en el borde aguas arriba y una (1) salida centrada en el borde aguas abajo.	Se inicia la propagación de la onda de forma radial hasta llegar a los laterales en un tiempo de simulación de 23 minutos e inmediatamente avanza de forma simétrica hasta llegar al extremo aguas abajo, alcanzando la mitad de la laguna aproximadamente a los 45 minutos; y el extremo aguas abajo a los 83 minutos. A partir de ese momento los niveles dentro de la laguna se mantienen hasta el final de la simulación en un rango de 1,60 hasta 1,65 metros de elevación.	Desde el inicio de la simulación hasta los 26 minutos, en el cual la perturbación alcanza los laterales, se observan vectores en el campo de direcciones orientados en el primer y cuarto cuadrante, lo cual significa que el flujo se dirige hacia aguas abajo. Para los 47 minutos se alcanza la mitad de la laguna y se observa el mismo comportamiento. En el minuto 83 se alcanza el extremo aguas abajo, observándose que parte del flujo sale por la descarga y otro flujo regresa con direcciones en el tercer y segundo cuadrante lo cual significa una dirección de flujo aguas arriba, observándose este fenómeno localizado en el último cuarto de la laguna hasta el final de la simulación	El campo de velocidades alcanza los laterales en un tiempo de 24 minutos, observando mayores velocidades en la descarga, y en zonas cercanas a la misma, y menores velocidades en las esquinas de la laguna. A los 43 minutos el campo de velocidades llega a la mitad de la laguna observándose zonas de bajas velocidad en las esquinas. En el minuto 83 se alcanza el extremo aguas abajo, verificándose que la propagación del flujo choca generando un remanso que a su vez disminuye las magnitudes del campo de velocidades, y en las esquinas aguas arriba se observan zonas de bajas velocidades. A partir del minuto 90 se observan mayores velocidades en las inmediaciones de la entrada y en el resto de la laguna magnitudes menores que oscilan en un rango muy pequeño.
b) Dos (2) entradas simétricas en el borde aguas arriba y una (1) salida centrada en el borde aguas abajo.	Se inicia la propagación de la onda de forma radial alrededor de cada una de las entradas hasta unirse al minuto 5, logrando una sola circunferencia que toca los laterales a los 18 minutos. Alcanzando la mitad de la laguna a los 44 minutos, y el extremo aguas abajo a los 83 minutos. A partir de ese momento los niveles dentro de la laguna se mantienen hasta el final de la simulación en un rango de 1,60 hasta 1,65 metros de elevación, predominando mayores elevaciones aguas arriba.	Desde el inicio de la simulación hasta los 5 minutos se aprecia como los campos de dirección de flujo se unen, y alcanza los laterales a los 18 minutos, observándose vectores en el primer y cuarto cuadrante orientados aguas abajo. El campo de direcciones alcanza la mitad de la laguna en un tiempo de 45 minutos, manteniendo su comportamiento hacia aguas abajo. En el minuto 83 se alcanza el extremo de la laguna, observándose patrones de flujo en el tercer y segundo cuadrante lo cual indica dirección de flujo hacia aguas arriba, dicho fenómeno está localizado en el último cuarto de la laguna y en el resto de la misma manteniendo flujos en el primer y cuarto cuadrante.	Los campos de velocidades se unen a los 5 minutos de simulación, alcanzando los laterales en un tiempo de 17 minutos, observando mayores velocidades en la descarga y en zonas cercanas a la misma, menores velocidades localizadas en las esquinas, y en la zona intermedia a las entradas. A los 45 minutos el campo de velocidades alcanza la mitad de la laguna, manteniéndose zonas de bajas velocidades en la zona intermedia a las entradas y en las esquinas aguas arriba. En el minuto 83 se alcanza el extremo aguas abajo, verificándose que la propagación del flujo choca generando un remanso que a su vez disminuye las magnitudes del campo de velocidades, manteniendo zonas de baja velocidad en las esquinas aguas arriba y en la zona entre las dos entradas. A partir del minuto 90 se observan mayores velocidades desde la entrada hasta la mitad de la laguna, y menores velocidades desde la mitad aguas abajo, esquinas aguas arriba y zona entre las dos entradas.
c) Dos (2) entradas simétricas en el borde aguas arriba y dos (2) salidas simétricas en el borde aguas abajo.	Se inicia la propagación de la onda de forma radial alrededor de cada una de las entradas hasta unirse al minuto 11, y en el mismo instante las circunferencias tocan los laterales. Se alcanza la mitad de la laguna a los 42 minutos de simulación. A los 84 minutos toca el extremo aguas abajo. A partir de ese momento los niveles dentro de la laguna se mantienen hasta el final de la simulación en un rango de 1,60 hasta 1,65 metros de elevación, predominando mayores elevaciones aguas arriba.	Desde el inicio de la simulación hasta los 11 minutos se aprecia como los campos de dirección de flujo se unen, y alcanzan los laterales, observándose vectores en el primer y cuarto cuadrante orientados aguas abajo. El campo de direcciones alcanza la mitad de la laguna en un tiempo de 43 minutos, manteniendo su comportamiento hacia aguas abajo. En el minuto 83 se alcanza el extremo de la laguna, observándose patrones de flujo en el segundo y tercer cuadrantes lo cual indica dirección de flujo hacia aguas arriba, dicho fenómeno está localizado en el último cuarto de la laguna y en el resto de la misma manteniendo flujos en el primer y cuarto cuadrante.	Los campos de velocidades se unen a los 10 minutos de simulación, y simultáneamente alcanzan los laterales, observando mayores velocidades en la descarga y en zonas cercanas a la misma. A los 43 minutos el campo de velocidades llega a la mitad de la laguna, observándose que las zonas de menor velocidad están localizadas en la zona intermedia a las entradas y en las esquinas aguas arriba. En el minuto 83 se alcanza el extremo aguas abajo, verificándose que la propagación del flujo choca generando un remanso que a su vez disminuye las magnitudes del campo de velocidades en tiempo posteriores, manteniendo zonas de baja velocidad en las esquinas aguas arriba y en la zona entre las dos entradas. A partir del minuto 90 se observan mayores velocidades desde la entrada hasta la mitad de la laguna, y menores velocidades desde la mitad aguas abajo, esquinas aguas arriba y zona entre las dos entradas.

Configuración modificada seleccionada

Elevación de la superficie del agua

La simulación se inicia con la formación de ondas de perturbación radiales en las dos entradas en el borde aguas arriba, como se aprecia en la Figura 16, la cual se desarrolla y avanza hasta alcanzar el borde aguas abajo como se ilustra en las Figuras 17 y 18.

La Figura 19 presenta la elevación de la superficie del agua a los 95 minutos de simulación. Se aprecian mayores elevaciones en la zona de entrada aguas arriba.

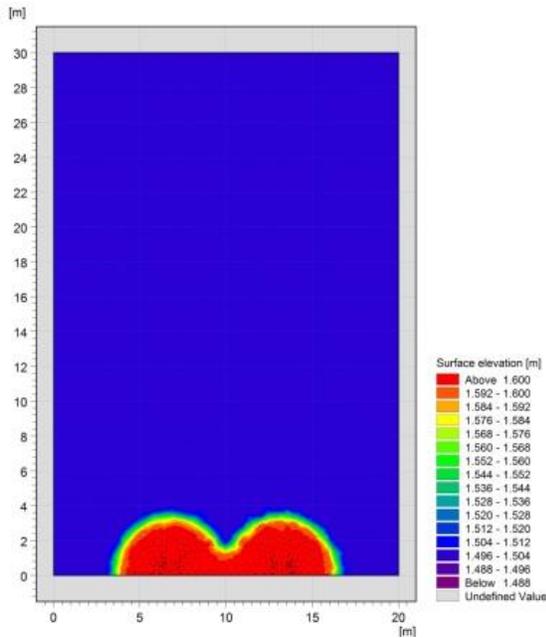


Figura 16. Elevación de la superficie a los 5 minutos de simulación.

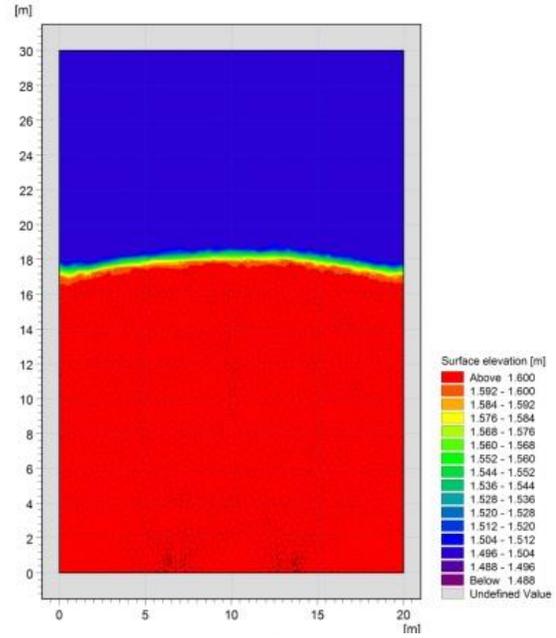


Figura 17. Elevación de la superficie a los 50 minutos de simulación.

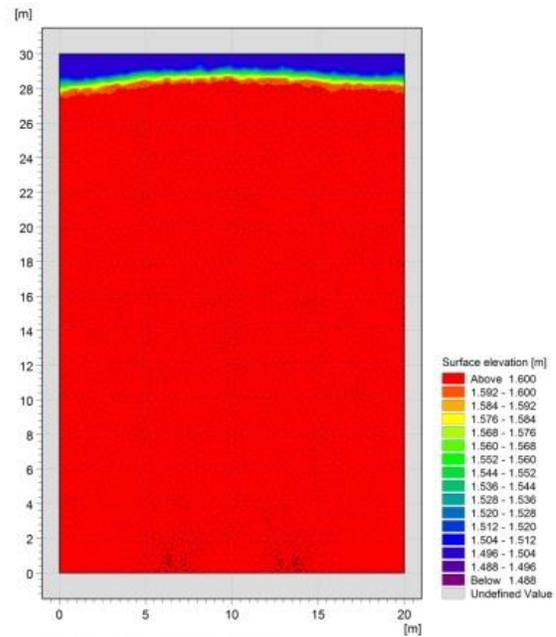


Figura 18. Elevación de la superficie a los 80 minutos de simulación.

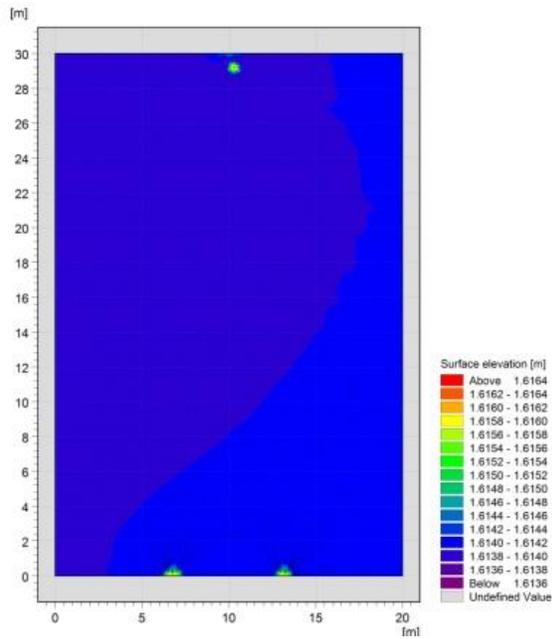


Figura 19. Elevación de la superficie a los 95 minutos de simulación.

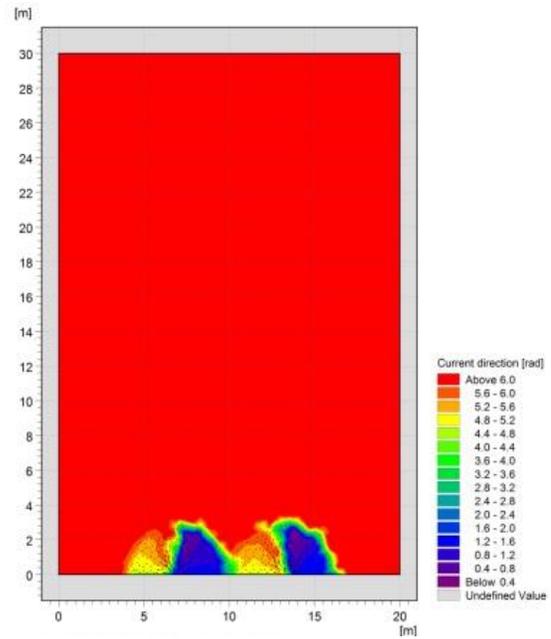


Figura 20. Dirección de flujo a los 5 minutos de simulación.

Dirección de flujo

En las Figuras 20 y 21 correspondientes a los 5 y 50 minutos de simulación, se observan direcciones de flujo ubicadas en el primer y cuarto cuadrantes en dirección aguas abajo. La Figura 22 para un tiempo de simulación de 80 minutos presenta la condición cuando el campo de vectores de dirección se aproxima al borde aguas abajo de la laguna. Se observan aún direcciones de flujo ubicadas en el primer y cuarto cuadrantes en dirección aguas abajo. La Figura 23 se corresponde con los 95 minutos de simulación y se pueden visualizar direcciones de flujo ubicadas en el segundo y tercer cuadrante (tonos verdes y azules claros) que implican direcciones de flujo aguas arriba, localizadas principalmente en la mitad aguas abajo.

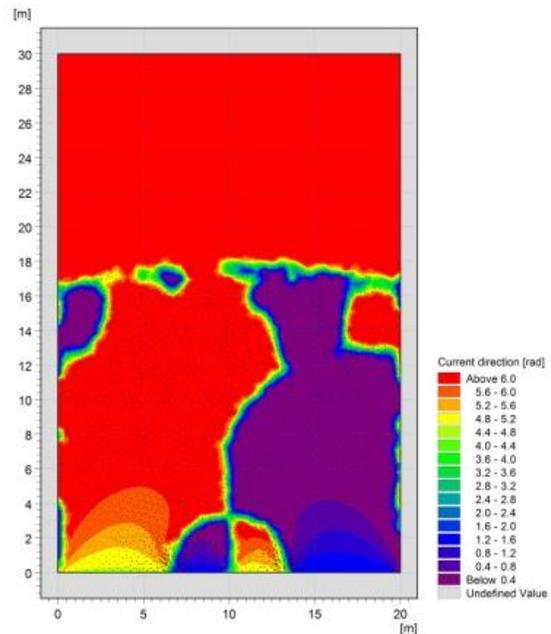


Figura 21. Dirección de flujo a los 50 minutos de simulación.

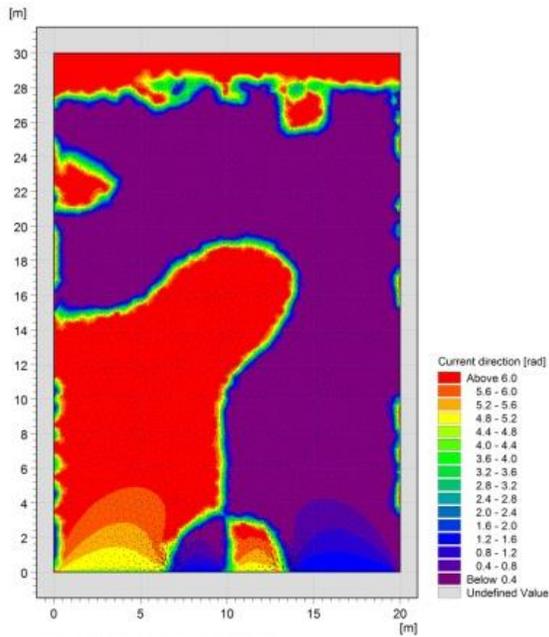


Figura 22. Dirección de flujo a los 80 minutos de simulación.

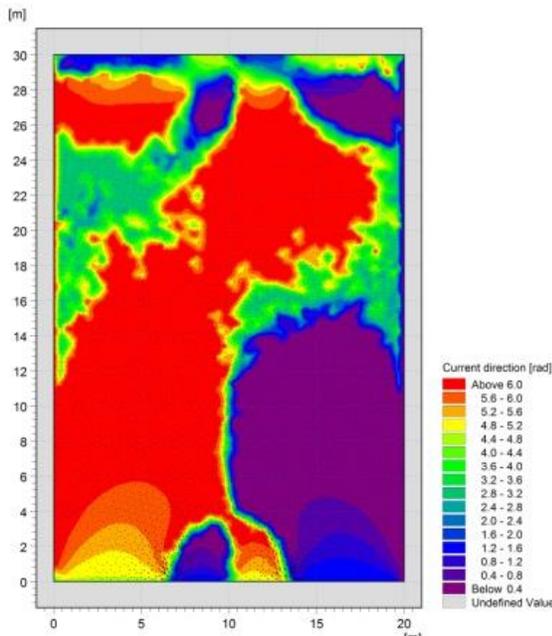


Figura 23. Dirección de flujo a los 95 minutos de simulación.

Velocidades

En la Figura 24 se observa la unión de los campos de velocidades a los 5 minutos de simulación y la Figura 25 corresponde al minuto 45, momento en el que el campo de velocidades alcanza la mitad de la laguna, observándose zonas de bajas velocidades en el área

intermedia de las entradas y en las esquinas aguas arriba.

La Figura 26 se corresponde a los 83 minutos, donde se alcanza el extremo aguas abajo, observándose que la propagación del flujo choca generando un remanso que a su vez disminuye las magnitudes del campo de velocidades, manteniendo zonas de baja velocidad en las esquinas aguas arriba y en la zona entre las dos entradas. A partir del minuto 90 se corresponde a la Figura 27 donde se observan mayores velocidades desde la entrada hasta la mitad de la laguna, y menores velocidades desde la mitad aguas abajo, esquinas aguas arriba y zona entre las dos entradas.

La Figura 28 presenta el campo de velocidades a los 7 minutos de simulación. En ella se observa en detalle la ubicación en el primer y cuarto cuadrantes del plano cartesiano, de las direcciones de los vectores de velocidad, lo cual se corrobora en el análisis de dirección de flujo. Lo anterior implica que el flujo se desplaza aguas abajo. La Figura 29 ilustra el campo de velocidades en la salida en el extremo aguas abajo de la laguna a los 100 minutos de simulación. Se puede observar una configuración típica de direcciones encontradas generadas por el sumidero de la salida. La Figura 30 ilustra el campo de velocidades en la esquina derecha aguas arriba a los 95 minutos de simulación. Se aprecian zonas de bajas velocidades en menores áreas en la esquina.

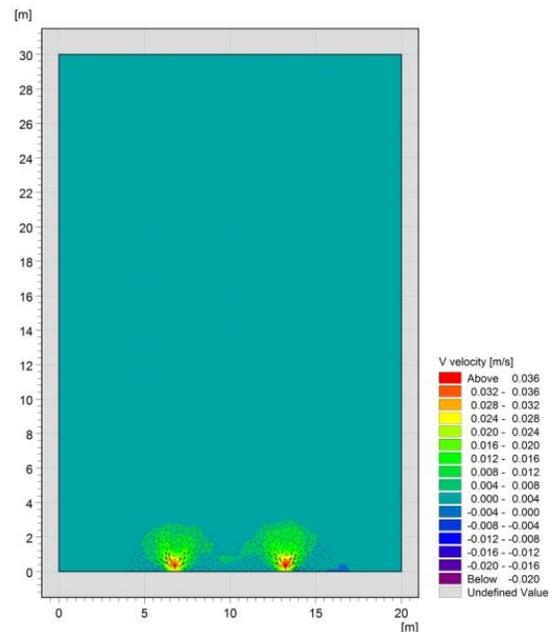


Figura 24. Velocidad a los 5 minutos de simulación.

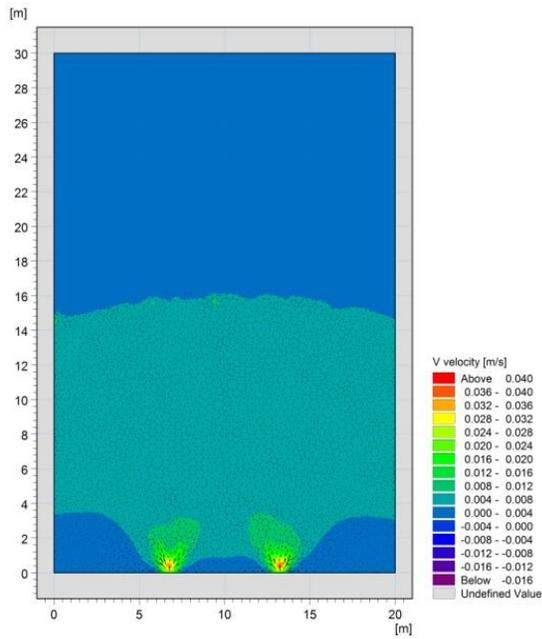


Figura 25. Velocidad a los 45 minutos de simulación.

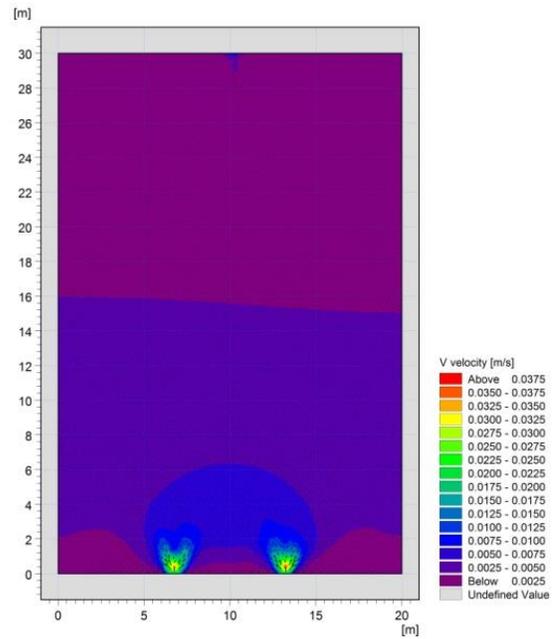


Figura 27. Velocidad a los 90 minutos de simulación.

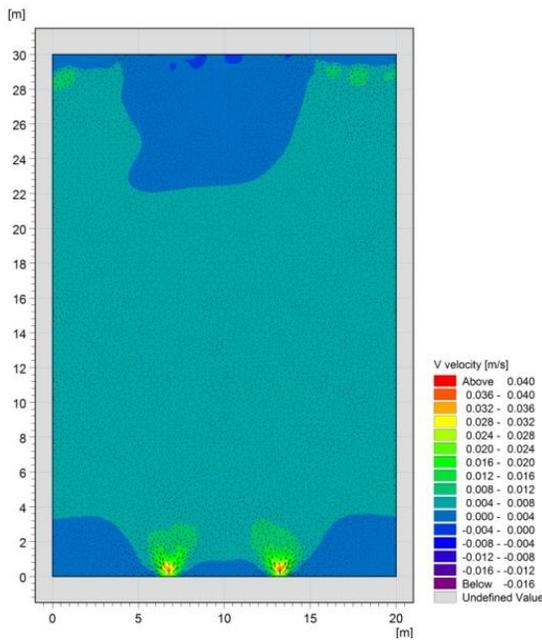


Figura 26. Velocidad a los 83 minutos de simulación.

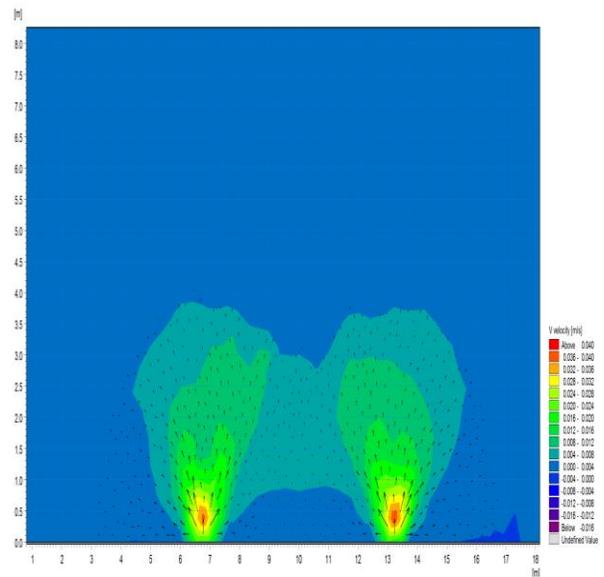


Figura 28. Campo de velocidades en las entradas a los 7 minutos de simulación, para las mejoras de entrada y salida propuestas.

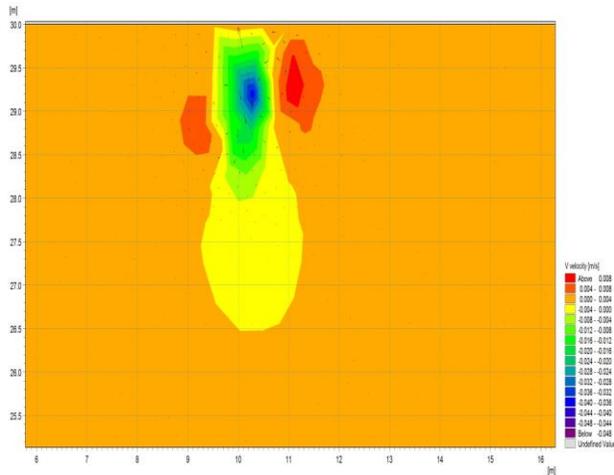


Figura 29. Campo de velocidades en la salida a los 100 minutos de simulación para las mejoras de entrada y salida propuestas.

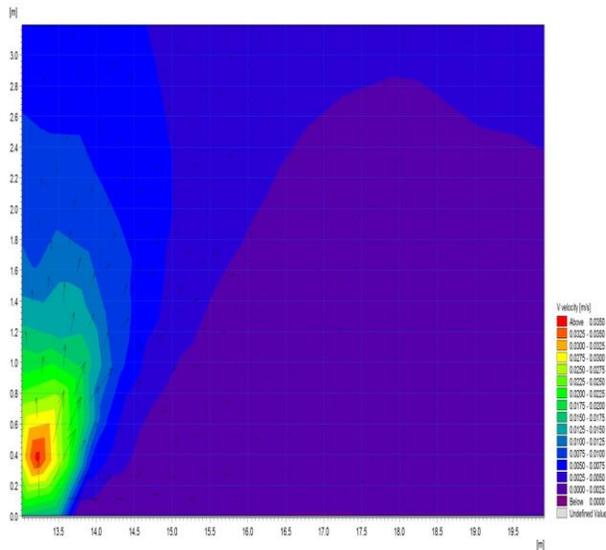


Figura 30. Campo de velocidades en la esquina derecha aguas arriba a los 95 minutos de simulación, para las mejoras de entrada y salida propuestas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El patrón de dirección de la corriente para la configuración de la laguna de Caño Seco, se corresponde con una dinámica de flujo que facilita la mezcla, observándose zonas de recirculación y de flujos encontrados. Al analizar la simulación de los campos de velocidades, su dirección y magnitud, se concluye que en las esquinas se generan velocidades muy próximas a cero, lo cual genera zonas de estancamiento que son para fines prácticos zonas muertas. Es sabido que en la medida que se generan zonas muertas, se disminuye el volumen útil de la laguna. Lo anterior se corroboró con observaciones

de campo. Las simulaciones de velocidades (magnitud y dirección del campo de vectores), guardan mucha relación con los patrones de dirección de la corriente ya descritos.

Al comparar las distintas alternativas simuladas, se observa que el comportamiento de las variables estudiadas es similar, en especial cuando se aumenta el número de entradas y salidas. En todos los casos simulados se observó, disminución de zonas de bajas velocidades y recirculación, en la medida que aumenta el número de entradas y salidas. Este comportamiento contrasta con los fenómenos de recirculación y zonas de bajas velocidades observadas en el prototipo, especialmente en el primer tercio aguas arriba y el tercer tercio aguas abajo.

Con base a las alternativas simuladas, se escogió como la solución más práctica para mejorar la hidrodinámica, la configuración de dos (2) entradas simétricas en el borde aguas arriba y una (1) salida centrada en el borde aguas abajo. Esta configuración implica menores costos ya que sólo requiere seccionar al prototipo, las dos tuberías de entrada y la tubería de salida en los bordes aguas arriba y aguas abajo de la laguna.

El patrón de dirección de la corriente para la alternativa seleccionada, permite observar menores zonas de recirculación y de flujos encontrados. Al analizar la simulación de los campos de velocidades, su dirección y magnitud, se concluye que en las esquinas se generan velocidades muy próximas a cero, en menor proporción que en el prototipo estudiado. Al alcanzar el extremo de la laguna, se observan patrones de flujo en el segundo y tercer cuadrante lo cual indica dirección de flujo aguas arriba; dicho fenómeno está localizado en el último cuarto de la laguna y en el resto de la misma se mantienen flujos en el primer y cuarto cuadrante, verificándose que la propagación del flujo choca en el extremo aguas abajo generando un remanso. También se evidencia mayores velocidades desde la entrada hasta la mitad de la laguna, y menores velocidades en la mitad aguas abajo, esquinas aguas arriba y zona entre las dos entradas.

La simulación de la hidrodinámica de lagunas de estabilización, con base en dinámica computacional de fluidos, representa una poderosa herramienta que puede ser utilizada para el diseño de lagunas de estabilización. Esta herramienta permite predecir el comportamiento hidráulico de los prototipos, para corroborar o corregir, antes de su implementación en campo. Es además útil, como en este caso, para estudiar lagunas ya construidas y en operación, con

miras a mejorar su hidrodinámica. En vista de la potencialidad de la dinámica computacional de fluidos, se recomienda implementarla para simular los procesos de depuración que ocurren en lagunas de estabilización.

AGRADECIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento y reconocimiento al Instituto Danés de Hidráulica (DHI) de Dinamarca, por el otorgamiento de la licencia de estudiante para tesis de Maestría/Doctorado (Agreement for Educational Time-limited MIKE Powered by DHI Software Licence), lo cual permitió realizar esta investigación.

REFERENCIAS

- Abbas H, Nasr R, Seif H. (2006). "Study of waste stabilization pond geometry for the wastewater treatment efficiency". *Ecol Eng.*;28(1):25–34.
- DHI (2017). "MIKE21 Flow Model. Hydrodynamic Module". User Guide. Danish Hydraulics Institute. Denmark.
- Espinosa, C. (2020). "Lagunas de Estabilización en el medio rural venezolano. Caso: Zona Panamericana de los Estados Mérida y Trujillo, Venezuela". Trabajo presentado ante la Ilustre Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat de Venezuela, como requisito parcial para optar a su incorporación como Miembro Correspondiente por el Estado Trujillo. Palacio de las Academias, Caracas, Venezuela.
- Gomes, R., Dias, D., von Sperling, M. (2016). "Review of practical aspects for modelling of stabilization ponds using Computational Fluid Dynamics". *Environmental Technology Reviews*, Vol. 5, No. 1, pp. 78–102. UK.
- Rengel, M. (1977). "Lagunas de Estabilización para el Tratamiento de Aguas Residuales de Origen Doméstico. Experiencia Venezolana". Serie Ambiente y Recursos Naturales N°AR-5. Casa Editora CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Souza VAS, Helbel AF, Janzen JG, et al (2012). "Simulação computacional do comportamento hidrodinâmico em lagoas facultativas com chicanas". *Ciência & Engenharia*;21(1):15–21.
- Wood MG, Greenfield PF, Howes T, et al (1995). "Computational fluid dynamic modeling of waste-water ponds to improve desing". *Water Science and Technology*. 1995;31(12):11

