

2022 |

# INGENIERÍA

HIDRÁULICA Y AMBIENTAL



02

XLIII

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE  
Revista científica del Centro de Investigaciones Hidráulicas

ISSN 2788-6050, RNPS 2066

La revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental tiene el propósito de divulgar el conocimiento y contribuir al intercambio de experiencias y la comunicación entre los profesionales y técnicos de habla española. Los temas de interés para la revista incluyen contenidos en la solución de problemas, aplicaciones y desarrollo de la ingeniería hidráulica.

## **Editor-Director**

Dr. José Bienvenido Martínez Rodríguez

## **Consejo Editorial**

Dra. Maray Garrido Monagas (*Directora*)

Dra. Haydee Llanusa Ruiz (*Secretaria de la publicación*)

Dr. Yoermes González Haramboure

Dr. Rafael Pardo Gómez

Dr. Norberto Marrero De León

Dr. Alcides Juan Felipe León Méndez

Dr. Armando Hernández Valdés

## **Consejo Asesor**

Damir Brjanovic, *Instituto UNESCO-IHE, Holanda*

Daniel Prats Rico, *Universidad de Alicante, España*

Joaquín Moreno Caselles, *Universidad Miguel Enrique de Elche, España*

Nahún García Villanueva, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México*

Raúl Lopardo, *Instituto Nacional del Agua, Argentina*

Alejandro López, *Laboratorio Nacional de Hidráulica, Santiago de Chile*

Jaime Iván Ordóñez, *Universidad Nacional de Colombia, Colombia*

Rafael Guarga Ferro, *Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental, Uruguay*

Abrahán López, *Universidad Francisco de Miranda, Venezuela*

Miguel A. Perozo Ynestroza, *Universidad Francisco de Miranda, Venezuela*

Cristóbal Díaz Morejón, *Ministerio de Ciencia Tecnología y Mediaambiente (CITMA), Cuba*

Alina Hernández Tur, *Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), Cuba*

Rafael Feitó Olivera, *Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de Cuba (UNAICC), Cuba*

Julián Herrera Puebla, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

Lorenzo E. Camejo Barreiro, *Universidad de Ciego de Ávila, Cuba*

Alfonso Suárez Reytor, *Universidad de Oriente, Cuba*

Eric Cabrera Estupiñán, *Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador*

Luis Córdova López, *Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Cuba*

Yoel Martínez González, *Instituto Superior de Ciencias y Tecnologías Aplicada, Cuba*

Ronnie Torres Hugues, *Centro de Servicios Técnicos de Ingeniería y Tecnología de la Construcción, Cuba*

Ifraín Osa Bernal, *HELVEX, Cuba*

Eduardo López Bastida, *Universidad de Cienfuegos, Cuba*

Javier Orccosupa, *Universidad Tecnológica del Perú, Perú*

Natividad Ramírez Ramírez, *Universidad de Guanajuato, México*

Carlos M. López Vázquez, *Instituto UNESCO-IHE, Holanda*

Julio Iván González Piedra, *Universidad de La Habana, Cuba*

Carlos Javier Fernández de Córdova Webster, *Universidad del Azuay, Ecuador*

Lamberto Alvarez Gil, *Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba*

Felicita González, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

Enrique Cisneros, *Instituto de Investigación de Riego, Cuba*

01	<p>TELVIA ARIAS-LAFARGUE DUNIA RODRIGUEZ HEREDIA VALDUVINA CÓRDOVA RODRÍGUEZ DARIA TITO FERRO PLÁCIDA SALAZAR ARRASTRE TAIMI BESSY HERRUTINER</p>	<p>INFLUENCIA DE RESIDUALES INDUSTRIALES EN LA CONTAMINACIÓN DE LA BAHÍA DE SANTIAGO DE CUBA EN EL 2020.</p>	<p>3 16</p>
02	<p>TERESITA DE JESÚS ROMERO LÓPEZ GERARDO SUÁREZ ÁLVAREZ</p>	<p>USO SOSTENIBLE DEL AGUA RESIDUAL DE LA PESCA A PARTIR DEL CULTIVO DE MICROALGAS. CASO DE ESTUDIO EPIGRAN.</p>	<p>17 28</p>
03	<p>ANGEL ORLANDO CASTELLANO SANCHEZ RACIEL DAVID LAGO SOLAN HENRY BORY PREVEZ</p>	<p>PROGRAMA PARA DETERMINAR LOS PARÁMETROS QUE CARACTERIZAN EL OLEAJE MARINO Y SIMULAR SU COMPORTAMIENTO.</p>	<p>29 43</p>
04	<p>CARLOS LÁZARO CASTILLO GARCÍA TOMÁS DÍAZ PÉREZ LAMBERTO ÁLVAREZ GIL MICHAEL ÁLVAREZ GONZÁLES</p>	<p>ESTRATEGIAS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE DRENAJE URBANO EN LA CIUDAD DE SANTA CLARA.</p>	<p>44 57</p>
05	<p>ROLANDO VERDÉS SÁNCHEZ LEMUEL CARLOS RAMOS ARZOLA ARMANDO ORESTES HERNÁNDEZ VALDÉS</p>	<p>SOLUCIÓN DEL PROBLEMA INVERSO DE LA HIDROGEOLOGÍA MEDIANTE EL ALGORITMO EVOLUCIÓN DIFERENCIAL.</p>	<p>58 70</p>
06	<p>ARMANDO O. HERNÁNDEZ VALDÉS</p>	<p>EL AEROPUERTO JOSÉ MARTÍ Y PELIGROS ASOCIADOS A SU SISTEMA DE PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES.</p>	<p>71 83</p>
07	<p>HOLANDA TERESA VIVAS SALTOS JOSÉ MANUEL CALDERÓN PINCAY LAURA GEMA MENDOZA CEDEÑO JOSÉ GERARDO CEDEÑO ZAMBRANO</p>	<p>REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE EL POLIELECTROLITO CATIONICO EXTRAÍDO DE LAS SEMILLAS DE MORINGA OLEÍFERA</p>	<p>84 96</p>
08	<p>RICARDO PÉREZ HERNÁNDEZ ESEQUIEL ROLANDO JIMÉNEZ ESPINOSA JOSÉ LUIS SILVEIRA RIVERO</p>	<p>RESULTADOS DEL RIEGO POR SURCOS ABIERTOS Y CERRADOS, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE CONDICIONANTES DE MANEJO EN CAÑA DE AZÚCAR.</p>	<p>97 108</p>

## Influencia de residuales industriales en la contaminación de la bahía de Santiago de Cuba en el 2020

**Telvia Arias-Lafargue**

E-MAIL: tal@uo.edu.cu

Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Universidad de Oriente.

**Dunia Rodriguez Heredia**

E-MAIL: duniarh@uo.edu.cu

Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Universidad de Oriente.

**Valdovina Córdova Rodríguez**

E-MAIL: vcordova@uo.edu.cu

Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente.

**Daria Tito Ferro**

E-MAIL: dariat@uo.edu.cu

Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente.

**Plácida Salazar Arrastre**

E-MAIL: placida@uo.edu.cu

Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Universidad de Oriente.

**Taimi Bessy Horruitiner**

E-MAIL: taimib@uo.edu.cu

Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente.

### RESUMEN

La bahía santiaguera es considerada la segunda más contaminada del país. Debido a la Covid-19, la productividad de las industrias que la rodean, y el trasiego marítimo portuario disminuyó. Por ello, el objetivo del trabajo es identificar la influencia que tuvieron los residuales de algunas industrias en la contaminación de la bahía en el 2020. Se determinaron once parámetros indicativos de contaminación como metales pesados, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos y turbiedad. Se puede asegurar que las empresas de Fibrocemento, ERASOL, Refinería de Petróleo, Procesadora de Soya, y Cervecería, son las que mayores concentraciones de contaminantes aportan a las aguas de la bahía y que la calidad de las aguas de la zona estudiada no cumple con los requisitos para zona de baño ni de pesca según las normas cubanas vigentes.

**PALABRAS CLAVES:** bahía Santiago de Cuba, contaminación, metales pesados, oxígeno disuelto, sólidos suspendidos

## Influence of industrial waste in the pollution of the bay of Santiago de Cuba in 2020

### ABSTRACT

The Santiago bay is considered the second most polluted in the country. Due to Covid-19, the productivity of the industries that surround it, and the port maritime transfer decreased. Therefore, the objective of the work is to identify the influence that the residuals of some industries had on the contamination of the bay in 2020. Eleven parameters indicative of contamination were determined, such as heavy metals, dissolved oxygen, suspended solids and turbidity. It can be ensured that the Fiber Cement, Erasol, Oil Refinery, Soy Processing, and Brewery companies are the ones that contribute the highest concentrations of pollutants to the waters of the bay and that the quality of the waters of the area studied does not meet the requirements for bathing or fishing areas according to current Cuban regulations.

**KEYWORDS:** Santiago de Cuba's bay, pollution, heavy metals, dissolved oxygen, suspended solids

## 01 INTRODUCCIÓN

En la bahía santiaguera descargan sus aguas los ríos Cobre, Los Guaos, Yarayó, así como el dren Yarto o Trocha. En el lóbulo interior de este ecosistema se localiza la ciudad y el puerto de Santiago de Cuba, segundo de importancia del país, con seis zonas que presentan magníficas condiciones para fondeaderos de buques que son: Punta Gorda, noroeste de Cayo Ratones, este de Punta del Sol, noroeste del Bajo de los Compadres, este-noroeste del Espigón Antonio Maceo y sureste de Punta Buena Vista. (CITMA, 2018)

La Delegación Territorial de la Unidad de Medio Ambiente del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), en Santiago de Cuba, en el diagnóstico que presentó de actualización de fuentes contaminantes de la bahía santiaguera en el 2018, identifica 22 fuentes principales de contaminación al mencionado cuerpo receptor, 13 de los cuales son industrias. En el mismo documento, luego de ser evaluadas las capacidades de manejo de los desechos de cada fuente contaminante, se establece un orden de prioridad de las industrias de mayor importancia dentro del total que inciden en la bahía de Santiago de Cuba. Las de mayor importancia y preocupación corresponden a la prioridad I, según se indica en la tabla 1, (CITMA, 2018). Aquí se muestra, además, el punto de vertimiento de cada una de ellas, aunque los residuales industriales de todas estas industrias de una forma u otra desembocan en la bahía.

Tabla 1. Orden de prioridad y puntos de vertimiento de las industrias de mayor importancia dentro del total que inciden en la bahía de Santiago de Cuba. Tomado de CITMA, 2018.

Industria	Punto de vertimiento	Prioridad
Refinería "Hermanos Díaz"	Bahía	I
Central Termoeléctrica "Antonio Maceo"	Bahía	I
Empresa Cervecería Santiago de Cuba "Hatuey"	Río Yarayó	I
Empresa Procesadora de Soya	Río Los Guaos	I
Empresa Refinadora de Aceite ERASOL	Río Los Guaos	I
Empresa de Cementos "José Merceron"	Bahía	III
Centro Genético Porcino	Río Gascón	III
Empresa Textil "Celia Sánchez Manduley"	Río Gascón	III
Empresa Productora de Prefabricados	Río Gascón	IV

Arias-Lafargue (2008) presentó una caracterización de 10 de las industrias que más contaminaban la bahía santiaguera en esos momentos, así como los ríos, arroyos, drenes y otras 10 instalaciones y servicios que también incidían negativamente en dicho cuerpo de agua. En el 2018 el diagnóstico del CITMA contiene esas mismas industrias, instalaciones y servicios identificados como altamente contaminantes (CITMA, 2018), lo cual indica que las modificaciones que se realizaron en algunas de ellas, no satisficieron los requerimientos establecidos en las normas de vertimiento vigente (ONN 2007, 2012).

Por muchos años la bahía santiaguera ha sido considerada la segunda bahía más contaminada del país, a pesar de que se han realizado múltiples acciones para contribuir a la disminución de los diferentes indicadores de contaminación cuyos valores se verifican anualmente.

Debido a la pandemia de la COVID-19, en el año 2020, el nivel de productividad de las industrias que comúnmente vierten sus residuos directa o indirectamente a la bahía santiaguera, se vio afectado por las bajas disponibilidades de materias primas y por la permanencia en los hogares de

muchos trabajadores, como una alternativa para evitar la propagación de esta enfermedad. Todo ello puede influir positivamente en la variación de las características de las aguas de la bahía, al disminuir a su vez, el vertimiento de residuales industriales, y ese es el objetivo de este trabajo, analizar el comportamiento de algunos indicadores de contaminación en la bahía santiaguera y su relación con los mismos indicadores medidos en las principales industrias contaminantes.

## 02 SELECCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Para realizar el estudio se tomaron muestras de los residuales líquidos de ocho de las industrias identificadas como principales contaminadoras de la bahía, resultados que se muestran en la introducción. En una segunda parte del trabajo se comparan estos resultados, con la caracterización que se realizó de las aguas de la bahía en el mismo período, de modo tal que pueda valorarse la influencia que, sobre la calidad del agua de la bahía santiaguera, tienen las industrias aledañas. La bahía de estudio es considerada de bolsa y se encuentra rodeada de elevaciones, con pocas posibilidades de renovación de sus aguas. Las costas son acantiladas, en ella el mar penetra para formar varias caletas y ensenadas (Arias-Lafargue, 2008). Estas particularidades hacen que las características de las aguas de la bahía sean bastante similares en ambas costas. Para la valoración de la influencia se tuvo en cuenta las direcciones que toman las corrientes marinas en la bahía, lo que se muestra en la figura 1.

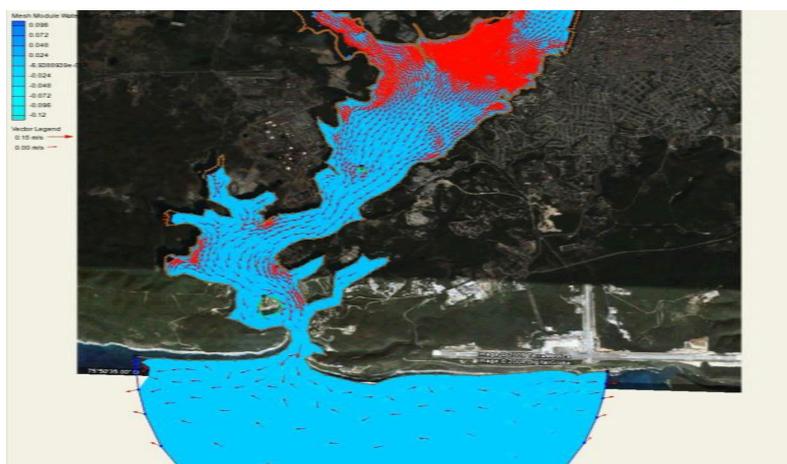


Figura 1. Mapa que muestra las direcciones que toman las corrientes marinas en la bahía de Santiago de Cuba (CITMA, 2018).

Las muestras de los residuales industriales y de las aguas de la bahía fueron analizadas en el Departamento de Calidad del Laboratorio "Elio Trincado" de la empresa Geominera Oriente y en la Empresa Nacional de Análisis y Servicios Técnicos perteneciente al Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (ENAST) de Santiago de Cuba, ambos laboratorios certificados. Se determinaron como parámetros indicativos de contaminación: metales pesados (Al, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sn, Zn y Hg), pH, nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ), demanda química de oxígeno (DQO), oxígeno disuelto, sólidos suspendidos y turbiedad, según las exigencias de las normas empleadas (NC 521:2007 y NC 27:2012). Las mismas se colectaron en envases plásticos y de cristal de 1 000 mL y las de oxígeno disuelto en envases de cristal de 200 mL con la adición de los correspondiente preservantes.

Para el caso de las aguas de la bahía las muestras fueron tomadas en la superficie y a un metro de profundidad a lo largo de la orilla este de la bahía de Santiago de Cuba, de acuerdo con las Normas Internacionales ISO 5667-9 e ISO 5667-3 Parte 3 (ISO 5667-9 1994).

### 03 RESIDUALES INDUSTRIALES ESTUDIADOS

La empresa de fibrocemento “Armando Mestre Martínez” (resultados en tabla 2) es una de las instalaciones que conforman la empresa de Fibrocemento PERDURIT, pertenece al Ministerio de la Construcción (MICONS), está integrada al grupo Industrial de la Construcción GEICON y se ubica en la Carretera de la Refinería km 2½. Posee un área aproximada de 124 523,5 m<sup>2</sup>. Esta industria abastece a la mitad oriental del archipiélago cubano de productos de fibrocemento y poliespuma (poliestireno expandido), dedicándose fervientemente a satisfacer estas producciones, ventas y comercialización. En los diferentes procesos que se realizan en el taller 1 de la misma, se genera una gran cantidad de residuales líquidos, los que son vertidos al río Gascón sin tratamiento previo contribuyendo así a la contaminación del ecosistema, pues el río desemboca en la bahía santiaguera. (Arias-Lafargue et.al. 2021a)

El taller 2 de la entidad, donde las tejas son procesadas, dispone de un sistema de tratamiento de los residuales líquidos, los que posteriormente se mezclan con los residuales del taller 1, antes de ser vertidos al medio. Todo el residual generado en las diferentes actividades productivas y de servicios que se realizan en esta empresa, son trasladados a través de diferentes canales hasta el canal principal que lo conduce hacia la fuente receptora final, río Gascón. El punto de muestreo se ubica al final del canal principal y antes de que los residuales sean vertidos al río Gascón. Aquí se unen todos los residuales generados en la empresa. Las muestras tomadas se presentan claras y sin materia flotante (figura 2).



Figura 2. Punto final de vertimiento de Fibrocemento.

En la tabla 2 se brinda la información correspondiente a los valores medios obtenidos de los análisis realizados a las muestras tomadas a los residuales de las cinco primeras industrias estudiadas.

Para el caso de la empresa de fibrocemento, los residuales investigados se tomaron al final del canal de descarga al río Los Guaos. Se podrá apreciar (en la tabla 2) que los residuales generados en la entidad presentan un alarmante pH muy básico, con valores por encima de 12 unidades, lo que evidentemente está influido por algunas de las materias primas utilizadas en el proceso productivo. Además, incumplen con la norma utilizada (NC 27:2012) los parámetros de conductividad, DBO<sub>5</sub>, DQO y sólidos sedimentables, motivado por la propia naturaleza del proceso. En el caso de los valores obtenidos de Nitrógeno Total, Fósforo Total y metales pesados cumplen con la norma utilizada, estos últimos fueron valorados de acuerdo a la tabla 1 de la referida norma y en todos los casos los valores obtenidos están por debajo de la misma.

Tabla 2. Valores medios obtenidos de los análisis realizados a residuales procedentes de las primeras cuatro industrias.

Determinación	UM	NC 27:2012	Empresa de Fibrocemento	Textilera		Cervecería Hatuey	Genético Porcino
				Taller de acabado	Salida Homogenizador		
pH	u	6-9	12,17	7,03	7,7	5,71	7,7
NT	mg/L	20	4,89	3,67	1,73	1,28	9,5
PT	mg/L	10	1,48	12,26	1,07	6,16	18,3
Conductividad	µs/cm	3500	7193,3	2533,57	3219,50	837,5	3267,9
Sólidos Suspendidos	mg/L	150	-			148,73	181,8
Sólidos Sedimentables	ml/L	5	75,31	5,0	0,96	2,8	1,1
Materia Flotante		NP	NP	NP			
Cr VI	mg/L	0,5	0,3	0,13	0,02	0,06	0,1
Al	mg/L	<10	0,07	0,06	0,08	0,12	0,1
Cd	mg/L	<0,3	<0,002	<0,002	<0,002	0,004	0,002
Cr	mg/L	2	<0,28	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Co	mg/L	-	<0,005			<0,005	<0,005
Cu	mg/L	<5	<0,05	<0,05	<0,005	0,052	<0,05
Fe	mg/L	-	0,06			2,49	0,2
Mn	mg/L	-	<0,05			0,27	0,2
Ni	mg/L	-	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Pb	mg/L	1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Sb	mg/L	-	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Zn	mg/L	5	<0,02	0,06	<0,02	0,08	0,2
DBO <sub>5</sub>	mg/L	60	221,11	314	33,6	271,06	45,3
DQO	mg/L	120	674,67	937,83	109,0	825,81	142,1
Aceites y grasas	mg/L	50	-	75,40	46,53	222,4	163,6

NT: nitrógeno total, PT: fósforo total, NP: no presente.

La empresa textil “Celia Sánchez Manduley” (tabla 2) se encuentra en la actualidad con menos de un 60% de su capacidad instalada, debido a esto le han sido arrendados algunos espacios a varias pequeñas industrias y almacenes que contaminan en menor o mayor medida la bahía de Santiago de Cuba, dentro de estas empresas se encuentran: Distribuidora Suchel, Fábrica de Chanquetas Playeras, Base Mecánica ESTIL, Fábrica de Tabacos, Empresa de Servicios Empresarial y Distribuidora Combell. (Arias-Lafargue, 2008)

Durante el estudio realizado, la producción del combinado no incluyó el empleo de colorantes, sólo disoluciones detergentes, de hidróxido de sodio, de peróxido de hidrógeno, y de ácido acético para el blanqueo y descrudado de las piezas textiles que lo necesitaran. Se tomaron muestras de residual en dos puntos. Uno ubicado en el Taller de Acabado (figura 3), donde se genera un residual blancuzco producto del blanqueo de las telas. Otro punto se situó en el homogenizador (figura 4), donde se acumula residual algo turbio, resultante de diferentes actividades productivas. (Córdova et al. 2020)



Figura 3. Registro del taller de acabado



Figura 4. Registro del homogenizador

Los resultados revelaron que los valores de la concentración de los metales pesados determinados estuvieron dentro de las normas cubanas para el vertimiento de residuales a las zonas costeras, como se aprecia en la tabla 2. El resto de los parámetros oscilaron entre valores por debajo y por encima de los límites establecidos por la norma cubana. Se concluye que en estos residuales existen compuestos orgánicos, elevados valores de DBO, DQO, grasas y aceites, y que la industria expulsa un residual con insuficiente tratamiento, por lo cual es una fuente de contaminación a la bahía.

Otra de las entidades consideradas altamente contaminante a la bahía santiaguera, es la Cervecería Santiago de Cuba "Hatuey" (tabla 2), industria que lleva más de 94 años de explotación y contribuye a la contaminación del río Yarayó y la bahía santiaguera. El punto de muestreo se ubica en uno de los registros del sistema de alcantarillado, donde se unen todos los residuales antes de su vertimiento al río Yarayó (figura 5). Los residuales se presentan turbios y con olores característicos.

En el 2020 debido a la pandemia se realizaron modificaciones en los productos a elaborar lo que influyó en que la  $DBO_5$  superara en 4,52 veces y la DQO en 6,88 veces los límites máximos permisibles establecidos por la normativa cubana para el vertimiento de aguas residuales a aguas terrestres y al alcantarillado (ONN 2012). Se evidenció que la concentración de metales pesados, conductividad eléctrica, así como el contenido de nitrógeno y fósforo se mantuvieron dentro de lo establecido por la norma de vertimiento y que a pesar de que la norma establece que no debe existir sólidos suspendidos se reportan valores superiores a los 100 mg/L. Mientras las grasas y aceites constituyen el parámetro que supera en 7,4 veces lo que indica la norma cubana (tabla 2).



Figura 5. Registro del sistema de alcantarillado.

El Centro Genético Porcino (tabla 2) se ubica al noroeste de la ciudad de Santiago de Cuba en el km 11 de la carretera central vía Palma Soriano. Esta entidad tiene como objetivo producir y comercializar cerdos genéticamente mejorados, carnes y subproductos porcinos. Durante la limpieza de las naves donde se crían los cerdos se genera cantidad de residuales líquidos y sólidos, los cuales son sometidos a un proceso de tratamiento antes de ser vertidos al medio. Las tres primeras lagunas retienen los sólidos sedimentables que lleva el residual y las dos últimas retienen el residual líquido que luego pasa a un filtro percolador antes de su vertimiento al medio en este caso al terreno y finalmente al río Los Guaos. Algunas de las lagunas se encuentran ubicadas muy próximas al cauce del río, por lo que se encuentran en zona de riesgo ante los agentes erosivos, fuertes aguaceros, y sismos de moderada intensidad, estos riesgos podrían provocar el colapso del sistema y un fuerte impacto sobre el río. Todas carecen de mantenimiento.

El punto de muestreo se ubica en la última laguna de retención de los residuales líquidos y en el registro por donde pasa el residual antes de llegar al filtro percolador. Toda la zona alrededor de la laguna se encuentra cubierta de lajas (figura 6). El líquido acumulado en la misma presenta una coloración verdosa. Las muestras tomadas se observan algo turbias. En este caso los residuales superan la norma (ONN 2012) en lo referido a los sólidos suspendidos, DQO y aceites y grasas tal como se puede apreciar en la tabla 3.



Figura 6. Laguna 5 y registro.

La Refinería de Petróleos Hermanos Díaz, forma parte de las restantes cuatro industrias muestreadas que se analizarán en esta parte del trabajo, cuyos resultados se muestran en la tabla 3. Esta industria dispone de sistema de tratamiento de todos sus residuales cuyo destino final lo constituyen las aguas de la bahía santiaguera. La misma ocupa alrededor de 136 hectáreas y tiene la

misión de producir derivados del petróleo y brindar servicios de alta calidad al territorio nacional. Entre los productos que se comercializan están: el gas licuado, kerosene, turbo combustible, asfalto, gasolina y diesel. Además, posibilita la producción del gas refrigerante LB-12 y el solvente RL-95, que sustituye al Freón 11 en la limpieza de equipos de refrigeración.

Tabla 3. Valores medios obtenidos de los análisis realizados a residuales procedentes de otras cuatro industrias.

Determinación	UM	NC 521:2007	Refinería			Procesadora de soya	ERASOL	Prefabricado	
			Ensenada Miradero	Ensenada Cajuma	Separador			Paneles	Descarga final
pH	u	9	7,74	7,70	7,32	6,52	6,6	7,39	7,85
NT	mg/L	20	0,75	0,85	1,93	1,43	1,07	2,63	1,16
PT	mg/L	7	0,05	0,14	1 481,06	32,17	23,56	1 085,7	0,22
Sólidos suspensión	mg/L	150	180,67	242,5	219,67	170,83	623,83	84,05	60,66
Sólidos Sedimentables	ml/L	15	0,1	0,93	0,46	5,13	4,13	0,30	0,30
Cr VI	mg/L	0,1	< 0,02	< 0,02	0,07	0,08	0,12	0,06	0,03
Aceites y grasas	mg/L	50	70,8	77,2	27,73	299,6	19 658,4	<0,02	113,27
Materia flotante		Ausente	NP	P	P	P	NP	NP	NP
CN <sup>-</sup>	mg/L	0,5	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Al	mg/L	1	0,22	0,09	0,34	0,07	0,34	1,03	0,08
Cd	mg/L	0,05	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,006	<0,002	<0,002
Cr	mg/L	2,5	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Cu	mg/L	1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Fe	mg/L	5	0,18	0,15	1,4	<0,02	3,26	1,66	0,09
Ni	mg/L	2	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Pb	mg/L	0,1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Sb	mg/L	0,7	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Zn	mg/L	4	0,34	0,03	0,07	0,034	0,84	0,05	<0,2
Hg	mg/L	0,005	<0,04	<0,04	<0,04	<0,02	<0,02	<0,04	<0,02
DBO <sub>5</sub>	mg/L	150	1 342,5	435,14	25,43	49,22	4 904,1	26,33	33,21
DQO	mg/L	300	4 063,0	1 327,86	85,0	33	14 747,2	85,17	105,14
Conductividad	µs/cm	-	413,8	420,6	433,1	1 253,67	2 355,91	403,6	1 183,94

NP: no presente, P: presente.

Varios son los elementos contaminantes que en sus procesos productivos se generan, así como los efectos que acarrearán sobre el ecosistema bahía (Arias-Lafargue, 2008). Por consiguiente, es necesario que los sistemas de tratamiento de que dispone cumplan eficientemente su función.

Para caracterizar los residuales generados fueron elegidos varios puntos de muestreo: uno dentro de cada una de las barreras flotantes que retienen los vertimientos provenientes de la laguna de oxidación y del separador y un punto a la salida del mismo hacia la laguna.

Como se plantea, estos residuales líquidos descargan a un sistema de barreras flotantes, ubicados en el cuerpo receptor (bahía de Santiago de Cuba), que actúan como trampas, cuya función es evitar que las grasas, aceites e hidrocarburos se esparzan libremente por las aguas de la Bahía. Estas grasas y aceites son de baja o nula biodegradabilidad y poseen características especiales como baja densidad y poca solubilidad en agua, por lo que tienden a separarse de la fase acuosa, y ocupan la superficie del líquido que las contiene y forman natas. Se observa una gruesa nata en el interior las barreras flotantes que reciben la descarga de residuales de la laguna de oxidación. La figura 7 muestra las afectaciones en la costa y en el área de las barreras flotantes.



Figura 7. Afectaciones en la costa en el área de las barreras flotantes.

Los análisis realizados demostraron que en los puntos de muestreo los residuales analizados cumplen las especificaciones de la norma utilizada para el pH, nitrógeno total, sólidos sedimentables, cromo hexavalente y metales pesados, sin detectarse nunca iones de cianuro.

La tabla 3 refleja los valores medios obtenidos de los análisis realizados a las muestras tomadas en los tres puntos de muestreos correspondiente a la ensenada Cajuma, ensenada Miradero y a la salida del separador. Los residuales en los Punto 1 y 2 no cumplen con las exigencias de la norma cubana (ONN 2007) para los casos de las concentraciones de sólidos suspendidos totales, grasas y aceites, DBO y DQO. Mientras en el Punto 3, la composición de los residuales no cumple con la norma para los casos de las concentraciones de fósforo total, sólidos suspendidos totales, además de grasas y aceites.

Los resultados obtenidos y analizados, evidencian que los residuales no cumplen con la norma de vertimiento cubana establecida, de acuerdo con su vertimiento al cuerpo receptor que se analiza. En consecuencia, deben determinarse los posibles lugares que mayor contaminación aportan dentro de la entidad a las ensenadas de la Bahía.

La empresa Refinadora de Aceites ERASOL (tabla 3), ubicada al oeste de la ciudad de Santiago de Cuba es una de las que descarga sus residuales a la bahía, los cuales afectan al bosque de mangles ubicado en la parte posterior de dicha entidad. (Rodríguez et al., 2021) Como resultado del proceso de refinación del aceite, esta industria genera un volumen de 283 m<sup>3</sup>/día de residuales líquidos, que son vertidos directamente al área de los manglares de la bahía sin ningún tratamiento. (Rodríguez-Heredia et al. 2022) El vertimiento de estos residuales provoca la muerte del mangle, el deterioro de

la calidad del agua de la bahía de Miradero y los ríos que desembocan en la zona, trae consigo la aparición de procesos de eutrofización, y, por tanto, contribuye a la reducción de oxígeno en el agua; el destino final de sus residuales líquidos termina finalmente en el manglar.

En la figura 8 se muestra el punto de muestreo, ubicado en la parte trasera de la fábrica. El residual sale a través de una tubería y descarga directamente al medio, donde se acumula. Este residual presenta un color blancuzco o amarillento y en la tabla 3 se podrá observar que los valores de sólidos suspendidos, DBO<sub>5</sub>, grasas y aceites, sólidos suspendidos totales y fósforo total se encuentran por encima de lo normado.



Figura 8. Zona de descarga de los residuales líquidos de ERASOL.

Dentro de las industrias que vierten a la bahía se encuentra también la Procesadora de Soya (tabla 3), encargada de obtener, a partir del grano de soya: aceite vegetal crudo, proteína vegetal texturizada, harina de soya para consumo humano, harina de soya para consumo animal y lecitina de soya, con una capacidad de instalación para procesar 500 ton/día. A partir de los diferentes procesos que se llevan a cabo en esta empresa, se generan residuales líquidos que son vertidos sin previo tratamiento a la Bahía, como receptor final. (Rodríguez et al., 2020).

La planta produce 74,4 m<sup>3</sup>/día de residuales líquidos provenientes del proceso industrial, consumo social y la limpieza de pisos. El residual del consumo industrial asciende a 56,4 m<sup>3</sup>/día. El punto de muestreo se ubicó a la salida del desagüe de la planta al cuerpo receptor, en este caso la bahía de Santiago de Cuba. Los residuales se presentan muy turbios y con abundante materia flotante (figura 9).



Figura 9. Punto de muestreo de la empresa Procesadora de Soya.

En la tabla 3 aparecen reflejados los valores medios obtenidos de los análisis realizados a las muestras tomadas en el punto de descarga de residuales de la procesadora a la bahía santiaguera. La evaluación de los residuales líquidos provenientes de la empresa Procesadora de Soya de Santiago de Cuba evidenció que en estos los metales pesados, la conductividad y el pH se encuentran dentro de lo normado, sin embargo, no se cumple con la norma de vertimiento vigente para las grasas y aceites, DQO y DBO.

La empresa de Prefabricado y Premezclado Santiago (tabla 3) es una entidad subordinada al ministerio de la Construcción, se encuentra ubicada en carretera de la Refinería km 2½, zona industrial. La misma tiene la misión de elaborar elementos prefabricados de hormigón armado, pretensado, premezclado, elementos alternativos, servicios de laboratorio, carpintería, acero elaborado y transportación de materias primas y materiales para satisfacer las necesidades de prefabricado y de viviendas. Como resultado del proceso de elaboración de hormigón se genera un volumen de residuales líquidos que es vertido a los manglares de la bahía sin ningún tipo de tratamiento. (Tito et al. 2021)

Las muestras se tomaron en la canaleta que sirve de descarga de los moldes donde se fabrican los paneles de prefabricado. En este caso el residual presenta un color oscuro y turbio. (figura 10). Y en el punto final de acumulación de todos los residuales que genera la entidad (figura 11). En este punto el terreno conforma una depresión en la cual se acumula el residual formando una poceta con una dimensión de aproximadamente 8 x 2 m. El líquido se observa turbio y con abundantes manchas de grasas.



Figura 10. Descarga de los moldes de los paneles de prefabricado.



Figura 11. Punto final de descarga de todos los residuales de la entidad.

Un análisis general muestra que de las ocho industrias estudiadas solo una (Fibrocemento) incumple con la norma de vertimiento en lo referido al pH, con un valor superior a las 12 unidades. Mientras el taller de acabado de la empresa Textil, la fábrica de aceite ERASOL, el separador de la Refinería de Petróleo, la Procesadora de Soya y los paneles de Prefabricado vierten residuales con concentraciones de fósforo superior a lo normado.

En lo concerniente a la conductividad viola lo establecido la industria de Fibrocemento, así como las industrias de Prefabricado y de Soya. Esta última tampoco cumple con las concentraciones establecidas de sólidos suspendidos al igual que ERASOL, Porcino y la Refinería de Petróleo, en todas las zonas estudiadas; aunque la concentración de los sólidos sedimentables solo incumple Fibrocemento. Sin embargo, algo en lo que coinciden las ocho industrias es en verter residuales con altas concentraciones de aceites y grasas. Mientras solo Prefabricado y Soya logran que los residuales que generan no tengan elevados contenidos de DBO<sub>5</sub> y DQO.

#### 04 INFLUENCIA EN LA CONTAMINACIÓN DE LA BAHÍA SANTIAGUERA DE LOS RESIDUALES INDUSTRIALES ESTUDIADOS.

En el año 2020, debido a la pandemia de la COVID-19, el nivel de productividad de las diversas industrias que comúnmente vierten sus residuos a la bahía santiaguera, se vio afectada por las bajas disponibilidades de materias primas y por la permanencia en los hogares de muchos trabajadores como una alternativa para reducir la propagación de esta enfermedad. Igualmente, disminuyó la llegada de barcos con mercancías al puerto, se suspendió el arribo de cruceros y se limitó el acceso a las playas y los centros recreativos de la zona costera.

Arias-Lafargue et al. (2021b), analizaron el comportamiento de algunos indicadores de contaminación en la bahía santiaguera en ese período, seleccionando 11 puntos de muestreos, seis de los cuales se ubicaban en el interior de la Bahía, donde confluyen los residuales de las industrias que se analizan en este trabajo.

En estos casos, ninguno de los puntos muestreados se utiliza como zona de baño, sin embargo, sí lo emplea la población para la pesca recreativa. Cuando se comparan los valores de los parámetros analizados, se aprecia que el pH, el nitrato y el amonio siempre cumplen lo establecido en la NC 25:1999 como agua de buena calidad para la pesca. Para el caso del nitrito, sólo el agua puede catalogarse de calidad dudosa en las muestras tomadas en el Puerto Guillermón Moncada, en el resto de los puntos la calidad es buena para la mencionada práctica. No obstante, en todos los puntos al interior de la bahía, se puede catalogar el agua como de calidad dudosa en cuanto al contenido de fosfato, DQO, DBO<sub>5</sub>, sólidos suspendidos y turbiedad para realizar la actividad recreativa mencionada. (Arias-Lafargue et al., 2021b)

A pesar de las significativas reducciones de los niveles de producción en las diferentes industrias que vierten sus residuales a la bahía santiaguera, queda demostrado que las mismas continúan influyendo negativamente en las características de las aguas de la Bahía, debido al vertimiento de residuales con elevadas concentraciones de fósforo, aceites, grasas, sólidos suspendidos y las demandas químicas y bioquímicas de oxígeno.

#### 05 CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en el año 2020, se puede asegurar que la empresa de Fibrocemento "Armando Mestre", la empresa Refinadora de Aceites ERASOL, la Refinería de Petróleo "Hermanos Díaz", la empresa Procesadora de Soya, y la Cervecería Hatuey, son las que mayores concentraciones de elementos contaminantes aportan a las aguas de la bahía, en cuanto a elevadas concentraciones de fósforo, aceites, grasas, sólidos suspendidos y las DQO y DBO<sub>5</sub>. En cambio, el contenido de metales pesados estuvo por debajo de la norma cubana en todos los puntos muestreados. A la entrada de la bahía, los indicadores de contaminación que violan lo normado son los sólidos suspendidos y el oxígeno disuelto a la entrada de la bahía y los demás parámetros

estudiados en su interior, por lo que puede asegurarse que la calidad de las aguas de toda la zona estudiada no cumple con los requisitos para zona de baño ni de pesca según lo que establecen las normas cubanas e internacionales vigentes.

## 06 REFERENCIAS

- Arias-Lafargue, T.** (2008). "Caracterización de algunas de las principales fuentes contaminantes de la bahía de Santiago de Cuba y sus consecuencias en el medio ambiente". *Revista Tecnología Química*, 28 (2), 79 – 89. ISSN 2224-6185. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_issuetoc&pid=2224-18520200003&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_issuetoc&pid=2224-18520200003&lng=es&nrm=iso)
- Arias-Lafargue, T., Salazar-Arrastre, P., Bessy Horruitiner, T., Córdova-Rodríguez, V., Rodríguez-Heredia, D. (2021a)** "Opción de tratamiento para las aguas residuales del taller 1 de la empresa de fibrocemento". *Revista Tecnología Química*. V.41, N.1, 34-46. ISSN: 2224-6185.
- Arias-Lafargue T., Rodríguez Heredia D., Córdova Rodríguez V. (2021b)** "Bahía de Santiago de Cuba. Indicadores de contaminación en su costa este". *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. Vol. XLII, no.4, pp. 64-78 ISSN 1680-0338
- CITMA (2018)** Informe de Inspección Estatal Ambiental. Bahía de Santiago de Cuba: situación ambiental, diagnóstico y propuestas. Delegación Territorial. Unidad de Medio Ambiente. Santiago de Cuba
- Córdova Rodríguez, V., Rodríguez Heredia, D., Tito Ferro, D., Arias-Lafargue, T., Bessy Horruitiner, T.;** (2020) "Composición de los licores residuales del Combinado Textil Celia Sánchez Manduley. *Revista Tecnología Química*. 40 (3), 502-516. ISSN 2224-6185
- ISO 5667-9 (1994)** Guía para el muestreo de aguas marinas, ISO 5667-3 Parte 3 Guía para la preservación y manipulación de las muestras. Ciudad de la Habana. Cuba.
- ONN, Oficina Nacional de Normalización (2012)** NC 27:2012 Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y alcantarillado- Especificaciones. La Habana, Cuba.
- ONN, Oficina Nacional de Normalización (2007)**, NC 521:2007 "Vertimiento de Aguas Residuales a la Zona Costera y Aguas Marinas — Especificaciones" La Habana. Cuba.
- Rodríguez Heredia, D., Calzado Lamela, O., Noguera Araujo, A. L., Córdova Rodríguez, V., Arias Lafargue, T. (2020)**; "Evaluación de la calidad de las aguas residuales de la Empresa Procesadora de Soya de Santiago de Cuba. *Revista Tecnología Química*., 40 (3), pp 598-610. ISSN 2224-6185
- Rodríguez Heredia D., Córdova Rodríguez V., Arias Lafargue T., Tito Ferro D., Salazar Arrastre P.** "Evaluación de los residuales de la empresa refinadora de aceites ERASOL de Santiago de Cuba". *Revista Centro Azúcar*. Vol.48, No.1, enero-marzo, pp. 1-12, 2022. ISSN: 2223-4861. <http://centrozucar.uclv.edu.cu>
- Tito Ferro D., Córdova Rodríguez D., Rodríguez Heredia D., Arias Lafargue T., Salazar Arrastre P., Bessy Horruitiner T. (2021)** "Composición del licor residual de la Empresa de Prefabricado y Premezclado de Santiago de Cuba" *Revista Centro Azúcar* Vol. 48, no.4, 42-52. ISSN: 2223-4861

### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Telvia Arias-Lafargue** <https://orcid.org/0000-0003-2610-1451>

Participó en el diseño de la investigación. Contribuyó en la interpretación de los datos, en el análisis de los resultados y en la redacción del informe final. Participó en la búsqueda de información.

**Dunia Rodriguez Heredia** <https://orcid.org/0000-0003-4676-7314>

Participó en el procesamiento de los datos experimentales y realizó contribuciones importantes en su análisis e interpretación. Realizó búsqueda de información y participó en la redacción del informe final.

**Valdivina Córdova Rodríguez** <https://orcid.org/0000-0002-6192-9898>

Trabajó en el diseño de la investigación, en la interpretación de los datos y en la búsqueda de información. Participó en la redacción del informe final.

**Daria Tito Ferro** <https://orcid.org/0000-0002-5276-8017>

Colaboró con la interpretación de los datos y revisión del informe final.

**Plácida Salazar Arrastre** <https://orcid.org/0000-0002-7965-5127>

Colaboró con la interpretación de los datos y revisión del informe final.

**Taimi Bessy Horruitiner** <https://orcid.org/0000-0001-7595-5547>

Colaboró con la interpretación de los datos y revisión del informe final.

## Uso sostenible del agua residual de la pesca a partir del cultivo de microalgas. Caso de estudio EPIGRAN

**Teresita de Jesús Romero López**

E-MAIL: teresitaromerolope@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría"

**Gerardo Suárez Álvarez**

E-MAIL: gerardoeloy650@gmail.com

Centro de Investigaciones Pesqueras (CIP)

### RESUMEN

El presente trabajo se realizó en el municipio de Manzanillo, provincia Granma, con el apoyo de la Industria Pesquera de Manzanillo. La investigación tuvo como objetivo proponer un sistema de tratamiento capaz de disminuir el potencial contaminante de las aguas residuales de la Empresa EPIGRAN con el empleo de la microalga *Chlorella* sp. Para ello se abordaron las lagunas de alta velocidad, evaluadas con antelación por especialistas de la pesca. De esta forma, se potenciará el uso sostenible del agua residual, ya que se alcanzarán subproductos de alto valor agregado para la alimentación animal, la industria farmacéutica y del cosmético. El agua clarificada tendrá una DBO<sub>5</sub> de 50 mg/L como máximo y se obtendrán 4,5 kg/m<sup>3</sup> de biomasa algal húmeda (1,0 kg/m<sup>3</sup> de biomasa seca).

**Palabras Claves:** EPIGRAN, laguna alta velocidad, microalga, tratamiento

Sustainable use of fishing wastewater from microalgae cultivation.  
Study case EPIGRAN

### ABSTRACT

This work was carried out in Manzanillo municipality, Granma province, with the support of Manzanillo Fishing Industry. The objective of the research was to propose a treatment system capable of reducing the contaminating potential of wastewater from the EPIGRAN Company with the use of the microalgae *Chlorella* sp. For this, the high-speed lagoons were approached, evaluated in advance by fishing specialists. In this way, the sustainable use of wastewater will be promoted, since high value-added by-products will be obtained for animal feed, the pharmaceutical and cosmetic industries. The clarified water will have a maximum BOD<sub>5</sub> of 50 mg/L and 4.5 kg/m<sup>3</sup> of wet algal biomass will be obtained (1.0 kg/m<sup>3</sup> of dry biomass).

**KEYWORDS:** EPIGRAN, high-speed lagoon, microalgae, treatment

## 01 INTRODUCCIÓN

"Las aguas residuales no deberían ser vistas como una carga para los gobiernos y la sociedad, sino como una oportunidad económica que puede convertirse en un recurso valioso" (Rodríguez et al., 2020).

Para ello, se requiere ante todo un cambio de paradigma entre los decisores, de modo que se proporcionen las pautas a seguir que conlleven a una mejora en la planificación, gestión y financiamiento a los tratamientos de las aguas residuales, a modo de recuperarlas y hacerlas disponibles a la sociedad. De esta forma, las plantas de tratamiento serían más sostenibles ambiental y financieramente.

En esta dirección se encamina la propuesta realizada a la Empresa Pesquera Industrial de Granma (EPIGRAN) donde se enclava la industria procesadora de mariscos y pescados, la cual no cuenta con tratamiento a sus aguas residuales, y que en la actualidad van a parar directamente a la zona costera, provocando considerables y diversos efectos negativos sobre los organismos acuáticos y la pesca, motivo suficiente para imponer límites en los niveles contaminantes a las aguas de desecho.

## 02 MATERIALES Y MÉTODOS

### AGUA RESIDUAL Y MATERIALES NATURALES

La empresa EPIGRAN se encuentra situada en la región sur de la provincia Granma ( $20^{\circ} 19'47,59''$  N y  $-77^{\circ} 09'14,35''$  W). La misma posee en su estructura dos instalaciones fundamentales: una ubicada en el municipio Manzanillo (INDUMAN) y la otra en el municipio Niquero (INDUNIQ). INDUMAN se localiza dentro del área que ocupa EPIGRAN como un gran complejo mixto empresarial e industrial (figura 1).



Figura 1. Imagen satelital de la Empresa EPIGRAN con las instalaciones procesadoras (INDUMAN)

A partir de las características de los residuales de INDUMAN, la cual procesa camarón blanco (*Litopenaeus vannamei*), pepino de mar (*Isostichopus badionotus*), ostión de mangle antillano (*Crassostrea rizophorae*) y algunas especies de pescado, se produce un estimado de residuales líquidos de 100-130 m<sup>3</sup>/d, que proceden principalmente del procesamiento de las especies mencionadas, la limpieza y desinfección de equipos e instalaciones y de las aguas de refrigeración con descarga directa al mar (20° 19'52,60" N y - 77° 09'16,06" W).

En 2020 se efectuó la caracterización a los residuales de esta industria, determinándose los parámetros siguientes: demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo total (PT), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), sólidos sedimentables (S. Sed), sólidos suspendidos totales (SST), grasas y aceites (G y A), coliformes totales (CT), coliformes fecales (CF), pH y temperatura (T), todos ellos según los métodos estándares descritos por Grasshoff et al. (1999) y el APHA (2012).

Para valorar la posibilidad de tratar los residuales con un sistema biológico, se determinó el índice de biodegradabilidad (IB) con la fórmula más abajo expuesta y siguiendo lo estipulado en la escala de valores mostrada.

$$IB = \frac{DQO}{DBO_5} \quad (1)$$

IB= 1,00-2,50 ----- Biodegradable

IB= 2,50 - 5,00 ----- Medianamente biodegradable

IB= 5,00 ----- Poco biodegradable

Con el objetivo de dimensionar las distintas operaciones unitarias que se formulan más adelante, así como la propuesta de materiales a utilizar en las diferentes fases del tratamiento a las aguas residuales que se generan en el proceso de las especies citadas, se abordaron los apuntes de Spellman (2003) y Riffat (2013), así como se tuvo en cuenta la experiencia de especialistas en la temática y personal que se vincula de manera directa en la protección del medio ambiente.

Según la caracterización realizada a los residuales de INDUMAN se obtuvieron los resultados que se señalan en la tabla 1 y que fueron interpretados según la norma de vertimiento NC 521:2007 (2007). Estos resultados apoyaron la propuesta del sistema de tratamiento a implementar en INDUMAN, con objetivo final de obtener algún beneficio tangible, exponiendo así un uso sostenible del agua residual a partir del empleo de microalgas. La propuesta en su conjunto contó con las siguientes operaciones unitarias: tamizado, tanque séptico, cámara de rejillas, foso de bombeo, trampa de grasas, sedimentador primario, tanque de cultivo madre y sistema de lagunas de alta velocidad, sistema parcialmente recomendado por Oscanoa et al. (2020).

Según estos valores, solo cumplen lo establecido por la norma de vertimiento NC 521:2007 (2007) la temperatura, el pH, los S. Sed y los CF, aunque las G y A se presentaron en el límite.

Una vez calculado el IB de los residuales de INDUMAN que fue de 1,8 (biodegradable según escala de valores), se concluyó que es posible poner en práctica un tratamiento biológico a esta industria; de ahí que se formulara el esquema de la figura 2, que se corresponde con los efluentes provenientes de la cocina comedor, así como de las salas de proceso.

Tabla 1. Datos de caracterización de los residuales industriales de INDUMAN

Parámetro	Unidad	Promedio	Rango	LMP NC 521:2007
T	°C	30	22-45	40
pH	u	7,8	6,9-9,6	5,5-9
DBO <sub>5</sub>	mg/L	650	310-880	75
DQO	mg/L	1 200	420-1 990	190
PT	mg/L	7,9	2,2-9,0	5
NTK	mg/L	40,3	11-60	20
S. Sed	ml/30 min	2,5	1-10	10
SST	mg/L	255	200-1 200	75
G y A	mg/L	34	30-80	30
CT	NMP/100 ml	240	200-400	---
CF	NMP/100 ml	110	80-400	400

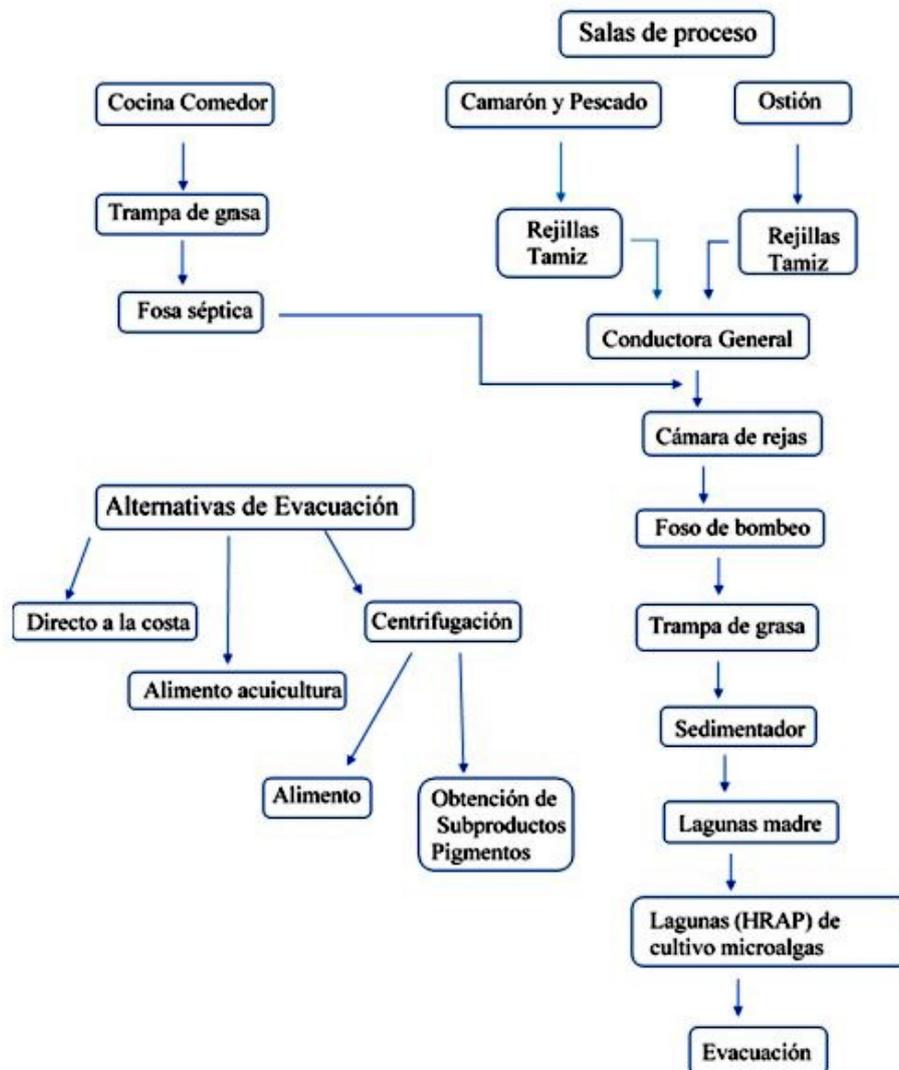


Figura 2. Sistema integral de tratamiento propuesto para los efluentes de la cocina comedor y las salas de proceso de INDUMAN

A continuación, se presentan los esquemas que conciernen a las distintas operaciones a ejecutar en la industria, para darle solución a los residuales de la cocina comedor y las salas de proceso.

## RESIDUALES PROVENIENTES DE LA COCINA COMEDOR

En la actualidad, la cocina comedor cuenta con un tanque séptico, el cual posee una trampa de grasa, desconociéndose la frecuencia de limpieza y el destino final del reboso. Además, el estado constructivo se cataloga como deficiente, por lo que se propone su rediseño.

### TANQUE SÉPTICO

Para el diseño del tanque séptico se contemplará el volumen de 6 a 8 m<sup>3</sup>/d, correspondiente al agua residual producida por la cocina comedor. Se recomienda generalmente que el período de retención mínimo sea de 5 d, por lo que la capacidad del tanque séptico propuesto deberá contemplar un volumen no menor de 30 m<sup>3</sup>.

El tanque séptico dispondrá de dos compartimientos en serie. El primero tendrá 6 m de largo por 3 m de ancho y una altura del agua de 2 m (36 m<sup>3</sup>). Este diseño permitirá un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 5 d. La segunda cámara será aproximadamente igual a 1/3 del volumen de la primera, por lo que las dimensiones serán de 3 m de largo por 3 m de ancho y la misma altura (2 m).

En la figura 3 se presenta la vista en planta del tanque séptico a diseñar.

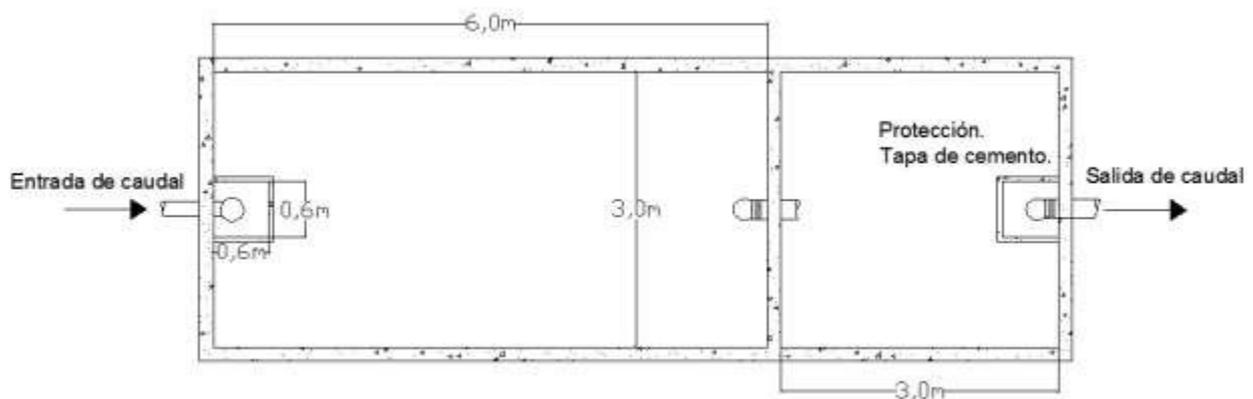


Figura 3. Vista en planta del tanque séptico

## RESIDUALES PROVENIENTES DE LAS SALAS DE PROCESO

Las diferentes salas de proceso descargan sus aguas residuales a un canal colector que las evacua hacia la costa, proponiéndose las siguientes operaciones unitarias que mejorarán considerablemente la calidad del efluente por secciones y en el destino final, el mar adyacente.

### REJILLAS TAMIZ

Se recomienda que a la salida de las salas de proceso se instalen cestas con tamices que remuevan cualquier material sólido, como restos de exoesqueletos de crustáceos, espinas, guantes o material de desecho de los embalajes que se manipulen y puedan obstruir los canales de distribución del residual. Estos tamices poseen aberturas de las mallas con valores que varían de 2,5 a 6,0 mm y tienen la capacidad de remover mediante el tamizado, entre un 20 y 35 % de sólidos suspendidos de gran tamaño.

## CÁMARA DE REJAS

El objetivo de las cámaras de reja es propiciar la retención de toda basura, materiales sólidos, gruesos y en general, todos aquellos desperdicios presentes en el agua que presenten peligros para el buen desempeño de las operaciones diseñadas al respecto. Se ubicará antes del foso de bombeo, en secciones transversales del flujo de agua, a la salida general de los salones de proceso.

Esta cámara de rejillas será doble, con parrillas removibles. Las parrillas deberán ser removibles para facilitar su limpieza. La altura del canal donde se ubicarán las mismas será de 25 cm y el ancho de 35 cm, para un área transversal de 0,088 m<sup>2</sup>.

En la figura 4 se observa una vista frontal de la cámara de rejillas propuesta.

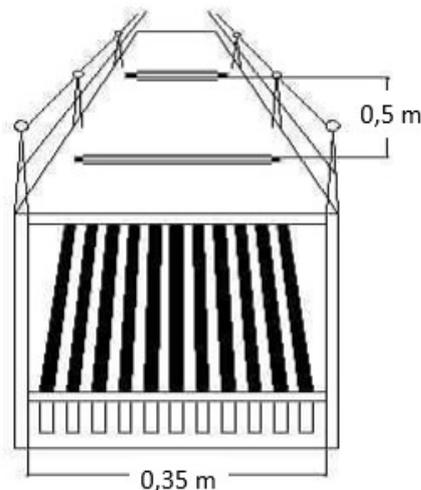


Figura 4. Vista frontal de la cámara de rejillas

## FOSO DE BOMBEO

El foso de bombeo (figura 5) tendrá un volumen que permita un flujo de bombeo de 20 a 30 m<sup>3</sup>/h, considerando un gasto total de 120 m<sup>3</sup>/d de residual en dos turnos de trabajo y sus dimensiones serán 3,2 m de largo; 3,2 m de altura y 3,0 m de ancho (30,7 m<sup>3</sup>).

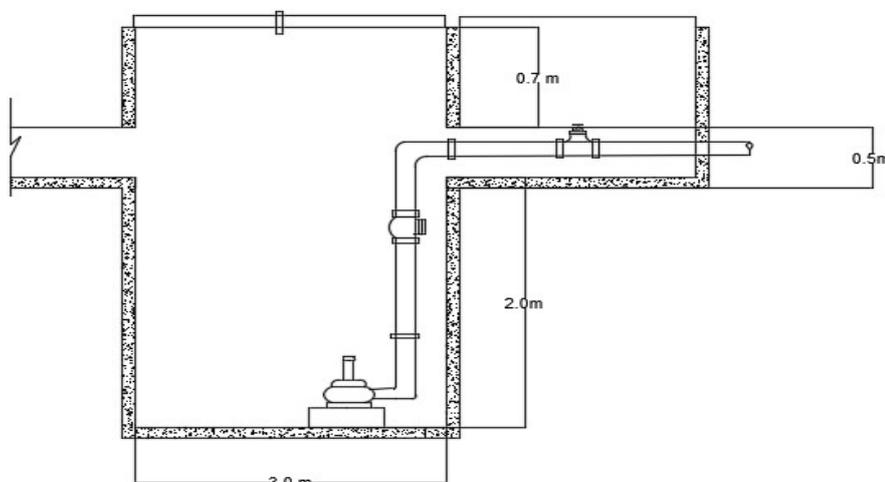


Figura 5. Vista frontal del foso de bombeo



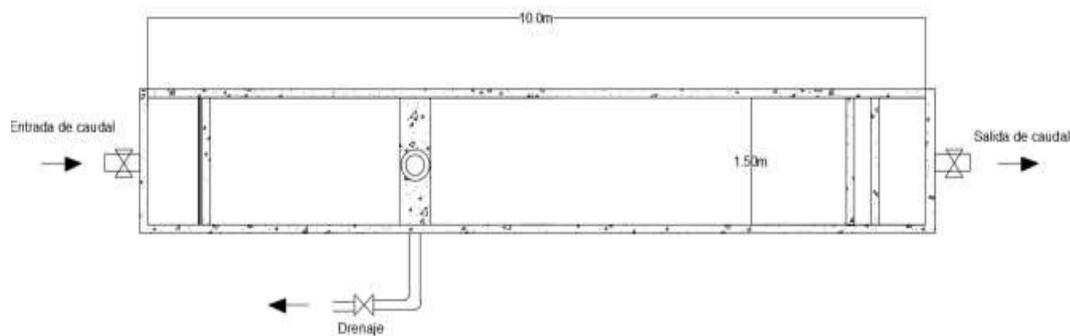


Figura 7. Vista en planta del sedimentador rectangular

## LAGUNA MADRE

Es un tanque que servirá para mantener un cultivo madre de algas, que se utilizará como inóculo con *Chlorella* sp en las lagunas de alta velocidad.

La estructura estará dividida internamente a la mitad por un tabique con pasarela para circular las microalgas en ambas partes de los dos tanques propuestos. Estas microalgas se utilizarán para inocular las lagunas de alta velocidad, para facilitar una determinada concentración inicial en cada laguna, que después de seis días de cultivo, podrán ser cosechadas por el método elegido.

Las dimensiones de estas lagunas son las siguientes: largo: 10 m; ancho: 2 m; profundidad: 0,5 m, aunque la altura útil del agua 0,4 m ( $8 \text{ m}^3$  o  $16 \text{ m}^3$  por las dos); volumen total:  $10 \text{ m}^3$  y área total:  $40 \text{ m}^2$  ( $20 \text{ m}^2$  por cada una) (ver vista en planta en la figura 8).

El proceso de agitación será por medio de un sistema de ruedas de paletas durante 6-8 h en el horario diurno y la velocidad de agua de 20- 25 cm/seg.

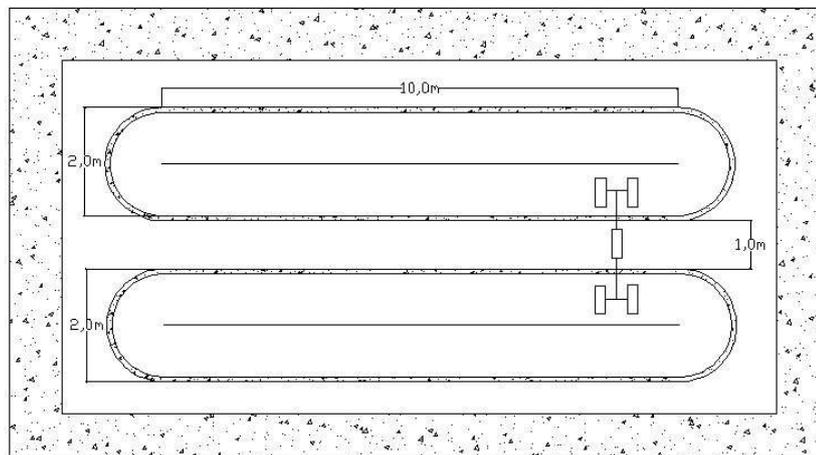


Figura 8. Vista en planta de las lagunas de cultivo madre

## LAGUNAS DE ALTA VELOCIDAD PARA EL CULTIVO MASIVO DE MICROALGAS

Las lagunas de alta velocidad recibirán al día los  $120 \text{ m}^3$  de residual clarificado procedente del sedimentador. Aquí las algas crecen a su máxima velocidad. El movimiento que se le imprime a la masa líquida facilita la utilización de todo el potencial de nutrientes del medio y de la luz incidente y

no permite la ocurrencia de la sedimentación de microalgas. El TR calculado para que se alcance la biomasa máxima de alga en el residual pesquero es de 5 a 6 d. El volumen de cada laguna será de  $120 \text{ m}^3$  aproximadamente y el sistema completo constará de seis tanques, para un volumen total de  $720 \text{ m}^3$ . Las lagunas estarán separadas entre sí por una distancia de 1,5 m, para garantizar la instalación de los motores que accionarán los ejes de paletas y permitir la limpieza de las mismas.

Cada laguna poseerá dos canales interconectados, para mantener un flujo lineal en el caldo de cultivo (residual). Esto es necesario para acelerar el crecimiento de las microalgas y obtener mayor biomasa celular en el menor tiempo posible. La velocidad del agua dentro del estanque será no menor de 25 cm/seg y en los extremos de la laguna se colocarán “baffles” o deflectores para evitar la formación de zonas muertas, respecto a la agitación dentro de cada laguna.

Las dimensiones de las lagunas serán: largo: 65 m; ancho: 4 m; profundidad: 0,5 m (altura máxima del agua – 0,45 m); ancho de cada canal: 2 m; volumen útil del agua:  $120 \text{ m}^3$  y área:  $260 \text{ m}^2$  ( $1\,560 \text{ m}^2$  para las seis lagunas).

Los canales de circulación tendrán un ancho de 2 m y en la zona de viraje, la sección curvilínea del canal de salida será más estrecha (0,9 a 1 m). De esta manera aumentará la velocidad del líquido para evitar la sedimentación de las algas.

La altura exterior de las lagunas será de 0,65 m y dentro de 0,45 m para que las algas puedan aprovechar al máximo la luz solar que le provee la energía para su función depuradora. Cada laguna estará internamente dividida por un tabique que conformará dos canales intercomunicados de 2 m de ancho cada uno, por los que circulará el agua residual con la biomasa algal. En las zonas de viraje, la sección curvilínea del canal será más estrecha de 1,3 a 1,5 m; así se permitirá el aumento de la velocidad de circulación en los extremos y la no sedimentación de la biomasa.

El sistema comprenderá seis lagunas (figura 9 - vista en planta) para una producción mensual aproximada de 2 a 3 t de alga seca, en correspondencia a  $120 \text{ m}^3$  de cultivo en el caso de *Chlorella* sp, en estrecha relación con las condiciones climáticas y de operación del sistema. El residual remanente tendrá una  $\text{DBO}_5$  entre 40 y 50 mg/l.

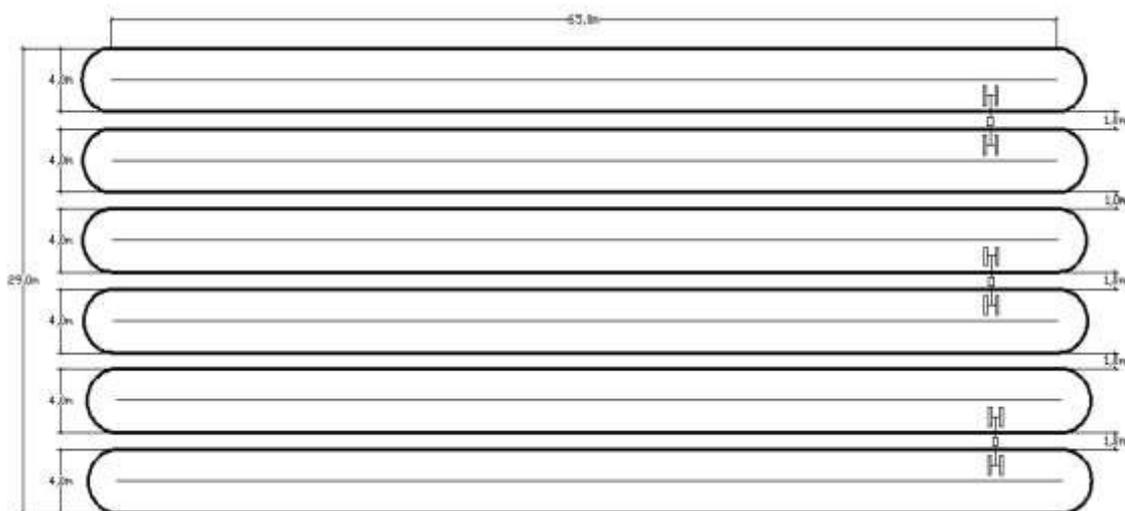


Figura 9. Vista en planta del sistema de lagunas de alta velocidad

Por pares de lagunas se ubicará un eje intermedio con una rueda de paletas para cada canal (figura 10), que posibilitarán el movimiento continuo del medio en su interior y mantendrán las algas en suspensión.

La velocidad de rotación de las ruedas de paletas deberá permitir consecuentemente, una velocidad en el agua de 20 a 25 cm/seg. Las paletas se ubicarán de forma tal que estén separadas 0,4 m de cada borde y a unos 5 cm del fondo de cada laguna.

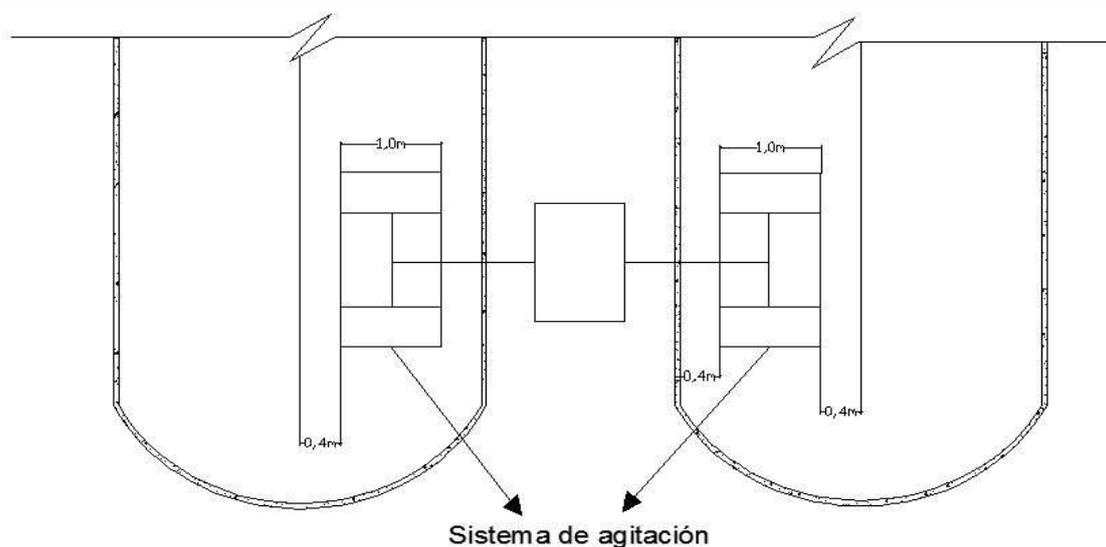


Figura 10. Vista en planta del sistema de agitación por paletas

Las algas aquí producidas y extraídas del medio residual, tendrán amplio uso en la alimentación animal y en la industria farmacéutica y cosmética; así lo aseveran Romero (2004, 2005) y Hernández-Pérez y Labbé (2014); el efluente resultante después de separar las microalgas, será amigable con el medio ambiente, una vez que los parámetros físico-químicos cumplirán con lo establecido por la norma cubana de vertimiento NC 521:2007 (2007).

### 03 CONCLUSIONES

Según los valores de caracterización de los residuales de INDUMAN, se determinó que los mismos son susceptibles de ser tratados con sistemas biológicos.

La planta de tratamiento propuesta para INDUMAN, ocupará un área aproximada de 2 625 m<sup>2</sup> de un total disponible de unos 4 000 m<sup>2</sup> y en ella serán tratadas las aguas residuales procedentes de los talleres de proceso de camarón, pescado, pepino de mar y ostión, o de cualquier especie que se incluya en los salones de proceso, así como los residuales de la cocina comedor que actualmente están conectados a la misma red hidráulica.

La purificación de los residuales será por lagunas de alta velocidad con obtención de la microalga *Chlorella* sp. Una vez separadas las mismas, el sistema brindará un efluente con una DBO<sub>5</sub> de 40 a 50 mg/L.

La biomasa seca, que alcanzará un valor aproximado de 1 kg/m<sup>3</sup> de cultivo al día (2-3 t de biomasa seca al mes) se emplearán en la alimentación de especies de la acuicultura y camaronicultura, así como para la obtención de bioderivados con un alto valor económico.

## 04 REFERENCIAS

- Allende, I.** (2001). Diseño Hidráulico de plantas de tratamiento para aguas residuales. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. (ISPJAE). 305 pp. La Habana, Cuba.
- APHA** (2012). Standard Methods for the examination of waters and waste waters. 22th Ed. New York, USA. American Public Health Association: Washington, American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Pollution Control Federation. Washington, DC, AWWA cat. No. 10085, 1926 pp. ISBN 9780875530130
- CEPIS** (2003). Especificaciones Técnicas para el Diseño de Trampa de Grasa. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Organización Panamericana de la Salud. Oficina Sanitaria Panamericana – Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. OPS/CEPIS/03.81. UNATSABAR. Unidad de apoyo técnico para el saneamiento básico del área rural: 11 pp. Lima, Perú.
- Dodane, P. H. y Bassan, M.** (2020). Tanques de Sedimentación y Espesamiento. Capítulo 6. pp: 121-138. In: Strande, L; Ronteeltap, M y Brdjanovic, D. (Ed). Manejo de lodos fecales. Un enfoque sistémico para su implementación y operación. 1ra edición. IWA Publishing. Alliance House, 428 pp. ISBN 9781780408019 (Hardback), ISBN: 9781780408026 (eBook). Londres, UK.
- Grasshoff, K.; Kremling, K. y Ehrhardt, M.** (1999). Methods of Seawater Analysis. 3th Ed. Wiley VCH, Verlag EmbH. 634pp. ISBN 9783527295890
- Hernández-Pérez, A. y Labbé, J.** (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. Microalgae, culture and benefits. Revista de Biología Marina y Oceanografía. Vol. 49, N°2: 157-173, DOI 0.4067/S0718-19572014000200001
- NC 521:2007.** (2007). Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas. Especificaciones. Norma Cubana. Obligatoria Experimental. 1ra Edición. Oficina Nacional de Normalización. ICS, C. Habana, Cuba.
- OPS** (2005). Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización. OPS/CEPIS/05.163. UNATSABAR.CEPIS. OPS. 40 pp. Lima. Perú.
- Oscanoa, A.; Cervantes, M. y Fabre, P.** (2020). Manual para la producción de biomasa microalgal en condiciones de invernadero. Handbook for the production of microalgal biomass under greenhouse conditions. Inf Inst Mar Perú, Vol. 47 / No. 3 /:332-356. ISSN 0378-7702. Perú.
- Riffat, R.** (2013). Fundamentals of wastewater treatment and engineering. IWA Publishing. Alliance House, 12 Caxton Street, London SW1H 0QS, UK ISBN13 9781780401317. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton, FL 33487-2742. Version Date: 20120727. 353 pp. ISBN-13: 978-0-203-81571-7. London.
- Rodríguez, D. J.; Serrano, H.A.; Delgado, A.; Nolasco, D. y Saltiel, G.** (2020). De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe. Banco Mundial. Washington, DC.: 63 pp. Extraído de: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/33436/146823SP.pdf>
- Romero, L. T.** (2004). Procedimiento de obtención de cuprocloreofila, formulaciones de productos a partir del principio activo y método de tratamiento. Certificado de patente de invención. No. de publicación: 22940. Int. Cl: A 61K 35/78, A 61 P 15/02. OCPI. Cuba.

**Romero, L. T. de J.** (2005). Uso de la microalga *Chlorella* spp en la depuración de los residuales líquidos de la industria pesquera y su aprovechamiento. Tesis presentada en opción al título de Doctora en Ciencias Técnicas. CIH, Cujae. La Habana, Cuba.

**Spellman, F. R.** (2003). Handbook of water & wastewater treatment plant operations. LEWIS Publishers. A CRC Press Company. TD434.S64. 628.1¢62-200304011. CRC Press LLC. 669 pp. ISBN 1-56670-627-0

#### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

#### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Teresita de Jesús Romero López**

<https://orcid.org/0000-0001-9572-8333>

Realizó contribuciones en el diseño de la Investigación, discusión de los resultados y la escritura del informe final.

**Gerardo Suárez Álvarez**

<https://orcid.org/0000-0001-8943-7134>

Realizó contribuciones en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y discusión de los mismos, así como en la escritura del documento.

## Programa para determinar los parámetros que caracterizan el oleaje marino y simular su comportamiento

**Ángel Orlando Castellano Sánchez**

E-MAIL: angel.castellano@uo.edu.cu

Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente.

**Raciel David Lago Solan**

E-MAIL: raciel.lago@uo.edu.cu

Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente.

**Henry Bory Prevez**

E-MAIL: bory@uo.edu.cu

Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente.

### RESUMEN

La undimotriz posibilita generar electricidad a partir de la energía cinética contenida en las olas del mar. Determinadas localidades de la zona costera de Santiago de Cuba brindan potencialidades para explotar este recurso. El objetivo es presentar un programa implementado en Matlab 2015, para determinar, en función de disímiles velocidades del viento y sus direcciones, los parámetros que caracterizan el comportamiento del oleaje, generar una simulación animada en 3D donde se reproduzca el comportamiento de este y determinar la densidad lineal de potencia, kW/m, tomando los de mayor incidencia en la zona de El Sardinero. Se diseñó el programa "Niord" y se comprobó su precisión por comparación con datos registrados, obteniéndose valores semejantes a los reportados en una estación meteorológica.

**PALABRAS CLAVES:** energía undimotriz, oleaje, parámetros, programa, zona costera de Santiago de Cuba

Program to determine the parameters that characterize the marine waves and simulate their behavior

### ABSTRACT

The waves energy let get electricity from kinetic energy contained in the sea waves. Certain localities of the coastal zone of Santiago de Cuba offer potentialities to exploit this resource. The objective is to present a software implemented in Matlab 2015, to determine, based on dissimilar wind speeds and directions, the parameters that characterize wave behavior, generate a 3D animated simulation where the behavior of this is reproduced and determine the Linear power density, kW/m, taking those with the highest incidence in the El Sardinero area. The "Niord" software was designed and its accuracy was verified by comparison with recorded data, obtaining values similar to those reported in a meteorological station.

**KEYWORDS:** wave energy, waves, parameters, software, coastal zone of Santiago de Cuba.

## 01 INTRODUCCIÓN

La energía undimotriz surge como una alternativa basada en la energía que transportan las olas a lo largo de los océanos del mundo. Esta forma de energía puede presentar un gran potencial, como alternativa a las energías obtenidas de la quema de combustibles fósiles, para la generación de energía eléctrica en determinadas zonas según las características del clima y de la costa marítima (Zhenyu et al. 2018).

La disponibilidad de la energía undimotriz en regiones densamente pobladas de Europa y América del Norte la convierten en una fuente renovable de energía (FRE) innovadora y atractiva. Mientras la energía solar depende de los días despejados y la eólica tiende a disminuir durante la mañana, las olas producen energía durante todo el día, lo que le permite formar parte de las energías más continuas entre el grupo de FRE. En Cuba se han realizado estudios para evaluar las potencialidades de las energías del mar (Hernández et al. 2019) y (Pérez-Martínez et al. 2021) pero quizás la FRE menos explorada en Cuba es la undimotriz, los estudios relacionados con esta fuente parten de caracterizar el oleaje marino identificando la altura, período, celeridad y densidad lineal de energía que posee el oleaje en una región determinada.

El objetivo de este trabajo es presentar un programa, registrado en el Centro Nacional Derecho de Autor (CENDA) con número 0150-01-2022, que calcula los parámetros anteriores a partir de la magnitud de las velocidades de los vientos y sus direcciones en la región bajo análisis, además se muestra al usuario una animación en 3D del comportamiento del océano ante los valores del viento y direcciones que se le introduzcan al programa.

## 02 MANIFESTACIONES DE LAS ENERGÍAS DEL MAR

La energía del mar se manifiesta, según se reporta en (Hernández et al. 2019) y (Viloria 2020), bajo cinco formas: oleaje, mareas, corrientes marinas, gradiente térmico y gradiente salino. El autor (Narasimalu 2020) desglosa el potencial energético mundial mostrando que las reservas de energías provenientes del mar son: energía mareomotriz de 300 TWh/año; energía de las corrientes marinas de 800 TWh/año; energía undimotriz de 80 000 TWh/año, corroborado por (Zhenyu et al. 2018); energía de gradiente térmico 10 000 TWh/año; y energía debida al gradiente salino 2 000 TWh/año. Esto evidencia que la undimotriz es la de mayor potencial energético.

En el mundo se han realizado diversos estudios sobre la energía undimotriz, en los cuales se ha estimado que el potencial de energía de las olas es aproximadamente de 2 TW y de esta cantidad entre el 10 y el 25 % puede ser transformada en electricidad, no obstante, a pesar de las ventajas de esta FRE frente a otras no presenta tanto desarrollo, es por esto que su comercialización a gran escala es poca en todo el mundo. Pese a esto, la investigación en tecnologías y posibles sitios para su implementación se ha intensificado en los últimos años dando como resultado el estudio de potencial en países como Italia, España, México, Chile, entre otros. Además, de sitios específicos para probar nuevas tecnologías como por ejemplo España, que actualmente tiene tres sitios de prueba para la energía de las olas: Biscay Marine Energy Platform (Bimep), la planta de energía de las olas de Mutriku que ahora es usada como sitio de prueba y PLOCAN en las islas Canarias, que incluye un área marítima de 23 km<sup>2</sup> desde la costa hasta 600 m de profundidad. Durante el 2015 se instalaron y ensayaron dos aparatos de energía undimotriz en PLOCAN: el prototipo W1 desarrollado por la compañía española Wedge Global y el PENGUIN II prototipo desarrollado por la empresa WELLO instalado en septiembre de 2015. (González et al. 2019)

En comparación con el resto de las FRE más empleadas a nivel global, según (Haim et al. 2019) se tiene que: solar 100-200 W/m<sup>2</sup>, eólica 400-600 W/m<sup>2</sup> y las olas 2-3 kW/m<sup>2</sup>. La energía undimotriz o energía de las olas es un recurso renovable disponible en todo el mundo, con un potencial de energía estimado de 200 a 300 GW.

## MANIFESTACIONES DE LAS ENERGÍAS DEL MAR EN CUBA

De las cinco formas de obtener energía de los mares, solo es posible la explotación de tres de ellas en los mares aledaños a Cuba, estas son: energía de las corrientes de marea, energía de las olas (Undimotriz) y el gradiente de energía térmica del océano (OTEC, del inglés). Para la costa norte de la región oriental de Cuba los meses de mayor aprovechamiento energético a partir del oleaje ocurren en el trimestre noviembre-enero con valores entre 5-8 kW/m (Hernández et al. 2019).

Algunos autores definen kW/m como energía expresada en kW por cada metro de frente de onda o potencia por metro de frente de onda de una onda sinusoidal, el autor (González et al. 2019) la denomina densidad media de energía o potencia de energía undimotriz, otros autores la designan como potencial energético de las olas, otra definición encontrada en la literatura, como en (Narasimalu 2020), es densidad de potencia de las olas. Los autores de este artículo definirán kW/m como densidad lineal de potencia, por ser la cantidad de potencia por unidad de longitud del frente de onda de la ola.

Es importante aclarar la diferencia entre las magnitudes medidas en kW/m o kW/m<sup>2</sup>, la primera se refiere a la densidad lineal de potencia y el segundo según el Sistema Internacional de Unidades (SI) es la magnitud que caracteriza a la intensidad dígase potencia transferida por unidad de área.

Se pretende mostrar cómo las velocidades del viento en el litoral costero cubano pueden influir en el comportamiento del oleaje y a su vez en la capacidad de generación de una instalación undimotriz. Existen estudios que cuantifican el potencial en el Caribe entre 5 y 7 kW/m desde los meses de diciembre y abril, en el Pacífico entre 3 y 4 kW/m durante todos los meses del año, en países como España cuentan con una densidad lineal de potencia de 100 kW/m, en los de Suramérica como Chile puede llegar hasta 40 kW/m, Colombia al contar con los océanos Pacífico y Atlántico su densidad lineal de potencia oscila entre 3 y 15 kW/m según la época del año. Del mapa del oleaje que se muestra en la figura 1, actualmente empleado por (Pérez 2017) y (Haim et al. 2019), se obtiene que los valores límites son 8 kW/m y 100 kW/m.

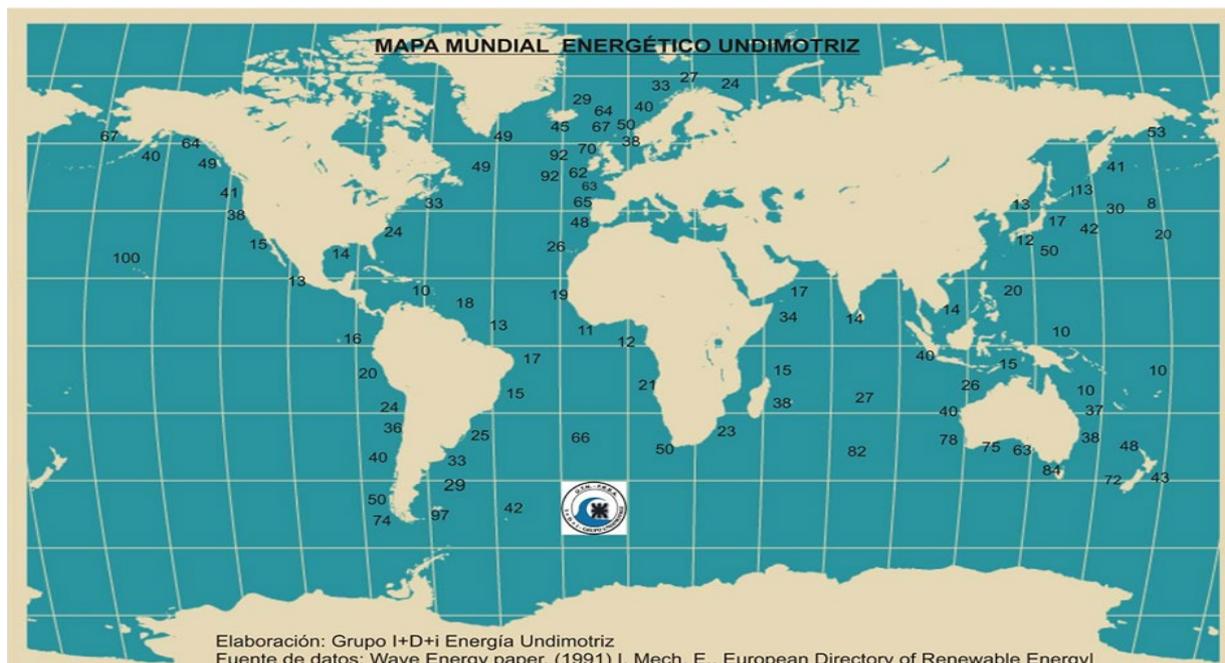


Figura 1. Mapa energético mundial undimotriz (Haim et al. 2019)

## MODELO MATEMÁTICO ESTÁTICO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD LINEAL DE POTENCIA

Las dos componentes de energía de las olas son la potencial y la cinética. La energía potencial es asociada con la forma o elevación de la ola y la cinética está asociada al movimiento o velocidad de las partículas de agua que la constituyen. Para olas regulares se tiene la ecuación (1) según (Viloria 2020):

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2}{8} \quad (1)$$

Donde E es la energía total por unidad de área superficial de agua en  $\text{kg/s}^2$ ,  $\rho$  es la densidad del agua de mar en  $\text{kg/m}^3$ , g es la aceleración de la gravedad, en  $\text{m/s}^2$  y H es la altura de la ola, en m.

La relación entre el período de la ola (T), en s, y la longitud de la ola (L), en m, está dada por (2):

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \quad (2)$$

La transferencia de energía de las olas es conocida como flujo de energía, lo que los autores proponen llamar densidad lineal de potencia, P, en  $\text{W/m}$ . Los autores de (Pérez 2017) y (Viloria 2020) reportan que las olas de pequeña amplitud en aguas profundas tienen una energía por unidad de onda dada por (3):

$$P = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T}{32\pi} \quad (3)$$

Otros autores refieren que el flujo de energía en ondas irregulares se determina por la ecuación (4) como:

$$P = \frac{\rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T}{64\pi} \quad (4)$$

La relación correspondiente a la densidad lineal de potencia promedio que se encuentra en las olas irregulares expresada en kW/m está dada por la ecuación (5) según (González et al. 2019) y (Gavidia 2020):

$$P = 0,49 \cdot H_s^2 \cdot T_z \approx 0,5 \cdot H_s^2 \cdot T_z \quad (5)$$

Donde  $H_s$  es la altura significativa de la ola, en m, y  $T_z$  es el intervalo de tiempo promedio entre alturas máximas sucesivas, en s. Esta ecuación es utilizada para no sobrestimar la energía potencial de la ola ya que las olas son generalmente irregulares en el océano, sin embargo, en (Pérez 2017) se explica que la ecuación (5) se puede expresar como:

$$P = k \cdot H_s^2 \cdot T_z \quad (6)$$

Donde  $k$  es una constante, en  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^4)$ , que viene dada por la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\rho \cdot g^2}{64\pi} \quad (7)$$

La altura significativa  $H_s$ , se define como la altura promedio del tercio de olas más altas dentro de un grupo de olas considerado, en m. Este valor se aproxima a la altura que un observador en una embarcación reporta de su inspección visual del estado del mar, ya que tal observador tiende a omitir las olas más pequeñas y menos evidentes (Pérez 2017). Los mares reales contienen olas que poseen alturas, períodos y direcciones aleatorios. En un corto período de tiempo, las características de los mares reales permanecen constantes, considerándose un estado del mar. Con el fin de describir los estados del mar y determinar sus características relevantes para los dispositivos de energía undimotriz, se utilizan los parámetros estáticos descritos anteriormente, desde las expresiones (1)-(7), los cuales se pueden obtener utilizando dispositivos de medición como las boyas oceanográficas, también conocidas como boyas de oleaje (Pérez 2017).

## DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

El programa implementado recibe el nombre de "Niord" por su relación con la mitología nórdica. En noruego Njörðr (Niord) es uno de los Vanir (dioses nórdicos), dios de la tierra fértil y de la costa marina, así como, el de náutica y la navegación. La razón principal por la que se seleccionó este nombre es como homenaje a las investigaciones realizadas por estos países respecto a las energías del mar, siendo los principales referentes en el mundo cuando de energías provenientes del mar se trata, además, de la navegación y construcción de embarcaciones.

Niord es un programa que, dados la dirección y velocidad del viento simula el comportamiento de la superficie marina mediante una animación en 3D de la misma y calcula la altura, el período, longitud, celeridad, la densidad lineal de potencia del frente de ola y otros datos referentes a las olas del mar. Estos datos son utilizados posteriormente para determinar la energía eléctrica generada por una instalación undimotriz emplazada en la costa. El Niord fue implementado en el entorno de programación MatLab 2015 y se realizó una aplicación ejecutable para independizarlo del MatLab.

Al ejecutar el programa se despliega la ventana del menú principal, ver figura 2, en dicha ventana el usuario podrá apreciar una imagen móvil del prototipo de central undimotriz de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) de Argentina (Haim et al. 2019), a continuación de la parte inferior de esta imagen le sigue el nombre del programa, Niord v1.0, y los botones Inicio, Matriz de potencia, Escenarios, Configuración, Ayuda y Salir.



Figura 2. Menú principal del programa

Para comenzar el estudio, el usuario accede mediante el botón de *Inicio* del menú principal presentado en la figura 2 a la ventana de simulación mostrada en la figura 3, la cual contiene los 5 paneles siguientes: Características del viento, en el cual se entra el valor numérico de la velocidad del viento en m/s o km/h y se selecciona su dirección; Características del oleaje, muestra la información de las olas obtenida de la simulación al dar clic en *Run* (correr o ejecutar); Energía del oleaje, se muestran los datos energéticos de las olas; Sistema undimotriz, se utiliza para establecer la eficiencia y potencia nominal del sistema undimotriz seleccionado; y Potencia eléctrica generada, en este se obtiene la energía eléctrica generada por el sistema undimotriz a partir de los metros de frente de ola.

Matriz de potencia permite comprobar la energía eléctrica que es capaz de generar el sistema undimotriz dado un rango de altura y período de las olas. Para crear la matriz, en la ventana emergente Rangos, ver figura 4, se selecciona la unidad de medida de la potencia (W o kW) y se establecen los rangos para la altura y el período. Cada rango es ajustado por usuario al entrar: valor mínimo, valor máximo y el incremento. A modo de ejemplo: si para la altura y el período se definen como valor mínimo 1 y máximo 10 con incremento de 1, la matriz se conformará con los valores de altura y período: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10. Al presionar el botón *Aceptar* se creará la matriz de potencia, que se muestra en la figura 5.

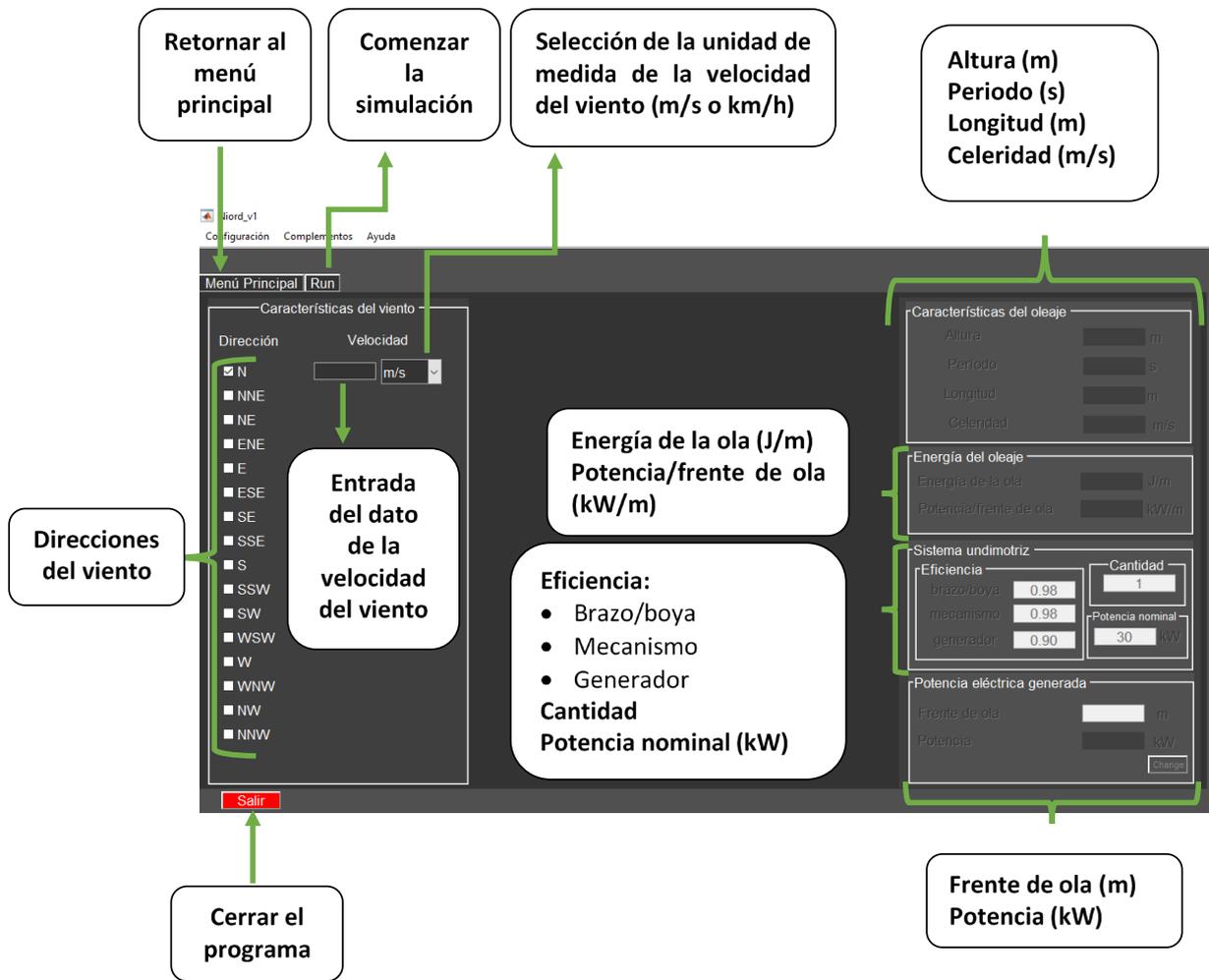


Figura 3. Ventana de simulación

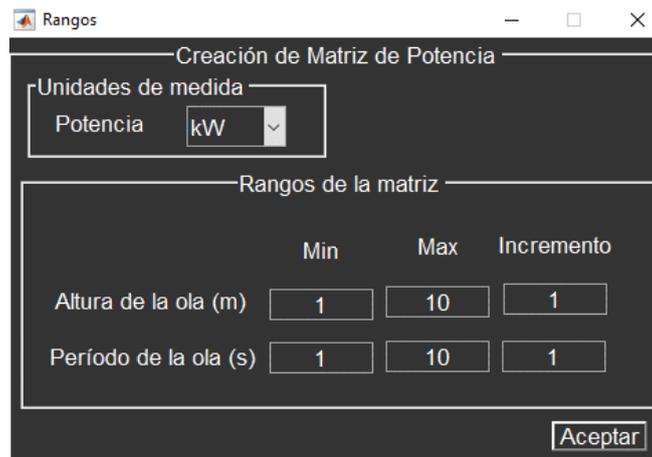


Figura 4 Ventana para crear la Matriz de potencia

		Período (s)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Altura (m)	1	0.82	1.64	2.46	3.28	4.10	4.92	5.74	6.56	7.39	8.21
	2	3.28	6.56	9.85	13.1	16.4	19.7	22.9	26.2	29.5	32.8
	3	7.39	14.7	22.1	29.5	36.9	44.3	51.7	59.1	66.5	73.9
	4	13.1	26.2	39.4	52.5	65.6	78.8	91.9	105	118	131
	5	20.5	41.0	61.5	82.1	102	123	143	164	184	205
	6	29.5	59.1	88.6	118	147	177	206	236	266	295
	7	40.2	80.4	120	160	201	241	281	321	362	402
	8	52.5	105	157	210	262	315	367	420	472	525
	9	66.5	133	199	266	332	399	465	532	598	665
	10	82.1	164	246	328	410	492	574	656	739	821

Figura 5 Ejemplo de Matriz de potencia

La opción *Escenarios*, ver figura 6, que se encuentra en fase de desarrollo por los autores, permitirá la creación de una base de datos personalizada para el usuario, facilitándole llevar el registro del comportamiento oceánico, ya sea en 24 horas, semanal o mensual, y así analizar cómo se comporta el océano con el cambio de las estaciones y en los meses del año.

Figura 6 Ventana para la creación de Escenarios

En relación con las opciones de *Configuración*, ver figura 7, en la ventana emergente se muestran dos paneles: Simulación y Métodos de cálculo. En Simulación el usuario tiene la posibilidad de ajustar el escenario de la simulación en función de: Tiempo de simulación, donde especifica el tiempo de duración de la animación en 3D de la superficie oceánica; Profundidad, selecciona la profundidad del sistema undimotriz; y Parámetros iniciales de simulación, permite configurar la vista de la animación del comportamiento oceánico.

En el panel Métodos de cálculo, el usuario puede configurar las opciones: Viento, al seleccionar la forma en que serán procesados los datos introducidos del viento siendo esta o un análisis vectorial o un análisis estadístico; y Oleaje, en este puede elegir el modelo matemático para el cálculo de los parámetros energéticos y de las características de las olas como se muestra en los paneles de la derecha de la figura 7. En la versión actual del Niord se encuentran disponibles el modelo matemático en régimen estático, definido en el epígrafe *Modelo matemático estático para determinar la densidad lineal de potencia* que se escoge activando la opción Datos de Geocuba como se observa en la figura 7; y el modelo *Beaufort-Douglas*, modelo estadístico que responde a las escalas de medida empírica para la intensidad del viento de Beaufort.

El modelo *Beaufort-Douglas* se basa principalmente en el estado del mar, de sus olas y la fuerza del viento, la escala Douglas es una escala que clasifica los diferentes estados del mar en 10 grados tomando como referencia el tamaño de las olas, esta escala tiene dos códigos, uno para estimar el estado del mar y otro para describir la altura de las olas.

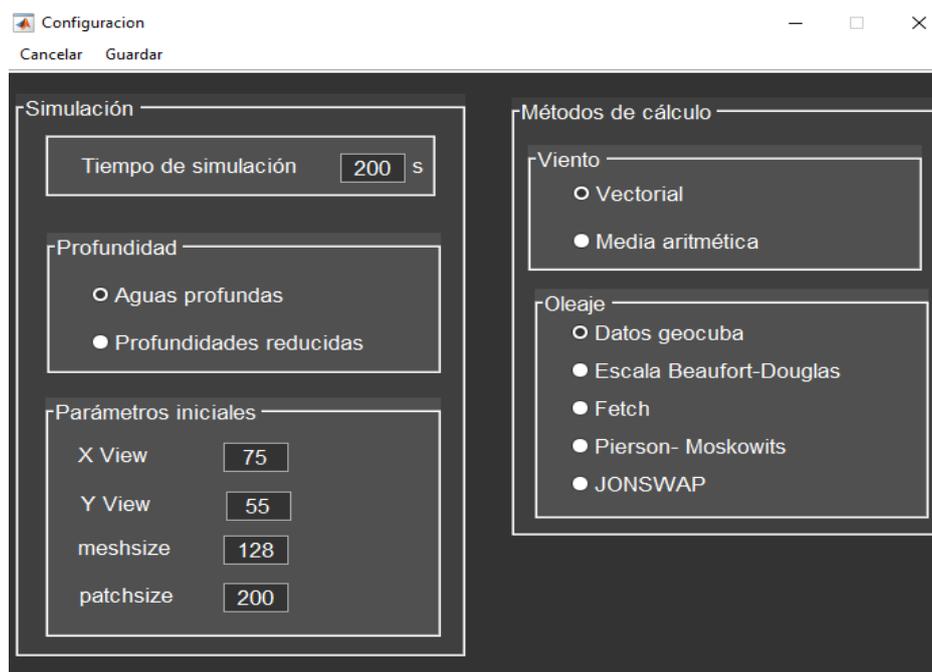


Figura 7 Ventana de Configuración

Por medio del botón de *Ayuda* el usuario puede acceder a la ventana mostrada en la figura 8 donde se describe el programa, se ilustran los elementos que integran la interfaz del Niord, así como, el procedimiento para su manejo.

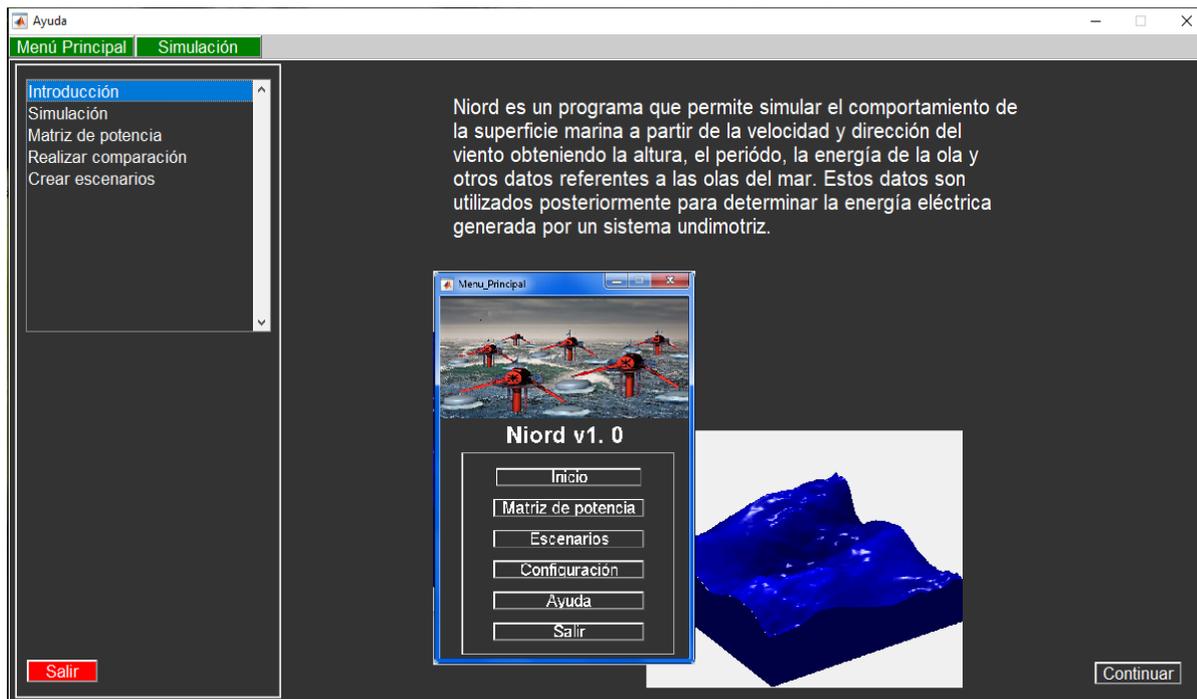


Figura 8 Ventana de Ayuda del Niord

Los estudios que se realizan en el mundo para predecir o recrear el comportamiento oceánico, así como, de las potencialidades energéticas asociadas al mismo necesitan del acceso por parte de los investigadores a sitios web de Centros de Meteorología, los cuales poseen bases de datos con un registro histórico de todas las variables climatológicas. En ocasiones, el acceso a estos datos se torna difícil por la carencia de los mismos, la disponibilidad de la conexión a internet o estar sujetos a pago. Para superar estas dificultades se implementó el programa Niord, el cual le permite al investigador con solo introducir datos de dirección y velocidad del viento obtener altura, período, longitud, celeridad y densidad lineal de potencia. Se emplean los datos de dirección y velocidad del viento ya que son de fácil acceso y están disponibles en páginas libres como [www.insmet.cu](http://www.insmet.cu), [www.meteoblue.com](http://www.meteoblue.com) y [www.windfinder.com](http://www.windfinder.com) o de estaciones meteorológicas como la empleada en el presente análisis, Estación Meteorológica ubicada en el Faro del Morro de Santiago de Cuba (GEOCUBA 2017).

Se destaca que el Niord es un programa que realiza los cálculos para determinar los parámetros que caracterizan el oleaje: altura, período, longitud y celeridad del oleaje, lo muestra al usuario en conjunto con la animación en 3D del océano y además determina la densidad lineal de potencia del oleaje. Lo anterior diferencia al Niord de otros programas similares, como es el caso del DEPTHWAVE implementado en el Departamento de Automática y Sistemas Computacionales de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, ya que estos solamente muestran la animación en 3D del océano y requieren la entrada por parte del usuario de datos estadísticos, derivados de la oceanografía física o de páginas web con dichas bases de datos.

### 03 RESULTADOS DE LA EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

Para comprobar la precisión del programa se comparan sus resultados con los datos registrados en la Estación Meteorológica ubicada en el Faro del Morro de Santiago de Cuba en el año 2017. Los datos registrados se tabulan en la tabla 1, estos fueron tomados de (GEOCUBA 2017). Es importante

aclarar que los datos de densidad lineal de potencia en kW/m que aparecen en dicha tabla no son reportados por (GEOCUBA 2017), constituyen fuente propia de los autores del presente trabajo, obtenidos aplicando como modelo matemático las expresiones (1)-(7).

Tabla 1. Comportamiento promedio del viento incidente en la zona costera de Sardinero en la provincia de Santiago de Cuba en el año 2017

Velocidad del viento		Direcciones del Viento											
		Sur (S)				Sureste (SE)				Suroeste (SW, del inglés)			
m/s	km/h	H (m)	T (s)	L (m)	P (kW/m)	H (m)	T (s)	L (m)	P (kW/m)	H (M)	T (s)	L (m)	P (kW/m)
3	10,8	0,75	5,56	46,7	3,07	0,45	3,96	23,69	0,79	0,68	5,21	41,01	2,36
6	21,6	1,49	7,01	74,2	15,27	1,07	5,6	47,38	6,29	1,35	6,57	65,09	11,75
9	32,4	2,24	8,02	97,2	39,49	1,77	6,86	71,07	21,09	2,03	7,52	85,3	30,41
12	43,2	2,98	8,83	118	76,94	2,53	7,92	94,76	49,74	2,7	8,27	103,3	59,16
15	54	3,73	9,51	137	129,83	3,35	8,86	118,4	97,56	3,38	8,91	119,9	99,88

[fuente: (GEOCUBA 2017)]

De la tabla 1 solo se requieren los datos de velocidad del viento y su correspondiente dirección para ejecutar los cálculos en el Niord. La captura de pantalla de la ejecución de este se muestra en la figura 9 para un viento proveniente del sur con una velocidad de 3 m/s. En la tabla 2 se comparan los resultados obtenidos con el Niord con los valores de altura (H), período (T), longitud (L) y densidad lineal de potencia (P) reportados en la tabla 1, junto a los valores del error relativo.

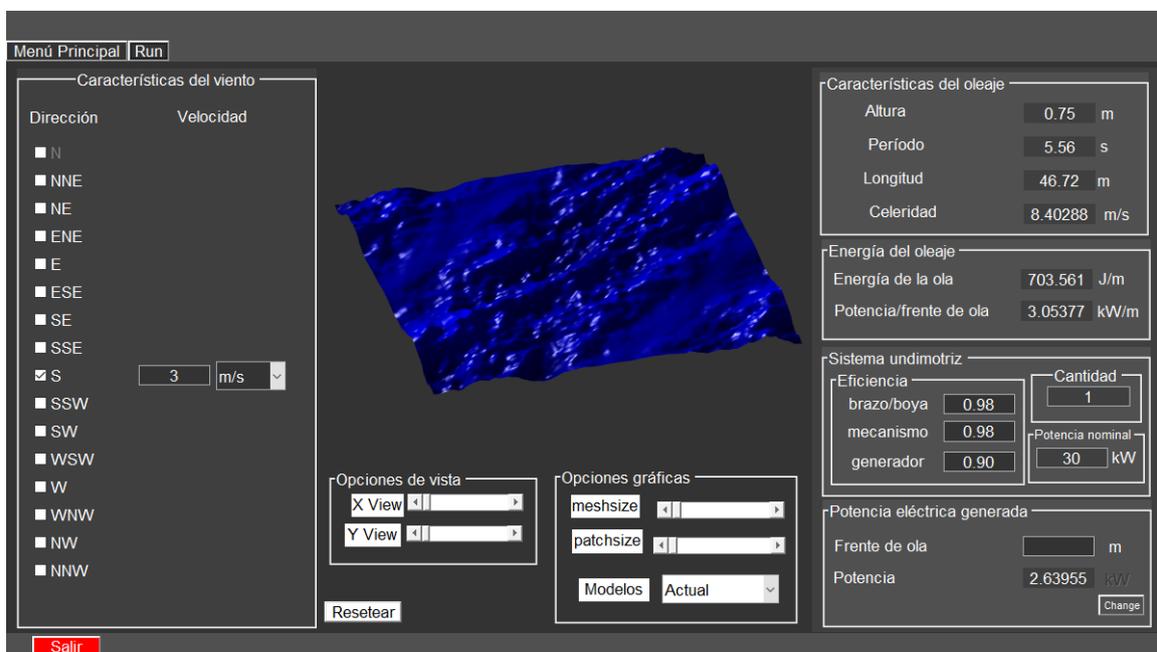


Figura 9. Simulación del Niord para un viento incidente proveniente del Sur con una velocidad de 3 m/s

Tabla 2. Comparación entre los datos reportados por (GEOCUBA 2017) vs los resultados del Niord para un viento de 3 m/s con dirección sur

Oleaje	GeoCuba	Niord	Error (%)
H (m)	0,75	0,75	0,00
T (s)	5,56	5,56	0,00
L (m)	46,7	46,72	0,04
P (kW/m)	3,07	3,05	0,65

De la tabla 2 se aprecia que para los parámetros de altura (H) y período (T) coinciden los resultados siendo nulo el error relativo, mientras que para la longitud (L) y densidad lineal de potencia (P) los errores relativos son de 0,04 y 0,65 % respectivamente, como estos no superan el 1 % del valor tabulado o calculado se considera, desde el punto de vista de ingeniería, que el programa tiene la exactitud adecuada.

Si se realiza otra corrida del Niord considerando un viento de 15 m/s con dirección sur-este se obtienen los resultados mostrados en la figura 10. En la tabla 3 se tabulan los resultados del Niord, los datos de la tabla 1 para las mismas condiciones y los respectivos errores relativos.

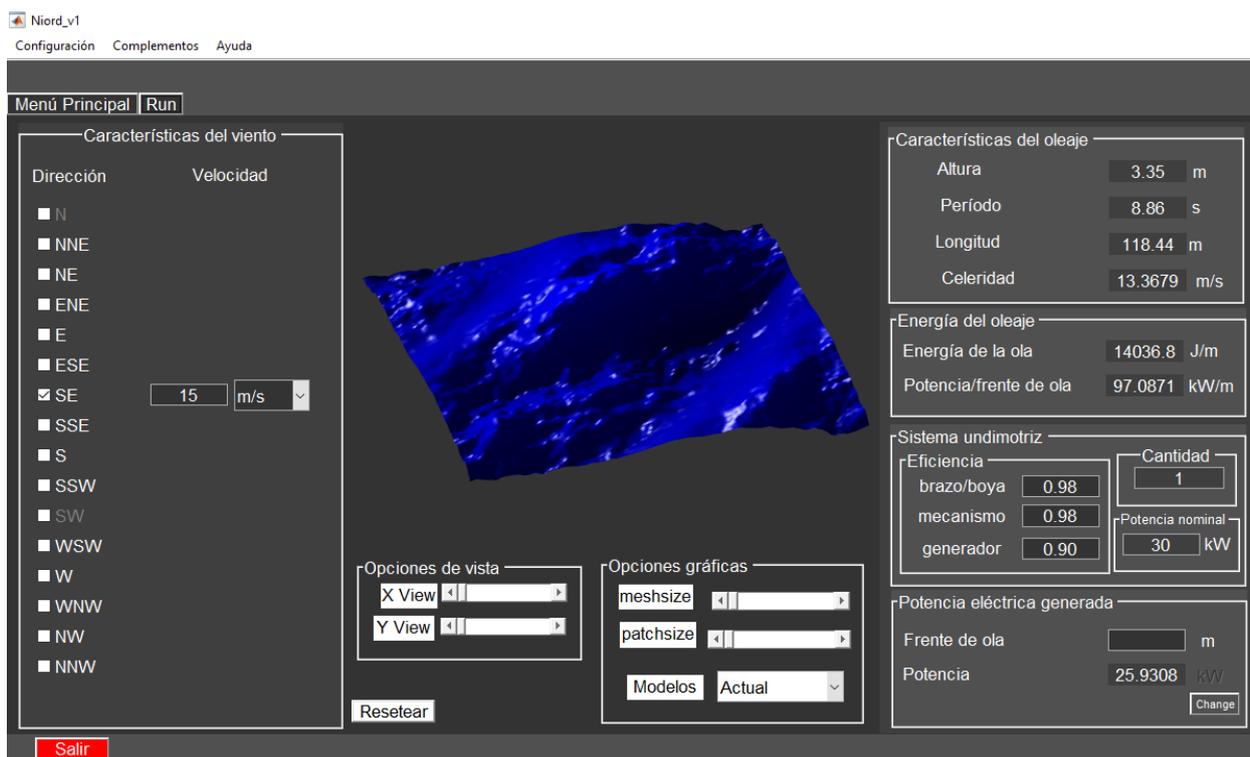


Figura 10. Simulación del Niord para un viento incidente proveniente del Sur-este con una velocidad de 15 m/s

Tabla 3. Comparación entre los datos reportados por (GEOCUBA 2017) vs los resultados del Niord para un viento de 15 m/s con dirección sur-este

Oleaje	GeoCuba	Niord	Error (%)
H (m)	3,35	3,35	0,00
T (s)	8,86	8,86	0,00
L (m)	118,4	118,44	0,03
P (kW/m)	97,56	97,08	0,49

La tabla 3 permite apreciar que para los parámetros de altura (H) y período (T) coinciden los resultados nuevamente, por lo que el error relativo es cero. Para la longitud (L) y densidad lineal de potencia (P) los errores relativos son de 0,03 % y 0,49 % respectivamente, como estos no superan el 1 %, se considera que el Niord presenta una adecuada exactitud para aplicaciones de ingeniería.

Si se comparan las imágenes de la animación del comportamiento oceánico figura 9 y figura 10, se puede notar cómo el oleaje se hace más irregular y de mayor tamaño con el incremento de la intensidad del viento.

El parámetro de mayor interés desde el punto de vista energético lo constituye la densidad lineal de potencia (kW/m), en la tabla 4 se presentan para comparación los valores de este parámetro obtenidos por el Niord, los valores calculados mostrados en la tabla 1 y los correspondientes errores relativos, para todas las direcciones y velocidades del viento reportadas en la tabla 1.

Tabla 4. Comparación entre los valores calculados vs los resultados del Niord para la densidad lineal de potencia (kW/m)

Viento	S			SE			SW		
	Calculado	Niord	Error	Calculado	Niord	Error	Calculado	Niord	Error
m/s	P (kW/m)	P (kW/m)	(%)	P (kW/m)	P (kW/m)	(%)	P (kW/m)	P (kW/m)	(%)
3	3,07	3,05	0,61	0,79	0,78	0,87	2,36	2,35	0,59
6	15,27	15,19	0,53	6,29	6,26	0,49	11,75	11,69	0,50
9	39,49	39,29	0,49	21,09	20,98	0,51	30,41	30,25	0,52
12	76,94	76,56	0,49	49,74	49,49	0,51	59,16	58,86	0,50
15	129,83	129,19	0,49	97,56	97,08	0,50	99,88	99,39	0,49

Los valores del error relativo para las diferentes direcciones y velocidades del viento tabulados en la tabla 4 son menores al 1 % del correspondiente valor calculado, lo que demuestra que el Niord tiene una exactitud adecuada para aplicaciones de ingeniería.

Se puede apreciar cómo el Niord calcula a partir de un único dato de dirección y velocidad del viento, la altura, período y longitud, obteniendo valores cercanos o aproximados a los datos de la estación meteorológica de El Faro del Morro en Santiago de Cuba, siendo la diferencia en el orden de las décimas y el error relativo reportado no supera el 1%. Lo cual demuestra la utilidad del Niord como herramienta para el análisis, evaluación y la toma de decisiones.

## 04 CONCLUSIONES

Se presentó el programa "Niord", implementado en Matlab 2015, para determinar en función de las velocidades del viento y sus direcciones, los parámetros que caracterizan el comportamiento del oleaje. Se comprobó su exactitud por comparación con datos registrados en la estación meteorológica de El Faro del Morro en Santiago de Cuba y calculados mediante expresiones reportadas en la literatura obteniéndose un error relativo inferior al 1 %, lo cual permite emplear el Niord como herramienta de análisis, evaluación y toma de decisiones.

## 05 REFERENCIAS

- Gavidia-Medina F. J.** (2020). "Campo extremo del oleaje frente a la costa de El Salvador", Realidad y Reflexión, no. 54, ISSN 1992-6510, e-ISSN 2520-9299, Universidad Francisco Gavidia, Instituto de Ciencia, Tecnología e Innovación (ICTI).
- GEOCUBA NC-ISO 9001-2001** (2017). "Estudio de Clima de Oleaje en el Sector Costero de Sardinero, Santiago de Cuba", Registro No. 013-2007, Grupo Empresarial GeoCuba, Oriente Sur: Agencia Estudios Marinos.
- González-Doría Y., Herrera-Medina M. y Ávila-Díaz C.** (2019). "Estudio del potencial energético undimotriz del departamento de Córdoba a través de un dispositivo absorbedor puntual tipo on-shore", INGE CUC, 16(1): 141-155. ISSN 2382-4700 (Electrónico), ISSN 0122-6517 (Impreso), Colombia, DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.16.1.2020.010>
- Haim A., Pelissero M., Pozzo J., Gallo F., Jauregui M., Ceciaga N., de Vita G., Pitón L., Bufanio R., Muiño F., Carreras G., Gyssel P., Balbiani M., Maldonado N., Cirelli E., Montoneri M., Benitez N., Canepa E., Tula R., Bagnasco S. y Lifschitz A.** (2019). "Energía Undimotriz - Tecnología Argentina Para la Generación de Energía Eléctrica", ASADES. Energías Renovables y Medio Ambiente, 44(): 39-47, ISSN en línea: 2684-0073 / ISSN impreso: 0328-932X.
- Hernández J., Mitrani I., Cabrales J., Hidalgo A., Betancourt A., Morfa Y., Calzada A., García R., Delgado I., Reyes D., Carracedo D., Sánchez B., Rodríguez A., Israel M., Ledesma E.** (2019). "Caracterización de Las Potencialidades Energéticas de Los Mares Circundantes a Cuba", CUBAENERGÍA, no.11, ISSN: 2219-6919, URL: [www.cubaenergia.cu](http://www.cubaenergia.cu)
- Narasimalu S.** (2020). "Floating Clean Multi-Energy Systems Towards Driving Blue Economic Growth". n: Wang, C., Lim, S., Tay, Z. (eds) WCFS2019. Lecture Notes in Civil Engineering, 41(). Springer, Singapore, Print ISBN: 978-981-13-8742-5, Online ISBN: 978-981-13-8743-2 [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8743-2\\_19](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8743-2_19)
- Pérez-Martínez J. A., Sánchez-Valdés E., Sánchez-Yañez P. y Santos-Fuentefría A.** (2021). "Estimación de energía de un parque hidrocínético: caso de estudio Bahía de Banes", Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 42(1): 81-94, ISSN 1680-0338.
- Pérez-Zapata J.** (2017). "Identificación y cuantificación del potencial de energía undimotriz en la costa del departamento del Atlántico, Colombia", Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo, Institución Universitaria ITSA. Soledad-Atlántico, Colombia, julio, 17(2): 93-102, ISSN: 1900-771X, ISSN: 2422-4324 (En Línea)

**Viloria-Durango G.** (2020). “Análisis de alternativas de energías renovables undimotriz, aprovechando el oleaje de San Andrés Islas”, Boletín Semillas Ambientales, Bogotá, Colombia, 14(2): 80-90, ISSN: 2463-0691 (En línea).

**Zhenyu L., Saddiqi A., Dias L., Narayanamurti V.** (2018). “Towards sustainability in water-energy nexus: Ocean energy for seawater desalination”, ELSEVIER, 82(3): 3833-3847, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.087>

### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Angel Orlando Castellano Sanchez** <https://orcid.org/0000-0001-7996-5611>

Participó en el diseño de la investigación. Contribuyó en la interpretación de los datos y la revisión del código del programa, en el análisis de los resultados y en la redacción del informe final. Participó en la búsqueda de información.

**Raciél David Lago Solano** <https://orcid.org/0000-0002-9723-9362>

Realizó la programación y el diseño de la interfaz gráfica de usuario del programa. Realizó búsqueda de información.

**Henry Bory Prevez** <https://orcid.org/0000-0001-5508-0501>

Trabajó en el diseño de la investigación, en la interpretación de los datos y en la búsqueda de información. Participó en la redacción y revisión del informe final.

## Estrategias para el diseño de sistemas de drenaje urbano en la ciudad de Santa Clara

**Carlos Lázaro Castillo García**

E-MAIL: ccgarcia@uclv.cu

Universidad Central Marta Abreu de las Villas. Villa Clara, Cuba

**Tomás Díaz Pérez**

E-MAIL: tomas.diaz@giat.cu

OSDE Gestión Integrada de Aguas Terrestres. La Habana, Cuba.

**Lamberto Álvarez Gil**

E-MAIL: lambertag@uclv.edu.cu

Universidad Central Marta Abreu de las Villas. Villa Clara, Cuba

**Michael Álvarez González**

E-MAIL: michael@vc.hidro.cu

Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (IPH VC)

### RESUMEN

En la presente investigación se propone una estrategia para el diseño de Sistemas de Drenaje Urbano a partir de la aplicación de nuevos conceptos basados en softwares especializados para su modelación y análisis, utilizando como caso de estudio la ciudad de Santa Clara. El objetivo principal de la estrategia es la elaboración de propuestas de solución integrales a los lugares más afectados por inundaciones. Los resultados obtenidos permiten reconocer la existencia en la ciudad de 66 Áreas Hidrológicas Urbanas, de las cuales son de interés un total de 24, y se propone como solución integral 16 Sistemas de Drenaje Urbano, con una longitud total de su trazado de 40,69 km y teniendo un impacto directo en 42 Puntos Críticos de Drenaje en la ciudad.

**PALABRAS CLAVES:**

área hidrológica urbana, hidrología urbana, punto crítico, sistema de drenaje urbano, vaguada crítica

## Strategies for the design of urban drainage systems in Santa Clara City

### ABSTRACT

This research proposes a strategy for the design of Urban Drainage Systems based on the application of new concepts based on specialized software for its modeling and analysis, using the city of Santa Clara as a case study. The main objective of the strategy is to prepare comprehensive solution proposals for the places most affected by floods. The results obtained allow recognizing the existence in the city of 66 Urban Hydrological Areas, of which a total of 24 are of interest, and 16 Urban Drainage Systems are proposed as an integral solution, with a total length of its layout of 40.69 km and having a direct impact on 42 Critical Drainage Points in the city.

**KEYWORDS:**

urban hydrological area, urban hydrology, critical point, urban drainage systems, critical stream.

## 01 INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano desordenado está considerado como un problema medioambiental y social importante, el cual repercute directamente en los proyectos de infraestructura hidráulica esenciales para la vida en las ciudades. Según Puga (2008) los proyectos de sistemas de aguas en urbanizaciones con desarrollo mal planificados requieren de inversiones sustanciales, debido a que se necesita ampliar una red existente en base a los requerimientos de la nueva área urbanizada. Esta situación de descontrol no solo es característica de países subdesarrollados, existen ejemplos muy marcados en Estados Unidos y España en los que, debido al elevado costo de ampliar las redes en este tipo de urbanización, los precios de las viviendas ascienden considerablemente. La situación se agudiza cuando las urbanizaciones obstruyen el cauce natural de ríos y arroyos lo que provoca inundaciones peligrosas tanto para la vida de los residentes como para sus pertenencias materiales.

En la actualidad existen varios softwares que utilizan modelos matemáticos para solucionar ecuaciones de alta complejidad relacionadas con el proceso lluvia-escorrentamiento-tránsito-hidrograma en un sistema de drenaje, generalmente estas ecuaciones responden al flujo no permanente en conductos a lámina libre y son llamadas las ecuaciones de Saint-Venant en 1D cuyas soluciones pueden obtenerse mediante métodos numéricos usando los modelos de onda dinámica, cinemática o difusa (Chow 1994), estas, junto con el patrón de lluvia-escorrentamiento adoptado, brindan una aproximación conceptual bastante acertada. En hidrología urbana los modelos más utilizados son EPA SWMM, Storm and Sanitary Analysis y SewerGEMS. En el caso de estudio se adopta el programa Storm and Sanitary Analysis 2015 el cual es un paquete complementario de AutoCAD Civil 3D 2015, quien también posee otros módulos adicionales ampliamente usados a nivel mundial para la concepción y el diseño de redes de drenaje pluvial.

Se parte del hecho de que la información hidrológica de la ciudad es escasa y la poca que existe está desactualizada, lo que provoca que los cálculos hidrológicos tengan que ejecutarse con sumo cuidado, y que en puntos críticos, converjan dos situaciones que obstaculizan el drenaje natural y provoquen serias inundaciones con alto costo material tanto para la sociedad, como para el país; la primera se asocia más a condiciones naturales, al poseer cotas bajas, donde confluyen las aguas, y la segunda a la acción del hombre, al ser zonas donde se acumulan grandes cantidades de desechos sólidos y orgánicos. El entorno se afecta también por el efecto de una mala planificación urbana, que ha provocado la limitación e incluso desaparición, de los registros de limpieza de sistemas de drenaje artificiales de la ciudad; hallándose afectado además arroyos y ríos por la indisciplina de las instituciones y la población que ha desaparecido o reducido sus secciones y cauces naturales; vinculándose a este hecho desfavorable, la limitada cultura ambiental y la existencia de una deficiente red pluvial, que no cubre las necesidades de una urbanización mucho más compleja que para la cual fue diseñada.

A partir de la difícil situación existente es necesario concebir una estrategia unificada para el diseño de sistemas de drenaje urbano (SDU) en la ciudad, aplicando para su concepción, herramientas de diseño y modelación matemáticas que permitan la toma de decisiones acertadas en la elaboración de proyectos de Ingeniería Básica afines.

## 02 METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL ESQUEMA TECNOLÓGICO DE LA ESTRATEGIA

El estudio del drenaje pluvial se asienta en la actualidad en dos ramas fundamentales; la aplicación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) en nuevos condominios residenciales, y métodos

tradicionales adoptando medidas estructurales y no estructurales en urbanizaciones existentes; en la actualidad ambas tendencias son combinadas con el propósito de lograr la mayor eficiencia de la infraestructura pluvial. La Hidrología Urbana es la ciencia que se encarga de estudiar los procesos de lluvia-escorrentía en estos entornos, y generalmente, la Hidráulica de Canales es la ciencia que se dedica al estudio del tránsito-hidrograma mediante estructuras de conducción-deposición.

## MEDIDAS ESTRUCTURALES, NO ESTRUCTURALES Y PRINCIPIOS DE DISEÑO APLICADOS

Tucci (2007) expone que las medidas para el control de inundaciones pueden ser del tipo estructural y no estructural. Las medidas estructurales son aquellas que modifican el sistema fluvial a través de obras en la cuenca (medidas extensivas) o en el río (medidas intensivas). Las medidas no estructurales son aquellas en que los perjuicios son reducidos por la mejor convivencia de la población con las crecidas, a través de medidas preventivas como la alerta de inundación, la zonificación de las áreas de riesgo, el seguro contra inundaciones, y las medidas de protección individual.

Es muy difícil lograr que una sola medida estructural resuelva el problema de drenaje en una urbanización determinada, por eso es que según Bertoni en Martina et al. (2015), las medidas estructurales nunca son proyectadas para dar una protección completa y total, ya que ello exigiría construir obras que aseguraran el resguardo aún frente a la mayor crecida posible, lo cual suele resultar física y económicamente inviable.

A partir de lo anterior, es imprescindible complementar las obras con la adopción de medidas no estructurales. Hasta hace unos años se creía, de manera errónea, que la solución a los problemas de las inundaciones era dada exclusivamente por obras de ingeniería, tales como canales, conductos, alcantarillas, diques laterales de protección y presas. Actualmente ya no existen dudas de que ninguna obra podrá funcionar, tal como originalmente fue prevista, si junto a la misma no se implementa también un conjunto de medidas no estructurales (Martina et al. 2015).

Desde el año 1969, Urban Drainage and Flood Control District (UDFCD), manifestó varios principios generales para seguir en los procesos de concepción y diseño de drenajes pluviales. (UDFCD 2016):

- Regionalidad: El drenaje es un fenómeno regional que no depende de los límites políticos, jurisdiccionales ni de propiedades.
- Infraestructura: El Sistema de Drenaje Urbano es un subsistema de la infraestructura hidráulica y de los recursos hidráulicos de una ciudad.
- Discretización: Toda área urbana parte de una subcuenca que a su vez pertenece a otra cuenca de mayor orden que conforma el sistema natural de drenaje, por la cual se deben realizar todos los planes de desarrollo y diseño de una correcta infraestructura.
- Precipitación: La lluvia es una propiedad primaria del lugar y el momento determinado.
- Integralidad: El planeamiento y diseño de sistemas de drenaje urbanos nunca puede ser basado en la premisa de que resolver un problema pueda trasladar el problema hacia otro lugar.
- Manejo: Una estrategia de drenaje urbano debe ser considerada multi-objetiva y multi-activa a lo largo de su vida.
- Sistemas: El diseño de un sistema de drenaje debe ser considerado en función al sistema de drenaje existente.

- Protección: En relación con el desarrollo de urbanizaciones existentes, los esfuerzos para sistemas de drenaje deben estar basados en minimizar los incrementos de volúmenes de lluvia, y disminuir los volúmenes en puntos críticos.
- Vertimiento: El sistema de drenaje urbano debe ser considerado a partir del punto de vertimiento de proyecto, emitiendo las consideraciones pertinentes aguas abajo de ese punto y los efectos que provocan el nuevo flujo entrante en el sistema natural de desagüe.

Los autores mantienen una posición firme con respecto al cumplimiento de los principios del UDFCD y manifiestan que estos deben ser complementados con otros más específicos relacionados con el objeto de estudio, los cuales deben ser aprobados por los organismos e instituciones involucrados en el proyecto y deben ser de conocimiento público.

## UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA E HIDROLÓGICA

La ciudad de Santa Clara se encuentra ubicada en las siguientes coordenadas; Universales: 22°24'24"N 79°57'11"O; Sistema Cuba Norte basado en la proyección cónica conforme de Lambert: Norte 284 000 a 289 500 y Este 600 046 a 609 000.

Según proyectos relacionados con la ciudad de Santa Clara, elaborados por varios especialistas de la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara, las rocas sobre las cuales se asienta la ciudad tienen una antigüedad de aproximadamente 60 a 65 millones de años. Gran parte de la urbe se encuentra encima del macizo serpentinitico de Cuba Central, de edad Cretácico Superior, que está compuesto por una roca serpentinita, roca metamórfica de color azul grisáceo de brillo aceitoso, que se observa en el área del complejo "Abel Santa María". Todos los repartos que se encuentran al Sur de la Línea del Ferrocarril Central poseen este tipo de roca. La otra parte de Santa Clara, al Norte del Ferrocarril que incluye los Repartos Libertad, Minerva, Camacho, Santa Catalina y Capiro, están sobre un paquete de rocas sedimentarias en los que predomina la roca caliza de colores claros y otras variedades de ellas como son las areniscas calcáreas (calizas con arena). Este tipo de rocas se observa perfectamente en la Loma del Capiro.

Se presenta un relieve articulado, de elevaciones bajas a llano. Las cotas oscilan entre 179 msnm y 75,37 msnm. Dentro de la ciudad predomina un relieve de llanuras erosivas muy diseccionadas, con pequeñas ondulaciones. El paisaje está fuertemente modificado por la asimilación antrópica, sin mantener detalles del paisaje original.

La combinación de este tipo de relieve con la geología natural predominantemente impermeable, con bajas tasas de infiltración, y las diferencias de nivel entre las elevaciones donde surgen las principales redes hidrográficas y el llano por el cual fluyen, provoca de que en la ciudad exista una amplia red de cañadas, vaguadas y arroyos tributantes a los ríos Bélico y Cubanicay, por las cuales el flujo superficial excedente de la lluvia es transportado hacia ellos (Causas naturales).

La precisión de los planos topográficos para el estudio del drenaje es considerada de acuerdo al nivel de proyecto que se trabaja. Para estudios iniciales en Ideas Conceptuales la escala máxima adecuada es 1:10 000 según CNA (2015). Dentro de los datos de topografía se debe incluir el catastro de la ciudad y detalles específicos necesarios para definir correctamente los parteaguas de escurrimiento. Para la ciudad de Santa Clara se cuenta con el plano 1: 10 000 con el cual se definen las Áreas Hidrológicas Urbanas y con un levantamiento digital del terreno (DEM) elaborado por la empresa GEOCUBA.

El escurrimiento de la ciudad está marcado por la presencia de las cuatro vertientes fundamentales:

- **Afluentes del río Ochoa (VO):** Es la vertiente Oeste de la ciudad la cual incluye los consejos populares, Sandino, Brisas del Capiro, Escambray, los repartos ubicados en la Carretera de Camajuaní, zonas aledañas a la sede Félix Varela de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, entre otros.
- **Río Cubanicay (VC):** Sistema afluente al río Bélico aledaño al centro de la ciudad, en el convergen todas las vaguadas de la divisoria Cubanicay-Ochoa y Cubanicay-Bélico, incluye los Consejos Populares de Vigía, Bengochea, Capiro, Zona Hospitalaria, Santa Catalina y parte de la Zona Centro del casco histórico.
- **Río Bélico (VB):** Corriente principal de la cuenca homónima, fluye por el centro de la ciudad, prácticamente paralelo al río Cubanicay, convergen las aguas de la divisoria Cubanicay-Bélico y Bélico-Carrascal, incluye los Consejos Populares de la Zona Central tributantes, Condado Norte, Condado Sur, Libertad, Camacho, Dobarganes entre otros.
- **Arroyo Carrascal (VJM):** Es un afluente del río Bélico cuya unión se produce cerca de la zona industrial de la ciudad, comúnmente es conocido como el río de José Martí (debido al nombre del Consejo Popular por el cual atraviesa), presenta como tributantes los repartos Virginia y José Martí.

Los datos hidrológicos necesarios para la elaboración de las propuestas de soluciones son obtenidos a partir del estudio de los patrones de precipitación de la ciudad, en caso de nivel de Ideas Conceptuales, el estudio no es necesario si se tienen relaciones de Intensidad-Frecuencia-Duración (IFD) elaboradas con anterioridad. En niveles superiores de proyecto es necesaria la revisión de las curvas IFD y en caso de poseer más de diez años de creadas, proceder a su actualización en correspondencia con las recomendaciones dadas por la Organización Meteorológica Mundial en su Manual de Prácticas Hidrometeorológicas. En este trabajo se utilizan las curvas IFD para la región central, elaboradas por Ing. Diego Emilio Abreu Franco, Ing. María P. Darías Navarro, Ing. Pedro M. Santana Jiménez del año 2009.

## CONDICIONES ACTUALES DEL DRENAJE PLUVIAL EN LA CIUDAD

La situación actual de la ciudad con respecto a su drenaje pluvial es muy compleja, varios proyectos elaborados en la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (EIPH VC) hacen mención de las causas que provocan las inundaciones en la urbe. Una característica importante de estas avenidas es que no necesariamente dependen de eventos extremos como lluvias de tormenta tropicales o huracanes, simples lluvias convectivas o de verano, son detonantes de que en ciertos puntos vulnerables exista una acumulación considerable de volúmenes de escurrimiento, debido a la incapacidad de las redes naturales y artificiales para evacuar los gastos.

A partir del estudio de estos proyectos, complementados por los recorridos realizados en la elaboración de este trabajo, sumando además las experiencias internacionales y nacionales, así como las encuestas a pobladores residentes cercanos de los puntos más complejos, se presentan a continuación un resumen de las causas antropogénicas fundamentales que provocan la situación existente: deficiente planificación urbana, indisciplina urbanística, falta de control de las autoridades competentes, falta de previsión, deficiente infraestructura de drenaje existente, entubamiento indiscriminado de cañadas, falta de mantenimiento del drenaje existente, falta de cultura medioambiental, indisciplina social asociada a vertimientos de residuos, conexiones ilegales de

alcantarillados domésticos a redes pluviales. Un ejemplo de la combinación de varias causas antropogénicas se muestra en la figura 1. Las causas antropogénicas y naturales, estas últimas definidas anteriormente, son la plataforma principal para un posterior estudio de medidas no estructurales aplicables a cada sistema de drenaje urbano propuesto en este trabajo.



Figura 1: Ejemplos de cañadas afectadas por el crecimiento urbanístico en la ciudad de Santa Clara.  
(Fuente: Elaboración Propia)

Atacar las causas desde la raíz es una premisa fundamental para el diseño del nuevo Plan Integral de Manejo de Aguas Pluviales de la ciudad de Santa Clara. Es complejo, desde el punto de vista práctico, emitir especificaciones o normas generales de cómo proceder en cada Consejo Popular o en cada cañada, pues todos los lugares poseen características propias. Sin embargo, este trabajo golpea directamente a la causa relacionada con la falta de infraestructura, mediante el diseño de un esquema tecnológico de medidas estructurales el cual es parte insoslayable de la estrategia adoptada para la solución de los puntos donde la situación de drenaje sea más difícil. Estas medidas, por si solas, no resuelven una situación determinada, para ampliar la concepción del alcance se hace necesario redimensionar la definición de Sistema de Drenaje Urbano, cuyo concepto se brindará posteriormente. Para obtener una metodología eficaz, el análisis exhaustivo del lugar y las condiciones naturales existentes es parte esencial de un buen redimensionamiento del problema y a partir de ello se propone entonces la respuesta acertada.

### 03 ANÁLISIS DEL ESQUEMA TECNOLÓGICO PARA LA ESTRATEGIA DE CONCEPCIÓN DE MEDIDAS ESTRUCTURALES APLICADA

Un esquema tecnológico es el conjunto de etapas necesarias para idear, diseñar y producir un bien o servicio que pretenda solucionar un problema o satisfacer una necesidad. Sin embargo, bajo este criterio, es necesario introducir nuevos conceptos ajustados a las necesidades del estudio, los cuales pretenden ampliar el campo de aplicación de la estrategia para otras ciudades con características similares.

#### CONCEPTOS ADOPTADOS EN LA ESTRATEGIA DE CONCEPCIÓN DE MEDIDAS ESTRUCTURALES

Se utiliza el principio general de discretización de allí que se emplea en el trabajo el concepto de “microcuenca” como parte de un elemento más general “la subcuenca”, y a su vez de la “cuenca hidrográfica”, esta es una característica propia de la morfología de las redes fluviales y que en muchos casos influye directamente en la adopción de modelos de lluvia-escurrimiento, un ejemplo recurrente es los límites de aplicación de la fórmula Racional, varios autores recomiendan solo su uso en cuencas

pequeñas con diferentes rangos de áreas que varían desde los 5 km<sup>2</sup> hasta los 12 km<sup>2</sup> como máximo, incluso más como expresa Chow et al. (1994).

El estudio del drenaje de la ciudad de Santa Clara parte de la cuenca a la cual pertenece, las subcuencas que tributan al sistema principal y las microcuencas aportantes a cada una, para definir estos elementos se establece el punto de cierre de la cuenca del río Bélico, en el puente ferroviario al Norte de la Circunvalación, ubicado en las siguientes coordenadas: N, 289 590; E, 604 999. Esta misma red ferroviaria también cierra el río de José Martí en las coordenadas: N, 289 375; E, 601 526. La línea de corriente principal de la cuenca es el río Bélico, mientras que los ríos Cubanicay y José Martí son los afluentes más importantes cuyas áreas de aporte son consideradas subcuencas. Para definir los límites de la cuenca del río Bélico y las subcuencas José Martí y Cubanicay se emplea el software AutoCAD Civil 3D 2015 y la herramienta "Catchments" con la ayuda del plano 1:10 000 para aquellas zonas fuera del alcance del DEM.

A partir de la relevancia del factor Área de Aporte en la fórmula Racional; combinando la definición de microcuenca, de la cual es necesario tomar los parámetros fundamentales para la obtención de la lluvia de proyecto; además de la intervención del hombre con infraestructuras que cambian el curso del drenaje natural; surge el concepto de Área Hidrológica Urbana (AHU).

Un Área Hidrológica Urbana es la adaptación del concepto de microcuenca en ambientes urbanos, es definida como aquella área tributante a una vaguada principal cuyo vertimiento ocurre en el sistema fluvial primario de la cuenca o la subcuenca a la que pertenece. Se consideran AHU también a aquellas laderas de los sistemas fluviales sin presencia de vaguadas, ambas tipologías con una superficie superior a las 5 ha. La construcción del AHU tiene como premisas fundamentales que sus límites no dependen de los Consejos Populares ni de zonas específicas, su trazado se realiza a partir de la vaguada principal objeto de estudio y las obras lineales como carreteras, autopistas y redes ferroviarias con presencia de drenajes, pueden ser consideradas límites de sectores dentro de una propia AHU.

Este concepto discretiza la red de drenaje natural de la ciudad en 66 AHU, de ellas solo seis son tipo laderas, a las cuales no es necesario la imposición de medidas estructurales; las restantes 60 en su totalidad poseen vaguadas principales que, en algunos Consejos Populares, principalmente en la Zona Centro, son entubadas. Cada vaguada posee características inherentes a su Área Hidrológica Urbana, sin embargo, el nivel de afectaciones provocadas por el hombre es directamente proporcional a la densidad de población que habita alrededor de ella como se observa en la figura 2; entre las menos afectadas está la cañada de Sub-Planta cuyo cauce principal recorre 2,5 km desde su nacimiento, en el cementerio de la ciudad, hasta su punto de cierre en el Ferrocarril Circunvalante del Norte, una de las más afectadas es la cañada de Dobarganes cuyo cauce recorre 0,5 km desde su nacimiento en el Museo Provincial Abel Santamaría hasta su punto de cierre en su unión con el río Bélico.

La Vaguada Crítica es la cañada principal del Área Hidrológica Urbana en estudio, donde generalmente se encuentran los Puntos Críticos de drenaje, aunque en ciertos lugares estos puntos pueden estar ubicados en vaguadas secundarias, la Vaguada Crítica es la que proporciona los datos morfométricos necesarios para el cálculo de la intensidad máxima de precipitación de la fórmula Racional, en caso de que no exista la vaguada principal como son las AHU de laderas, estos datos son obtenidos del AHU típica más cercana. Los parámetros principales que son evaluados en las AHU son: Área (km<sup>2</sup>, ha), Longitud de Vaguada Crítica (km, m), Pendiente Media de Vaguada Crítica (m/m, %).



Figura 2: Áreas Hidrológicas Urbanas de Sub-Planta y Dobarganes. (Fuente: Elaboración Propia)

El estudio de los casos más complicados tiene que partir necesariamente de puntos conocidos donde ocurran inundaciones frecuentes; el análisis de los proyectos elaborados en la EIPH VC, sobre todo las I.C Drenaje Pluvial Santa Clara de 2010 y el plano georreferenciado de 2014 con la recopilación de soluciones propuestas en el período comprendido entre 2006 y 2012; el documento “Puntos Críticos de Drenaje de la ciudad de Santa Clara” elaborado en 2019 por el MSc. Ing. Tomás Díaz Pérez Delegado de Recursos Hidráulicos de la Provincia de Villa Clara, recopilación de las principales demandas de pobladores y organismos; además de estudios presenciales realizados en el transcurso de los meses de agosto y diciembre de 2019 por el autor de este trabajo, con la colaboración de varios ingenieros involucrados en los estudios de hidrología y topografía de la ciudad; son los antecedentes para la definición de los Puntos Críticos.

Un Punto Crítico es el lugar o zona puntual en donde el drenaje, tanto natural como artificial, es afectado por causas antropogénicas; lo que provoca la acumulación de considerables volúmenes de escorrentía pluvial que no son evacuados eficientemente por los sistemas existentes y provocan inundaciones, causando la incomodidad y quejas de los residentes afectados.

En la figura 3 se observa la aplicación de los conceptos de Área Hidrológica Urbana, Vaguada Crítica y Punto Crítico en los Consejos Populares Capiro y Bengochea:

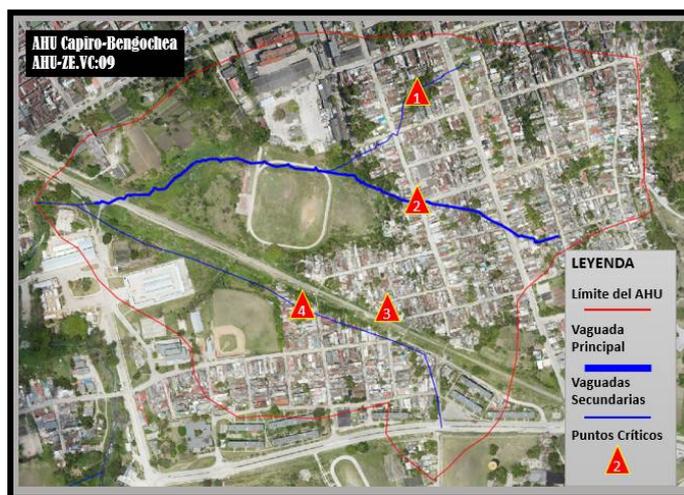


Figura 3: Área Hidrológica Urbana Capiro-Bengochea. (Fuente: Elaboración Propia)

Para solucionar o mitigar los efectos de las inundaciones es necesario reelaborar el concepto de Sistema de Drenaje Urbano y ampliarlo al punto que permita, no solo la aplicación de medidas estructurales, soluciones ingenieriles u otra obra física, sino además crear una estructura sólida de medidas no estructurales que acompañen su campo de acción. Para ello se propone la siguiente definición.

Un Sistema de Drenaje Urbano (SDU) es el conjunto de medidas estructurales y no estructurales aplicadas a una o varias Áreas Hidrológicas Urbanas, cuyo objetivo fundamental es la mitigación del impacto de lluvias intensas en los Puntos Críticos definidos y Vaguadas Principales y Secundarias, con lo cual se pretende el bienestar económico y social de la comunidad junto con su convivencia con eventos extremos. Un SDU está compuesto por:

- Red Natural de Drenaje (RDN): En las AHU esta red viene representada por las vaguadas principales y secundarias, a las que se adiciona los vertimientos de las mismas en los cuerpos receptores fluviales.
- Red Artificial de Drenaje (RAD): Son presentadas en este estudio como la nueva red diseñada y la red artificial existente, así como sus vertimientos en los cuerpos receptores fluviales.
- Estructuras de cruce de aguas (ECA): Obras como puentes y alcantarillas cuyo objetivo es proporcionar la vía de cruce necesaria para personas y vehículos.
- Estructuras de mitigación de avenidas (EMA): Aplicables en puntos específicos donde sean necesaria la reducción de gastos o la acumulación de volúmenes. En esta investigación se emplea la estructura de bypass para dividir el flujo de un colector o cañada con alto gasto de diseño.
- Plan de Gestión de Avenidas (PGA): Una mirada a eventos extremos y el comportamiento del SDU ante una situación de eventos superiores al de diseño, lo cual es fundamental para el estudio de medidas no estructurales en los SDU.
- Plan de Gestión de Infraestructura (PGI): Análisis de mantenimientos periódicos, responsabilidades de la comunidad, el gobierno local y los organismos para el correcto desempeño de la vida útil de la obra.
- Plan de Gestión de la Urbanización (PGU): Ubicación de las franjas vetadas para nuevas construcciones, límites de propiedad de cañadas y ríos, cuestiones legales sobre drenaje pluvial en la comunidad.

Bajo estas nuevas definiciones, teniendo como pilares la búsqueda bibliográfica de casos de estudio y manuales a nivel nacional e internacional, la consulta de normativas de la temática y la experiencia acumulada por proyectistas y constructores, los autores proponen un Esquema Tecnológico que resume la etapa de anteproyecto en Ideas Conceptuales de un Sistema de Drenaje Urbano aplicado para solucionar o mitigar el impacto de grandes avenidas o eventos extremos en un Punto Crítico o varios de un Área Hidrológica Urbana determinada.

## ESQUEMA TECNOLÓGICO SIMPLIFICADO PARA PROYECTOS EN IDEAS CONCEPTUALES DE DRENAJE PLUVIAL URBANO

El esquema tecnológico se divide en etapas (pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento), fases (10 en total) y casos (flexibles de acuerdo a la tenencia de datos) y es aplicado única y exclusivamente para un AHU o varias limítrofes que presenten características similares y que estén relacionadas con el objetivo de proyecto. Bajo ninguna circunstancia este esquema puede ser

aplicado para una ciudad en general o poblado si dentro de los mismos se distinguen varias AHU no conectadas, no hay límites de áreas de la AHU para aplicar el esquema puesto que la morfología de la cuenca es variada, sin embargo, la más grande de la ciudad de Santa Clara es de 160 ha, perteneciente a los consejos populares Escambray y Brisas del Capiro.

La figura 4 muestra el Esquema Tecnológico para la etapa de pre-procesamiento cuyo objetivo principal es la definición del trazado del Sistema de Drenaje Urbano. En esta etapa cobra relevancia, por su carácter determinante, el concepto de AHU y a partir de su definición, el trazado final del SDU. Uno de los aspectos más significativos de esta etapa es el intenso estudio de la situación existente, así como de las características físico-geográficas e hidrológicas del lugar, por tanto, los recorridos y las preguntas a residentes son una parte esencial de la etapa. Por último, el trazado de la RAD conjunto con la RDN y la ubicación de las ECA (tanto como proyecto o existentes) y EMA debe ser una fase donde las empresas de proyectos y organismos institucionales den la aprobación a la solución integral.

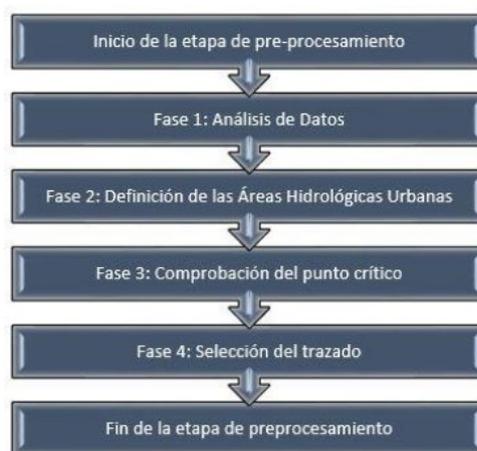


Figura 4: Etapa de Pre-Procesamiento. (Fuente: Elaboración Propia)

Por su parte en la etapa de procesamiento como se muestra en la figura 5 es donde se concentran los cálculos del esquema tecnológico, su objetivo principal es el diseño de todas las medidas estructurales del Sistema de Drenaje Urbano, para lo cual se desarrollan 3 fases como se muestra. Lo más relevante es sin duda el proceso de diseño y simulación del comportamiento de las variables hidrológicas (AHU) e hidráulicas (RDN, RAD, ECA y EMA) a partir de herramientas computacionales, por lo cual gana en importancia las normas y requisitos fundamentales para este tipo de proyecto.

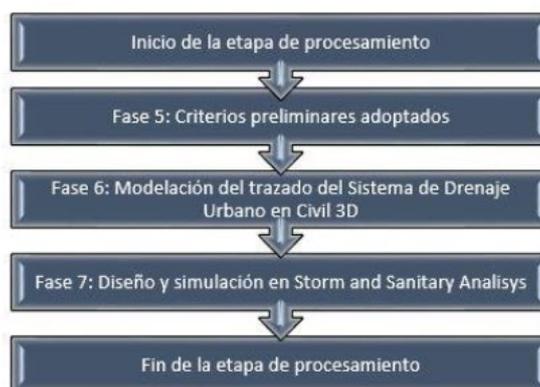


Figura 5: Etapa de Procesamiento. (Fuente: Elaboración Propia)

Por último, el post-procesamiento es la etapa final del esquema tecnológico, su objetivo principal es el análisis de los resultados obtenidos en la etapa de procesamiento, para lo cual se desarrollan 3 fases como se presenta en la figura 6. Su importancia viene con cada nivel de proyecto, por ejemplo, un proyecto en Ideas Conceptuales no va a tener un análisis constructivo tan profundo como un proyecto Técnico-Ejecutivo, aunque el análisis hidrológico e hidráulico debe ser exigente en todos los niveles.



Figura 6: Etapa de Post-Procesamiento. (Fuente: Elaboración Propia)

## ANÁLISIS DE RESULTADOS EN LA APLICACIÓN DE LA ESTRATEGIA PARA LA CIUDAD DE SANTA CLARA

La ciudad de Santa Clara es una urbe con más de 200 000 habitantes y con un alto grado de urbanización, sobre todo hacia su casco histórico y entre los ríos Bélico y Cubanicay. Las AHU de Santa Clara por lo general poseen características similares con respecto a su forma, siendo alargadas y estrechas hacia la parte sur de la ciudad y más redondeadas, amplias hacia la parte norte. La tabla 1 muestra los parámetros hidrológicos fundamentales obtenidos para el diseño en la etapa de procesamiento de los 16 SDU propuestos.

Tabla 1: Resultados de los parámetros hidrológicos obtenidos en las modelaciones.

SDU	Coeficiente de escurrimiento en % de Área			Gasto máximo del AHU m <sup>3</sup> /s	Área de aporte al sistema ha	Error del modelo %
	0,3-0,49	0,5-0,69	0,7-0,8			
Bengochea	32,13	11,89	55,98	2,51	13,29	-0,13
Calle Unión	0	0	100	3,08	13,82	-0,34
Camacho	0	51,53	48,47	4,80	25,42	-0,29
Capiro	48,81	21,49	29,69	3,48	21,45	-0,02
Chambery	0	75,34	25,66	1,74	9,57	-0,19
Condado Sur	0	100	0	4,60	26,53	-0,19
Condado-Calle Real	4,41	90,70	4,89	16,71	140,18	-0,14
Dobarganes	0	0	100	3,04	13,85	-0,32
Escambray	23,10	62,42	14,48	20,89	153,10	-0,09
Hospital-Calle Maceo	0	0	100	3,18	13,35	-0,43
La Vigía	0	14,59	85,41	8,69	40,58	-0,40
Libertad	12,01	38,93	49,05	3,38	17,98	-0,27
Paseo de la Paz	0	56,78	43,22	3,38	19,76	-0,23
Santa Catalina	43,02	41,77	15,21	3,32	19,20	-0,08
Sub-Planta	5,20	46,28	48,52	4,29	27,31	-0,26
Virginia	0	43,66	56,36	13,12	83,82	-0,25

La estrategia adoptada permitió en un plazo cercano a 6 meses tener una caracterización completa de las 66 AHU de la ciudad, de las cuales 24 alojan los 42 Puntos Críticos, se proponen en la estrategia 16 SDU para dar una solución integral a la ciudad, de ellos 14 tienen como vertiente a los ríos Bélico y Cubanicay mientras que los dos restantes poseen vertientes hacia fuera del perímetro urbano. La tabla 2 ofrece un resumen de las dimensiones de las obras de conducción propuestas, siendo este valor un estimado y muy útil para obtener estimar los costos de inversión que supone un proyecto de esta envergadura.

Tabla 2: Longitud de conducciones en metros para cada Sistema de Drenaje propuesto.

SDU	400 mm	500 mm	600 mm	800 mm	1000 mm	1200 mm	Canal Cubierto	Canal de Drenaje	Total	Tuberías
Bengochea	0	425	257	171	68	321	0	612	1854	1242
Calle Unión	0	0	32	232	790	0	177	0	1231	1054
Camacho	748	195	78	451	30	0	0	255	2157	1902
Capiro	0	369	427	362	106	0	0	507	1771	1264
Chambery	335	323	244	483	0	0	0	0	1385	1385
Condado Sur	0	1203	597	673	248	0	0	0	2721	2721
Condado-Calle Real	1695	196	858	2069	870	780	1120	781	8369	6468
Dobarganes	159	221	145	59	366	0	0	0	950	950
Escambray	0	81	237	140	675	0	0	2403	3536	1133
Hospital-Calle Maceo	187	768	417	641	0	0	0	0	2013	2013
La Vigía	0	232	338	1271	668	0	0	0	2509	2509
Libertad	202	36	64	104	892	0	0	874	2172	1298
Paseo de la Paz	0	451	0	203	194	731	0	0	1579	1579
Santa Catalina	282	0	432	57	74	338	478	388	2049	1183
Sub-Planta	103	260	215	162	819	0	196	0	1755	1559
Virginia	183	498	331	857	1182	1305	228	64	4648	4356
<b>TOTAL</b>	<b>3894</b>	<b>5258</b>	<b>4672</b>	<b>7935</b>	<b>7382</b>	<b>3475</b>	<b>2199</b>	<b>5884</b>	<b>40699</b>	<b>32616</b>

La figura 7 muestra una vista del modelo Autodesk Storm Sanitary Analysis 2015, elaborado para el Sistema de Drenaje Urbano Santa Catalina, las características de cada SDU varían de acuerdo a las necesidades locales de cada AHU y a la RDN existente, los mismos son diseñados en estrecha relación a la RDN afectada por la urbanización. Esta característica permite que el SDU tenga puntos de alivio de los gastos en los lugares donde coinciden con las redes existentes y así tener un mayor margen de descarga de aguas.

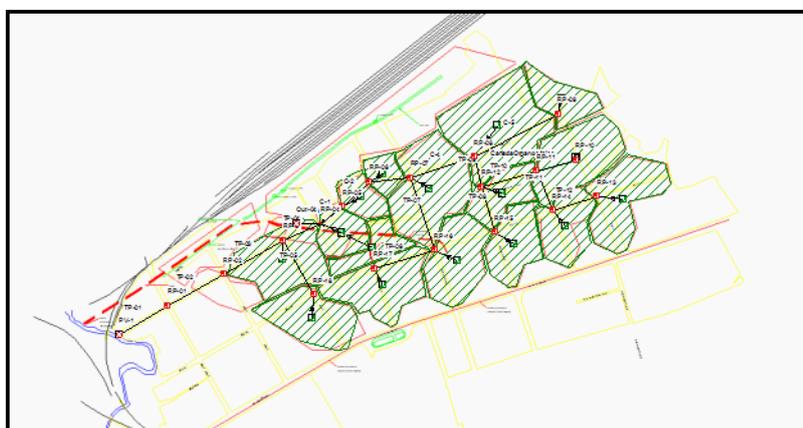


Figura 7: Sistema de Drenaje Urbano Santa Catalina. (Fuente: Elaboración Propia)

## 04 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos en el análisis de cada solución propuesta permiten arribar a las siguientes conclusiones:

- La aplicación de medidas estructurales y de diseño de obras para drenaje de por sí solas no resuelven los problemas de inundaciones, es necesaria la adopción además de medidas no estructurales que mitiguen los impactos de eventos superiores a los de proyecto.
- La estrategia planteada permitió obtener en un breve período de tiempo una caracterización general del drenaje en la ciudad de Santa Clara, compuesto por 66 AHU, 42 Puntos Críticos y como propuesta de solución se presentan 16 SDU con una longitud total cercana a los 40 km de conducciones.
- Las herramientas informáticas Autodesk AutoCAD Civil 3D 2015 y Autodesk Storm and Sanitary Analysis 2015, son una gran combinación para modelar redes de drenaje pluvial y emitir posteriormente conclusiones acerca de su funcionamiento.
- La nueva definición de Sistema de Drenaje Urbano con sus siete componentes permite implementar medidas estructurales y no estructurales sólidas articuladas en un solo plan general para un Área Hidrológica determinada.

Los autores recomendamos:

- La elaboración del estudio “Tormenta de diseño para la ciudad de Santa Clara” cuyos resultados brindarán un mejor comportamiento de relaciones IDF e hietogramas patrones para la ciudad.
- La elaboración del estudio “Hidrología de los ríos Bélico y Cubanicay” considerando que los puntos de vertidos propuestos en este trabajo son solo esquemáticos.

## 05 REFERENCIAS

- Chow V. T., Maidment D. y Mays L.** (1994) Hidrología Aplicada. McGraw-Hill Interamericana, ISBN: 958-600-171-7 Bogotá, Colombia
- CNA** (2015) Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Drenaje Pluvial Urbano. Comisión Nacional del Agua, México DF, extraído de <http://cmx.org.mx/wp-content/uploads/MAPAS%202015/libros/SGAPDS-1-15-Libro19.pdf> en abril de 2020
- Martina E. F., Peralta A. M. d. V., Marín N. C., Paolo L. D. P., González S., Torchia N., Viand J. y Moscardini O.** (2015) Inundaciones urbanas y cambio climático. Recomendaciones para la gestión. Gobierno de Argentina, ISBN 978-987-47402-6-7, Buenos Aires (Argentina), extraído de <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/manualinundaciones.pdf> en marzo de 2020
- NC: 1239-2018** (2018) Especificaciones para el diseño de alcantarillado sanitario y drenaje pluvial. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.
- Puga D.** (2008) "Crecimiento urbano desordenado: causas y consecuencias", Centre de recerca en economia internacional, No 19 ISSN: 1137-7828, Universidad Pompeu Farra, Barcelona España, extraído de: [https://crei.cat/wp-content/uploads/opuscles/090429174552\\_ESP\\_CREI\\_19\\_castella.pdf](https://crei.cat/wp-content/uploads/opuscles/090429174552_ESP_CREI_19_castella.pdf) en marzo de 2020

**Tucci C. E. M.** (2007) “Gestión de Inundaciones Urbanas”. Argentina: Comité Permanente de los Congresos Nacionales del Agua, ISBN 8577271277, Google Books, extraído de [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/gestion-de-inundaciones/gestion-de-inundaciones-urbanas-esp.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/gestion-de-inundaciones/gestion-de-inundaciones-urbanas-esp.pdf) en abril de 2020.

**UDFCD** (2016) Urban Storm Drainage Criteria Manual. Vol.1. Management, Hydrology, and Hydraulics. Urban Drainage and Flood Control District. ISBN: 978-1-887201-66-7. Denver (Colorado, USA).

#### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

#### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Ing. Carlos Lázaro Castillo García** <https://orcid.org/0000-0002-6430-2775>

Autor principal del trabajo de diploma “Estrategias para el diseño de sistemas de drenaje urbano en la ciudad de Santa Clara” presentado en Santa Clara, 2020 para la obtención del título de Ingeniero Hidráulico en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final.

**MSc. Tomás Díaz Pérez** <https://orcid.org/0000-0001-8236-6652>

Tutor del trabajo de diploma “Estrategias para el diseño de sistemas de drenaje urbano en la ciudad de Santa Clara” presentado en Santa Clara, 2020. Participó en el diseño de la investigación y análisis de los resultados.

**Dr. C. Lamberto Álvarez Gil** <https://orcid.org/0000-0002-4543-4035>

Co-tutor del trabajo de diploma “Estrategias para el diseño de sistemas de drenaje urbano en la ciudad de Santa Clara” presentado en Santa Clara, 2020. Participó en el diseño de la investigación.

**Dr. C. Michael Álvarez González** <https://orcid.org/0000-0003-2953-4762>

Participó en el análisis de resultados.

## Solución del problema inverso de la hidrogeología mediante el algoritmo evolución diferencial

**Rolando Verdés Sánchez**

E-MAIL: rolando.verdes@eiphh.giat.cu

Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de La Habana.

**Lemuel Carlos Ramos Arzola**

E-MAIL: lemuelcarlosra@gmail.com

Instit national de la recherche scientifique, Université du Québec

**Armando Orestes Hernández Valdés**

E-MAIL: ahernandez@cih.cujae.edu.cu

Universidad Central Marta Abreu de las Villas. Villa Clara, Cuba

### RESUMEN

La presente contribución propone un nuevo algoritmo de optimización dentro de la tecnología AQÜIMPE para la calibración automática de los parámetros hidrogeológicos de modelos de acuíferos (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento). La propuesta utiliza una técnica metaheurística llamada algoritmo evolución diferencial (differential evolution, DE por sus siglas en inglés) la cual se basa en los principios básicos de los algoritmos genéticos con algunas modificaciones. El acople entre el modelo de flujo AQÜIMPE y DE se implementa en el asistente matemático MATLAB. Se aplica el modelo propuesto en la calibración del modelo del acuífero Cuentas Claras, donde DE demuestra ser una buena opción a la hora de elegir un algoritmo de optimización para la solución del problema inverso de la hidrogeología.

**PALABRAS CLAVES:** acuífero, AQÜIMPE, calibración, evolución diferencial, problema inverso.

## Solution of the inverse problem of the hydrogeology by the differential evolution algorithm

### ABSTRACT

In this research a new module within AQÜIMPE technology is proposed, to the automatic calibration of the hydrogeologic parameters of the aquifers model (hydraulic conductivity and storage coefficient). The proposal uses a metaheuristic technique called differential evolution algorithm, which is based on the basic principles of the genetic algorithms with some modifications. This technique is implemented in the solution of the inverse problem of the hydrogeology. The coupling between the AQÜIMPE flow model code and DE is implemented in the mathematical assistant MATLAB. The model proposed is applied in the calibration of the real aquifer model. Through its application it shows that DE is a good option when selecting an optimization algorithm to the solution of the inverse problem of the hydrogeology.

**KEYWORDS:** aquifer, AQÜIMPE, calibration, differential evolution, inverse problem.

## 01 INTRODUCCIÓN

La complejidad de los medios geológicos, en especial las formaciones acuíferas, una de las principales fuentes portadoras del recurso elemental para la vida (el agua), han provocado y favorecido el desarrollo de modelos numéricos. Estos modelos permiten a los especialistas dotarse de una herramienta capaz de simular y estimar el comportamiento de los sistemas acuíferos ante diferentes acciones, ya sean provocadas por el hombre o por la misma naturaleza (Ramos, 2016).

El problema que surge cuando se conocen las propiedades hidrogeológicas, las condiciones iniciales, las condiciones de frontera del acuífero y se desea determinar la distribución espacial y temporal de los niveles del agua subterránea se conoce como problema directo o de simulación. Sin embargo, el desarrollo de herramientas de simulación no ha ido convenientemente acompañado de un desarrollo paralelo de las herramientas de estimación de parámetros hidrogeológicos. La obtención de los valores de los parámetros hidrogeológicos de un acuífero, conductividad hidráulica ( $K$ ) y coeficiente de almacenamiento ( $S$ ) a partir de datos de niveles piezométricos se conoce como el problema inverso de la hidrología subterránea.

Durante la estimación de parámetros, el proceso de modificarlos continuamente hasta que se logre una buena coincidencia entre los valores simulados y observados se denomina calibración. Este proceso puede realizarse de forma manual mediante un proceso de prueba y error, o de forma automática mediante algoritmos de optimización, donde los algoritmos metaheurísticos han alcanzado un gran auge en los últimos tiempos.

Las técnicas metaheurísticas representan los algoritmos de optimización más generales. La mayor parte de los algoritmos metaheurísticos están inspirados en comportamientos que se llevan a cabo en la naturaleza, teniendo en cuenta las principales características de los sistemas biológicos.

Los algoritmos genéticos constituyen una de las variantes más populares a la hora de elegir un algoritmo metaheurístico (Mallepedi et al., 2011). Fueron desarrollados por John H. Holland a principios de los 60'. Las principales ventajas que presentan es que son capaces de explorar el espacio de soluciones en múltiples direcciones a la vez, además de resolver problemas altamente no lineales y complejos y tienen el potencial para acoplarse con otras técnicas de búsqueda-optimización (Marczyk, 2004).

En Cuba, con la creación del modelo de simulación de flujo del agua subterránea AQÜIMPE (Martínez, 1989), el problema inverso ha sido resuelto, inicialmente, mediante la calibración manual, sin embargo, Mesa (2004) resuelve el problema inverso aplicando un algoritmo genético de convergencia global llamado Shuffled Complex Evolution (SCE) en la tecnología AQÜIMPE. Se han acoplado, además, al modelo de flujo AQÜIMPE, luego de su migración al software MATLAB y de la creación de la herramienta META-AQÜIMPE técnicas metaheurísticas novedosas. Sin embargo, la complejidad del propio problema inverso de la hidrogeología hace imposible definir qué algoritmo es el más adecuado para encontrar la solución óptima, es por eso que enriquecer la tecnología AQÜIMPE con nuevas técnicas metaheurísticas es útil y necesario si se quieren evaluar y administrar con rigor los recursos hidráulicos subterráneos.

En la presente contribución se discute un modelo de calibración automática que utiliza como técnica de búsqueda el algoritmo evolución diferencial (DE, por sus siglas en inglés) acoplado al modelo de flujo AQÜIMPE en el entorno de Matlab (META-AQÜIMPE), este modelo se aplica para el caso de un acuífero real.

## 02 MATERIALES Y MÉTODOS

### ALGORITMO EVOLUCIÓN DIFERENCIAL

El algoritmo evolución diferencial (DE) introducido por Storn y Price (1997), es un algoritmo basado en poblaciones que utiliza los operadores básicos de los algoritmos genéticos: mutación, cruzamiento y selección. Las razones por las que los investigadores encuentran a DE como una poderosa herramienta de optimización son (Das and Suganthan, 2011): (a) comparado con la mayoría de los algoritmos evolutivos, es mucho más simple y noble de implementar, (b) a pesar de su simplicidad exhibe buenos resultados en problemas multimodales complejos, (c) el número de parámetros heurísticos que posee es muy pequeño y sus efectos en el rendimiento del algoritmo han sido bien estudiados.

DE emplea un método de búsqueda paralelo que utiliza un número de agentes en un espacio de búsqueda. Las posiciones de los agentes son inicializadas aleatoriamente. Cada agente representa un punto en el espacio, de coordenadas  $[x_1, x_2, x_3, \dots, x_D]$ , donde  $D$  representa la dimensión del problema. Estos agentes constituyen vectores de posición, de orden  $(NP \times D)$ , que se denotan según la forma  $X_i^g$  ( $i = 1, 2, \dots, NP$ ), donde  $g$  es el contador de generaciones y  $NP$  es el número de agentes que integran la población. Cada agente constituye una solución del problema de optimización.

#### MUTACIÓN

En DE, la mutación se evidencia a partir de la construcción del denominado “vector mutado”  $V_i^{g+1}$  (de iguales dimensiones del vector  $X_i^g$ ), el cual se inicializa normalmente con valores nulos. Este vector se construye a partir de la adición de una diferencia ponderada entre dos agentes de la población con un tercero, tal como se muestra en la ecuación (1).

$$V_i^{g+1} = X_{r_1}^g + F_i(X_{r_2}^g - X_{r_3}^g), i = 1, \dots, NP \quad (1)$$

donde:  $r_1, r_2, r_3$ , son subíndices diferentes escogidos aleatoriamente en el intervalo  $[1, NP]$  en cada generación, en los cuales no se incluye el subíndice del agente que se muta.  $F$  es un vector, de orden  $(1 \times NP)$ , denominado factor de escala, el cual se distribuye uniformemente en el espacio  $[0, 2]$ .

Este vector controla la amplificación de la variación diferencial  $(X_{r_2}^g - X_{r_3}^g)$  (Storn and Price, 1997). La ecuación de mutación se aplica para cada agente del proceso. La ecuación (1) se encuentra dentro de las estrategias de mutación más aplicadas, esta estrategia se conoce en la literatura con la notación DE/rand/1/bin, propuesto por Storn y Price (1997) para identificar que el agente que se muta se escoge de manera aleatoria en la población y que se realiza un cruzamiento binomial. En la figura 1 se muestra la representación gráfica de la ecuación (1) en un espacio bidimensional.

#### CRUZAMIENTO

Según Feoktistov (2006), el rol principal del cruzamiento es mezclar la información aportada por el agente o vector de posición  $X_i^g$  y el vector mutado  $V_i^{g+1}$  (muchas veces llamados vector “padre” y vector “donador” respectivamente) para mejorar la diversidad de la población y poder explorar regiones más prometedoras.

En este sentido, es necesaria la construcción de un tercer vector, el vector  $U_i^{g+1}$ , denominado vector de prueba, el cual se inicializa con valores nulos y su función es retener parte de la información

de los vectores  $X_i^g$  y  $V_i^{g+1}$ . Su construcción se realiza componente a componente de acuerdo con la ecuación (2):

$$u_{j,i}^{g+1} = \left\{ \begin{array}{ll} v_{j,i}^{g+1} & \text{si } (rand(j) \leq C_r \text{ ó } j = rnb(i)), i = 1, \dots, NP \quad j = 1, \dots, D \\ x_{i,j}^g & \text{si } (rand(j) > C_r \text{ y } j \neq rnb(i)), i = 1, \dots, NP \quad j = 1, \dots, D \end{array} \right\} \quad (2)$$

donde:  $rand$  es un vector, de orden  $(1 \times D)$ , distribuido uniformemente en el espacio  $[0,1]$ ,  $C_r$  se denomina constante de cruzamiento y viene dado por un valor constante del espacio  $[0,1]$  determinado por el usuario,  $rnb$  representa un subíndice escogido aleatoriamente en el espacio  $[1, NP]$  que asegura que el vector de prueba  $U_i^{g+1}$  contenga al menos una componente del vector mutado  $V_i^{g+1}$ ,  $u_{j,i}^{g+1}$ ,  $v_{j,i}^{g+1}$  y  $x_{j,i}^g$  son componentes de los vectores de prueba, mutación y posición respectivamente. En la figura 2 se muestra un posible esquema de cruzamiento para un caso de dimensión  $D = 7$ .

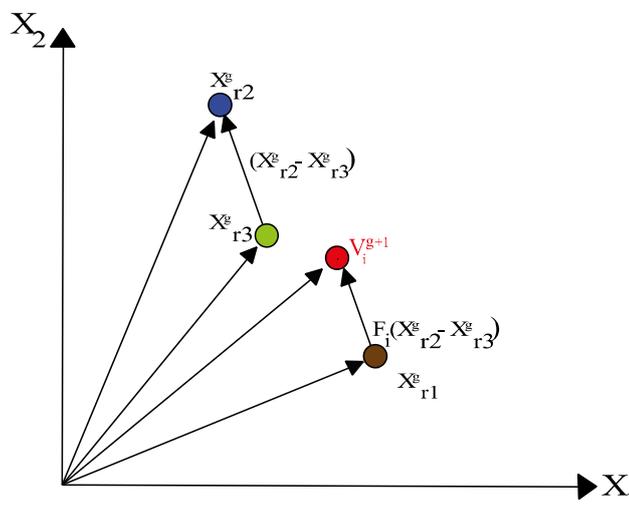


Figura 1. Representación gráfica de la obtención del vector mutación en un espacio bidimensional

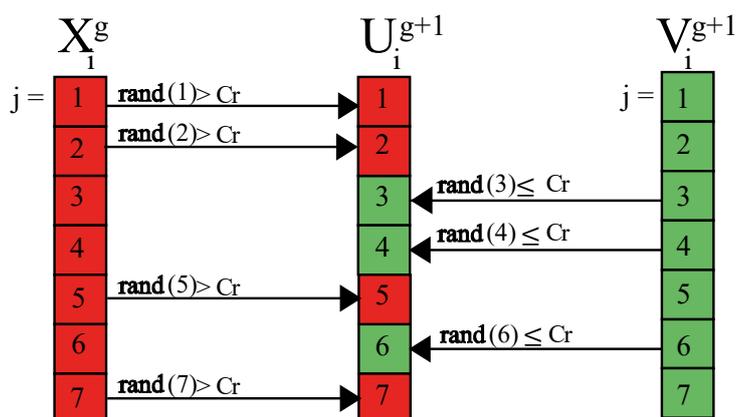


Figura 2. Representación de un posible esquema de cruzamiento para el caso  $D = 7$ . (Modificada de Storn y Price 1997)

### SELECCIÓN

Para decidir que vector pasa a la siguiente generación, el vector de prueba  $U_i^{g+1}$  y el vector de posición  $X_i^g$  son evaluados en la función objetivo y comparados utilizando el criterio de la codicia de acuerdo a la siguiente regla:

$$X_i^{g+1} = \begin{cases} U_i^{g+1} & \text{si } f(U_i^{g+1}) \leq f(X_i^g) \\ X_i^g & \text{si } f(U_i^{g+1}) > f(X_i^g) \end{cases} \quad (3)$$

### MODELO DIRECTO

El modelo matemático AQÜIMPE (Martínez, 1989), resuelve la ecuación diferencial parcial de segundo orden, de tipo parabólica, que gobierna el flujo bidimensional, impermanente, lineal y confinado en un medio poroso con término fuente-sumidero dada por la ecuación (4):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + W \quad (4)$$

sujeta a la siguiente condición inicial y condiciones de borde que se muestran a continuación:

$$h(x, y, 0) = f_0(x, y), \quad (x, y) \in \Omega \quad (5)$$

$$-T \frac{\partial h}{\partial n} = f_2(x, y), \quad (x, y) \in \partial\Omega_2 \quad (6)$$

$$h(x, y, t) = f_1(x, y), \quad (x, y) \in \partial\Omega_1 \quad (7)$$

donde:  $h$  es la carga hidráulica,  $T$  la transmisividad del acuífero,  $S$  coeficiente de almacenamiento del acuífero,  $W$  es el término fuente o sumidero,  $t$  el tiempo,  $x, y$  son las variables espaciales,  $\Omega$  región de flujo,  $\partial\Omega$  contorno de la región de flujo ( $\partial\Omega = \partial\Omega_1 \cup \partial\Omega_2$ ),  $\partial/\partial n$  derivada normal al contorno, y  $f_0, f_1, f_2$  son funciones conocidas.

AQÜIMPE resuelve la ecuación (4) mediante el método del elemento finito (MEF) con triángulo cuadrático como elemento de discretización, utilizando la aproximación de Galérkin, permitiendo obtener la carga hidráulica en función de las variables espaciales  $(x, y)$  y del tiempo  $(t)$  (Cabrera y Dilla, 2011). Al aplicar el MEF la ecuación (4) se transforma en un sistema matricial de ecuaciones lineales, que cuando se trata de un acuífero confinado, el problema consiste en resolver  $k$  veces el sistema de ecuaciones lineales mostrado en la ecuación (8) (Cabrera y Dilla, 2011).

$$[M]\{h\} = \{f\} \quad (8)$$

donde:  $M$  es una matriz simétrica cuadrada, de orden  $(n \times n)$  ( $n$  es el número de nodos), en la que cada fila está asociada con uno de los nodos de la malla. Lo mismo sucede con las columnas. En el vector  $h$  se guardan las variables a calcular en cada tiempo  $k$  y  $f$  es el vector de los términos independientes donde se almacena el efecto de los caudales extraídos e incorporados al modelo en cada nodo (Cabrera y Dilla, 2011). Dada la simetría de la matriz  $M$ , el sistema de ecuaciones lineales descrito en (8) se resuelve mediante el método conocido como método de la raíz cuadrada o de Choleski (Cabrera, 2007).

### MODELO INVERSO

La herramienta META-AQÜIMPE emplea la ecuación (9) como función objetivo (FO) del problema de optimización sujeta a las restricciones que se muestran en las ecuaciones (10) y (11). Esta función

objetivo minimiza las diferencias entre los niveles observados y simulados del acuífero, donde  $N_p$  es el número de pozos de observación,  $N_t$  es el número de tiempos,  $h_{obs}$  es el nivel observado en los pozos de observación,  $h_{sim}$  es el nivel simulado por el modelo,  $K_{min}$  y  $K_{max}$  representan los valores mínimos y máximos de la conductividad hidráulica y  $S_{min}$  y  $S_{max}$  representan los valores mínimos y máximos del coeficiente de almacenamiento.

$$FO(K, S) = \min \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_p} (h_{t,1}^{obs} - h_{t,i}^{sim}(K, S))^2 \quad (9)$$

$$K_{min} \leq K \leq K_{max} \quad (10)$$

$$S_{min} \leq S \leq S_{max} \quad (11)$$

El módulo que se propone en este trabajo integra a la herramienta META-AQÜIMPE el algoritmo DE para realizar la calibración automática de modelos de acuíferos. Este acople se realiza en el entorno de MATLAB. En la figura 3 se muestra un diagrama de flujo con las principales etapas de este módulo.

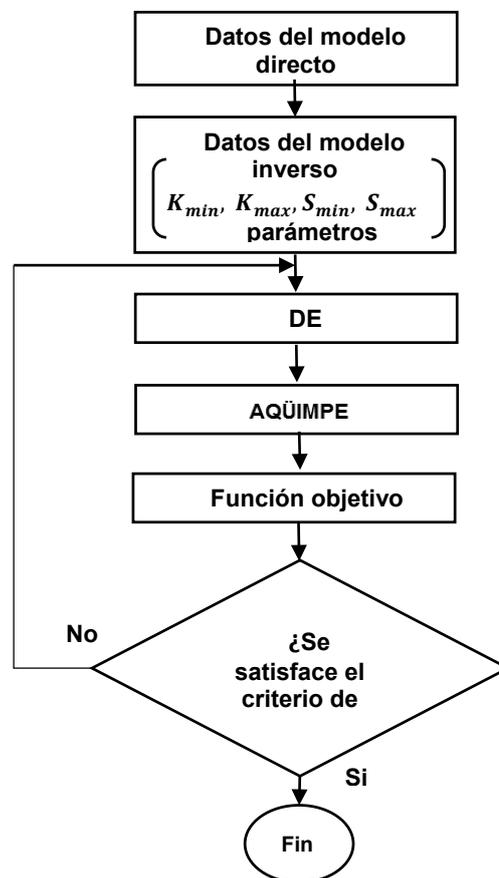


Figura 3. Diagrama de flujo de la herramienta META - AQÜIMPE con el algoritmo evolución diferencial acoplado

Verdés (2018) demuestra a partir de la calibración del modelo de un acuífero hipotético, que los parámetros heurísticos  $NP= 10$  y  $C_r= 0.8$  garantizan un buen rendimiento del algoritmo DE, estos parámetros son los utilizados para la calibración del caso de estudio.

## MODELO CONCEPTUAL

La zona de estudio (sector Cuentas Claras, SCC), ocupa un área aproximada de 1560 km<sup>2</sup>, comprendiendo a los municipios Manzanillo, Campechuela y Yara, pertenecientes a la provincia Granma, Cuba.

Esta zona limita al norte con el Golfo de Guacanayabo, al sur con las premontañas de la Sierra Maestra, al este con el municipio Yara y al oeste con el municipio Campechuela (figura 4). Blanco et. al (2010).

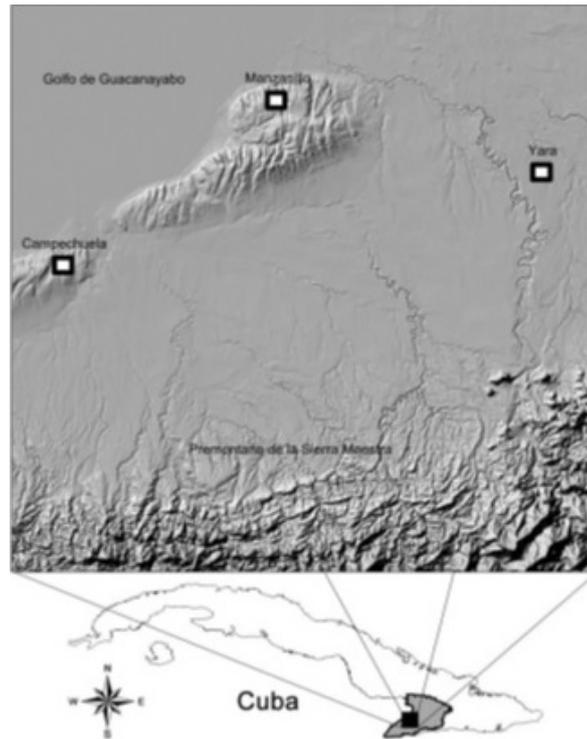


Figura 4. Ubicación de la zona de estudio. Sector Cuentas Claras

La recarga del acuífero Cuentas Claras se produce fundamentalmente en las premontañas de la Sierra Maestra ubicadas al sur del sector. Sin embargo, los resultados de los estudios geológicos y geofísicos, sugieren que el aporte de la recarga de la zona montañosa al sector Cuentas Claras proviene de fallas geológicas bajo este, por lo que el flujo debe ser vertical con significativas componentes de velocidad.

En el modelo conceptual se excluye dicha zona y se introduce el aporte de la montaña indirectamente en el sector como una lámina adicional a la lámina de la precipitación que ocurre sobre Cuentas Claras.

## LÍMITES Y CONDICIONES DE CONTORNO DEL SCC

A partir de los estudios hidrogeológicos, geofísicos, geológicos e hidrológicos realizados en la zona de estudio, Ramos (2012) procedió a definir el área del modelo y sus fronteras como se muestra en la figura (5).

En el área de estudio se encuentran un total de 51 pozos de explotación controlados por tres organismos: la Industria con 11 pozos, el Ministerio de la Agricultura (MINAGRI) con 12 pozos y el Poder Popular, por medio del acueducto, con 28 pozos.

El área cuenta con una red de 8 pozos de observación con mediciones desde enero de 1991 hasta noviembre de 2011, pero de este período solamente en los años de 1997 al 2000, los registros de 7 de ellos tienen observaciones mensuales.

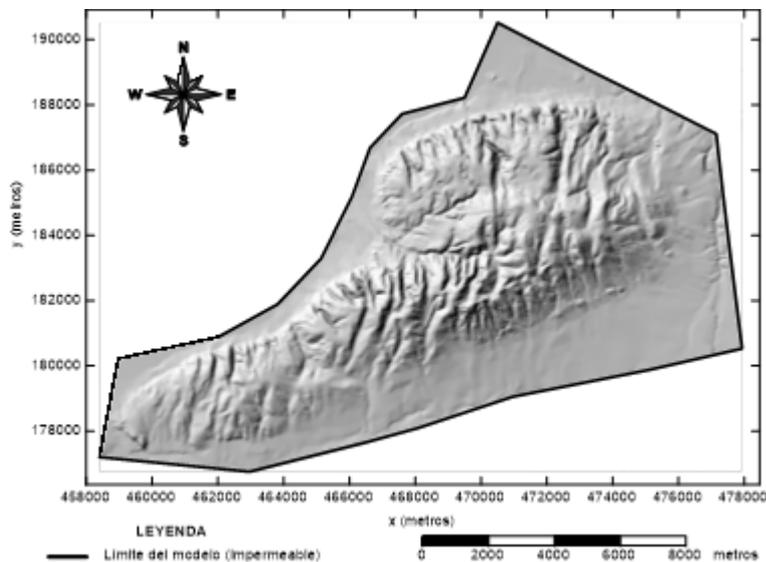


Figura 5. Área del modelo del Sector Cuentas Claras

### DISCRETIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Para la creación de la malla de triángulos se utilizó la herramienta SIG AQTRIGEO. En la figura 6 se muestra la discretización del área del Sector Cuentas Claras. La malla mostrada está compuesta por 121 elementos (triángulos) y 264 nodos (vértices y centros de cada lado de los triángulos).

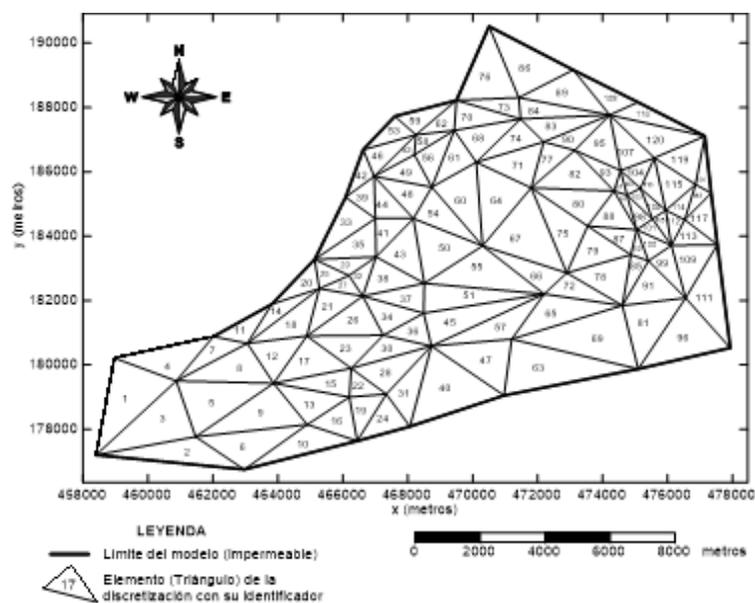


Figura 6. Discretización del Sector Cuentas Claras

### GRUPOS DE INFILTRACIÓN Y PROPIEDADES HIDROGEOLÓGICAS

Atendiendo a las características hidrofísicas de los distintos tipos de suelos del área en cuestión, a la asignación de la recarga por zonas mediante los polígonos de Thiessen y a la discretización del área a modelar, Ramos (2012) definió un conjunto de 8 grupos de infiltración, además decide agrupar los

triángulos en 10 grupos o zonas de propiedades hidrogeológicas atendiendo a la información aportada por la geología y la geofísica. En la figura 7 se muestra la distribución de estos grupos sobre el área del SCC.

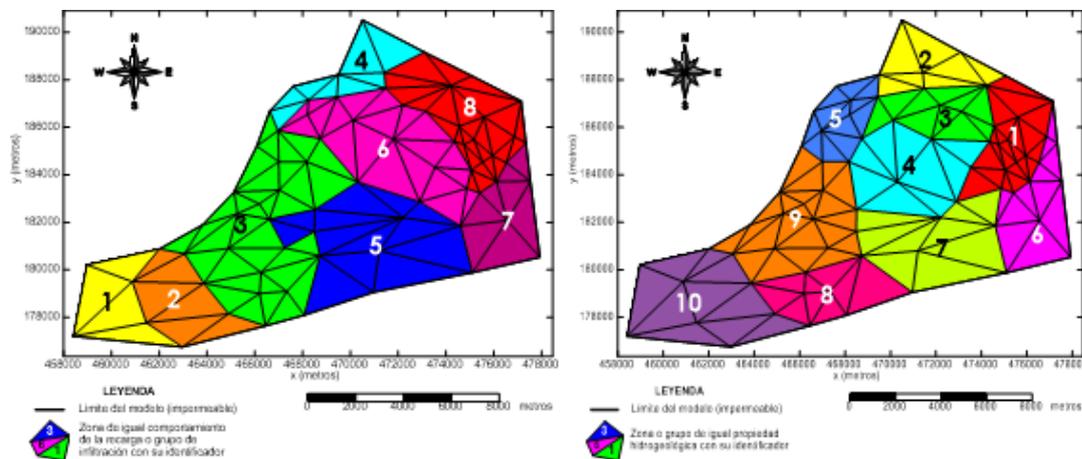


Figura 7. Distribución de los grupos de infiltración (izquierda) y grupos de propiedades hidrogeológicas (derecha)

### ESTADO INICIAL DEL ACUÍFERO

Con los datos de niveles en los pozos de observación del mes agosto del año 1998, se realiza una interpolación con la ayuda de la herramienta Surfer 13, utilizando el método de Kriging, mediante el cual se obtiene el mapa de hidroisohipsas que se muestra en la figura 8.

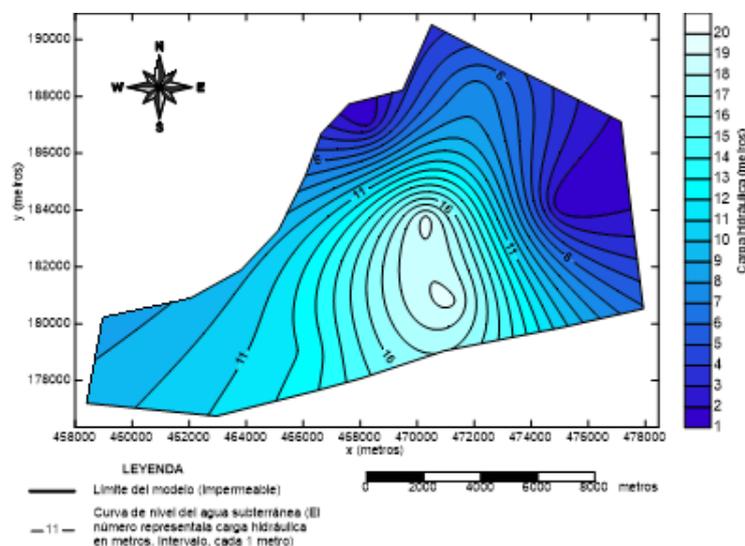


Figura 8. Estado inicial del SCC (agosto de 1998).

### CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para realizar la calibración del modelo del SCC, se utiliza la herramienta META-AQÜIMPE con DE como algoritmo de optimización. En todas las ejecuciones se emplean los valores de los parámetros heurísticos  $NP = 10$  y  $C_r = 0.8$ . El intervalo donde se calibrarán las propiedades se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Límites del intervalo de búsqueda de los parámetros (establecido por Ramos 2012)

Grupos de Propiedades	Intervalo de propiedades			
	Transmisividad (m <sup>2</sup> /d)		Coeficiente de almacenamiento	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1-10	10	5000	0,001	0,1

En la tabla 2 se muestra el resultado de algunas de las 15 ejecuciones realizadas con el algoritmo DE durante el proceso de calibración. En cada ejecución se realizaron 10000 evaluaciones de la función objetivo

Tabla 2. Resultados de la calibración del modelo del SCC

Ejecuciones	Valor de la FO
1	52,50
3	41,74
5	70,11
7	61,80
10	52,03
11	64,00
12	55,81
<b>13</b>	<b>40,65</b>
14	43,75
15	57,75
Promedio	55,10

El mejor resultado de la tabla 2 se obtiene en la ejecución 13, donde se alcanza el menor valor de la FO.

El algoritmo presentó un ritmo de convergencia acelerado durante las 100 primeras generaciones (figura 9), esta característica estuvo reflejada en cada una de las ejecuciones que se realizaron y los tiempos de cómputo necesarios para realizar cada ejecución estuvieron cercanos a los 25 minutos.

DE logra disminuir considerablemente el valor de la FO en las etapas tempranas del proceso de búsqueda, sin embargo, a partir de 500 generaciones tuvo una tendencia general al estancamiento en cada ejecución, por lo que no es recomendable establecer grandes valores de evaluaciones de la función objetivo como criterio de parada de este algoritmo, se recomienda hasta 10000 evaluaciones de la función objetivo. Los valores de las propiedades calibradas pueden encontrarse en (Verdes,2018).

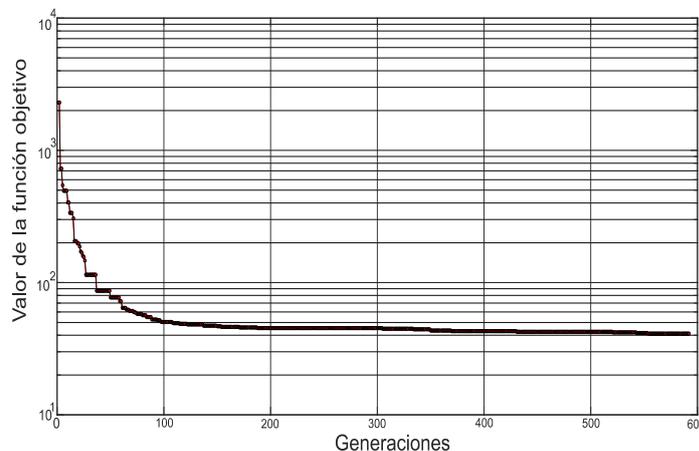


Figura 9. Comportamiento típico del algoritmo DE en las ejecuciones de la calibración del modelo SCC

A continuación, se realiza una comparación entre los niveles simulados y observados en cada pozo de observación, en la ejecución 13 (figura 10).

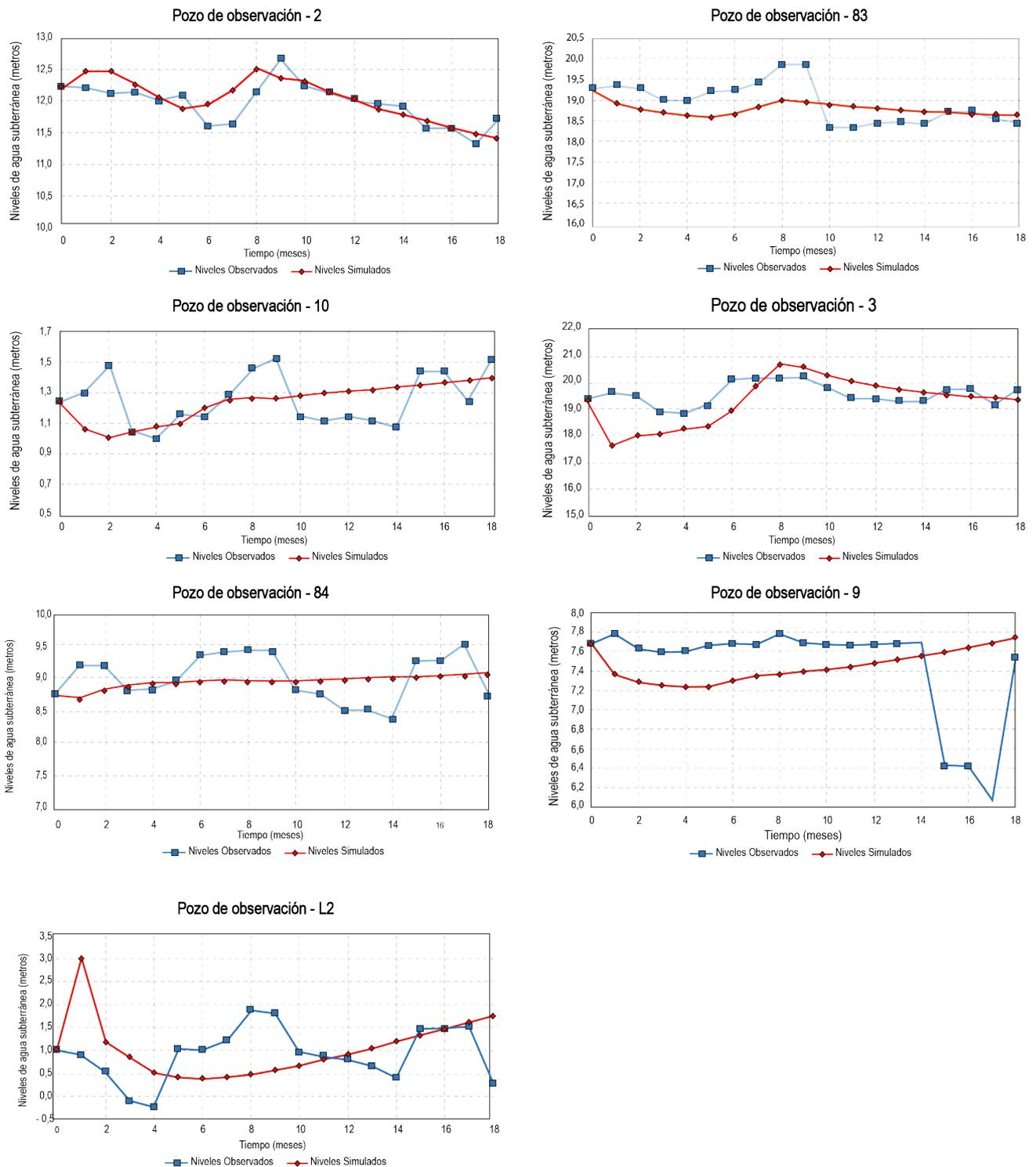


Figura 10. Niveles observados y simulados en el período de calibración

### 03 CONCLUSIONES

Mediante el empleo de la herramienta META-AQÜIMPE con el algoritmo DE acoplado para calibrar modelos de acuíferos y los parámetros heurísticos que garantizan un buen rendimiento del algoritmo, se obtienen nuevos valores para las propiedades hidrogeológicas representativas del modelo del sector Cuentas Claras, además se redujo considerablemente el tiempo de cómputo y el número de evaluaciones de la función objetivo.

El algoritmo DE presenta un ritmo de convergencia acelerado en sus primeras 100 generaciones, donde logra reducir el valor de la función objetivo en pocas evaluaciones. Esta característica resulta ser muy beneficiosa, ya que en el proceso de calibración de modelos de acuíferos se realizan gran cantidad de evaluaciones de la función objetivo y es donde más tiempo se emplea. Sin embargo, demostró que pasadas las 500 generaciones es propenso al estancamiento, por lo que no se justifica un número elevado de evaluaciones de la función objetivo como criterio de parada del algoritmo.

Se demuestra que DE con los parámetros heurísticos obtenidos se pueden calibrar propiedades hidrogeológicas empleando pocas evaluaciones. Estas propiedades garantizan un comportamiento hidrodinámico del modelo similar al observado.

### 04 REFERENCIAS

- Blanco J.L., LLoréns C., Licea J., Almirall J., Cordovés J. y Lorenzo A.** (2010) "Investigación Hidrogeológica de los Sectores Cuentas Claras y Cayo Redondo. Manzanillo (Primera Etapa)". Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Holguín, Cuba.
- Cabrera E.** (2007). "Simulación de acuíferos con el empleo de herramientas de los Sistemas de Información Geográfica". Tesis en opción al título de Master en Ingeniería Hidráulica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". La Habana, Cuba.
- Cabrera E. y Salvador-Dilla F.** (2011). "Modelo de administración de acuíferos: MADA." Tecnología y Ciencias del Agua, Vol.II (4), pp. 5-24. ISSN: 2007-2422, México.
- Das S. and Suganthan N.** (2011). "Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art." IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.15 (1), pp. 4-45, ISSN: 1941-0026, doi: 10.1109/TEVC.2010.2059031.
- Feoktistov V.** (2006). "Differential Evolution in Search of Solution". Springer, ISBN: 978-0-387-36895-5, Boston, USA
- Mallepedi R., Suganthan P. N., Pan Q. K. and Tasgetiren M. F.** (2011). "Differential evolution algorithm with ensemble of parameters and mutation strategies". Applied Soft Computing, Vol.11, pp. 1679-1696. ISSN 1568-4946, Netherlands
- Marczyk A.** (2004). "Algoritmos genéticos y computación evolutiva". Computer Based Learning Unit, University of Leeds.
- Martínez J. B.** (1989). "Simulación matemática de cuencas subterráneas: flujo impermanente bidimensional". Monografía, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de la Habana, Cuba.
- Mesa H. R.** (2004). "Solución del problema inverso en modelos de flujo del agua subterránea mediante un algoritmo de convergencia global". Tesis doctoral. La Habana, Departamento de Matemática, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría".

- Ramos L. C.** (2012). "Modelación matemática del acuífero Cuentas Claras". Trabajo de Diploma para optar por el título de Ingeniero Hidráulico, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". La Habana, Cuba.
- Ramos L. C.** (2016). "Modelo matemático para la optimización del costo de bombeo de la explotación del agua subterránea". Tesis de maestría. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". La Habana, Cuba.
- Verdés R.** (2018). "Solución del problema inverso de la hidrogeología mediante el algoritmo evolución diferencial". Tesis presentada en opción al título de ingeniero hidráulico. Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría" La Habana, Cuba.
- Storn R. and Price K.** (1997). "Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces". Journal of Global Optimization, Vol.11, pp.341-349. ISSN: 1573-2916, Springer Nature, Switzerland.

#### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

#### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Rolando Verdés Sánchez**

<https://orcid.org/0000-0002-1127-9225>

Realizó la interpretación de los datos. Ejecutó los trabajos de modelación, análisis de los resultados y la redacción del informe final.

**Lemuel Carlos Ramos Arzola**

<https://orcid.org/0000-0002-4275-8843>

Realizó la interpretación de los datos. Ejecutó los trabajos de modelación, el diseño de la investigación y la revisión de los resultados.

**Armando Hernández Valdés**

<https://orcid.org/0000-0002-2479-6854>

Realizó el análisis de los resultados y la revisión del informe final.

## El aeropuerto José Martí y peligros asociados a su sistema de protección contra inundaciones

**Armando O. Hernández Valdés**

E-MAIL:ahernandez@cih.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba

### RESUMEN

A partir de los resultados del proceso de calibración de un modelo elaborado de un sector del acuífero Vento donde se encuentra ubicado el aeropuerto, se realizaron simulaciones de dos escenarios para conocer la respuesta del acuífero ante un evento extremo de similares características a las del ciclón Frederick. Los resultados mostraron que tal y como sucedió en el evento de referencia, los pozos de recarga se convierten en surgentes y que el período de descenso de los niveles es prolongado y de alrededor de 10 días. Se demuestra la vulnerabilidad del sistema de protección contra inundaciones que actualmente presenta el aeropuerto José Martí y los peligros de contaminación asociados, por lo que se recomienda sustituir el sistema actual de protección contra inundaciones del aeropuerto, por uno superficial.

**PALABRAS CLAVES:** contaminación, hidrogeología, inundaciones, modelación matemática, peligros, vulnerabilidad.

### José Martí Airport and the risks associated to its flood mitigation system

#### ABSTRACT

José Martí International Airport is represented into a mathematical model of Vento aquifer. From the results of a calibration model of a section of Vento aquifer where José Martí International Airport is located, two scenarios have been simulated as to understand the aquifer response to extreme weather events with similar characteristics to hurricane Frederick. Results show how recharge wells are transformed into surging wells and the descending period of the groundwater level is prolonged to about 10 days. The findings point out the vulnerability of the current flood mitigation system and the pollution risks associated with it. Therefore, it is recommendable to substitute the current system by a superficial one.

**KEYWORDS:** pollution, hydrogeology, floods, mathematical modeling, risks, vulnerability.

## 01 INTRODUCCIÓN

El sistema de protección contra inundaciones de aeropuerto José Martí ha sido objeto de preocupación de varias entidades desde los acontecimientos ocurridos por las intensas lluvias durante los días 9 y 10 de septiembre de 1979 (500 mm de lluvia en 36 horas), debidas al huracán Frederick, las cuales provocaron inundaciones de consideración durante diez días según se reporta en el informe de la empresa de Investigaciones y Proyectos, 2014

Entre las medidas implementadas estuvieron la perforación de pozos de recarga en el lugar del desplome de una caverna próxima a la Terminal No. 1 y la perforación de pozos de recarga en zonas alejadas a la pista del aeropuerto. Otros estudios valoraban la construcción de canales para conducir el agua a la zona de la laguna Ariguanabo y otros drenes superficiales, trabajos que nunca se ejecutaron.

Las afectaciones a las aguas subterráneas están relacionadas con peligros tecnológicos relacionados con la manipulación de los hidrocarburos y de los residuales líquidos. Es necesario tener en cuenta que si bien es cierto que los hidrocarburos atrapados en la zona no saturada producto de las fugas de los depósitos de almacenamiento o de las redes de distribución pueden permanecer largos periodos de tiempo, una vez puestos en contacto con la zona saturada producto del arrastre superficial o subsuperficial hacia los pozos de recarga, se pueden mover grandes distancias en cortos periodos de tiempo en las formaciones cársicas subyacentes hasta los acueductos próximos a dichas instalaciones y aguas debajo de los puntos de peligro potencial con afectaciones posibles hasta alrededor de 3 m<sup>3</sup>/s si consideramos los aportes totales de las cuencas Ariguanabo y Vento Almendares a los acueductos de Aguada del Cura, Taza de Vento, Cosculluela y otras obras de captación.

Ante fenómenos extremos de lluvias de gran intensidad, el sistema de drenaje del aeropuerto puede colapsar debido a que la capacidad de recarga del acuífero está limitada por estratos superiores de características impermeable, por lo que los pozos de drenaje se pueden convertir en pozos surgentes y posteriormente con la disminución de las lluvias en el proceso de recarga se pueden inyectar al acuífero importantes cantidades de sustancias contaminantes.

En el presente trabajo se ilustran los resultados de la simulación de un sector del acuífero Vento, que incluye el área donde se encuentra ubicado el aeropuerto José Martí.

## 02 GEOMORFOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

### CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DE LA ZONA

El territorio estudiado fue fondo marino hasta hace once a doce millones de años, cuando se inició un lento, pero constante movimiento de ascenso que lo hizo emerger sobre el nivel del mar de esas épocas geológicas. Desde entonces ha estado sometido a procesos exógenos aéreos, de erosión y meteorización; que han sido los agentes modeladores del relieve actual.

El aeropuerto se encuentra sobre una depresión cársica, donde la cobertura es poco permeable y de materiales limo arenoso de color gris. En la figura 1 se presenta el mapa geológico de la zona, la cual, según López E. 2002, se caracteriza de la manera siguiente:

### FORMACIÓN GÜINES (MIOCENO INFERIOR - SUPERIOR, N11-3 GN)

Se desarrolla en casi toda la llanura centro – meridional, ocupando aproximadamente el 45% del territorio municipal. En ella están enclavados numerosos repartos como Río Verde, Calabazar, El Globo, Rancho Boyeros y parte de Santiago de Las Vegas, además de grandes industrias. Está constituida por varios tipos de calizas de aspecto mayormente masivo, organógenas, organógeno-detríticas, coralinas, recristalizadas, dolomitizadas, arcillosas; en menor grado dolomitas, calcarenitas y margas calcáreas, que transicionan de unas a otras en todas direcciones. Se caracterizan por un buen desarrollo del carso, tanto hipogénico como superficial. Yace concordantemente sobre las formaciones Colón, Jaruco y Cojímar y discordantemente sobre las formaciones Consuelo, Guanajay, Tinguaro y está sobreyacida a su vez, discordantemente por los depósitos Cuaternarios.

### SEDIMENTOS ALUVIALES INDIFERENCIADOS (Q)

Ocupan sobre todo los valles de inundación (zonas muy bajas entre 0 y 5 m de altura), generalmente sobre la Formación Güines. Hacia la parte meridional del territorio puede encontrarse una mezcla de limo arenoso de color gris y gris carmelitoso, con poco contenido de grava, provenientes de las diferentes formaciones presentes en el área.

El actual aeropuerto “José Martí” se asienta sobre rocas carbonatadas y carbonato-arcillosa de la formación Cojímar (edad Mioceno medio-parte baja), con un espesor no mayor de 45 a 50 m. Debajo yacen rocas, también carbonatadas, de la formación Jaruco (edad Mioceno inferior) con una potencia cercana a los 100 m, que afloran en las alturas de Cacahual. Ambas formaciones están afectadas por procesos cársicos.

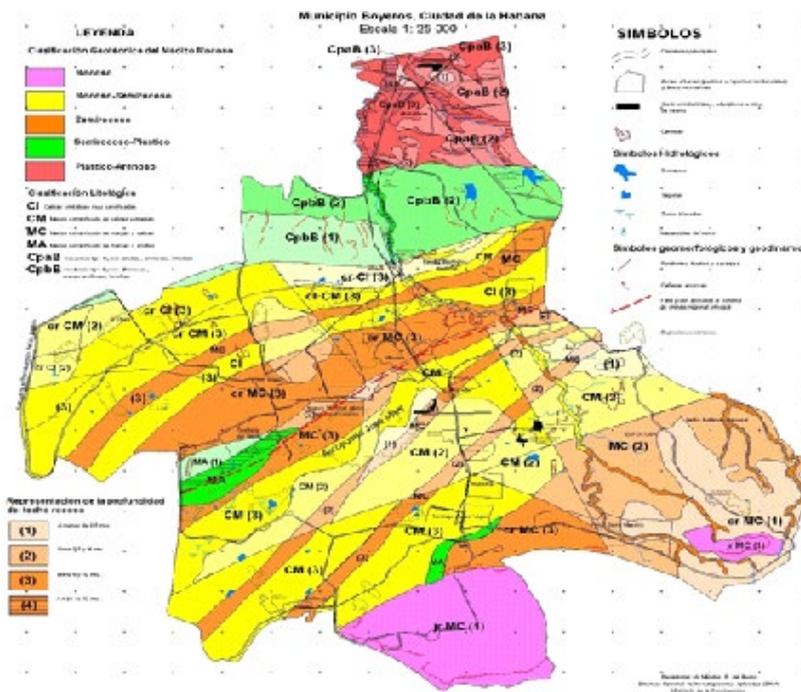


Figura 1. Mapa geológico de la zona de Boyeros

### FORMACIÓN JARUCO (OLIGOCENO SUPERIOR - MIOCENO INFERIOR, P32 -N1 JR).

Tiene un desarrollo muy local, aflorando al suroeste, en un farallón en las inmediaciones de las alturas del Cacahual, cercano a la carretera Rincón - Bejucal y conformando un valle contiguo al sur.

La constituyen calizas arcillosas, margas de color crema y amarillo - crema y margas organógenas deleznales de color blanco, todas ellas ligeramente fosfatadas. La unidad se caracteriza por ser masiva en su parte inferior y estratificada en su parte superior. Sobreyace de forma concordante a las formaciones Guanajay y Tinguaro, y es cubierta concordantemente por las formaciones Güines y Cojimar.

### FORMACIÓN COJÍMAR (MIOCENO INFERIOR - MEDIO, N1 2 C)

Se expresa con amplia distribución en forma de bandas anchas en la parte central y meridional del municipio. En su área de distribución se desarrollan asentamientos poblacionales e industriales. Las mayores elevaciones del territorio, (Alturas del Cacahual) están vinculadas con esta unidad.

Litológicamente están constituidas por margas calcáreas a arcillosas, masivas, de color gris, frescas y amarillo crema cuando están alteradas, calizas biodetríticas de color blanco a blanco - crema, calcarenitas de matriz margosas y arcillas. Es común en las margas la presencia de fragmentos de microfósiles diversos.

Yace concordantemente sobre las formaciones Colón y Jaruco y discordantemente sobre las formaciones Consuelo y Guanajay. Es cubierta a su vez concordantemente por la formación Güines. Es un equivalente temporal de la secuencia baja y media de la Formación Güines.

En el capítulo III del EIA “Ampliación del aeropuerto internacional José Martí”, se realizaron las siguientes observaciones.

A kilómetro y medio al noroeste de la pista del aeropuerto corre una falla normal con dirección noroeste-suroeste. Toda el área del aeropuerto se ubica en el bloque hundido de dicha falla que actúa como control tectónico de la cuenca endorreica. En el bloque levantado afloran rocas algo más antiguas (formación Emanto del Eoceno superior) de composición margosa, las cuales pueden ser observadas en el poblado de Wajay. Hacia el noroeste, en Calabazar aparecen en superficie las calizas más jóvenes del entorno (formación Güines del Mioceno medio-parte alta), (figura 2). Todas estas formaciones están afectadas también de procesos cárnicos.

En junio de 1996, la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) realizó el estudio ingeniero geológico en el área de la Terminal 3. La cala más profunda (No. 23 con X= 355700, y Y= 352400) alcanzó 19,5 m y llegó hasta las rocas carbonatadas de la formación Cojimar. El resto de las calas realizadas permitió caracterizar el corte del terreno, (de arriba hacia abajo) del modo siguiente:

- Suelo ferralítico rojo - espesor promedio 0,5 m.
- Mezcla de suelo y fragmentos de calizas (relleno) - espesor medio 0,5 m.
- Arcilla roja plástica - espesor medio 1,5 m. Poco permeable.
- Bolsones de arcilla de diferentes colores (rojo, ocre, marrón) con fragmentos de calizas muy meteorizadas, espesor medio 10,5 m. Poco permeables.
- Calizas areno-arcillosas muy porosas (Formación Cojimar).

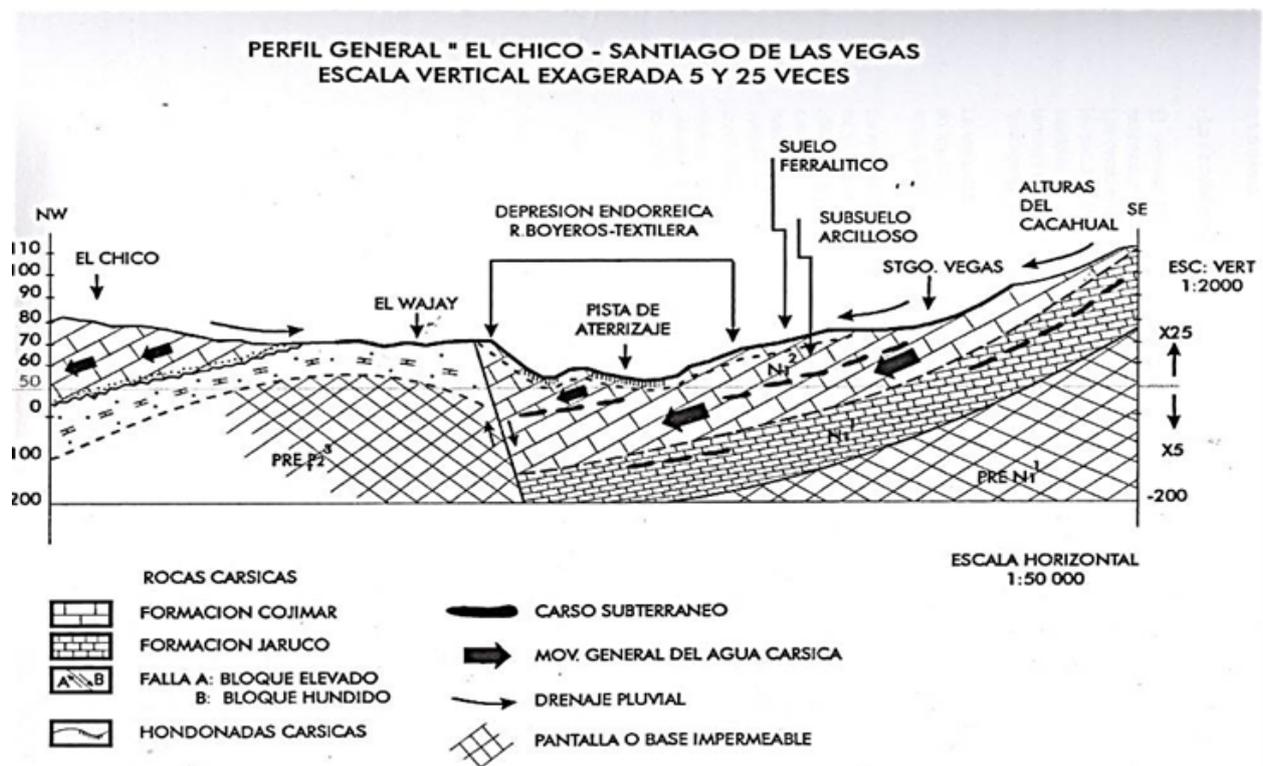


Figura 2. Perfil general "El Chico-Santiago de las Vegas" [Fuente EIA 1996]

## GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología que caracteriza la región es la llanura cársica. En la región predominan las pendientes planas, (hasta un 10 %). Los elementos geomorfológicos más notables de la depresión endorreica Rancho Boyeros-Textilera son los siguientes:

- Hondonadas cársicas: La mayor ocupa el sector central de las pistas del aeropuerto y parte del área de la Terminal No.3. La cota mínima se ubica hacia el centro de la hondonada y es de +58 m. Otras hondonadas cársicas menores se localizan al sur de Fontanar.
- Dolinas cársicas: Oquedades semicirculares de 100 a 300 m. de diámetro que se expresan pobremente en la superficie del terreno, pero se observan bien en las imágenes de las fotos aéreas.
- Ausencia de cursos fluviales permanentes o semipermanentes en toda la extensión de la depresión lo que impide el drenaje eficiente de las aguas pluviales y provoca su estancamiento e inundaciones en épocas de grandes precipitaciones, agravado esto por la pobre permeabilidad de los suelos. Lo anterior es la causa de la presencia de pantanos y lagunas, cuya extensión y número se incrementan en dirección a la Textilera de Ariguanabo.
- El único curso fluvial de importancia relativa que transporta agua a la depresión es el río Govea y el único que drena desde la depresión es el río San Antonio de los Baños que nace en el mismo borde de la citada depresión y corre hacia el sur a lo largo de unos 8 kilómetros hasta escurrirse totalmente a través de un sumidero cársico.

El curso superficial se manifiesta en forma de hondonada y dolinas, pero el más importante es el curso subterráneo. La formación Cojimar y Jaruco presentan capas alternas de calizas porosas afectadas por procesos cársicos y capas de calizas margosas no carsificadas. El espesor total de ambas

formaciones puede alcanzar hasta 150 m. La inclinación general de las capas es suave (no mayor de 5° - 6°) hacia el norte.

La geomorfología que caracteriza la región es la llanura cársica. Esta llanura suavemente ondulada sólo está alterada por los bloques de levantamiento contemporáneo, estos bloques se levantan de 1 a 2 m sobre el medio circundante. Constituida por sedimentos carbonatados del Mioceno, por lo cual el carso está bien desarrollado y da lugar a extensos campos de lápiz y algunas grutas.

Es una región de llanura estructuro-fluvial, carsificada, cuya altitud disminuye desde los bordes hacia el interior; por ejemplo, desde cota de +90 a +100 m al SW, en el área de Santiago de las Vegas, hasta una cota de +60 a +70m, o menos, hacia el centro en Boyeros, donde se encuentra el aeropuerto).

La geomorfología es un elemento complejo que agrupa diversos aspectos del medio. El aspecto descriptivo fundamental de la geomorfología es la topografía. Otros aspectos a tener en cuenta son la pendiente y la altitud. Para el caso de las obras de la ampliación, el terreno mantiene su clasificación como terrero llano, por lo que no hay cambios apreciables en la topografía del área. El impacto es irrelevante.

Los fenómenos físicos geológicos en la zona estudiada están representados por los sedimentos arcillosos de cobertura y el gran desarrollo del carso en las calizas cavernosas de la formación Güines.

## HIDROGEOLOGÍA

Como se puede apreciar en la figura 3, la zona del aeropuerto se encuentra en la cuenca Ariguanabo-Almendares, ubicada en la zona descarga del acuífero Ariguanabo.

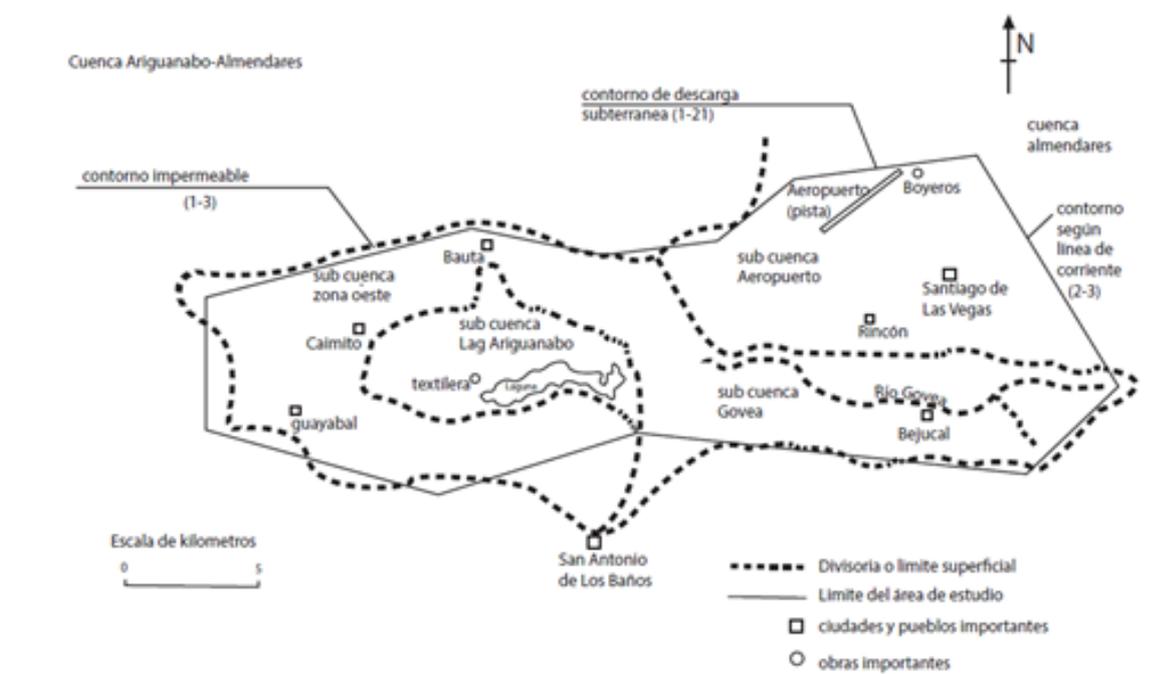


Figura. 3. Cuenca Ariguanabo-Almendares

En las figuras 4 y 5 se pueden apreciar que aguas abajo del aeropuerto José Martí y no muy lejos de este, existen varias fuentes de abasto de la ciudad de La Habana.

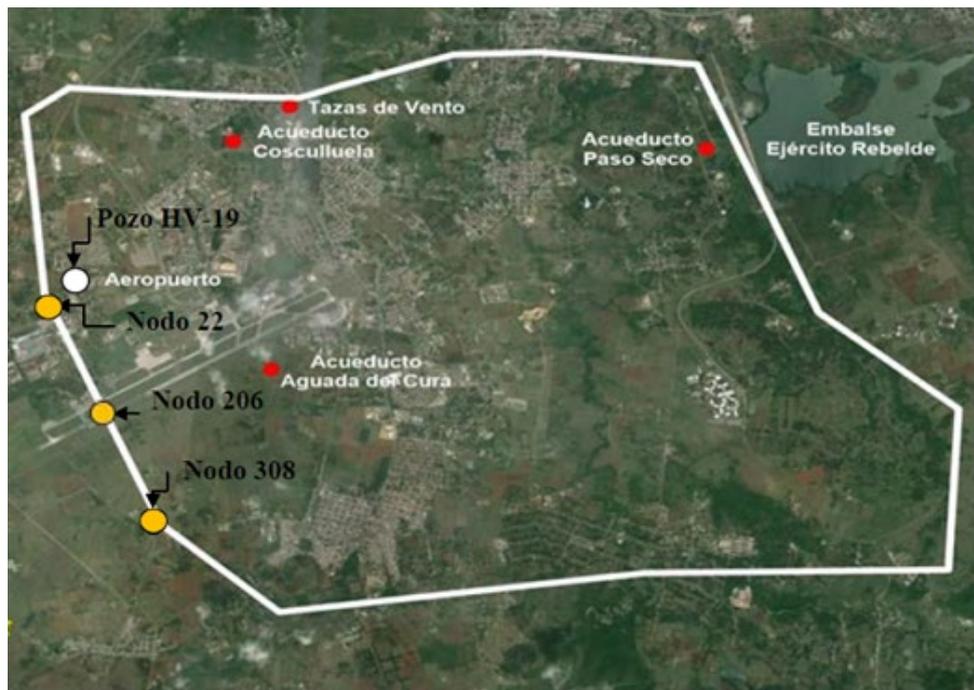


Figura 4. Imagen satelital del aeropuerto y acueductos, [Cabrera E. H. 2014]

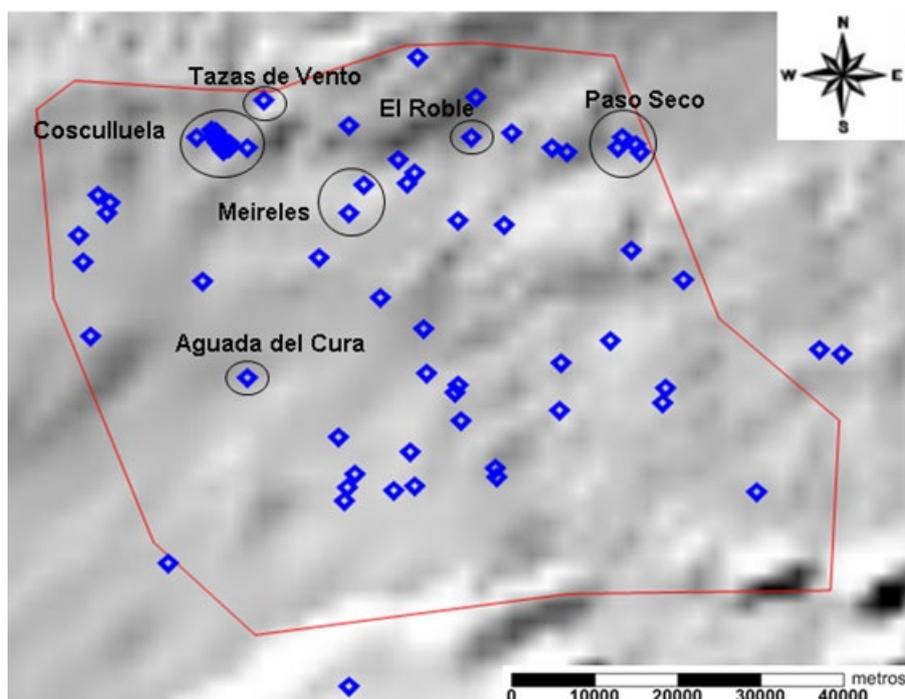


Figura 5. Otras fuentes de captación de aguas subterráneas, [Cabrera E. H. 2014]

El acueducto Cosculluela se explota hace aproximadamente 50 años y cuenta con 9 pozos de 50-70 m de profundidad, ubicados en un área de 50 x 150 m. El gasto total de extracción es de 0,8-1,65 m<sup>3</sup>/s.

De los acueductos antes mencionados se muestran la imagen del acueducto Aguada del Cura, próximo a la Terminal 1 del aeropuerto, el cual utiliza una galería de captación que tiene una longitud

de 600 m, unida a un pozo central de un diámetro de 15 m y una profundidad de 3,5 m. El gasto de la fuente varía de 0,5 a 1,36 m<sup>3</sup>/s y está explotándose desde hace más de 80 años

Otro acueducto que por su importancia histórica y por la magnitud de los aportes de abasto a la ciudad de la Habana, es el acueducto de Vento que utiliza como obra de captación de los manantiales las Tazas Grande y Chica que se muestran en la imagen satelital de la figura 6. Las Tazas de Vento se explotan desde finales del siglo XIX, su gasto depende de los niveles del agua subterránea y varían de 0,76 a 3 m<sup>3</sup>/s y constituye el principal punto de descarga del acuífero Vento.



Figura 6. Tazas Chica y Grande de los manantiales de Vento, [Cabrera E. H. 2014]

### MODELACIÓN MATEMÁTICA DE UN SECTOR DEL ACUÍFERO VENTO

Como parte de investigaciones realizadas para evaluar el impacto de la operación de los acueductos a que se hicieron referencia anteriormente sobre los manantiales de Vento, se modeló un sector del acuífero Vento cuyos límites se indicaron en la figura 4, (Cabrera, 2014 y Chirinos 2015). Con posterioridad a los trabajos mencionados anteriormente, se procedió a realizar una nueva calibración considerando entrada subterránea desde el acuífero Ariguanabo, posteriormente se realizó la simulación de los años 2004 y 2005, donde los períodos húmedos del 2005 provocaron oscilaciones importantes en los niveles de las aguas subterráneas.

En la figura 4 se indican las ubicaciones del pozo de observación HV-19 y del nodo 22.

En la figura 7 se comparan los datos de los niveles observados y los simulados durante los años 2004 y 2005, de donde se puede observar una buena correspondencia.

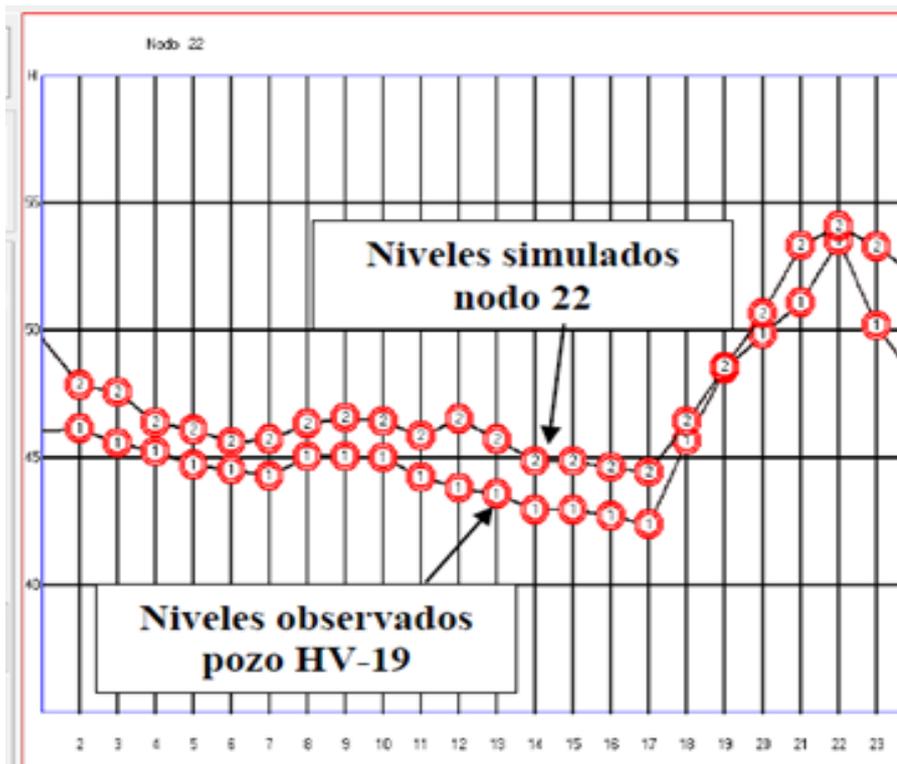


Figura 7. Niveles simulados en el nodo 22 y observados en el pozo HV-19, correspondiente a los años 2004 y 2005

Los mapas de hidroisohipsas o curvas de nivel de las aguas subterráneas simulados: a finales del periodo seco del año 2005 (Abril) y a finales del periodo húmedo del propio año (Octubre), se muestran en las figuras 8 y 9.

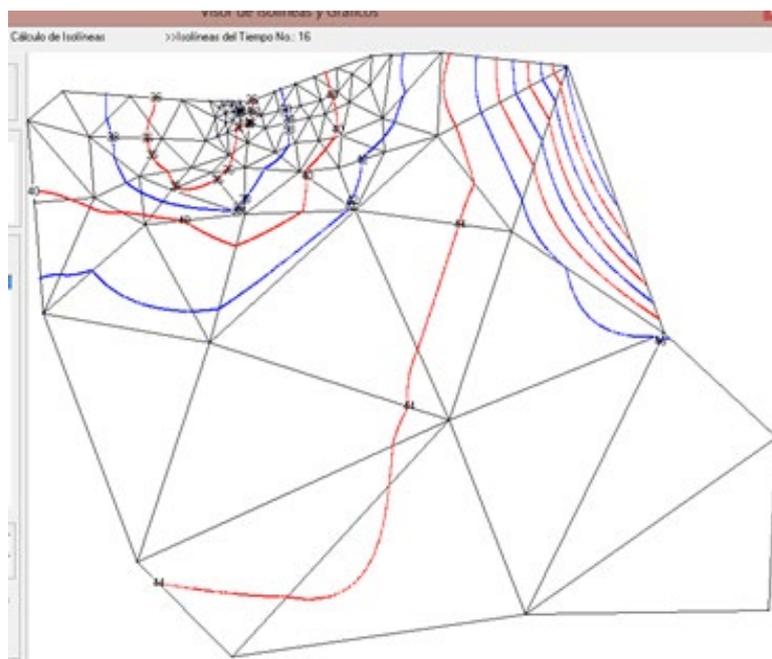


Figura 8. Mapa de hidroisohipsas simulado correspondiente a finales del periodo seco del 2005

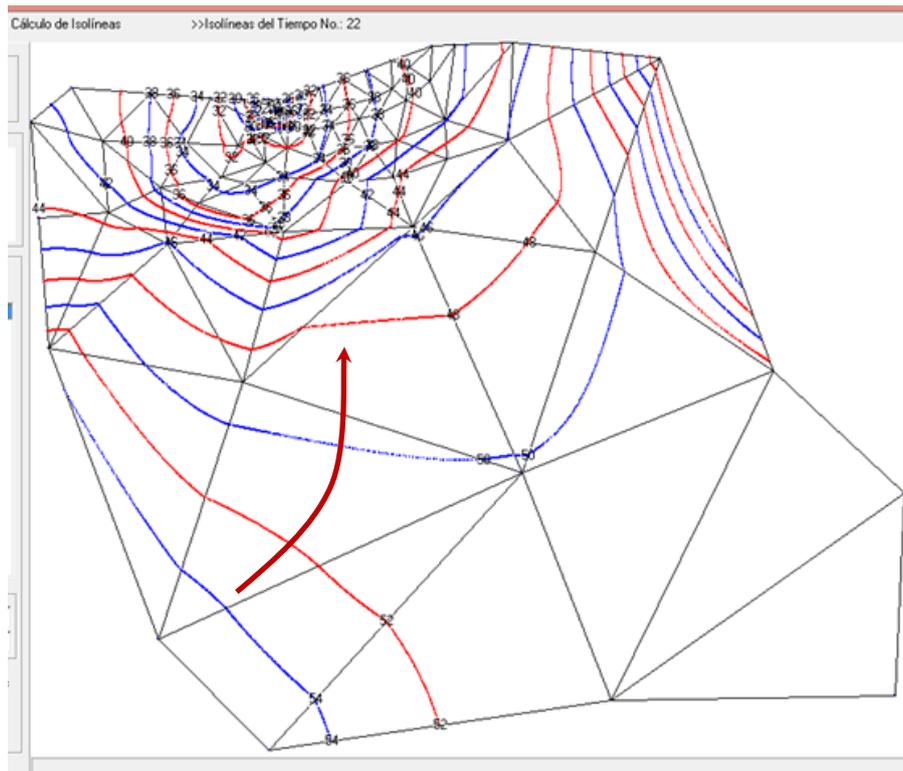


Figura 9. Mapa de hidroisohipsas simulado correspondiente a finales del periodo húmedo del 2005

El comportamiento de las curvas de nivel de ambos periodos es similar, solo variando los gradientes de flujo, pero no las direcciones principales del flujo, desde la zona del aeropuerto hacia las fuentes de abasto (indicadas con color rojo), por lo que cualquier contaminante seguiría dicha dirección preferencial.

### SIMULACIÓN DE UN EVENTO EXTREMO A FINALES DE UN PERÍODO HÚMEDO (OCTUBRE DEL 2005)

Con el objetivo de valorar mediante la simulación, lo que pudiera suceder al producirse al final de un periodo húmedo, un evento extremo de similares características al ya señalado del ciclón Frederick del año 1979, se realizó una simulación con pasos de tiempo de 6 horas y con una lámina de lluvia de 500 mm en 36 horas, utilizando como estado inicial el correspondiente a octubre del 2005 y con una explotación del 50% de la usual para las fuentes de abasto.

Para ilustrar la importancia del comportamiento hidrodinámico del acuífero, se simularon dos casos: el primero considerando que el acuífero siempre se comportara como libre, utilizando el coeficiente de almacenamiento obtenido del proceso de simulación y otra variante, suponiendo que este funcionara como confinado con un coeficiente de almacenamiento cien veces inferior.

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 10 y 11, donde se puede apreciar que los pozos del aeropuerto se convierten en surgentes, ya que las cotas piezométricas son superiores a las del terreno y que el proceso de disminución de los niveles es muy lento, pudiendo llegar a varios días la inundación, tal y como sucedió durante el huracán Frederick cuando aviones quedaron en zonas inundadas por varios días.

Cuando el acuífero comienza a trabajar como confinado, el nivel piezométrico de las aguas subterráneas supera rápidamente el nivel del terreno y la surgencia es superior.

De acuerdo a los resultados mostrados anteriormente, se alerta a las empresas interesadas de que el sistema actual de control de inundaciones mediante pozos de recarga deja de ser efectivo frente a eventos extremos por intensas lluvias a finales de un periodo húmedo.

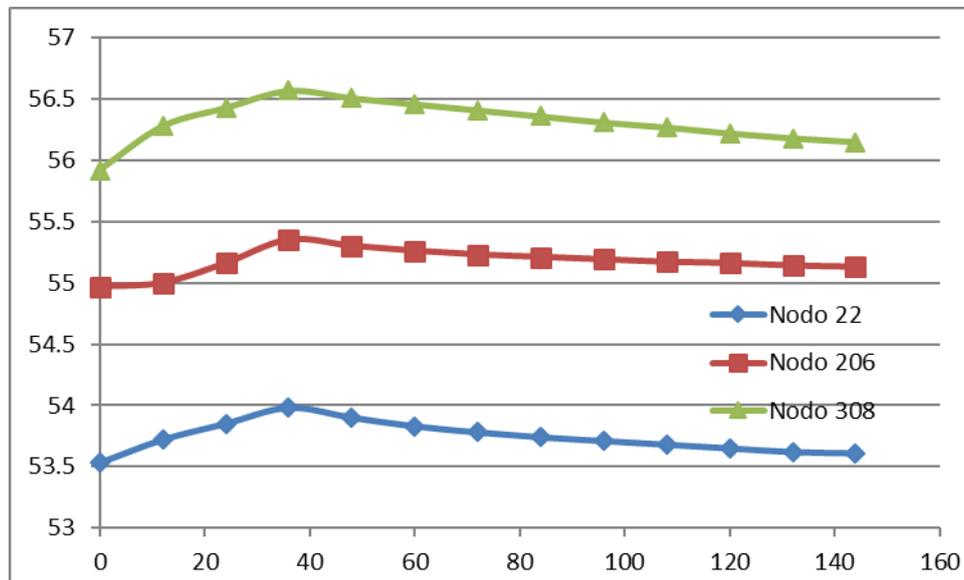


Figura 10. Niveles simulados en los nodos indicados en la figura 7, considerando que el acuífero trabajara como libre

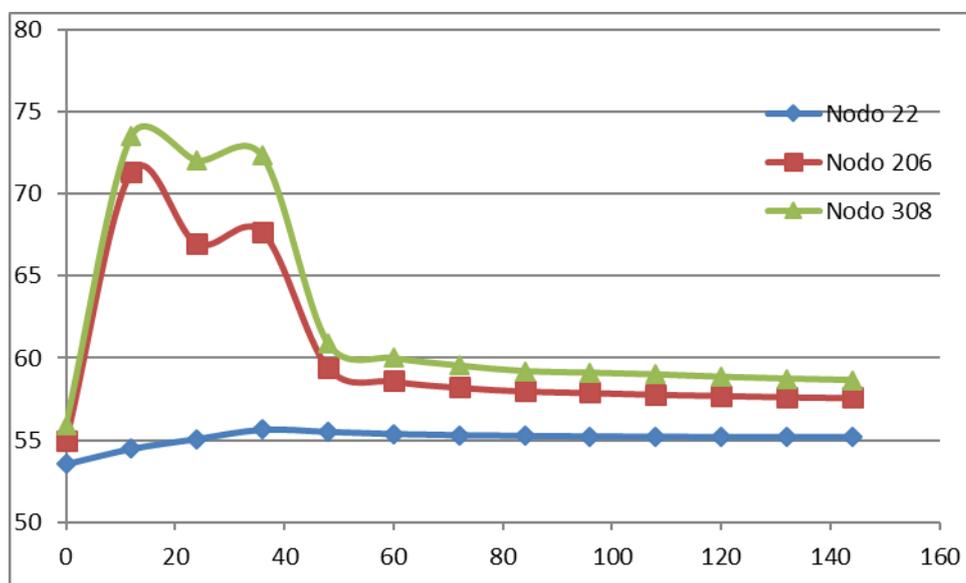


Figura 11. Niveles simulados en los nodos indicados en la figura 7, considerando que el acuífero trabajara como confinado

Beilin V., 1984, plantea que el sistema de recarga construido podrá ser efectivo (con condiciones de nivelación y organización de todo el sistema) solamente en los años que se produzca una inundación local en lugares aislados y durante un tiempo pequeño, sin una elevación apreciable del nivel de las aguas subterráneas y sin el remanso del agua subterráneo de las áreas que le rodean. Recomienda

una serie de investigaciones especiales para la realización de la probabilidad de cálculo de las precipitaciones y el balance hídrico general. Este trabajo presupone como cota máxima de inundación 52.50 por las características técnicas de las instalaciones del aeropuerto: Pista de aterrizaje, base técnica y terminal aérea.

En el estudio de la empresa de Investigaciones y Proyectos, 2012, sobre el estado del sistema de drenaje del aeropuerto José Martí, indica su estado deplorable al estar solo en capacidad de funcionamiento el 25% aproximadamente de los pozos construidos.

También se alerta sobre el sistema de control de inundaciones mediante pozos de recarga construido en el área del desplome de una caverna al lado de la avenida Van Troi por la que se accede a la Terminal 1 del aeropuerto y que se ilustra en la figura 12, la cual agrava la situación por encontrarse aguas arriba del aeropuerto.



Figura 12 Pozos de recarga en la zona hundimiento desplome de una caverna.

### 03 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El sistema actual de protección contra inundaciones del aeropuerto José Martí mediante pozos de recarga solo es capaz de evitar estas, cuando el nivel de las aguas subterráneas esté profundo y alejado del techo del acuífero y no sean lluvias intensas y prolongadas, ya que menos del 50% de los pozos son capaces de funcionar de forma aceptable.

De producirse un evento extremo de intensas lluvias al final de un periodo húmedo, los pozos de recarga pueden convertirse en surgentes, incrementando las inundaciones y provocando el cierre del aeropuerto por varios días.

Los peligros de contaminación de las aguas subterráneas por el arrastre de residuales líquidos de las actividades aeroportuarias, se incrementa significativamente por el sistema actual de pozos de recarga.

Los pozos de recarga situados en la depresión del terreno al lado de la avenida Van Troi, es altamente peligrosa por no disponer de sistemas de protección contra la contaminación de las aguas subterráneas y contribuye a incrementar los peligros de inundación del aeropuerto.

## RECOMENDACIONES

El sistema de drenaje actual de las aguas pluviales mediante pozos de recarga en la zona del aeropuerto José Martí debe ser sustituido por uno superficial porque no es posible garantizar la protección de las aguas subterráneas de la contaminación y con la posibilidad de que estos se conviertan en pozos surgentes en lugar de pozos de recarga.

Ubicar todos los pozos y calas, para que una vez construido el nuevo sistema de drenaje, proceder al sellado de estos y de esa forma garantizar la protección contra la contaminación de las aguas subterráneas.

## 04 REFERENCIAS

- Beilin V.** (1984) Informe para la argumentación hidrogeológica del proyecto de medidas contra inundaciones del Aeropuerto “José Martí” y de la Textilera “Ariguanabo”. Archivo EIPHH.
- Borden R. C. and Kao C. M.** (1992) “Evaluation of groundwater extraction for remediation of petroleum-contaminated aquifers”. Water Environment Research. Vol. 64, No. 1 pp 28-36. ISSN: 1554-7531
- Cabrera E.** (2014) “Modelación matemática del acuífero de Vento”, Trabajo de Diploma. Instituto Superior Politécnico “José A. Echeverría”, La Habana, Cuba.
- Chirinos D.** (2015) “Modelación matemática de un sector del acuífero Vento”. Trabajo de Diploma. Instituto Superior Politécnico “José A. Echeverría”, La Habana, Cuba.
- López E.** (2002). “Estudio hidrogeológico para el drenaje pluvial de Santiago de las Vegas y repartos Mulgoba y Primero de Mayo”. Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Habana del INRH.
- GEMA-MES** (2014). “Estudio de Impacto Ambiental. Ampliación del aeropuerto internacional José Martí”.
- Hernández A.** (2000). “Modelación del transporte de productos del petróleo en las aguas subterráneas en un acuífero poco profundo próximo al poblado de Güines. Cuba”. Memorias del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Tomo II, pág 13-22. ISBN: 9789503302682. Córdoba. Argentina.
- INRH.** (2012). “Estudio hidrogeológico drenaje pluvial taller de reparaciones de aeronaves aeropuerto internacional José Martí”
- INRH.** (2014). “Estudio hidrogeológico para el drenaje con pozos de la ampliación Terminal 3 del aeropuerto José Martí”.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Armando O. Hernández Valdés <https://orcid.org/0000-0002-2479-6854>

Realizó el artículo en su totalidad.

## Remoción de contaminantes en aguas residuales mediante el polielectrolito catiónico extraído de las semillas de *Moringa oleífera*

**Holanda Teresa Vivas Saltos**

E-MAIL: teresa.vivas@espam.edu.ec

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Ecuador.

**José Manuel Calderón Pincay**

E-MAIL: jose.calderon@espam.edu.ec

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Ecuador.

Laura Gema Mendoza Cedeño

E-MAIL: laura.mendoza@espam.edu.ec

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Ecuador.

**José Gerardo Cedeño Zambrano**

E-MAIL: gerceza@gmail.com

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Ecuador.

### RESUMEN

Esta investigación pretende evaluar la eficiencia del polielectrolito catiónico de la *Moringa oleífera* en la remoción de contaminantes de aguas residuales. Se aplicó un diseño completamente al azar en un arreglo unifactorial, con cuatro tratamientos y tres repeticiones. El coagulante polielectrolito catiónico extraído de la semilla de moringa tuvo una dosis de 1, 2 y 4 mL y como testigo el sulfato de aluminio. Se tomó una muestra de 9000 mL de agua residual, se realizó la caracterización física presentando 120 mg/L de SST, 43,52 FAU de turbidez y 456 Pt/Co de color. No hubo diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo a la prueba de ANOVA ( $p: 0.707$ ), por lo que se evidencia que el tratamiento a base de moringa en sus diferentes concentraciones es un buen coagulante para remover contaminantes en aguas residuales.

**PALABRAS CLAVES:** Agua residual, coagulante, *Moringa oleífera*, polielectrolito catiónico, remoción

## Removal of pollutants from wastewater using cationic polyelectrolyte extracted from *Moringa oleifera* seeds

### ABSTRACT

This research aims to evaluate the efficiency of the cationic polyelectrolyte of *Moringa oleifera* in removing pollutants from wastewater. A completely randomized design was applied in a unifactorial arrangement, with four treatments and three repetitions. The cationic polyelectrolyte coagulant extracted from the moringa seed had a dose of 1, 2 and 4 mL and aluminum sulfate as a control. A sample of 9000 mL of residual water was taken, the physical characterization was carried out showing 120 mg/L of SST, 43.52 FAU of turbidity and 456 Pt / Co of color. There were no significant differences between treatments according to the ANOVA test ( $p: 0.707$ ), so it is evidenced that the treatment based on moringa in its different concentrations is a good coagulant to remove contaminants in wastewater.

**KEYWORDS:** Waste water, coagulant, *Moringa oleifera*, cationic polyelectrolyte, removal

## 01 INTRODUCCIÓN

El aumento de la contaminación ambiental conduce a un deterioro de la calidad del agua y requiere la eliminación de una variedad de contaminantes de las aguas residuales superficiales (Ghimici, 2016; Tao et al., 2016). Actualmente, los coagulantes o floculantes tradicionales utilizados en el tratamiento de aguas pueden contrarrestar estos problemas, sin embargo, existe una gran necesidad de encontrar algunos agentes más biodegradables, rentables y más respetuosos con el medio ambiente como sustitutos de las soluciones existentes (Grenda et al., 2020; Watanabe et al., 2016).

Según el Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP, 2018) se espera que el deterioro de la calidad del agua aumente durante las próximas décadas, lo que conlleva un incremento de las amenazas para la salud humana, el medio ambiente y el desarrollo sostenible. Además, se estima que el 80% del total de las aguas residuales se libera al medio ambiente sin ningún tratamiento previo (WWAP, 2017). En Ecuador solo el 8% de las aguas negras tienen algún nivel de tratamiento (Cabrera et al., 2010). Uno de los principales contaminantes del agua son los sólidos suspendidos totales (SST), que contribuyen a mayores costos para el tratamiento del agua, la disminución de los recursos pesqueros y la estética general del agua (Verma et al., 2013; He et al., 2019).

La purificación no convencional de agua cruda se puede dar utilizando coagulantes naturales, entre ellos el extracto de semillas de *Moringa oleífera*, que remueve los coloides de aguas crudas y contaminadas (Vunain et al., 2019). Además, este constituye una alternativa a otros compuestos, que en grandes cantidades llegan a ser tóxicos, causando efectos negativos en la salud humana (Acevedo, 2019). El presente estudio contribuye a los esfuerzos para identificar un coagulante natural alternativo sostenible, ecológico y de bajo costo para el tratamiento de aguas residuales en Manabí y para determinar si el polielectrolito catiónico de la *Moringa (Moringa oleífera)* es eficiente en la remoción de sólidos suspendidos totales, turbidez y color. Se planteó como objetivo evaluar la eficiencia del polielectrolito catiónico de la *Moringa (Moringa oleífera)* en la remoción de contaminantes de la Planta de tratamiento de agua residual de la ESPAM MFL.

## 02 METODOLOGÍA

### DISEÑO EXPERIMENTAL

En esta investigación se aplicó el método experimental que permitió la manipulación de las variables para obtener el mejor resultado, para ello se necesitó una secuencia de las pruebas de jarras realizadas en el laboratorio. Además, se empleó el factor en estudio, que es la cantidad (mL) de polielectrolito catiónico y (g) Sulfato de aluminio.

#### **Niveles del factor en estudio:**

Sulfato de aluminio (P0) = 0,5 g

Polielectrolito (P1) = 1 mL

Polielectrolito (P2) = 2 mL

Polielectrolito (P3) = 4 mL

Se realizaron cuatro tratamientos, estando compuestos por los tres niveles del factor en estudio más el testigo, cada uno con tres repeticiones  $(P+1) * r$ , dando un total de 12 unidades experimentales (Tabla 1). El experimento fue conducido bajo los lineamientos del Diseño Completamente al Azar (DCA) en un arreglo unifactorial  $(P+1)$ .

Tabla 1. Tratamientos empleados en la investigación

Tratamiento	Unidades experimentales	Dosis
T <sub>0</sub>	R <sub>1</sub>	Testigo
	R <sub>2</sub>	
	R <sub>3</sub>	
T <sub>1</sub>	R <sub>1</sub>	1 mL
	R <sub>2</sub>	
	R <sub>3</sub>	
T <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	2 mL
	R <sub>2</sub>	
	R <sub>3</sub>	
T <sub>3</sub>	R <sub>1</sub>	4 mL
	R <sub>2</sub>	
	R <sub>3</sub>	

Las combinaciones utilizadas se describen en la tabla 2:

Tabla 2. Descripción de las unidades experimentales

Nomenclatura	Unidad experimental	Combinaciones		Tiempo de agitación
		Polielectrolito catiónico	Agua Residual	
T <sub>0</sub>	R <sub>1</sub>	Testigo	500 mL	15 minutos
	R <sub>2</sub>			
	R <sub>3</sub>			
T <sub>1</sub>	R <sub>1</sub>	1 ml	500 mL	15 minutos
	R <sub>2</sub>			
	R <sub>3</sub>			
T <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	2 ml	500 mL	15 minutos
	R <sub>2</sub>			
	R <sub>3</sub>			
T <sub>3</sub>	R <sub>1</sub>	4 ml	500 mL	15 minutos
	R <sub>2</sub>			
	R <sub>3</sub>			

Se utilizó la Estadística Inferencial para contrastar las hipótesis planteadas, utilizando el software estadístico InfoStat. Se desarrollaron las siguientes pruebas:

- Análisis de la Varianza (ANOVA) - unifactorial.
- Prueba de hipótesis.
- Gráficos Estadísticos.

Tabla 3. Fuentes de interés del ANOVA del DCA

Fuente de variación	Grados de libertad
<b>Total</b>	<b>11</b>
<b>Tratamientos</b>	<b>4</b>
<b>Error Experimental</b>	<b>8</b>

### EXTRACCIÓN DEL POLIELECTROLITO CATIÓNICO DE LA MORINGA OLEÍFERA

Se recolectaron en la ciudad de Calceta, un total de 2000 semillas de moringa en un periodo de 6 meses para el desarrollo de la presente investigación. Siguiendo el método de García (2007), se retiraron las semillas de *Moringa Oleífera* manualmente de las vainas, luego se secaron durante una hora en una estufa a 105 °C, se trituraron en un molino manual y se tamizaron en una malla de 500 micras, dando como resultado 800 g de harina.

Se prepararon los 800 g de harina en 400 mL de alcohol etílico al 95% de pureza, se removió la mezcla por 30 minutos, se dejó reposar durante una hora, con el objetivo de extraer el aceite, luego, se preparó 5 g de cloruro de sodio en 500 mL de agua destilada y se procedió a agregar la harina ya preparada removiéndola durante 15 minutos, una vez transcurrido el tiempo se filtró la mezcla, obteniendo 400 mL de polielectrolito catiónico de la semilla de *Moringa oleífera*. Después de obtener el extracto del compuesto activo se dejó reposar por 24 horas en un refrigerador a 4°C.

### CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

Se realizó una toma de muestra simple en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la ESPAM MFL, según la norma NTE INEN 2169 (2013). La muestra de agua fue llevada al laboratorio del área Agroindustrial de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí “MFL”, donde se realizaron los respectivos análisis físicos de sólidos suspendidos totales mediante el análisis gravimétrico y aplicando la siguiente ecuación.

$$SST = \frac{(ST(g) - SDT(g)) * 1\,000\,mg}{\text{Volumen de la muestra (L)}} \quad (1)$$

Donde:

ST = Sólidos totales en los 100 mL muestra (g)

SDT = Sólidos disueltos totales en los 100 mL muestra (g)

SST = Sólidos suspendidos totales (mg/L)

La turbidez y color se determinaron mediante el equipo colorímetro marca Spectroquant Move 100 y se obtuvieron los resultados del agua residual antes del tratamiento, como se muestran en la tabla 4:

Tabla 4. Análisis de agua residual

Sólidos Suspendidos totales			Turbidez (FAU)	Color (Pt/co)
ST (g)	SDT (g)	SST (mg/L)		
0,207	0,195	120	43,52	456

### DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DEL AGUA RESIDUAL CON LA MEJOR DOSIS DEL POLIELECTROLITO CATIÓNICO

Se aplicó el método de prueba de jarra para determinar la mejor dosis de polielectrolito catiónico de la Moringa oleífera; para el desarrollo de los análisis se realizaron tres repeticiones para cada uno de los tratamientos: T<sub>0</sub> (testigo), T<sub>1</sub> (1 mL), T<sub>2</sub> (2 mL) y T<sub>3</sub> (4 mL).

En cada vaso del equipo de jarras se colocaron 500 mL de agua residual, previamente agitada por un tiempo de 2 minutos, se añadió las diferentes dosis de polielectrolito catiónico de la moringa y sulfato de aluminio en cada vaso. Se ubicaron las paletas dentro de las jarras, activando el sistema de agitación a una velocidad máxima de 280 rpm durante 30 segundos de agitación, luego se redujo la velocidad de las paletas a 140 rpm y se dejó flocular por 15 minutos.

Una vez transcurrido el tiempo de agitación, se detuvo el agitador, se extrajeron las paletas y se dejó sedimentar por un lapso de tiempo de 24 horas, pasado el tiempo de sedimentación, se tomaron las muestras de cada jarra para determinar los parámetros de sólidos suspendidos totales, turbidez y color.

### DETERMINACIÓN DE LA MEJOR DOSIS

Para la determinación de la mejor dosis se aplicó la siguiente ecuación:

$$E = \frac{S_{inicial} - S_{final}}{S_{inicial}} * 100 \quad (2)$$

Donde:

*E*: Eficiencia de remoción (%)

*S<sub>inicial</sub>*: Carga contaminante antes del tratamiento

*S<sub>final</sub>*: Carga contaminante después del tratamiento

## 03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se determinó mediante análisis de varianza (ANOVA) que los tratamientos no presentan diferencias significativas en la remoción de sólidos suspendidos totales (valor P igual a 0.707), es decir hay homogeneidad entre ellos, a un nivel de confianza del 95%.

Tabla 5. ANOVA de los resultados de la variable SST

F.V.	GL	SC	CM	F	p – valor
<b>Tratamiento</b>	3	141.67	47.22	0.48	<b>0.707</b>
<b>Error</b>	8	793.33	99.17		
<b>Total</b>	11	935.00			

En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio de la muestra de agua, en cada una de las repeticiones y tratamientos.

Tabla 6. Resultados de los análisis de cada una de las repeticiones

Tratamiento	SST en agua residual	ST (g)	SDT (g)	SST en agua tratada	Tabla 12. LMP de SST (TULSMA)	Remoción (%)	Promedio (%)
T <sub>0</sub>	120 mg/L	0,2045 g	0,2011 g	34 mg/ L	100 mg/ L	92	79,67
	120 mg/ L	0,1945 g	0,1922 g	23 mg/ L	100 mg/ L	86	
	120 mg/ L	0,2000 g	0,1987 g	13 mg/ L	100 mg/ L	61	
T <sub>1</sub>	120 mg/ L	0,1980 g	0,1970 g	10 mg/ L	100 mg/ L	92	86,00
	120 mg/ L	0,1940 g	0,1920 g	20 mg/ L	100 mg/ L	83	
	120 mg/ L	0,1920 g	0,1910 g	20 mg/ L	100 mg/ L	83	
T <sub>2</sub>	120 mg/ L	0,2000 g	0,1980 g	20 mg/ L	100 mg/ L	83	89,00
	120 mg/ L	0,1980 g	0,1970 g	10 mg/ L	100 mg/ L	92	
	120 mg/ L	0,1990 g	0,1970 g	10 mg/ L	100 mg/ L	92	
T <sub>3</sub>	120 mg/ L	0,1970 g	0,1950 g	10 mg/ L	100 mg/ L	92	83,33
	120 mg/ L	0,1950 g	0,1940 g	20 mg/ L	100 mg/ L	83	
	120 mg/ L	0,1930 g	0,1900 g	30 mg/ L	100 mg/ L	75	

**Nota.** LMP (Límite Máximo Permissible)

TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente)

Los valores de sólidos suspendidos totales están entre 10-30 mg/l, por debajo de los límites máximos permisibles establecidos en la normativa legal vigente para descargas a un cuerpo de agua dulce del Ministerio del Ambiente (MAE, 2015). Además, una proteína catiónica contenida en el cotiledón de Moringa ayuda a los procesos de coagulación y floculación (Landazuri et al., 2018).

Los resultados presentados en la figura 1 muestran las medias obtenidas de la prueba de SST de cada tratamiento, donde el valor medio con mayor eficiencia fue alcanzado por el tratamiento T<sub>2</sub> (2 mL) obteniendo un 89% en la remoción de sólidos suspendidos totales, seguido por el Tratamiento T<sub>1</sub> (1 mL) con un 86% y el tratamiento T<sub>3</sub> (4 mL) con 83,33%, mientras que el tratamiento que presenta menor eficiencia fue el tratamiento T<sub>0</sub> (Testigo) con 79,67%. Por lo tanto, la dosificación adecuada para remover SST es de 2 mL de polielectrolito catiónico para tratar 500 mL de agua residual (lo que equivale a 4 mL por litro), sin embargo, al aumentar la dosis a 4 mL, los niveles SST vuelven a disminuir. En un estudio comparativo realizado por Montesdeoca et al. (2018), se demostró que el polielectrolito de moringa en dosis de 2 mL presentó el 92% de remoción de SST, resultado similar con la aplicación de la misma dosis de sulfato de aluminio con el 94% de remoción.

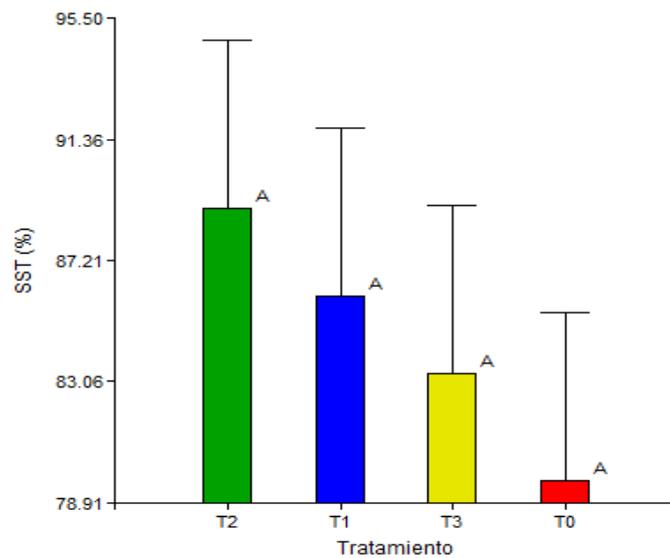


Figura 1. ANOVA de los resultados de la variable SST

En este sentido, se puede afirmar que *M. oleífera* resulta un coagulante efectivo en tratamiento de aguas residuales y es una posible alternativa, ya que no deja residuos tóxicos en el agua tratada que pudieran afectar el organismo, dado su origen vegetal y disminuye gran parte de los sólidos presentes en el agua mediante procesos de adsorción, datos que se comparan con un estudio realizado en Brasil en donde tenían por objetivo comparar la eficiencia de dos coagulantes, el sulfato de aluminio y el polielectrolito catiónico de la semilla de *Moringa oleífera* para la remoción de sólidos, determinando que la diferencia entre los coagulantes es baja, por lo que la moringa podría sustituir a este coagulante sintético (Paredes, 2013).

La turbidez se expresó en %, y se determinó estadísticamente que los tratamientos no presentan diferencia significativa entre sí, con un nivel de confianza del 95% (Tabla 7).

Tabla 7. ANOVA de los resultados de la variable turbidez

F.V.	GL	SC	CM	F	p – valor
Tratamiento	3	1134.25	378.08	1.42	<b>0.307</b>
Error	8	2132.67	266.58		
Total	11	3266.92			

En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio de la muestra de agua, en cada una de las repeticiones y tratamientos.

En la remoción de turbidez con el polielectrolito catiónico de moringa, el valor medio con mayor eficiencia fue T<sub>1</sub> (1 mL) con el 28% y el tratamiento con menor eficiencia fue el T<sub>3</sub> (4 mL) con 10% (Figura 2). Además, existe un rango de significatividad pues los valores muestran que la menor turbidez se presenta en la media del tratamiento T<sub>3</sub>, donde se puede verificar que al aumentar la dosis de 1 mL a 4 mL se redujo la eficiencia de remoción, datos que se pueden comparar con un estudio realizado por Arias et al. (2017) en el que evalúan la semilla de *Moringa oleífera* en el tratamiento de aguas residuales de una central de sacrificio, determinando que la turbidez más baja se obtuvo donde se aplicó la dosis de 150 mL a una concentración del 5% con una remoción entre el 19 al 21%, versus a la dosis máxima de 200 mL con concentración de 20%, se evidencia que no

necesariamente a mayor concentración de solución coagulante se da un mayor nivel de remoción en la turbidez, información que concuerda con Arias y Méndez (2014) mencionan que se necesita menor cantidad de coagulante de la moringa para obtener una eficiencia de remoción superior de turbidez, ya que una sobredosificación del polímero causa un efecto negativo en el proceso físico-químico de coagulación-floculación, afectando el tamaño del floculo, no obstante, grados de remoción de turbidez hasta 24% sugieren una optimización del proceso de extracción del polielectrolito.

Tabla 8. Resultados de los análisis de cada una de las repeticiones

Tratamientos	Agua residual (FAU)	Agua tratada (FAU)	Remoción de turbidez (%)	Promedio de remoción (%)
T0	43,52	25	43	37,00
	43,52	38	13	
	43,52	20	55	
T1	43,52	35	20	28,00
	43,52	36	17	
	43,52	32	47	
T2	43,52	39	10	25,33
	43,52	26	40	
	43,52	35	26	
T3	43,52	47	0	10,00
	43,52	39	10	
	43,52	41	20	

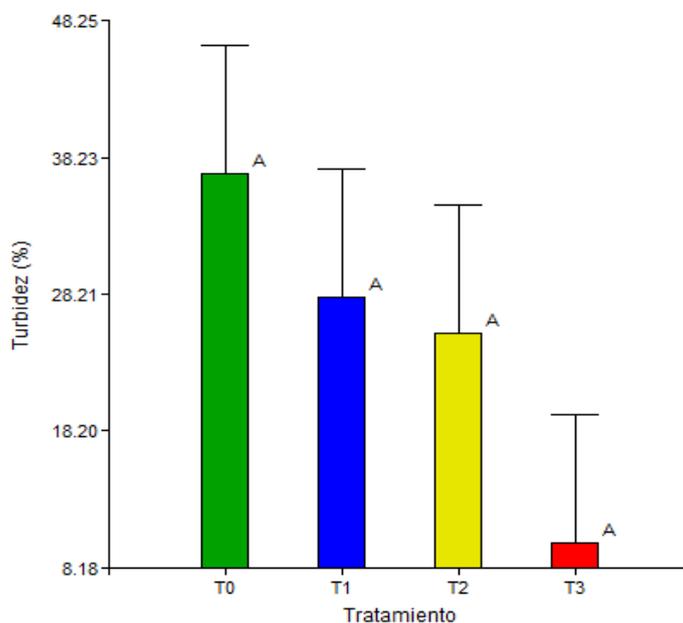


Figura 2. Categorización mediante la prueba de medida de la Variable turbidez

Existen varios estudios que informan sobre la capacidad de *Moringa oleífera* en la eliminación de turbidez debido a la proteína catiónica contenida en el cotiledón de la semilla (Baptista et al., 2017), concordando con los resultados obtenidos. Además, Landazuri et al. (2018) lograron demostrar los efectos bactericidas de *Moringa oleífera* al reducir en 89.7% la cantidad de *E. coli* presente en el Río Monjas de Quito-Ecuador.

En el color los tratamientos no presentan diferencias significativas, a un nivel de confianza del 95%, con un valor de P de 0.2617 (Tabla 9).

Tabla 9. ANOVA de los resultados de la variable de color

F.V.	GL	SC	CM	F	p – valor
<b>Tratamiento</b>	3	762.92	254.31	1.61	<b>0.2617</b>
<b>Error</b>	8	1262	157.75		
<b>Total</b>	11	2024.92			

En la Tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio de la muestra de agua, en cada una de las repeticiones y tratamientos.

Tabla 10. Resultados de los análisis de cada una de las repeticiones

Tratamientos	Agua residual (Pt/Co)	Agua tratada (Pt/Co)	Remoción de turbidez	Promedio de remoción (%)
<b>T0</b>	456	324	29	<b>25,67</b>
	456	443	3	
	456	249	45	
<b>T1</b>	456	384	16	<b>15,33</b>
	456	421	8	
	456	356	22	
<b>T2</b>	456	444	3	<b>6,00</b>
	456	457	0	
	456	387	15	
<b>T3</b>	456	551	0	<b>6,67</b>
	456	383	16	
	456	440	4	

Para el color (figura 3), el valor promedio con mayor eficiencia fue el tratamiento T<sub>0</sub> (testigo) con 25,67 % de remoción, seguido por el tratamiento T<sub>1</sub> (1 mL) con 15,33 % y el tratamiento con menor eficiencia fue el tratamiento T<sub>2</sub> (3 mL) con 6%. Según los resultados obtenidos se puede verificar que la eficiencia de remoción en las variables de color y turbidez fueron de entre 6-28%, menores a comparación de la remoción de sólidos suspendidos totales que estuvieron entre 83-89%, datos que se relacionan con un estudio realizado por Moreno (2018), donde menciona que a pesar de que investigaciones afirman que el polielectrolito catiónico de la *Moringa oleifera* presenta una buena eficiencia como coagulante natural en relación a los sintéticos, no interaccionaron lo suficiente con las partículas coloidales responsables de la turbidez y el color en el agua residual. Por otra parte, en el estudio realizado por Revelo (2015), se recomienda filtrar el agua con zeolita activada para remover trazas de color.

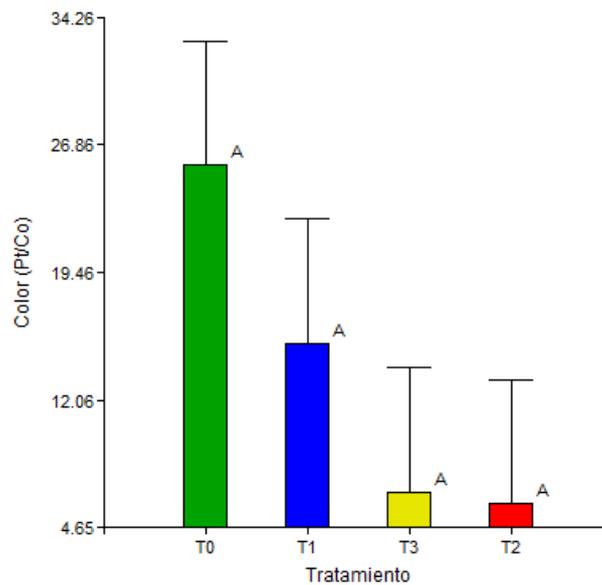


Figura 3. Categorización mediante la prueba de media de la variable de color

## 04 CONCLUSIONES

Mediante este estudio se ha demostrado que el extracto de semillas de *Moringa oleifera* tiene un alto potencial para reducir SST de aguas residuales; se obtuvo que el T1 (1mL) alcanzó una remoción de SST de 86%, el T2 (2mL) removió 89% de SST y el T3 (3mL) mostró una eficiencia de 83,33%, por lo que se determinó que el T2 es el tratamiento de mayor remoción. Asimismo, también se logra reducir el nivel de turbidez y color alcanzándose un rango de remoción de entre 6-28%, siendo menor el efecto de los tratamientos sobre estas variables debido a una baja interacción entre las partículas coloidales responsables de estos parámetros con el extracto de semillas de *Moringa oleifera*.

De acuerdo al análisis de varianza la remoción de SST, turbidez y color no presentan diferencias significativas entre tratamientos, esto sugiere que el extracto de *Moringa oleifera* es un coagulante efectivo en tratamiento de aguas residuales, mostrando resultados similares a la aplicación de sulfato de aluminio; además, dado su origen vegetal, es una alternativa ecoamigable pues no genera residuos tóxicos en el agua tratada.

## 05 REFERENCIAS

- Acevedo E.** (2019). Uso de semillas de moringa (*Moringa oleifera*) como floculante natural para la purificación de aguas crudas de río negro, río de oro y quebrada Floridablanca, Santander, Tesis de pregrado, Facultad de Ciencias Exactas Naturales y Agropecuarias, Universidad de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Arias A., Hernández J., Castro A. y Sánchez N.** (2017). "Tratamiento de aguas residuales de una central de sacrificio: uso del polvo de la semilla de la *M. oleifera* como coagulante natural". Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial 1; 29 -39, [https://doi.org/10.18684/BSAA\(Edic%C3%B3nEspecial\)29-39](https://doi.org/10.18684/BSAA(Edic%C3%B3nEspecial)29-39), ISSN 1692-3561, Colombia.

- Arias D. y Méndez E.** (2014). "Remoción de sólidos en aguas residuales de la industria harinera de pescado empleando biopolímeros". *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(3); 115-123. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n3/v5n3a8.pdf>, ISSN 2007-2422, México.
- Cabrera H., Garcés M. y Paredes P.** (2010). *Producción de Aguas Servidas, Tratamiento y Uso en el Ecuador*. Quito: UN WATER.
- García E.** (2007). Metodología de extracción in situ de coagulantes naturales para la clarificación de agua superficial. Aplicación en países en vías de desarrollo. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Ghimici L.** (2016). "Cationic polyelectrolyte induced separation of some inorganic contaminants and their mixture (zirconium silicate, kaolin, K-feldspar, zinc oxide) as well as of the paraffin oil from water", *Journal of Environmental Management* 169: 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.007>, ISSN: 0301-4797, Academic Press Inc., United States.
- Grenda K., Arnold J., Gamelas J., Cayre O. and Rasteiro M.** (2020). "Flocculation of silica nanoparticles by natural, wood-based polyelectrolytes", *Separation and Purification Technology*, 231: 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115888>, ISSN: 1383-5866, Elsevier, Netherlands.
- He L., Tan T., Gao Z. and Fan L.** (2019). "The Shock Effect of Inorganic Suspended Solids in Surface Runoff on Wastewater Treatment Plant Performance", *International Journal of Environmental Research and Public Health*: 1-12. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030453>, ISSN 1660-4601, MDPI, Italy.
- Landazuri A., Villarreal J., Núñez E., Pico M., Lagos A. and Caviedes M.** (2018). "Experimental evaluation of crushed *Moringa oleifera* Lam. seeds and powder waste during coagulation-flocculation processes". *Journal of Environmental Chemical Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.08.021>, ISSN: 2213-3437, Elsevier BV, United Kingdom.
- MAE** (2015). *Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente. Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua*. Quito. MAE.
- Montesdeoca G. y Mendoza J.** (2018). Eficiencia de la semilla de moringa (*Moringa oleifera*) en la remoción de sólidos suspendidos totales en Aguas. Manabí, ESPAM MFL Tesis de pregrado, Facultad de Medio Ambiente, Calceta, Ecuador.
- Moreno G.** (2018). Aplicación de Semilla de *Moringa Oleifera Lam* Como Alternativa Coagulante de Agua Almacenada en el Municipio de Zirándaro, Tesis de pregrado, Facultad de Planeación Urbana y Regional, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- NTE INEN 2169.** (2013). *Agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y Conservación de muestras*. Quito. INEN.
- Paredes P.** (2013). "El uso de *Moringa oleifera* como material natural para el tratamiento del agua potable en países en vía de desarrollo". *Yachana*, 2(2): 243-246, <https://doi.org/10.1234/yach.v2i2.63>, ISSN: 1390-7778, Ecuador.

- Revelo A., Proaño D. y Banchón C.** 2015. "Biocoagulación de aguas residuales de industria textilera mediante extractos de *Caesalpinia spinosa*", Enfoque UTE, 6(1): 1 -12, <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v6n1.50>, e-ISSN: 1390-6542, Ecuador.
- Tao Z., Wang Z., Lin X., Wang S., Wang H., Yoshida H., Xu A. and Song Y.** (2016). "One-year Survey of human enteroviruses from sewage and the factors affecting virus adsorption to the suspended solids". Nature, <https://doi.org/10.1038/srep31474>, ISSN: 1476-4687, United Kingdom.
- Verma A., Wei X. and Kusiak A.** (2013). "Predicting the total suspended solids in wastewater: A data-mining approach", Engineering Applications of Artificial Intelligence, 26: 1366–1372, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.08.0105>, ISSN: 0952-1976, Elsevier Ltd, United Kingdom.
- Vunain E., Masoamphambe E. F., Mpeketula P. M. G., Monjerezi M. and Etale A.** (2019). "Evaluation of coagulating efficiency and water borne pathogens reduction capacity of *Moringa oleifera* seed powder for treatment of domestic wastewater from Zomba, Malawi". Journal of Environmental Chemical Engineering, 7(3), <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103118>, ISSN: 2213-3437, Elsevier BV, United Kingdom.
- Watanabe R., Nie Y., Takahashi S., Wakahara S. and Li Y.** (2016). "Efficient performance and the microbial community changes of submerged anaerobic membrane bioreactor in treatment of sewage containing cellulose suspended solid at 25 °C", Bioresource Technology, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.049>, ISSN: 0960-8524, Elsevier, United Kingdom.
- WWAP (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos) /ONU-Agua.** (2018). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua., UNESCO París. extraído de: <http://unesdoc.unesco.org/images/0026/002614/261494s.pdf>
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas)** (2017) Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas residuales: El recurso desaprovechado, UNESCO París. extraído de: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647>

#### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

#### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Holanda Teresa Vivas Saltos** <https://orcid.org/0000-0003-3544-443X>

Elaboró y ejecutó la metodología del trabajo para determinar la dosis óptima del polielectrolito catiónico de la semilla de la moringa (*Moringa oleifera*) en la remoción de contaminantes del agua residual, a través de la aplicación del diseño experimental propuesto para el efecto. Participó en la revisión bibliográfica y redacción final de trabajo.

**José Manuel Calderón Pincay** <https://orcid.org/0000-0002-3315-997X>

Realizó la caracterización del agua residual cumpliendo los protocolos establecidos en la universidad. Así mismo, efectuó el análisis del agua residual tratada con el coagulante natural.

[Laura Gema Mendoza Cedeño](https://orcid.org/0000-0002-1153-9867) <https://orcid.org/0000-0002-1153-9867>

Colaboró en los análisis estadísticos de la investigación, mediante la aplicación del programa Statgraphics. Participó en la búsqueda de información y redacción del trabajo.

[José Gerardo Cedeño Zambrano](https://orcid.org/0000-0002-9669-3539) <https://orcid.org/0000-0002-9669-3539>

Participó en la revisión final del trabajo, estableciendo observaciones y recomendaciones previo a la presentación final del trabajo.

## Resultados del riego por surcos abiertos y cerrados, mediante la aplicación de condicionantes de manejo en caña de azúcar.

**Ricardo Pérez Hernández**

E-MAIL: auroraa@infomed.sld.cu

Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola. Ministerio de la Agricultura. La Habana, Cuba.

**Esequiel Rolando Jiménez Espinosa**

E-MAIL: esequieljimenez79@gmail.com

Hydrometeorological Service. Ministry of Agriculture. Georgetown. Guyana.

**José Luis Silveira Rivero**

E-MAIL: auroraa@infomed.sld.cu

Empresa Azucarera Urbano Noris, Holguín. Cuba

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue “evaluar tres caudales y dosis de riego, en surcos abiertos y cerrados, para determinar los mejores indicadores de calidad del desempeño del riego, en vertisoles”. Las investigaciones se realizaron en el bloque 0-68, variedad Jaronú (60-5), área neta de 49.52ha, y pendiente 0,001m/m, en la Empresa Azucarera U. Noris en Holguín. Mediante el modelo de infiltración Kostiakov – Lewis, los caudales de 3.2, 4.3 y 5 L/s se evaluaron para dosis de riego de 35, 40 y 45 mm, aplicándose las condicionantes: “satisfacción parcial y total de la dosis de riego (Zr) aguas abajo”. Tanto para surcos abiertos como cerrados, se obtuvo una reducción significativa de los tiempos de infiltración, y unido a ello, mayores valores de eficiencias en el evento de riego.

**PALABRAS CLAVES:** Investigaciones de campo, satisfacción parcial, y tiempo de infiltración reducido.

Irrigation results for open and closed furrows, by mean of two manage condition in sugar cane.

### ABSTRACT

The objective of this work was “to evaluate three flows and doses of irrigation, in open and closed furrows, to determine the best indicators of quality of irrigation performance, in vertisols”. The investigations were carried out in block 0-68, Jaronú variety (60-5), net area of 49.52ha, and slope 0.001m/m, at the U. Noris Sugar Company in Holguín. Using the Kostiakov-Lewis infiltration model, flows of 3.2, 4.3 and 5 L/s were evaluated for irrigation doses of 35, 40 and 45 mm, applying the conditions: “partial and total satisfaction of the irrigation dose (Zr ) downstream”. For both open and closed furrows, a significant reduction in infiltration times was obtained, and together with this, higher values of efficiencies in the irrigation event.

**KEYWORDS:** Field investigations, partial satisfaction, and time reduced infiltration.

## 01 INTRODUCCIÓN

Según (Martín, 1987), la caña de azúcar ha estado ligada a la economía de Cuba, y este país ha sido reconocido como una de las regiones más favorables para la producción de este cultivo, siendo el producto exportable durante muchos años. Además, la producción de azúcar en Cuba, representa un papel estratégico y básico para la economía nacional. Dicho autor, agregó que el riego y drenaje tienen un papel importante a partir de las experiencias y las condiciones cubanas, con alto potencial hidráulico en el país, así como, diferentes sistemas de regadío, unido al correcto manejo del riego y a su importancia económica.

Pereira et al. (2010), confirmaron que el riego superficial mantiene una relevante importancia en el desarrollo del regadío a escala mundial, ocupando un 80 % del total de las áreas irrigadas; además, por continuar siendo el método más apropiado para suelos llanos y pesados, manteniéndose económicamente rentable para muchos cultivos y sistemas de producción. Bautista et al. (2009), reportaron que el método de 2 puntos de aproximación, es una de las mejores técnicas para la determinación de los parámetros de infiltración, mediante datos obtenidos en evaluaciones de campo y balance de masa. Ello principalmente, por la simplicidad de datos y procedimientos matemáticos.

Por otra parte, (Guerrero et al., 2016) evaluaron 3 modelos de infiltración: Kostiakov, Kostiakov-Lewis y Philip, en surcos de 100m de longitud y espaciamientos de 0,8m en suelos arcillosos de Yara (Granma), reportando que el modelo de Kostiakov-Lewis ocupó el primer lugar conforme a los indicadores evaluados. Lo anterior, coincidió con los reportes de (Pérez et al., 2020), quienes evaluaron 5 modelos diferentes de infiltración para cada uno de los caudales utilizados, asociados a distintas longitudes de surcos y condicionantes de manejo para el tiempo de infiltración durante la fase de mojado.

El objetivo de la investigación es evaluar tres caudales y dosis de riego, en surcos abiertos y cerrados con longitudes de 350m, seleccionando los mejores a partir de la determinación de los indicadores de calidad del desempeño del riego (eficiencias), en suelos oscuros plásticos (vertisoles).

En el presente artículo, se abordan de forma comparativa estos resultados, aplicándose las condicionantes de manejo para el recurso agua; así como las respectivas comparaciones de los tiempos de infiltración reducidos, con los tiempos de infiltración normal (100%). Incluyéndose, las magnitudes de las eficiencias de riego asociadas a cada uno de los caudales evaluados y sus respectivas dosis de riego (Zr).

## 02 MATERIALES Y METODOS: DATOS GENERALES

Los datos se tomaron a partir de los trabajos de evaluaciones de campo realizadas en el bloque cañero de riego y drenaje parcelario (0 - 68), cepa caña planta, variedad Jaronú (60 - 5), área neta 49,52 ha y pendiente de 0,001 m/m, correspondiente a la empresa azucarera "Urbano Noris", Holguín. En cada evaluación se regaron tres surcos simultáneamente, realizándose todas las mediciones en el surco central previamente estaquillado cada 20m. La toma de agua para el regadío fue desde un canal secundario, construido perpendicularmente a la dirección de los surcos (figura 1 y 2), utilizándose sifones semiflexibles de PVC y dos aforadores hidrométricos portátiles tipo Parshall (previamente calibrados), según: (Pérez, 2000) y (Pérez y Meneses, 2004).



Figura 1. Ceba de sifones



Figura 2. Canal secundario

En la tabla 1, se muestra el comportamiento de la humedad inicial media acumulada desde la superficie del suelo hasta el perfil de (0,4 – 0,5) m, antes del inicio del riego.

Tabla1. Humedades en el perfil del suelo

Distancia (m)	Cabecera: 0	80	160	240	350
Humedad (% p.s.s.)	59,1	58,6	58,4	58,1	55,7
H. media acumulada (% p.s.s.)	<b>58</b>				

## RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE LA INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO.

Método empleado, plazoleta de inundación: a) velocidad de infiltración instantánea (cm/h), b) media (mm/min), y c) lámina de infiltración media (mm).

$$a) I = 24,4 * t^{-0,7} \quad b) I_m = 13,55 * t^{-0,7} \quad c) hm = 13,55 * t^{0,3}$$

La fuente de abasto de agua fue la estación de bombeo “Veinte Rosas” ubicada en el río Cauto, con un caudal real de 3,7m<sup>3</sup>/s y carga 30m. La conducción del agua hacia las áreas bajo riego se llevó a cabo mediante una red de canales, abasteciendo parte de las áreas cañeras de la empresa azucarera “Urbano Noris”, así como también a las empresas azucareras, “Cristino Naranja” y “Antonio Maceo”. El suelo de la región se caracteriza por: alta fertilidad y alto contenido de arcilla montmorillonita, asociado a problemas de drenaje debido a su baja velocidad de infiltración de 1,23 cm/h, utilizándose una plazoleta de inundación (muestreos de humedad) y el método de aforo de entrada y salida, mediante los dispositivos hidrométricos anteriormente referidos.

Por otra parte, en ausencia prolongada de lluvias o riego, estos suelos llanos presentan en la superficie agrietamientos significativos y una coloración grisácea, la cual tiende a ser más oscura con el aumento de la profundidad. Al humedecerse, se hacen más negruzcos aumentando su plasticidad debido al tipo de arcilla, coincidiendo con los reportes de (Humbert, 1979). Sobre la base de los argumentos anteriores, los surcos de riego se construyeron con distanciamiento de 1,6m, acorde a los propósitos siguientes: a) un humedecimiento uniforme sin desbordamiento de agua, b) un perímetro mojado cuyos conos de humedad se solapen entre surcos contiguos. Respecto al perímetro mojado, (Walker and Kasilingan, 2004), afirmaron que la rugosidad relativa de los surcos puede ser observada aguas abajo, donde pueden existir secciones con diferentes dimensiones, afirmando que existen evidencias de que también varían la rugosidad y el perímetro húmedo.

Los caudales seleccionados fueron: (3,2, 4,3 y 5,0) L/s, para una longitud de surcos de 350m, evaluándose cada uno para dosis de riego de: (35, 40 y 45) mm, según la tabla 2. Se destaca la

utilización de las variantes de riego por surcos (abiertos y cerrados), así como la condicionante correspondiente de manejo del agua.

Tabla 2. Datos de evaluaciones de campo

AREA DEL BLOQUE	BLOQUE # 0 – 68 (An = 49,52) ha		
	$Q_o = 3,2$ L/s	$Q_o = 4,3$ L/s	$Q_o = 5$ L/s
$Q_{mne}$ y $Q_{min}$ (L/s)	6,73 - 1,38	7,02 - 1,47	7,3 - 1,52
$S_o$ (m/m)	0,001	0,001	0,001
$Esp$ (m)	1,6	1,6	1,6
$L_s$ (m)	350	350	350
$K$ (m <sup>3</sup> /m/min)	0,0045	0,0069	0,00725
$\alpha$	0,5	0,48	0,52
$f_o$ (m <sup>3</sup> /m/min)	0,000127	0,00015	0,00013
$Zreq.$ (mm)	35 40 45	35 40 45	35 40 45
$Tav$ (min)	102	100	97

$Q_o$ : Caudal,  $S_o$ : pendiente,  $Esp$ : espaciamiento,  $L_s$ : longitud del surco,  $K$  y  $\alpha$ : coeficientes de Kostiakov,  $f_o$ : velocidad de infiltración estabilizada,  $Zreq.$ : dosis de riego,  $Tav$ : tiempo de avance del agua,  $Q_{mne}$ : caudal máximo no erosionable,  $Q_{min}$ : caudal mínimo admisible.

Condicionante: satisfacción parcial de la dosis de riego ( $Z_r$ ) en el extremo de los surcos (aguas abajo), mediante la reducción del tiempo de infiltración, de forma similar a los reportes de (Pérez et al., 2020).

En resumen, el tiempo de la fase de mojado ( $T_m$ ) acorde al tipo de riego (surcos abiertos y cerrados) = (40 y 30) % respectivamente, del tiempo de infiltración de la lámina de agua requerida ( $Z_r$ ).

Por otra parte, las magnitudes de las láminas de agua infiltradas ( $Z_i$ ) en el perfil del suelo se determinaron en los puntos: cabecera,  $\frac{1}{4} L$ ,  $\frac{1}{2} L$ ,  $\frac{3}{4} L$ , y  $L$  (extremo inferior o cola del surco aguas abajo). Ello en función de los respectivos tiempos de oportunidad del agua en los puntos referidos del surco central, lo cual propició:

La correcta representación de los tipos de comportamiento de las láminas de agua infiltradas, de forma gráfica por caudal evaluado [Laminas infiltradas vs tiempo de oportunidad].

La determinación de las magnitudes de los indicadores de calidad y desempeño del riego (eficiencias) para cada caudal evaluado.

## NORMATIVAS VIGENTES

El modelo de infiltración utilizado fue: Kostiakov-Lewis, acorde a la Norma Ramal del Ministerio de la Agricultura, (NRAG, 2016). El proceso de cálculo para el diseño y evaluación de cada caudal, se realizó mediante: programaciones en Excel, DIERIS: “Diseño y Evaluación del Riego por Surcos (abiertos y cerrados)” el cual contiene las condicionantes de manejo del agua antes señaladas; el software SIRMUD II, reconocido por el Comité de Riego Drenaje y Medioambiente, como estándar para los trabajos de evaluación, diseño y operación, de las técnicas de riego citadas.

Consecuentemente, las determinaciones de las magnitudes de los caudales (L/s):  $Q_{mne}$  (máximo no erosionable) y  $Q$  (mínimo), confirmaron la adecuada selección de los caudales ( $Q_o$ ) utilizados. En

todos los casos, se corroboraron in situ las magnitudes de la velocidad del agua próxima a la cabecera del surco, cuyos resultados fueron inferiores a la velocidad máxima admisible.

## ECUACION DE KOSTIAKOV – LEWIS. DATOS DE CAMPO Y EFICIENCIAS

$$\text{Ecuación: } Z_i = [(K * t^a) + (f_0 * t)] \quad (1)$$

Donde,  $Z_i$ : lámina infiltrada ( $m^3/m$ ), siendo  $K$ : coeficiente de Kostiakov ( $m^3/m/min$ ) y  $t$ : tiempo de oportunidad (min),  $a$ : exponente de Kostiakov,  $f_0$ : velocidad de infiltración estabilizada ( $m^3/m/min$ ). Dichos coeficientes se obtuvieron mediante el método de balance del volumen de agua con dos puntos de aproximación en evaluaciones de campo.

En la tabla 3, se precisan los cálculos para la determinación de las eficiencias del evento de riego.

Tabla 3. Procedimientos de cálculo de las Eficiencias de Riego

EFICIENCIAS DEL RIEGO POR SURCOS
<b>Eficiencia de Almacenamiento (%)</b>
$E_{alm} = [\text{Volumen almacenado} / \text{Volumen necesario}] * 100$
<b>Eficiencia de Aplicación (%)</b>
$E_{ap} = [\text{Volumen almacenado} / \text{Volumen aplicado}] * 100$
<b>Eficiencia de Distribución (%)</b>
$E_d = [\text{Lamina } (Z_i) \text{ en } (3/4L) / \text{Lamina Media } (Z_m)] * 100$
<b>Uniformidad Absoluta de Distribución (%)</b>
$UAD = [\text{Lam. Infiltr. en la Cola } (Z_c) / \text{Lamina Media } (Z_m)] * 100$

## 03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### TIEMPOS DE AVANCE, LAMINAS DE AGUA INFILTRADAS, ESTADIGRAFOS Y EFICIENCIAS

La figura 3, brinda información relevante acerca de los comportamientos de las curvas de avance para cada uno de los caudales evaluados y tiempos respectivos, en diferentes puntos de la longitud de los surcos. Los tiempos de avance mayores para las estaciones ubicadas a lo largo de los surcos se correspondieron con el caudal de 3,2L/s con 102min, seguido del caudal de 4,3L/s con 100min; mientras que el caudal de 5L/s alcanzó el total de la longitud de los surcos (350m), en un tiempo de 97min.

En la tabla 4, se presentan las ecuaciones de los tiempos de avance (min) para dichos caudales, siendo  $L$  = longitud del surco (m). Para la ecuación tipo potencial:  $T = a * L^b$  los coeficientes adimensionales  $a$  y  $b$  dependen del caudal aplicado, la pendiente y rugosidad de los surcos, así como de las características físicas del suelo, humedad y velocidad media de absorción del agua. Las ecuaciones de referencia presentaron una tendencia óptima, con adecuados estadígrafos  $R^2 = (1 - 0,99)$ .

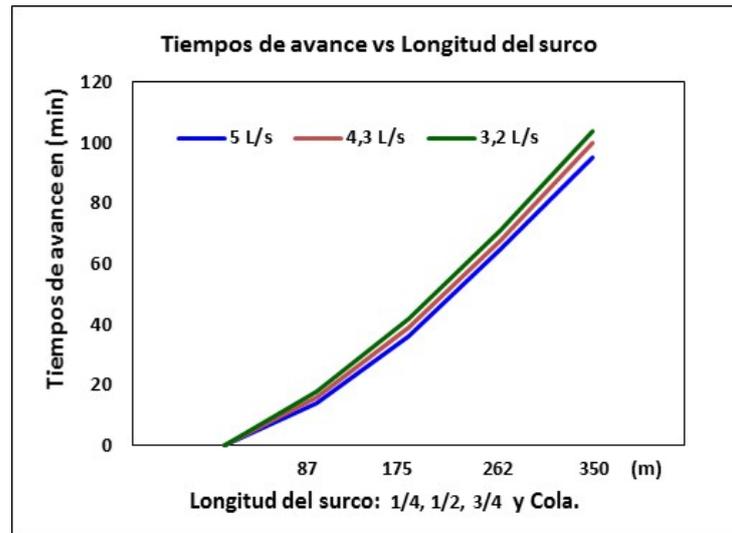


Figura 3. Curvas de avance para los 3 caudales evaluados

Los resultados de los tiempos de avance calculados para cada caudal mediante las ecuaciones de referencia, tienen una fuerte correlación con los tiempos tomados en el campo en 20 estaciones (estacas) equidistantes a lo largo de los surcos.

Tabla 4. Ecuaciones de tiempos de avance y resultados estadísticos.

Qo (L/s)	Ecuaciones de avance (min)	R <sup>2</sup>
3,2	$T = 0,0390 * L^{1,344}$	1,0
4,3	$T = 0,0380 * L^{1,343}$	1,0
5,0	$T = 0,0378 * L^{1,34}$	0,99

Por su parte, en las tablas (5, 6 y 7), se muestran los respectivos comportamientos de los tiempos de oportunidad para los caudales evaluados y dosis de riego requeridas. Los mayores valores de los tiempos de oportunidad se presentaron en la cabecera,  $\frac{1}{4}$  L y  $\frac{1}{2}$  L, reduciéndose estos a partir de  $\frac{3}{4}$  L, con valores menores en el extremo aguas abajo (cola de los surcos). Además, se comprobó la influencia del tamaño y agrietamiento de los poros del suelo durante el proceso de infiltración del agua, debido al caudal aplicado, en correspondencia con (Bautista and Schlegel, 2017), (Kanya, 2007) y (Pérez et al., 2000).

Las figuras (4, 5 y 6) muestran el comportamiento de las láminas de agua infiltradas mediante la ecuación de Kostiaikov-Lewis, en función de los tiempos de oportunidad para las dosis de riego referidas por caudal evaluado, tablas (5, 6 y 7). Se destaca también, el aumento de las magnitudes de las láminas de agua infiltradas con el incremento de las dosis de riego.

Para la región, cultivo y suelos referidos, se requiere de un manejo eficiente del recurso hídrico dadas las condiciones de campo (topografía, infiltración y agrietamiento) de los suelos durante el periodo poco lluvioso, coincidiendo con (Strelkoff et al., 2009).

Por tanto, la selección de los caudales más aptos no tiene que estar asociada solamente a un adecuado tiempo de avance del agua, sino también, a la correcta minimización del tiempo de mojado (infiltración) aguas abajo; lo cual se asocia a tiempos de aplicación y oportunidad más satisfactorios, coincidiendo con (Pérez y Meneses, 2004), (Guerrero et al., 2016) y (Pérez et al., 2020).

Tabla 5. Tiempos de oportunidad (min),  $Q_o = 3,2 \text{ L/s}$

Dosis de riego	Cabecera	¼ Ls	½ Ls	¾ Ls	Cola
Zr = 35mm	164	150	126	96	64
Zr = 40mm	185	169	145	115	83
Zr = 45mm	206	191	166	137	104

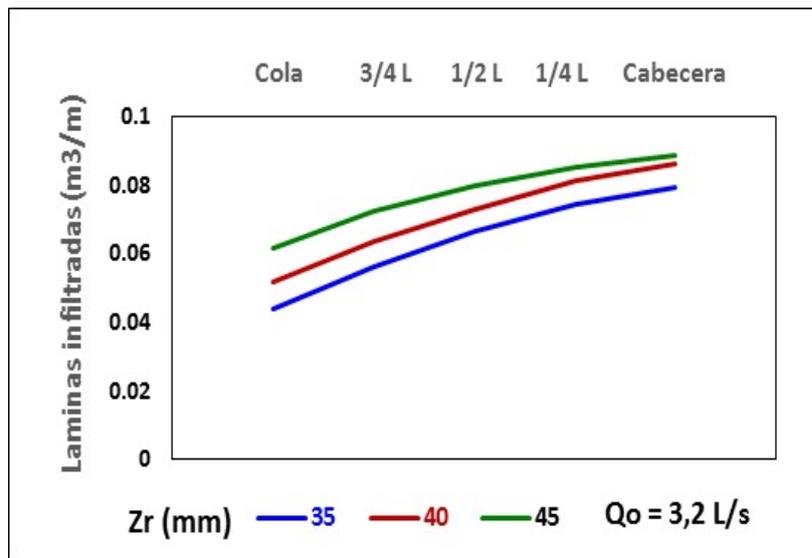


Figura 4. Láminas infiltradas en función de los tiempos de oportunidad

Tabla 6. Tiempos de oportunidad (min),  $Q_o = 4,3 \text{ L/s}$

Dosis de riego	Cabecera	¼ Ls	½ Ls	¾ Ls	Cola
Zr = 35mm	134	118	94	66	34
Zr = 40mm	144	128	104	76	44
Zr = 45mm	155	140	116	87	55

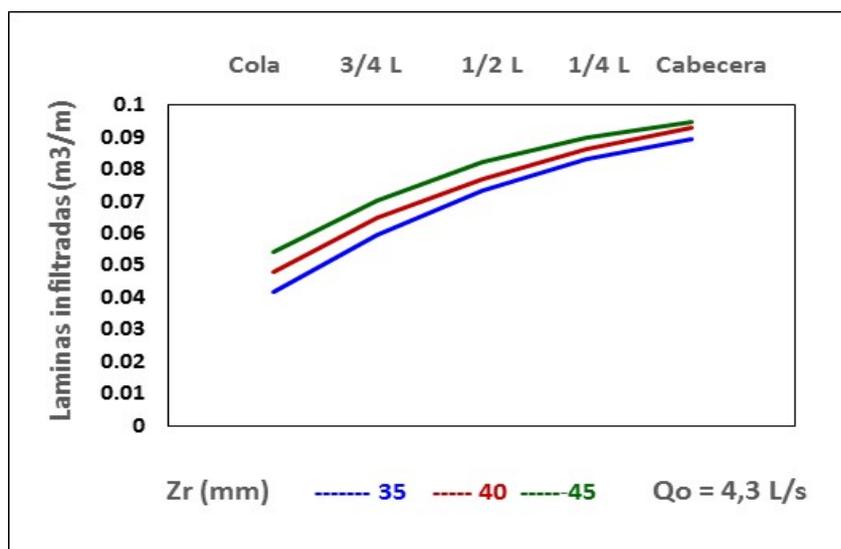


Figura 5. Láminas infiltradas en función de los tiempos de oportunidad

Tabla 7. Tiempos de oportunidad (min),  $Q_o = 5,0$  L/s

Dosis de riego	Cabecera	¼ Ls	½ Ls	¾ Ls	Cola
Zr = 35mm	119	104	81	54	23
Zr = 40mm	125	110	87	60	29
Zr = 45mm	132	117	94	66	35

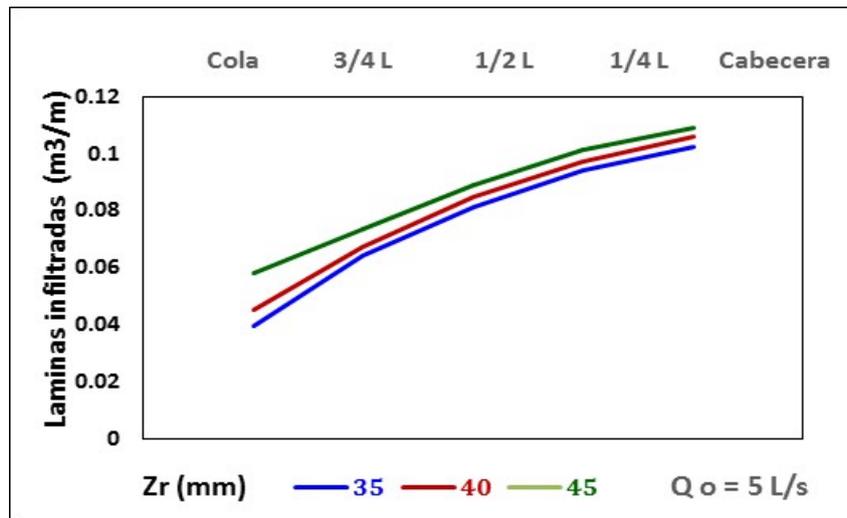


Figura 6. Láminas infiltradas en función de los tiempos de oportunidad

En la tabla 8, se muestran los estadígrafos del evento de infiltración del agua en dependencia del caudal y dosis de riego. Para los caudales (3,2 y 4,3) L/s y Zr (35, 40 y 45) mm, se obtuvieron ecuaciones de tipo potencial con altos valores de coeficientes de determinación ( $R^2$ ), los cuales fluctuaron entre (0,9957 y 0,9986), asociado el valor menor a:  $Q_o = 4,3$  L/s y  $Zr = 45$  mm, mientras que el valor mayor para dicho caudal se correspondió con  $Zr = 40$  mm.

Para el caudal  $Q_o = 3,2$  L/s, las fluctuaciones de  $R^2$  fueron (0,9976 y 0,9986), asociado el valor menor a  $Zr = 35$  mm y el mayor a  $Zr = 45$  mm. Por último, para  $Q_o = 5$  L/s, las ecuaciones fueron de tipo polinómica con elevados valores de coeficiente de determinación (0,9985 y 0,9998), asociándose el valor menor a  $Zr = 45$  mm y el mayor a las dosis de riego  $Zr$  (35 y 40) mm, respectivamente. Ello guarda relación, con los reportes de (Pérez et al. ,2020).

Tabla 8. Ecuaciones de ajuste de infiltración por caudal y dosis de riego

$Q_o$ (L/s)	Zr (mm)	Lineas de tendencia de mejor ajuste	$R^2$
3,2	35	$Y = 0,0439 * X^{0,3745}$	0,9976
	40	$Y = 0,0515 * X^{0,3225}$	0,9985
	45	$Y = 0,0617 * X^{0,2304}$	0,9986
4,3	35	$Y = 0,423 * X^{0,4814}$	0,9965
	40	$Y = 0,485 * X^{0,4141}$	0,9986
	45	$Y = 0,0548 * X^{0,3512}$	0,9957
5,0	35	$Y = - 0,0027 * X^2 + 0,0319 * X + 0,0106$	0,9998
	40	$Y = - 0,0023 * X^2 + 0,0291 * X + 0,0185$	0,9998
	45	$Y = - 0,0013 * X^2 + 0,021 * X + 0,0378$	0,9985

En las tablas 9 y 10, se presentan los resultados de las eficiencias y pérdidas totales en (% y m<sup>3</sup>) por caudal evaluado, dosis de riego (Zr), y condicionantes establecidas para el tiempo de infiltración en surcos abiertos y cerrados. Además, se presentan las pérdidas de agua respecto al riego con tiempo de infiltración total (100%) en la cola de los surcos, facilitándose las comparaciones correspondientes.

Tabla 9. Eficiencias, pérdidas totales por caudal y dosis de riego (Zr) en surcos abiertos. Condicionante: T.inf. (reducido) = (0,4 x T.inf. de Zr) y comparación con Tinf. normal (100% de Zr).

Dosis de Riego (mm)	Zr = 35mm			Zr = 40mm			Zr = 45mm		
Q(L/s) / Efic. (%)	3,2	4,3	5,0	3,2	4,3	5,0	3,2	4,3	5,0
Efic. almacenamiento	96	98	94	95	96	94	96	94	94,3
Efic. aplicación	60,1	58	53	60,6	61,5	57	61,3	64	61,5
Efic. distribución	78	73,1	68	81,3	76	70,5	83,7	79	73
Unif.Abs.Distribución	68,6	60	52	73	65	56	77	69	60
<b>T.inf. reducido (min)</b>	62	31	20	81	41	26	102	53	33
Pérdidas Totales (%)	40,5	42	47,6	39,4	38,5	43	38,7	36	39,2
Pérdidas	13	14	18	14	14	16	15	14	15,3
Comparacion Efic. (%)	para: T.inf. (100%) de Zr								
Efic. almacenamiento	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Efic. aplicación	42,6	40,8	43,1	41,5	40,3	45,1	40,1	39,2	46,3
Efic. distribución	87,5	85	76,6	89,7	87,4	79,4	91,3	89,3	82
Unif.Abs.Distribución	82,2	78,4	65,7	86,3	82	70	87,7	85	73,6
<b>T.inf. Total (min)</b>	155	78	45	202	104	58	256	132	73
Perdidas Totales (%)	57,4	59,2	57	58,5	59,7	55	60	61	53,7

Por otra parte, en la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos con la variante de riego por surcos cerrados, incluyendo las eficiencias de riego y los tiempos de: aplicación (corte del agua), infiltración en la cola de los surcos y oportunidad en el inicio de estos.

Tabla 10. Eficiencias y láminas infiltradas por caudal y dosis de riego (Zr) en surcos cerrados. Condicionante: T.inf. (reducido aguas abajo) = (0,3 x T.inf. de Zr).

Lam.Infiltradas (mm)	Zr = 35mm			Zr = 40mm			Zr = 45mm		
Q(L/s) / Efic. (%)	3,2	4,3	5,0	3,2	4,3	5,0	3,2	4,3	5,0
Efic. almacenamiento	98,5	99,3	100	97,4	98,3	99,7	97,2	97,5	98,4
Efic. aplicación	69	61,6	58,2	71,5	66,4	64	73,2	70	69,6
Unif.Abs.Distribución	76,3	73	69,6	78,6	75	71,1	81	77	72,6
T. de corte (min)	148	123	112	163	131	117	179	139	122
T.oport. cabecera (min)	153	128	117	167	135	121	183	144	126
<b>T. Infiltr. cola (min)</b>	46	23	15	61	31	17	77	40	25
L1(m), inicio charca	181	172	167	173	166	163	165	160	159
Z1(m <sup>3</sup> /m), Lam hasta L1	0,0723	0,0831	0,0960	0,0769	0,0863	0,0990	0,0820	0,0898	0,1018
Zo(m <sup>3</sup> /m), Lam. cabecera	0,0756	0,0869	0,1006	0,0800	0,0899	0,1035	0,0848	0,0932	0,1060
Zc (m <sup>3</sup> /m), Lam inf. cola	0,0504	0,0546	0,0594	0,0557	0,0586	0,0629	0,0615	0,0630	0,0664

A lo anterior se agrega, la distancia a la cual se inicia la formación del agua acumulada en los surcos (L1) y las láminas de agua infiltradas (Z<sub>1</sub>, Z<sub>0</sub> y Z<sub>c</sub>), expresadas en (m<sup>3</sup>/m) en distintos puntos del surco central.

Los resultados obtenidos se pueden calificar de relevantes, para la técnica de riego por surcos.

Mediante la aplicación de  $Q_o = 4,3\text{L/s}$ , para  $Z_r = 40\text{mm}$  y tiempo de infiltración reducido 53min, se obtuvo el siguiente comportamiento para las eficiencias que caracterizan la calidad del evento de riego:

$$E_{alm} = 96\%, E_{ap} = 64\%, E_d = 79\% \text{ y } UAD = 69\%$$

Evaluando el mismo caudal y dosis de riego,  $Q = 4,3\text{L/s}$  y  $Z_r = 40\text{mm}$  para el tiempo de infiltración (100% de  $Z_r$ ) = 104min, se observa un ligero aumento (4%), para la eficiencia de almacenamiento ( $E_{alm}$ ) respecto al tiempo de infiltración referido. Además, resultó muy significativo el incremento de 21,2% para la eficiencia de aplicación, asociada al tiempo de infiltración reducido de 41min; así como relevante también, fue la gran diferencia entre los tiempos de infiltración (41 y 104) min, a favor de la variante de riego con tiempo de mojado reducido en la cola de los surcos. Por último, las pérdidas de agua alcanzaron 38,5% para el riego en surcos abiertos mediante la condicionante establecida, y de 59,7% para el tiempo de infiltración = 100% de  $Z_r$ . Para dicho caudal y dosis de riego, con tiempo de infiltración = 104min, las eficiencias de riego fueron:

$$E_{alm} = 100\%, E_{ap} = 40,3\%, E_d = 87,4\% \text{ y } UAD = 82\%$$

Los altos valores correspondientes a las dos últimas eficiencias, se asocian al excesivo tiempo de infiltración en el extremo inferior de los surcos. Lo cual se refleja en las pérdidas del recurso agua (59,7%).

Los resultados más apropiados para la técnica de riego por surcos cerrados, se asociaron al caudal  $Q = 4,3\text{L/s}$  y  $Z_r = 40\text{mm}$ , con  $T_{inf.}$  reducido = 31min. Las eficiencias de riego fueron:

$$E_{alm} = 98,3\%, E_{ap} = 66,4\% \text{ y } UAD = 75\%$$

Ello unido a una adecuada minimización de las pérdidas de agua, destacándose para cada caudal y dosis ( $Z_r$ ), las distancias del humedecimiento desde la cabecera de los surcos hasta el punto de inicio de la charca  $L_1(\text{m})$ , la lámina  $Z_l (\text{m}^3/\text{m})$  correspondiente, y las respectivas láminas en la cabecera del surco  $Z_o$  y en la cola (aguas abajo)  $Z_c$ . Resultados muy satisfactorios en general, destacándose la magnitud de la eficiencia de aplicación, la cual supera a los obtenidos con la técnica de riego anterior.

## 04 CONCLUSIONES

Resultó relevante, la efectividad del modelo Kostiaikov-Lewis para la predicción de las láminas de agua infiltradas en función de los tiempos de oportunidad. También resultaron favorecidas las eficiencias del evento de riego, siendo muy satisfactorias para tiempos de infiltración reducidos respecto al tradicional, tanto en surcos abiertos como cerrados.

Entre los beneficios asociados con las condicionantes de manejo, se destacan: reducción de los tiempos de oportunidad en la longitud de los surcos y de las magnitudes de las láminas de agua infiltradas durante el riego, destacándose también los valores de eficiencias de almacenamiento y aplicación. Surcos abiertos: Para  $Z_r = 45\text{mm}$  y caudales (4,3 y 5) L/s,  $E_{ap} = (64 \text{ y } 61,5) \%$  respectivamente, con tiempos de infiltración reducidos de (53 y 33) min. Las pérdidas de agua, fueron del (36 y 39,2) % para los caudales citados. Para el tiempo de infiltración 100% de  $Z_r$ , las pérdidas totales para dichos caudales fueron: (61 y 53,7) %.

Para surcos cerrados, los mejores resultados se asociaron a los caudales: (4,3 y 5) L/s para  $Z_r = 45\text{mm}$ , con  $T_{inf.}$  reducido = (40 – 25) min, respectivamente. Los resultados obtenidos para las

eficiencias de almacenamiento y aplicación fueron:  $E_{alm} = 97,5\%$  y  $E_{ap} = 69,6\%$ . Resumiendo, los mejores comportamientos correspondieron a la técnica de riego mediante surcos cerrados.

## 05 REFERENCIAS

**Bautista E., Clemmens A. J. and Strelkoff T. S.** (2009). Structured application of the two point method for infiltration parameter estimation in surface irrigation. *Journal Irrigation Drain. Engineers.* ASCE 135 (5), 566–578, USA.

**Bautista E. and Schlegel J. L.** (2017). A flexible system for estimation of infiltration and hydraulic resistance parameters in surface irrigation. *Trans. ASABE*, 60 (4), 1223 – 1234. 2017. American Society of Agricultural and Biological Engineers. ISSN 2151 – 0032, <https://doi.org/10.13031/trans.12117>, USA.

**Guerrero A. M., Tornos N., Brown O. y Gómez Y.** (2016). Evaluación de tres modelos en la estimación de la infiltración acumulada”. *Revista Ingeniería Agrícola*”, ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761, Vol. 6, No. 3, pp. 41-47, 2016, Cuba.

**Kanya L.** (2007). Toward real – time control of surface irrigation. PhD thesis. Univ. of Southern Queensland (USQ), Australia. Extraído de: <http://eprints.usq.edu.au/4109/> en: enero 2016 y 2019.

**Martín J.R.** (1987). La caña de azúcar en Cuba. Editorial Científico Técnica: La Habana, Cuba.

**Pérez R., Jiménez E., y Silveira J. L.** (2020). Evaluación de modelos de infiltración en riego por surcos, suelos oscuros plásticos. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, VOL. XLI, No. 1, Ene - Abr 2020, p. 43-55, ISSN 1815–591X, RNPS 2066, Cuba.

**Pérez R.** (2005). Riego Superficial, capítulo 4. *Manual Básico de Riego y Drenaje*. Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, ISSN: 959 – 249 – 176 – 7, pp. 39 – 46. La Habana, Cuba.

**Pérez R. y Meneses J.** (2004). Impactos de la evaluación del riego por surcos en el cultivo de la caña de azúcar. *Novena Convención Internacional y Feria de las Industrias Metalúrgicas, Mecanización y del Reciclaje*. METÁNICA, Palacio de Convenciones de La Habana, ISSN 1607- 6281, La Habana, Cuba.

**Pérez R.** (2000). Eficiencia del riego por surcos. *CubaAzúcar*, Vol. XXIX, No 3, Julio – Septiembre del 2000, ISSN 0590 – 2916, pp. 60 – 63, Cuba.

**Pereira S. L., De Juan V. J., Picornell M. R. y Tarjuelo J. M.** (2010). El riego y sus tecnologías. Editado por: Centro Regional de Estudios del agua – Universidad de Castilla de la Mancha, ISBN: 13: 978-84-692-9979-1, Albacete, España.

**Strelkoff T. S., Clemmens A. J. and Bautista E.** (2009). Field properties in Surface Irrigation Management and Design. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 135(5), October 1, 2009, ASCE, ISSN 0733 – 9437/2009 / 5 – 525 – 5261. USA.

**Walker W. R. and Kasilingan B.** (2004). Another look at wetted perimeter along irrigated furrows – modeling implications. *World water and Enviromental Resources Congress (EWRI / ASCE)*, Reston, USA.

### CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

**Ricardo Pérez Hernández** <https://orcid.org/0000-0002-6240-0902>

Conducción de la investigación, procesamiento y análisis de datos. Redacción del manuscrito.

**Esequiel Rolando Jiménez Espinosa** <https://orcid.org/0000-0003-0182-8099>

Procesamiento y análisis de los datos, búsqueda bibliográfica. Redacción del manuscrito.

**José Luis Silveira Rivero**

Participación en las evaluaciones de campo que sustentan los resultados obtenidos.